Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В 2-х книгах

Книга 1

ТЕХНОСФЕРА

МИР
электроники

А.И. Белоус, В.А. Солодуха,
С.В. Шведов

Космическая электроника

В 2–х книгах
Книга 1

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2021

УДК 621.38
ББК 32.85
Б43

Б43 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В.
Космическая электроника
В 2-х книгах
Книга 1
Москва: Техносфера, 2021 – 696 с. ISBN 978-5-94836-398-1

Книга посвящена анализу современного состояния, проблем и перспектив развития микроэлектронной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), космических аппаратов и систем двойного и военного применения. Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ), до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Издание адресовано инженерам-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, а также преподавателям, студентам, аспирантам, специализирующимся в области микроэлектроники и ее приложений.

УДК 621.38
ББК 32.85

© Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. 2021
© ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление. 2021
ISBN 978-5-94836-398-1

Содержание

Предисловие 10

Введение 13

Перечень условных обозначений 30

Глава 1. Современные космические аппараты 32
1.1. Основные направления развития космической промышленности 32
1.2. Классификация современных космических аппаратов 39
1.3. Конструкции и устройство космических аппаратов 42
1.4. Бортовые системы космических аппаратов 50
1.4.1. Классификация бортовых систем космических аппаратов 50
1.4.2. Особенности проектирования бортовых информационно-управляющих систем с использованием микросхем программируемой логики 57
1.5. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли 61
1.5.1. Космические аппараты ДЗЗ Российской Федерации и Республики Беларусь 62
1.5.2. Космические аппараты ДЗЗ Украины 77
1.5.3. Космические аппараты ДЗЗ США 77
1.5.4. Космические аппараты ДЗЗ Франции 79
1.5.5. Космические аппараты ДЗЗ Японии 80
1.5.6. Космические аппараты ДЗЗ Индии 81
1.5.7. Космические аппараты ДЗЗ Китая 82
1.5.8. Космические аппараты ДЗЗ европейского космического агентства 83
1.5.9. Космические аппараты ДЗЗ других стран 86
1.6. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли 88
1.7. Воздействие космической радиации на КА 100
1.8. Микрометеоритное воздействие на КА 102
1.9. Проблема космического мусора на орбите Земли 104
1.10. Применение микроэлектронных технологий для создания миниатюрных реактивных двигателей космического назначения 107
1.10.1. Проблемы микроминиатюризации космических аппаратов 107
1.10.2. Миниатюрные реактивные двигатели горизонтальной конструкции 111
1.10.3. Миниатюрные реактивные двигатели вертикальной конструкции 116
1.11. Космические аппараты военного и специального назначения 120
1.11.1. Система предупреждения о ракетном нападении 120
1.11.2. Наземный эшелон СПРН 123
1.11.3. Фазированные антенные решетки 126
1.11.4. Космический эшелон СПРН 130
1.11.5. Военно-разведывательные спутники 136
Литература к главе 1 147

Глава 2. Отказы и аварии ракетоносителей и космических аппаратов 150
2.1. Проблемы безопасности ракетно-космической техники 150
2.2. Анализ причин отказов ракет-носителей 156
2.3. Анализ отказов космических аппаратов 159
2.4. Анализ причин отказов изделий ракетно-космической техники 163
2.5. Анализ тенденций изменения рисков аварий ракет-носителей за период с 2000 по 2009 г. 166
2.6. Анализ тенденций изменения рисков отказов КА за период с 2000 по 2009 г. 172
2.7. Анализ причин аварий РН и КА за период с 2000 по 2009 г. 175
2.8. Анализ отказов компьютерных систем и программных средств 177
2.9. Анализ отказов бортовых систем на международной космической станции в 2000-е гг. 179
2.10. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования 180
Литература к главе 2 188

Глава 3. Микроэлектронная элементная база ракетно-космической техники 191
3.1. Классификация современных микропроцессоров 191
3.2. Процессоры для электронных систем управления иностранными космическими аппаратами 195
3.2.1. Бортовые процессоры иностранных космических аппаратов 195
3.2.2. Фирма Aitech Defense Systems 200
3.2.3. BAE Systems 202
3.2.4. Honeywell 203
3.2.5. Микропроцессоры с архитектурой SPARC 203
3.2.6. Микропроцессоры компании Atmel 204
3.2.7. Aeroflex 205
3.3. Отечественные микропроцессоры и микроконтроллеры 206
3.3.1. ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград) 207
3.3.2. ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград) 208
3.3.3. НИИСИ РАН (г. Москва) 212
3.3.4. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород) 213
3.3.5. ЗАО «Светлана-Полупроводники» (г. Санкт-Петербург) 214
3.3.6. ОАО «НИИЭТ» (г. Воронеж) 215
3.3.7. ЗАО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) 218
3.3.8. ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (г. Зеленоград) 220
3.3.9. ЗАО НТЦ «Модуль» (г. Москва) 223
3.3.10. ЗАО «МЦСТ» (г. Москва) 225
3.3.11. ОАО «НИИМА «Прогресс» (г. Москва) 228
3.3.12. ООО «Дизайн-центр КМ211» (г. Зеленоград) 229
3.3.13. ООО «НПП «Цифровые решения» (г. Москва) 231
3.3.14. ОАО «Мультиклет» (г. Екатеринбург) 232
3.3.15. НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог) 233
3.3.16. НПК «Технологический центр» и ОАО «Завод-ПРОТОН-МИЭТ» (г. Зеленоград) 234

3.3.17. ЧП «НТЛаб-системы» (г. Минск) 234
3.3.18. Научно-технический центр «ДЭЛС» (г. Минск) 235
3.4. Инструментальные средства разработки и отладки для МП и МК 235
3.5. Тенденции развития современных микроконтроллеров 239
3.5.1. Переход потребителей на 32-битные микроконтроллеры 239
3.5.2. Лицензионные архитектуры MIPS32 и Cortex-M 241
3.5.3. Особенности проектирования и организации производства микросхем для космического применения 242
3.6. Особенности использования фаблесс-модели при проектировании микроэлектронных изделий для космических применений 244
3.6.1. Предпосылки возникновения и развития фаблесс-модели бизнеса 244
3.6.2. Структура и особенности фаблесс-бизнеса 245
3.6.3. Особенности выбора заказчика по фаблесс-проекту 247
3.6.4. Технические предпосылки и условия реализации типового фаблесс-проекта. Программное обеспечение и библиотеки проектирования 248
3.6.5. Выбор технологического процесса изготовления изделия 249
3.6.6. Необходимость наличия собственной аналитической базы 249
3.6.7. Изготовление опытных образцов 250
3.6.8. Финансовая парадигма фаблесс-проекта 251
3.6.9. Общие рекомендации по организации работы в режиме фаблесс 252
3.7. Особенности выбора иностранной ЭКБ для проектирования отечественных КА 253
3.7.1. Основные предпосылки необходимости использования иностранной ЭКБ 253
3.7.2. Особенности этапа выбора номенклатуры ЭКБ иностранного производства 255
3.7.3. Особенности проведения сертификационных испытаний ЭКБ ИП 258
3.7.4. Особенности реализации этапа анализа отдельных перечней ЭКБ ИП 262
3.8. Особенности отечественной элементной базы для систем электроэнергетического обеспечения космических летательных аппаратов 266
3.9. Стойкость бортовой РЭА к воздействию ионизирующих излучений 270
3.10. Силовые полупроводниковые приборы для электронных систем КА 279
3.10.1. Основные принципы использования силовых приборов 279
3.10.2. Базовые технологии силовых приборов 281
3.10.3. Силовые MOSFET 283
3.10.4. Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET) 284
3.10.5. Интеллектуальные силовые ИС 289
3.10.6. Интеллектуальные ИС систем питания 292
Литература к главе 3 296

Глава 4. Особенности выбора и применения иностранной ЭКБ для проектирования отечественных космических аппаратов 298
4.1. Общие проблемы выбора ЭКБ для РЭА космического назначения 298
4.2. Ограничение экспорта в Россию электронных компонентов иностранного производства 300
4.2.1. Ограничение экспорта ЭКБ из США 301
4.2.2. Ограничение экспорта электронных компонентов из Европы и других стран 306
4.2.3. Международные организации контроля экспорта 307
4.3. Особенности применения индустриальных ЭКБ иностранного производства в ракетно-космической технике 308
4.4. Контрафактные микроэлектронные изделия и методы их выявления 318
4.4.1. Типы контрафактных компонентов 318
4.4.2. Эффективные методы выявления контрафактных изделий 320
4.4.3. Электрические испытания микроэлектронных изделий космического назначения 323
4.5. Особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров 330
4.5.1. Проблемы применения иностранных процессоров в отечественных КА 330
4.5.2. Варианты исполнения и квалификационные характеристики микропроцессоров UT 699 и GR 712 331
4.5.3. Архитектурные и аппаратные особенности микропроцессоров UT 699 и GR 712 семейства Leon 3FT 332
4.5.4. Особенности программирования микропроцессора Leon 3 334
4.6. Радиационно-стойкие преобразователи постоянного тока для космических и военных применений 337
4.7. Мировой опыт организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических систем 344
4.8. Ускоренные испытания ЭКБ КН на надежность 352
4.9. Анализ результатов испытаний микросхем, закупленных в РФ в период с 2009 по 2011 г. 356
Литература к главе 4 366

Глава 5. Методы минимизации энергопотребления микроэлектронных устройств 369
5.1. Основные тенденции изменения параметров энергопотребления микроэлектронных устройств 369
5.2. Пути уменьшения величины рассеиваемой мощности в КМОП БИС 373
5.3. Основные источники рассеиваемой мощности в КМОП БИС 384
5.4. Логическое проектирование КМОП БИС с пониженным энергопотреблением 389
5.4.1. Основы логического синтеза КМОП микросхем с пониженным энергопотреблением 389
5.4.2. Определение источников рассеиваемой мощности в КМОП микросхемах 391

5.4.3. Вероятностная оценка вариантов оптимизации по прогнозируемой переключательной активности узлов микросхемы 393
5.4.4. Выбор элементного базиса при проектировании КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением 396
5.4.5. Логический синтез КМОП БИС в базисе библиотечных элементов 398
5.4.6. Оптимизация двухуровневых логических схем с учетом рассеивания мощности 399
5.4.7. Выбор базовых вентилей технологически независимой функциональной схемы 401
5.4.8. Оптимизация многоуровневых логических схем из многовходовых вентилей 402
5.4.9. Оптимизация многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилей 404
5.4.10. Технологическое отображение 407
5.4.11. Оценка энергопотребления спроектированных КМОП БИС на логическом и схемотехническом уровнях 408
5.4.12. Технология проектирования КМОП БИС с пониженным энергопотреблением с использованием комплекса ЭЛС 410
5.4.13. Архитектура программного комплекса ЭЛС 412
5.4.14. Функциональные возможности программного комплекса ЭЛС 413
5.5. Особенности организации режима пониженного энергопотребления в современных интерфейсных БИС 417
5.5.1. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485 417
5.5.2. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-232 423
5.5.3. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования интерфейсных ИМС КН с пониженным напряжением питания 440
5.5.4. Особенности проектирования электрических схем блоков передатчика интерфейсных БИС с пониженным напряжением питания 447
5.5.5. Термонезависимый источник опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника 452
5.5.6. Варианты построения термонезависимых источников опорного напряжения 453
5.5.7. Анализ схемотехнических особенностей организации и применения триггеров Д-типа 456
5.5.8. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП БИС 462
5.5.9. Схемотехнические методы повышения устойчивости микросхем к эффекту горячих электронов 475
Литература к главе 5 480

Глава 6. Особенности технологического процесса изготовления и базовых конструкций субмикронных транзисторов и диодов Шоттки 485
6.1. О терминологии субмикронной микроэлектроники 485
6.2. Тенденции и перспективы развития современной технологии в микроэлектронике 487

6.2.1. Проблема масштабирования ... 492
6.2.2. Современная субмикронная технология – пример ее реализации при изготовлении микропроцессоров ... 493
6.3. Особенности субмикронных МОП-транзисторов ... 500
6.3.1. Конструкции МОП-транзисторов в СБИС ... 501
6.3.2. Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов ... 504
6.3.3. МОП-транзисторы со структурой «кремний на изоляторе» ... 507
6.3.4. Транзисторы с двойным, тройным и цилиндрическим затвором ... 513
6.3.5. Другие типы транзисторных структур ... 518
6.3.6. Особенности транзисторов для аналоговых применений ... 520
6.4. Конструктивно-технологические особенности высокотемпературных диодов Шоттки ... 522
6.4.1. Физические основы функционирования диодов Шоттки ... 522
6.4.2. Конструктивно-технологические особенности формирования высокотемпературных диодов Шоттки ... 525
6.4.3. Методы обеспечения минимального обратного тока и минимального прямого напряжения ... 529
6.4.4. Методы обеспечения минимального прямого напряжения и максимального обратного напряжения ... 532
6.5. Конструктивно-технологические особенности формирования структур диодов Шоттки с повышенной устойчивостью к разрядам статического электричества ... 537
Литература к главе 6 ... 541

Глава 7. Особенности воздействия радиации на субмикронные интегральные микросхемы ... 549
7.1. Физические механизмы воздействия радиации на субмикронные КМОП интегральные микросхемы ... 550
7.2. Воздействие радиации на аналоговые биполярные интегральные микросхемы ... 563
7.3. Основные методы обеспечения радиационной стойкости интегральных микросхем ... 567
7.4. Радиационная стойкость современных и перспективных ИМС ... 568
7.5. Рекомендуемый набор тестовых элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем ... 572
7.6. Оборудование и методики облучения тестовых структур и исследуемых образцов микросхем ... 575
7.7. Методика измерения электрических параметров тестовых структур после радиационной обработки ... 578
7.8. Экспериментальные результаты воздействия электронного облучения на параметры эпитаксиальных кремниевых p-n-структур ... 581
7.9. Экспериментальные результаты исследования воздействия проникающей радиации на параметры биполярных транзисторных структур ... 588

7.10. Экспериментальные исследования влияния ионизирующих излучений на параметры биполярных аналоговых интегральных микросхем 593
7.11. Экспериментальные результаты исследований воздействия ионизирующих излучений на параметры транзисторных МОП-структур и интегральных микросхем на их основе 601
7.11.1. Исследование влияния гамма-излучения на параметры транзисторных МОП-структур 601
7.11.2. Экспериментальные исследования воздействия гамма-излучения на параметры МОП-конденсаторов и транзисторных МОП-структур – элементов субмикронных КМОП ИМС 609
7.11.3. Особенности воздействия гамма-излучения на параметры МОП-ячеек памяти ЭСППЗУ 612
7.11.4. Экспериментальные исследования воздействия проникающего излучения на параметры логических КМОП ИМС 615
7.11.5. Влияние ионизирующего излучения на параметры КМОП БИС памяти 620
7.11.6. Экспериментальные исследования влияния радиационного воздействия на параметры транзисторных МОП/КНИ-структур и КМОП БИС ОЗУ на их основе 627
7.11.7. Экспериментальное исследование воздействия проникающего излучения на параметры БиКМОП БИС 635
7.12. Особенности применения имитационных методов исследования радиационных эффектов в БиКМОП микросхемах 642
Литература к главе 7 653

Глава 8. Методы прогнозирования и повышения радиационной стойкости биполярных и КМОП интегральных микросхем 665
8.1. Методы прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИМС 665
8.1.1. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости МОП-приборов 665
8.1.2. Метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости 671
8.2. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости биполярных и БиКМОП приборов 674
8.3. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования радиационной стойкости МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ 676
8.4. Методы повышения устойчивости ИМС к воздействию проникающей радиации 677
8.4.1. Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП микросхем 677
8.4.2. Стандартные конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИМС 680
8.4.3. Новые конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП БИС 688
Литература к главе 8 693

Предисловие

Первоначальное по замыслу авторов назначение этой книги – ознакомить разработчиков бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА) и систем двойного и специального назначения с современными подходами к проектированию и применению микроэлектронной элементной базы этой аппаратуры. Однако в процессе написания книги, сбора и обработки имеющейся обширной информации, бесед с чиновниками и специалистами отечественной и зарубежной космической и микроэлектронной отраслей промышленности первоначальный замысел авторов был существенно изменен. Полученные в результате анализа обширные дополнительные материалы заставили отказаться от исходного формата книги, и кроме изложения собственно особенностей и проблем проектирования современных микроэлектронных устройств для приборов космического и специального назначения здесь представлен значительно более расширенный материал.

Весь этот материал автором пришлось оформить в виде «двухтомника», где кроме глав, посвященных непосредственно проблемам проектирования современных микроэлектронных устройств космического и специального (военного) назначения, появились главы, посвященные другим «космическим» проблемам – как устроены современные космические аппараты (КА), какова роль радиоэлектронного бортового оборудования в достижении цели проекта, для которого разрабатывался этот КА, какова статистика аварий и отказов этих аппаратов, почему эти аварии и отказы в значительной степени связаны с качеством и функциональными возможностями используемых в их бортовых РЭА микросхем, почему в РФ активно применяются контрафактные микросхемы и как с ними бороться, каковы физические механизмы воздействия на РЭА КН ионизирующих излучений космического пространства и потоков сверхскоростных высокоэнергетических микрочастиц (космическая пыль) и какими методами и технологическими решениями можно если не исключить, то хотя бы уменьшить их влияние на надежность функционирования РЭА космического и специального назначения – и многое другое.

Необходимость такого существенного увеличения объема книги было во многом обусловлена информацией, почерпнутой авторами из фундаментального труда Железнякова А.Б. «Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос» / М.: Эксмо: Яуза, 2011. – 544 с., где фактически в сжатом виде детально изложена вся история как отечественной, так и мировой космонавтики.

Изложенные в этой работе факты, описания всех основных этапов грандиозной эпопеи выхода человечества за пределы нашей Земли, показали всю сложность этой чрезвычайно важной для человечества задачи, а также «высветили» роль так называемой ЭКБ – элементно-компонентной базы в процессе покорения космоса.

Конечно, автор этой работы (Железняков А.Б.) не предполагал, что всю массу достоверно изложенных им триумфальных и трагических событий процесса освоения космического пространства будут читать специалисты по электронике и рассматривать события под своим углом зрения, с учетом своего опыта и знаний в сфере микроэлектроники.

К сожалению, и в этом читатели сами могут легко убедиться, обратившись к первоисточнику, более чем в трети случаев аварий и отказов КА одной из наиболее вероятных причин этих событий является отказ этой самой ЭКБ.

Забегая вперед, одной из многих задач этой книги авторы считают и такую – проектируя конкретную бортовую радиоэлектронную аппаратуру для КА и выбирая для этого уже имеющуюся на рынке (или разрабатывая новую ЭКБ) разработчики должны представлять себя на месте тех людей (космонавтов, сотрудников наземных служб обеспечения КА, военных), жизни которых самым непосредственным способом будут зависеть от надежности этой самой РЭА. Так в оглавлении книги появились непредусмотренные ранее главы о структуре и составе бортовой аппаратуры КА, о детальном сравнительном анализе статистики и причинах аварий и отказов ракетоносителей и КА, о контрафактной ЭКБ и способах борьбы с ней.

В ходе изучения этого дополнительного и непосредственно никак не связанного с профессиональной деятельностью авторов (микроэлектроника и ее приложения) материала возникла объективная необходимость сравнить подходы разработчиков КА разных стран (США, СССР/РФ, Китая, стран Евросоюза и др.) к развитию соответствующей инфраструктуры и принципов использования ЭКБ в КА и военной технике.

К удивлению авторов – дилетантов оказалось (и это отражено в материалах книги), что, например, в Китае, намного позже включившемся в «космическую гонку», в последние годы соотношение числа удачных к неудачным пускам КА значительно лучше, чем в США и РФ, что у них на момент написания этой книги в КА используется не менее 98% собственной ЭКБ (для РФ этот показатель – в зависимости от источника информации – лежит в диапазоне только от 20 до 30% – все остальное – это иностранная ЭКБ), а их КА уже далеко не повторяют американские и российские технические решения, а во многом их опережают, а, например, в области разработки «противоспутникового» оружия они продвинулись весьма существенно вперед, продемонстрировав наблюдающим за ними конкурентам (США и РФ) активно маневрирующие на орбите и выполняющие различные манипуляции роботы-спутники («убийцы» спутников), а их «нефритовый заяц» достаточно комфортно чувствует себя на Луне.

В итоге вместо задуманного авторами скромного однотомного руководства по проектированию современных высоконадежных ИМС и ПП для космической и военной техники, читателю предлагается своего рода энциклопедия космической электроники, обобщающая в объеме двухтомника основную имеющуюся в открытой печати информацию как о причинах основных аварий и отказов космической техники за весь период ее развития, так и практические рекомендации по проектированию надежной элементной базы для бортовой РЭА.

Авторы выражают благодарность коллегам, активно участвовавшим в подготовке и обсуждении материалов книги, критические замечания и дополнения которых способствовали улучшению как структуры книги, так и излагаемого в ней материала – Бибило П.Н., Богатырев Ю.В., Борисенко В.Е., Бондаренко В.П., Долгий Л.Н., Овчинников В.И., Стемпицкий В.Р., Ушеренко С.М., Коршунов В.П., Критенко М.И., Стешенко В.Б., Турцевич А.С., Телец В.А., Мерданов М.К., Макаров Ю.Н., Никифоров А.Ю., Черемисинова Л.Д., Шиллер В.А. и др.

Следует отметить, что многие из этих коллег предоставили авторам оригинальные материалы собственных исследований по тематике этой книги – их включение в состав книги в значительной степени усилило практическую направленность работы.

Авторы также выражают благодарность рецензентам – академику Витязю П.А. и академику Лабунову В.А., конкретные замечания и предложения которых в значительной степени способствовали формированию окончательного варианта предлагаемой читателю книги.

Огромный объем работ по техническому оформлению рукописи был выполнен Гордиенко С.В. и Горовой Е.В.

При написании книги авторы использовали многочисленные открытые зарубежные и отечественные источники, результаты собственных научных исследований и практические результаты, полученные ими в области проектирования современных микроэлектронных изделий, учитывая специфику исследуемых проблем – достоверная информация о результатах анализа причин катастроф и аварий как в СССР/РФ, США, так и в Китае редко появляется в открытой печати. Поэтому здесь авторы использовали также информацию, полученную во время личных встреч и переговоров с сотрудниками китайской и индийской космической промышленности, в том числе – неоднократных встреч и дискуссий с Абдул Каламом (его называют «индийский Королев») – до того периода времени, когда он был избран Президентом Индии – и другими авторитетными специалистами.

Введение

Уникальность предмета исследований книги – космическая и специальная (экстремальная) микроэлектроника – элементная база современной ракетно-космической техники (РКТ), а также систем вооружений и военной техники.

Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ) до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Структура и последовательность изложения материала здесь направлена на изложение достаточно сложного материала в максимально упрощенном (но не в ущерб качеству) виде. Читателю последовательно излагается достаточный для понимания проблемы, но минимальный объем информации – от устройства и классификации космических аппаратов и их бортовых систем, результатов статистического анализа причин их аварий и отказов до особенностей выбора и применения ЭКБ иностранного производства. Основной объем представленного материала касается проблем проектирования микросхем космического назначения – от выбора технологии изготовления до методов их проектирования с учетом особенностей глубокого субмикрона.

Для достижения этой цели материал книги представлен в виде 20-ти глав.

В первой главе в сжатом виде представлены основные направления и тенденции развития космической техники и технологии, приводится классификация космических аппаратов, дается краткое описание их устройства, принципов организации и функционирования основных электронных бортовых систем управления, ибо именно исходя из требований к функциональным возможностям и техническим характеристикам этих систем формулируются требования к их ЭКБ. Более подробно рассмотрены космические аппараты дистанционного зондирования Земли, поскольку в одной из последующих глав рассмотрены практические примеры проектирования для них специализированных ПЗС – микросборок.

Здесь же кратко рассмотрены основные механизмы воздействия на КА факторов космического пространства (радиации, микрометеоритов и др.).

В последнем параграфе главы рассмотрены основные направления развития новых направлений в космическом приборостроении – применение МЭМС-технологий для создания миниатюрных (размерами со спичечный коробок) реактивных двигателей космического назначения.

Вторая глава посвящена общим проблемам обеспечения безопасности ракетно-космической техники, систематизации и анализу основных причин катастроф, аварий, отказов ракетоносителей и КЛА. Приводятся обобщенные по открытым источникам информации статистические данные по изменению характера и причин отказов на основных этапах развития космической техники, показана роль надежности используемой ЭКБ в решении задачи снижения рисков отказов, формулируются основные требования к количественным показателям надежности и долговечности ЭКБ КН.

Отдельно здесь рассмотрены специальные методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры КА длительного функционирования.

Третья глава посвящена общим вопросам выбора микроэлектронной ЭКБ для устройств ракетно-космической техники. Рассмотрена типовая структура контроллера бортовой электронной системы управления КА, даны конкретные примеры использования процессоров и микроконтроллеров в электронных системах управления иностранными КА,

Детально рассмотрены основные технические характеристики и функциональные особенности почти всех известных отечественных микроконтроллеров двойного и специального назначения, а также важные для практического применения особенности проектирования и организации производства микросхем для космических применений.

При рассмотрении последнего вопроса большое внимание уделено особенностям использования фаблес – модели, когда оригинальная микросхема проектируется отечественным дизайн-центром под требования конкретного заказчика – разработчика РЭА космического или специального применения, а затем изготавливается на одной из зарубежных микроэлектронных фабрик, отдельный параграф главы посвящен важным для инженера-дизайнера особенностям выбора конкретного конструктивно-технологического базиса (типа технологии, минимальных проектных норм уровня глубокого субмикрона) для проектирования микросхем космического назначения.

Система электроэнергообеспечения современных космических аппаратов во многом определяет их конечные тактико-технические характеристики, поэтому здесь детально рассмотрены состав и технические характеристики соответствующей отечественной ЭКБ для систем электрообеспечения.

Для стремительно развивающегося в РФ космического направления – спутников и специальной аппаратуры дистанционного зондирования Земли – представлено описание соответствующей ЭКБ, рассмотрены функциональные возможности, технические характеристики и особенности применения.

Поскольку воздействие ионизирующих излучений космического пространства является одним из главных факторов, ограничивающих сроки активного существования КА и приводящих к отказам и сбоям в работе бортовой РЭА (примерно в 30% случаев отказов функционирования их причиной является воздействие радиации), отдельный параграф целиком посвящен общим вопросам обеспечения стойкости бортовой РЭА к ионизирующим излучениям.

В частности, рассмотрены вопросы формирования соответствующих требований и определения локальных радиационных условий на борту КА, особенности методик оценки радиационной стойкости бортовой РЭА, а также рекомендации по повышению эффективности использования элементов радиационной защиты от воздействия тяжелых заряженных частиц, основные нормативные методики оценки радиационной стойкости бортовой РЭА.

Поскольку, кроме микросхем, при построении РЭА КН широко используются и дискретные полупроводниковые приборы, в конце главы рассмотрена номенклатура силовых полупроводниковых приборов КН (мощные полевые транзисторы, диоды, IGBT-модули и др.).

Четвертая глава посвящена особенностям выбора и применения в составе отечественных космических аппаратов ЭКБ иностранных производителей. Рассмотрены общие проблемы и подходы к выбору такой ЭКБ. Отдельно анализируются нормативные документы США и Евросоюза, ограничивающие экспорт в Россию этих компонентов, рассмотрены пути и механизмы решения сопутствующих проблем.

Поскольку приобретение иностранной ЭКБ категории Space обычно представляет собой достаточно сложную задачу, на практике для проектирования РЭА КН широко используют иностранную ЭКБ категории Industry (промышленного назначения). Детально рассмотрены особенности применения этих изделий в ракетно-космической технике, приводится перечень обязательных мероприятий, которые должен выполнить разработчик РЭА перед тем, как поставить эти образцы в электронные блоки проектируемой РЭА КН. Отдельный параграф посвящен проблемным особенностям выбора иностранной ЭКБ для РЭА стратегически значимых отечественных объектов.

Одной из важнейших проблем комплектации РЭА КН импортными микроэлектронными изделиями является проблема так называемого «контрафакта». Причем эта проблема не только для российских разработчиков, она носит глобальный характер – известно много случаев, когда даже в электронные системы подводных лодок, боевых самолетов США и стран НАТО, космической аппаратуры НАСА и Европейского космического агентства попадали контрафактные (поддельные, клонированные) микросхемы низкого качества китайского производства (в Китае налажено массовое производство таких изделий).

В последние годы все больше контрафактных изделий выявляется и российскими специалистами, а в ряде случаев однозначно установлена их ответственность за отказы РКТ.

Дана следующая классификация контрафактных изделий: пиратская версия (клон), компонент не соответствует стандартам изготовления оригинального изделия; компонент не изготовлен сертифицированным на то производителем; компонент является дефектным или ранее бывшим в употреблении, но поставленным под видом новых компонентов; компонент имеет некорректную (или поддельную) маркировку и сопроводительную документацию. В итоге контрафактную продукцию можно отнести к следующим более частным категориям: повторно используемые, перемаркированные, дефектные (бракованные), незаконно (например, сверх договорного объема) произведенные, клонированные, незаконно измененные (восстановленные) изделия, а также компоненты с поддельной документацией.

Для каждой из этих категорий рассмотрены эффективные методы их выявления. Подробно описан один из таких эффективных методов – специальный комплекс электрических и температурных испытаний с конкретными примерами из практики анализа. Рассмотрены особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров и микроконтроллеров, необходимых для построения высокопроизводительных и надежных бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК) – как для систем полезной нагрузки, так и для платформы космических аппаратов. Детально проанализирован

наиболее широко используемый с 2009 г. в космической отрасли США и стран ЕС разработанный компанией Aeroflex процессорный комплект Leon 3FT (микропроцессоры UT699 и GR712): варианты использования, квалификационные характеристики, архитектурные и аппаратные особенности, особенности программирования и пр.

Отдельный параграф посвящен иностранным радиационно-стойким преобразователям постоянного тока для космических и военных применений, объем импорта которых в Россию за последние 5 лет увеличился на порядок. Как известно, система электропитания любого спутникового оборудования должна быть адаптирована к высокой тактовой частоте работы и быстрому изменению нагрузки на шине питания. Показано, что для этого требуется, чтобы эти DC/DC преобразователи и стабилизаторы обладали переходными характеристиками на уровне не ниже десяти ампер на микросекунду при изменении нагрузки в полном диапазоне, при этом максимальное отклонение величины выходного напряжения не должно превышать ±5%, ибо любое превышение предельно допустимого напряжения питания процессора или ПЛИС при таком изменении нагрузки может привести к мгновенному (или скрытому) отказу микросхемы бортовой РЭА.

Здесь же представлены основные результаты обобщения мирового опыта организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических аппаратов, поскольку специфика ЭКБ КН заключается в том, что ее развитие идет своим путем, отличным от развития электроники общепромышленной, ориентированной на выпуск массовой продукции с коротким жизненным циклом и быстрой сменяемостью типов изделий.

Представлены особенности организации работ по развитию ЭКБ КН в США, где этим занимаются параллельно три ведомства – министерства обороны и энергетики, НАСА, а также в Европе, Японии и Китае.

В пятой главе рассмотрены основные направления решения одной из наиболее актуальных проблем космической микроэлектроники – снижение энергопотребления микроэлектронных устройств космического назначения. Актуальность проблемы обусловлена тем очевидным фактом, что функциональные возможности и производительность бортовой РЭА неуклонно увеличиваются, а закон сохранения энергии никто еще не отменил. Если за каждый килограмм (тонну) полезной нагрузки конструкторам ракетно-комической техники приходится платить сокращением «избыточных» функций, то для обеспечения минимизации энергопотребления электронных блоков приходится использовать самые различные методы и способы, основанные на использовании как особенностей собственно микроэлектронных технологий изготовления ЭКБ, так и целого спектра оригинальных конструктивно-схемотехнических методов. Пятая глава как раз и посвящена описанию основных из этих методов.

В начале главы рассмотрены основные механизмы рассеивания мощности в наиболее широко используемых в КА КМОП-микросхемах, физические, схемотехнические, технологические и системотехнические (архитектурные) ограничения, которые надо знать и учитывать разработчиками и потребителям микросхем космического применения. Особое внимание в этой главе уделено интерфейсным микросхемам, которые позволяют обеспечивать совместное функционирование в со-

ставе бортовой системы самых различных функциональных блоков, узлов и элементов систем как единичного целого, организовать взаимодействие различных электронных бортовых систем КА между собой, обеспечить быстрый и надежный информационный обмен как между этими «внутренними» системами, так и с «внешними» устройствами. Без так называемого «развитого интерфейса» невозможна эффективная эксплуатация самых современных вычислительных и управляющих бортовых систем КА. Важнейшими элементами интерфейса являются специальные микросхемы, используемые для построения интерфейсных каналов, которые имеют множество разновидностей, отличающихся функциональными возможностями, схемотехническими и конструктивно-технологическими решениями, системой электрических параметров и особенностями применения. Единственное, что их объединяет, – проблема минимизации их энергопотребления при работе в составе бортовых систем РЭА КН, а также условия работы (высокий уровень внешних помех, высокие значения переключаемых (коммутируемых) и нагрузочных токов, экстремальные электрические нагрузки, работа в условиях радиационных и механических воздействий. Особенности проектирования и применения интерфейсных микросхем предыдущего поколения достаточно подробно были изложены в работе А.И. Белоуса, О.Е. Блинкова «Биполярные микросхемы для интерфейсов систем автоматического управления (Ленинград, «Машиностроение», 1990 г., 272 с.), на которую в главе даются соответствующие ссылки.

Однако новому поколению интерфейсных микросхем присущи и новые проблемы, и новые методы их разрешения, поэтому здесь основное внимание читателей сконцентрировано на особенностях организации режимов понижения энергопотребления в современных интерфейсных микросхемах преимущественно с последовательной (а не параллельной) передачей данных. Рассмотрены наиболее часто используемые разработчиками бортовой РЭА микросхемы приемо-передатчиков пониженного энергопотребления типа RS-232 и RS-485, приведены конструктивно-схемотехнические особенности их проектирования, дан развернутый пример проектирования конкретной схемы электрического блока передатчика, источника температуронезависимого опорного напряжения и др.

Основные конструктивно-схемотехнические особенности проектирования ИМС КН с пониженным напряжением питания детально рассмотрены в рамках отдельного параграфа.

Учитывая широкое использование в интерфейсных (и не только) микросхемах элементов памяти (Embedded memory – встроенная память), последний параграф этой главы посвящен детальному анализу схемотехнических особенностей организации и применения наиболее часто используемых типов базовых элементов (ячеек) памяти – различного вида триггеров D-типа.

Учитывая повышенный уровень различного рода помех, генерируемых на борту эксплуатируемого космического аппарата (орбитальной станции, навигационного спутника, межпланетного космического аппарата), в эту главу включен специальный параграф, посвященный детальному анализу как самих источников возникающих помех, так и конструктивно-схемотехническим методам их подавления на ранних этапах – проектирования как собственных заказных микросхем, так и на этапах их последующего применения в составе бортовой РЭА КН.

Шестая глава посвящена особенностям технологического процесса изготовления и базовым конструкциям современных транзисторов и диодов Шоттки, предназначенных для использования при проектировании и изготовлении микросхем и полупроводниковых приборов космической микроэлектроники.

Эта глава необходима для понимания современных тенденций и перспектив развития современной микроэлектроники, которая развивается в направлении так называемого «глубокого субмикрона». На первый план здесь выходит проблема масштабирования геометрических размеров интегральных микросхем – уменьшение линейных (горизонтальных) и вертикальных (параметров активной структуры базового транзистора) размеров вызвала к жизни совершенно новые, ранее неизвестные физические механизмы отказов этого нового поколения микроэлектронных изделий.

Поэтому здесь детально рассмотрены особенности технологий изготовления и формируемые этими технологиями конструкции субмикронных МОП-транзисторов. Представлен общий анализ этих конструкций, дано описание наиболее часто используемых в практической деятельности инженеров-разработчиков БИС методов улучшения рабочих характеристик МОП-транзисторов для проектных норм 90, 65, 45 нм и менее, отдельно рассмотрены особенности, достоинства и основные недостатки МОП-транзисторов со структурой «кремний на изоляторе» (КНИ), особенности транзисторов с двойным, тройным, и так называемым «цилиндрическим затвором», а также другие используемые в БИС КН типы транзисторных структур. В рамках отдельного параграфа рассмотрены особенности использования в составе БИС КН специальных конструкций транзисторов для аналоговых применений.

Также отдельный параграф главы посвящен конструктивно-технологическим особенностям изготовления и использования в составе микроэлектронных устройств высокотемпературных диодов Шоттки – представлены более пятидесяти вариантов их конструкций с соответствующими комментариями в зависимости от решаемых ими задач в составе конкретных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов космического назначения.

Седьмая глава посвящена теоретическому и экспериментальному анализу особенностей воздействия ионизирующих излучений космического пространства на субмикронные интегральные микросхемы и дискретные полупроводниковые приборы. Если физические механизмы воздействия радиации на «досубмикронные» микросхемы были достаточно хорошо изучены и представлены в многочисленных открытых отечественных и зарубежных изданиях, то при использовании субмикронных проектных норм образовался определенный «информационный вакуум» – в различных литературных источниках часто публиковалась прямо противоположная информация, вплоть до того что субмикронные микросхемы вообще нельзя использовать в космической аппаратуре из-за якобы их низкой стойкости к ионизирующим излучениям открытого космического пространства.

Во многом это объясняется жесткой конкурентной борьбой на рынке изготовителей БИС КН, а также чисто экономическими факторами – разработка субмикронной технологии требует вложения уже не сотен тысяч долларов, а сотен миллионов для уровня 90 нм и достигает нескольких миллиардов долларов для уровня 45 нм и менее.

К сожалению, на основании подобной дезинформации были приняты и определенные решения лидерами отечественной ракетно-технической отрасли, ответственными за принятие решений в области использования ЭКБ для космического аппаратостроения.

Поэтому в данной главе детально рассмотрены конкретные особенности и физические механизмы воздействия радиации на субмикронные БИС (КМОП, биполярные, цифровые, аналоговые, схемы памяти), а также представлены основные методы обеспечения их радиационной стойкости, включая рекомендации по составу тестовых приборов, элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем, рекомендации по используемому оборудованию и методикам облучения образцов, методикам их измерений после радиационной обработки.

Достоинством материалов этой главы является то, что в отличие от различного рода утверждений о «стойкости» или «нестойкости» базовых конструкций субмикронной БИС в десяти параграфах главы представлены конкретные результаты экспериментальных исследований (преимущественно отечественных, в том числе авторских, а также авторитетных зарубежных исследователей) о воздействии разного рода излучений на характеристики различных микроэлектронных приборов.

Так, представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований воздействия гамма-излучения на параметры субмикронных МОП-транзисторов, МОП-конденсаторов, ячеек памяти на МОП-транзисторах, логических МОП ИМС, КМОП ОЗУ, ПЗУ, БиКМОП БИС, МОП/КНИ структур и БИС ОЗУ на их основе.

Принимая во внимание объективные технические и финансовые проблемы разработчиков РЭА КН в отношении возможности проведения натурных испытаний (полигон в Семипалатинске во времена СССР эти проблемы закрывал), в последнем параграфе этой главы приводятся описания особенностей применения и физические обоснования целесообразности применения адекватных имитационных методов исследований радиационных эффектов и методов прогнозирования на их основе радиационной стойкости КМОП и БиКМОП-микросхем.

Здесь же представлены конкретные и только апробированные в отечественной и зарубежной практике методы повышения устойчивости различных классов БИС к воздействию факторов проникающей радиации (гамма, альфа, бета излучениям, тяжелым заряженным частицам, протонам, нейтронам и другим видам ионизирующих излучений). Детально описаны методики облучения, методики измерений электрических параметров тестовых структур и образцов типовых представителей основных классов ИМС, состав и особенности используемого при этом оборудования, технической оснастки и специальных программных обеспечений.

Следующая, ***восьмая глава*** целиком посвящена описанию апробированных расчетно-экспериментальных методов прогнозирования и расчета уровней радиационной стойкости как биполярных (цифровых, логических и аналоговых), так и стандартных КМОП интегральных микросхем.

Здесь же рассмотрены основные конструктивно-технологические и схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП-микросхем.

Девятая глава целиком посвящена конкретным аспектам проектирования микросхем космического применения на основе наиболее быстро развивающегося направления радиационно-стойких ИМС – КНС и КНИ – структур.

Данная глава претендует на фундаментальный характер анализа уровня развития этого направления развития микроэлектронных технологий, поскольку содержит достаточно объемную теоретическую часть (анализ особенностей дефектообразования в кремнии (и поликремнии) вследствие облучения импульсами гамма-квантов, описание самих радиационных дефектов, их комплексов и кластеров, описание физических механизмов влияния радиации на проводимость диэлектрических слоев, свойства границы Si/SiO_2 и др.

Приводится сравнение радиационных свойств КНИ ИМС изготовленных различными технологическими способами, анализируются пути повышения стабильности и надежности структур с различными диэлектрическими слоями.

Несомненным достоинством главы, с точки зрения авторов, является детальное описание физических явлений и процессов, происходящих в КНИ БИС в условиях воздействия на них различных ионизирующих излучений (единичные сбои, единичная «защелка», единичное «выгорание», единичный пробой затвора, единичное восстановление эффекта так называемой «однотранзисторной» защелки), а также эффектов воздействия импульсного излучения и эффектов «полной дозы».

Все вышеизложенные выводы и рекомендации подтверждаются изложением результатов конкретных экспериментальных исследований образцов, приведен состав соответствующих тестовых элементов и получены экспериментальные результаты для всех базовых элементов БИС (транзисторы различных конфигураций, резисторы, диоды, конденсаторы).

В заключение приведены наиболее широко используемые конструктивно-технологические и конструктивно-схемотехнические методы повышения стойкости КНИ ИМС, в том числе путем стабилизации заряда в «скрытом» диэлектрике КНИ-структур (путем дополнительной имплантации ионов водорода, путем имплантации фтора), а также особенности формирования в КНИ-структурах МОП-транзисторов с «кольцевыми» затворами, коротко-канальных КНИ МОП-транзисторов и самосовмещенных КНИ МОП-транзисторов с «кольцевым» затвором.

Отдельный параграф главы посвящен сводному анализу конструктивно-технологических методов повышения устойчивости КНИ-структур к воздействию факторов открытого космического пространства, предложенных в открытых патентах США.

Также в отдельный параграф выделены вопросы повышения стойкости КНС и КНИ БИС ОЗУ к воздействию наиболее «опасного» – импульсного ионизирующего излучения (анализ основных радиационных дефектов, приводящих к сбоям в работе базовых элементов и микросхем, описание методик и аппаратных реализаций радиационного эксперимента, ионизационные эффекты в полупроводниковых слоях КНС и КНИ-структур, анализ процесса ионизационной реакции КНС МОП-транзисторов и импульсное ионизирующее излучение, локальные ионизационные эффекты в диэлектрических областях КМОП КНС БИС ЗУ и др.)

Не менее фундаментальной с точки зрения содержания материала является ***десятая глава***, посвященная анализу общих проблем проектирования субмикрон-

ных БИС КН и электронных блоков ИС на их основе. Структура главы состоит из шести разделов, содержащих в свою очередь 33 подраздела, каждый их которых независимо от представленного объема материала одинаково важен для использования в процессе проектирования субмикронных БИС КН.

Использование субмикронной технологии (с технологическими нормами 90 нм и менее) ставит новые проблемы при проектировании как цифровых, так и аналоговых КМОП БИС. Некоторые из этих проблем ранее вообще не встречались, тогда как другие существовали и ранее, но сегодня приобрели более существенное значение.

При приближении от 90 нм к 65 нм и тем более к 45 нм перед проектировщиками встают новые проблемы, обусловленные возрастающим влиянием электрических и физических эффектов, связанных с высокой плотностью межсоединений и высокой плотностью компоновки транзисторов (динамическое падение напряжения на переходных сопротивлениях, «антенные» эффекты и эффекты перекрестного взаимодействия, возрастание роли токов утечки, электромиграция и многие другие).

Рассмотрены современные тенденции масштабирования, возникающие при этом проблемы и пути их решения.

Одной из основных проблем является рост величины потребляемой кристаллом как статической, так и динамической мощности, обусловленной токами утечки. Даны рекомендации, как возможно на этапе проектирования управлять оптимальным распределением рассеиваемой мощности по площади кристалла.

Детально проанализированы все основные виды токов, протекающих в активной и пассивной структурах транзистора (подпороговые токи утечки, туннельные токи затвора, ток выключения, токи переходов и др.), причины их возникновения, выражения для расчета их численных значений.

Особое внимание уделено проблеме расчета и управления величиной динамической мощности в структуре типового субмикронного кремниевого МОП-транзистора (использование схемотехники блоков с заданной величиной задержки переключения, корректный учет задержек распространения сигналов на межсоединениях и переходных сопротивлениях межуровневых контактов, способы снижения уровня потребляемой в процессе переключения мощности, методы библиотечной оптимизации и др.).

В заключительных параграфах главы рассмотрены еще две актуальные для инженеров-разработчиков проблемы – влияние температуры на характеристики МОП-транзисторов, изготовленных по технологии глубокого субмикрона (температурные зависимости подпороговых токов утечки, туннельного тока затвора, входного и выходного токов, токов переходов), а также влияние разбросов (флуктуаций) технологических параметров на основные электрические параметры субмикронных МОП-транзисторов. Связанное с технологией изготовления отклонение электрических параметров базовых транзисторов всегда было серьезной проблемой для разработчиков – схемотехников и инженеров-технологов. На техническом сленге это явление известно как Yield Killer (убийца выхода годных).

Неожиданно для самих исследователей этой проблемы выяснилось, что для субмикронной технологии эффект Yield Killer оказывает действительно «убий-

ственное» влияние на основные рабочие характеристики МОП-транзисторов, и чем меньше проектная норма, тем сложнее с ним бороться.

Здесь показано, что флуктуации (случайный разброс) технологических параметров в зависимости от их природы можно разделить на «глобальные» и «локальные». Если «глобальные» флуктуации оказывают влияние на все идентичные компоненты (пластины в реакторе подвергаются неравномерному нагреву в зависимости от места их расположения), то «локальные» влияют не только на конкретную пластину, но даже на единичный кристалл (неравномерный нагрев пластины в центре и на периферии в процессе высокотемпературного окисления и др.).

Поэтому особое внимание уделено влиянию этих технологических флуктуаций на величину токов утечки. В частности, показано, что подпороговый ток I_{sub} (разброс значений которого дополнительно обусловлен флуктуацией дозы легирования, толщины подзатворного окисла, длин каналов) экспоненциально зависит от важнейших параметров транзистора – пороговых напряжений и туннельного тока затвора, причем эта зависимость носит ярко выраженный нелинейный характер даже в случае незначительного увеличения разброса технологических параметров.

В завершении главы сформулированы конкретные рекомендации по снижению токов утечки в МОП-транзисторах, изготовленных по субмикронным технологиям, перечислены основные ограничения, связанные с уменьшением их линейных размеров, даны конкретные рекомендации по методам минимизации токов утечки при проектировании микросхем как на системном (архитектурном), так и на логическом и схемотехническом уровнях реализации проекта.

Глава 11 посвящена особенностям проектирования систем на кристалле (СНК) и систем в корпусе (СВК), предназначенных для использования в бортовой РЭА КН, а также в системах вооружения и военной техники.

По определению СВК представляет собой объединение нескольких различных кристаллов цифровой логики, памяти, интерфейсных компонентов, пассивных компонентов, фильтров, антенн в одном стандартном (или специально разработанном) металлокерамическом или другом специальном корпусе.

Рассмотрены конкретные особенности проектирования СВК и СНК, приведено сравнение их основных параметров и соответственно процессов их разработки. Так, например, показано, что стоимость реализации типового СНК проекта в 7–10 раз больше, чем СВК, если время реализации СВК занимает от 6 до 9 месяцев, то процесс создания СНК – от 18 до 36 месяцев, причем если для создания СВК требуется практически стандартный коллектив разработчиков, то для СНК нужен уже численно больший специально подготовленный коллектив высококвалифицированных инженеров, при этом отладка прототипа СВК занимает всего 1-2 месяца против 12–20 месяцев для СНК.

Отдельно рассмотрены особенности проектирования высокочастотных (RF) модулей в составе СВК. Так, параметризованные ячейки (p-cells) для пассивных устройств RF являются уже стандартным библиотечным компонентом в поставленных на рынок средств САПР, но они не предусматривают обычно учет влияния характеристик выбранного проектировщиком конкретного типа корпуса. Опять же, на эскизном этапе проекта разработчик самостоятельно должен принимать ряд нестандартных решений (например, стоит ли помещать требуемую

индуктивность на кристалл, где она занимает много полезной площади, или целесообразно разместить ее на подложке, плате, элементе корпуса).

В рамках отдельного параграфа рассмотрены некоторые дополнительные особенности технологий глубокого субмикрона, которые также необходимо учитывать в процессе проектирования специализированных микросхем для СНК и СВК. В частности, это касается учета влияния дестабилизирующих факторов на быстродействие цифровых микросхем с помощью средств САПР. Так, для проектов с использованием технологических норм больше 0,25 мкм, включающих до миллиона вентилей, можно не учитывать влияние технологических флуктуаций и импульсных помех на выходные параметры цифровых микросхем. Однако уже для 0,18 мкм отклонения реальных значений динамических параметров от расчетных весьма существенны. Максимальные значения импульсных помех в цепях питания могут достигать десятков процентов, причем наибольшую амплитуду имеют составляющие с частотами от 30 до 300 МГц (а именно это частоты обычно используются для внутренней синхронизации кристаллов).

Показано, что если для 0,25 мкм проектных норм при расчете динамических параметров обычно достаточно учитывать только емкости проводников межсоединений, то при 0,18 мкм необходимо учитывать уже и омические сопротивления линий связи, а при нормах 90 нм – еще и индуктивности, паразитные резисторы, что в итоге многократно увеличивает время расчетов.

Детально проанализированы особенности проектирования топологии кристаллов, предназначенных для использования в СНК и СВК, приведены конкретные рекомендации по минимизации последствий работы различных паразитных эффектов. Например, для исключения «антенного» эффекта (в процессе плазменного травления и полировок на проводниках накапливается статический заряд, который может вызвать пробой МОП-транзистора) рекомендуется вводить специальные ограничения на величину максимальной площади внутренней металлизации соединительных шин. Для выравнивания плотности токов в проводниках и уменьшения возникающих после химико-механической полировки термомеханических повреждений рекомендовано использовать «фиктивные» элементы – фиктивные проводники в широких диэлектрических зазорах, фиктивные диэлектрические зазоры рядом с «широкими» проводниками.

Последующие пять глав посвящены обобщению и анализу результатов исследований преимущественно отечественных ученых и специалистов в области защиты бортовой аппаратуры космических летательных аппаратов и используемой ЭКБ КН от различного рада деструктивных факторов открытого космического пространства. Если проблемы воздействия радиации и методы повышения радиационной стойкости ЭКБ достаточно подробно рассматривались в ряде предшествующих глав, то нижеследующие главы посвящены в основном конкретным проблемам защиты бортовой аппаратуры и ЭКБ от влияния электромагнитного излучения и высокоскоростных потоков микрочастиц, или в более общем виде – защиты от воздействия импульсных высокоэнергетических потоков вещества и излучений.

Известно, что в космическом пространстве находится большое количество космического мусора, микрометеоритов, «сгустков» микрочастиц так называемой «космической пыли» и других объектов микро- и макроуровня. Например, плотность

этой космической пыли в околоземном пространстве составляет $3 \cdot 10^{-29}$ кг/м^3 (на Землю оседает примерно 400 тонн пыли в сутки).

Космическая пыль образуется частицами диаметром от нескольких микрон до одного миллиметра (основная масса имеет размеры от 1 до 100 мкм), отдельные из которых движутся со скоростями от 1 до 10 тыс. км/с.

Долгое время соударения таких сгустков микрочастиц с металлическими конструкциями космических аппаратов рассматривались лишь с классической позиции эрозии внешней поверхности. Однако по мере накопления информации о причинах отказа бортовых систем и КА стало очевидно, что такой подход не соответствует реально протекающим в космосе процессам. В основе сложных процессов, происходящих при ударе частиц о корпус КА и отдельные элементы его конструкции, лежит механизм образования плазмы, которая может индуцировать в электронных устройствах значительные «наведенные» импульсные токи, нарушающие нормальную работу бортовых систем вплоть до их выхода из строя.

Поэтому задача защиты конструкций и отдельных элементов КА с длительным сроком существования, космических орбитальных и особенно межпланетных станций от воздействия потоков микрочастиц является весьма актуальной.

Глава 12 посвящена проблемам получения соответствующих специальных материалов для защиты микросхем и блоков бортовой аппаратуры от воздействия этих высокоскоростных потоков микрочастиц и несанкционированных электромагнитных излучений.

Детально рассмотрены физические механизмы и особенности взаимодействия этих потоков микрочастиц с физической преградой (корпус КА, корпус микросхемы), их влияние на изменение структуры и свойств материалов, подвергшихся такому воздействию. В частности, исследованы механизмы влияния границ раздела в многослойных материалах на проникающую способность микрочастиц, рассмотрены особенности получения специальных многослойных материалов, корпусов, предназначенных для защиты кристаллов микросхем от проникающего воздействия этих микрочастиц и электромагнитного излучения.

Остальные параграфы этой главы посвящены анализу известных радиопоглощающих материалов, в том числе и многослойных, применяемых для защиты от электромагнитного излучения, а также анализу физических механизмов процессов поглощения и отражения электромагнитного излучения многослойными материалами.

Глава 13 посвящена описанию конкретных методик и типов оборудования, используемого для проведения экспериментальных исследований процессов взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с различными материалами.

В первом параграфе обоснован выбор в качестве основных материалов для исследований порошков SiC и Al_2O_3 с размером 50–100 мкм, а в качестве объектов исследований, применяемых в бортовой аппаратуре и требующих защиты, использовались микросхемы в металлокерамическом и пластмассовом корпусах (они же выполняли роль тестовых объектов и детекторов). Представлено описание методик выбора матричных материалов и наполнителей, которые воспринимали основную долю нагрузки в композиционных материалах.

Подробно рассмотрены комплексная методика и оборудование для испытаний. В частности, для разгона частиц до скоростей 1–3 км/с применялись специ-

альные взрывные ускорители, основанные на кумуляции энергии взрывчатых веществ (насыпной аммоний марки 6ЖВ).

При разработке методик измерений электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии микрочастиц с преградой, для количественной оценки магнитодинамических процессов использовался эффект Холла.

В основе методик измерения и регистрации ионизирующих излучений, возникающих при высокоскоростном соударении частиц космической пыли с защитными элементами КА, использовалась в качестве основного материала рентгеновская пленка с чувствительностью 850 $Р^{-1}$ по критерию 0,85 под вуалью.

Представленная в главе методика исследования структуры и свойств материалов после воздействия на них высокоскоростного потока микрочастиц базируются на использовании стандартного комплекта оборудования для проведения металлографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, а также оборудования просвечивающей электронной микроскопии.

Детально рассмотрены результаты рентгеноструктурного анализа происходящих деформационных процессов, описана детализированная методика и особенности измерения основных электрофизических параметров как самих испытываемых микросхем, так и вышеперечисленных композиционных материалов.

В главе 14 представлены экспериментальные результаты исследования влияния воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на механические и электрофизические свойства защитных материалов, детализированные методики проведения которых были рассмотрены в предыдущей главе. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде таблиц, графиков, фотографий, сопровождаемых соответствующими описаниям, комментариями.

Необходимость такого представления материала обусловлена тем фактом, что, к сожалению, до сих пор наличие вышеописанного механизма влияния воздействия микроразмерных частиц «космической пыли» на материалы и приборы вызывает неординарную реакцию экспертов и иногда подвергается сомнению. Используя методики, перечень оборудования, указанный в предыдущей главе, любой исследователь может повторить эксперименты и убедится в существовании эффекта, чтобы в последующем направить свои изыскания на поиск путей и способов защиты от его последствий.

Например, при исследовании электромагнитных излучений были зарегистрированы спектры излучения амплитудой от 100 мВ до 1,5 В при длительности импульса $(5–12) \cdot 10^{-6}$ с на расстоянии всего 15 см от эпицентра взрыва. В момент взрывов продукты сдетонировавших взрывчатых веществ представляли собой смесь газообразных и конденсированных веществ при давлении 20–40 ГПа и температуре 3000–5000 К, а ведь подобные состояния, как известно, типичны для низкотемпературной неидеальной многокомпонентной и многообразной плазмы с низкой концентрацией заряженных частиц, которые также участвуют в формировании деструктивного для физической преграды потока.

Представлены фотографии видов отдельных дефектов и треков, наблюдаемые также на поверхностях исследуемых кремниевых пластин и кристаллов при скоростях потока частиц в диапазоне 1,2–1,5 км/с.

Отдельный параграф посвящен теоретическим и практическим особенностям проведения моделирования процессов создания потоков таких микрочастиц и их взаимодействию с корпусами КА и отдельных микросхем.

Показано, что основные повреждения в микросхемах – «механические» повреждения в виде разрывов и сколов (в местах проволочных соединений, металлизированных шин питания, контактных площадок), а также впервые зафиксированные оригинальные дефекты – в местах повреждения наблюдаются зоны локально разогрева высокой интенсивности, которые в ряде случаев приводят возникновению и росту в этих местах новых кристаллических образований из полупроводникового материала поврежденного кристалла (представлен ряд фотографий).

Длительное время исследователям не удавалось определить численные характеристики энергии генерации электромагнитного поля и потоков высокоэнергетических ионов, необходимой для выброса струй плотной плазмы из объема преграды, поскольку длительность процесса не превышает 10^{-3} с, а в рамках теории обычного «классического» механического удара, как известно, не возникает источник дополнительной энергии. Поэтому в последнем параграфе главы детально рассмотрены особенности процесса генерации такого электромагнитного поля, суть которого можно кратко описать следующим образом – на первой стадии развития процесса электромагнитное поле формируется при движении частиц внутри твердого тела, при котором имеет место «классический» механизм трения – с потерей массы и возникновением в материале электрически заряженных частиц. Движение миллионов этих частиц инициирует возникновение соответствующих электромагнитных полей. Пульсация внутри таких «солитонов» высокого давления приводит к эквивалентному физическому эффекту пульсаций плотной плазмы внутри преграды, а уже сопутствующие ударно-волновые процессы перемещают в металлах обобществленные электроны.

Глава 15 посвящена анализу качественных и количественных изменений структуры и свойств одно- и многослойных защитных материалов при воздействии на них высокоскоростных потоков микрочастиц. Представлены результаты анализа таких изменений в структурах однослойных материалов (металлов, полимерных материалов). Вначале рассмотрены изменения вольт-амперных характеристик стандартных («незащищенных») микросхем серийного производства, а затем представлены и проанализированы соответствующие изменения вольт-амперных характеристик микросхем, конструктивно оформленных в корпусах из «защитного» многослойного материала.

Поскольку в конструкциях КА широко применяются такие материалы, как алюминий, титан и их сплавы, приведены результаты исследований воздействия частиц SiC на микроструктуру образцов из алюминия.

В главе 16 более детально рассмотрены конкретные особенности и последовательность операций технологического процесса изготовления многослойных защитных материалов для корпусов микросхем КН, устойчивых к эффекту сверхглубокого проникновения высокоскоростных микрочастиц.

Сформированы основные требования к таким материалам, описаны основные этапы технологического процесса получения многослойных материалов для

корпусов ИМС. Описаны особенности влияния размера частиц наполнителя на свойства материалов, особенности формирования макро- и микроструктуры этих многослойных материалов, представлены конкретные данные о механических и электрофизических свойствах материалов и экранирующих свойствах многослойных корпусов.

В главе 17 рассмотрены основные методы отбраковки в серийном производстве микросхем со скрытыми дефектами. Представленные методы позволяют разработчикам электронных устройств повышать надежность, в случае невозможности получения требуемых типономиналов иностранной ЭКБ категории Space или Industry использовать для комплектации прототипа устройства отечественные микросхемы двойного или специального назначения, но прошедших комплекс дополнительных испытаний в соответствии с рассмотренными методами. Это относится к использованию специальных статистических подходов (коэффициенты чувствительности выходных параметров, границы области работоспособности), моделей математической обработки результатов форсированных испытаний, определению потенциально ненадежных микросхем с использованием принудительного электростатического разряда, специальных режимов процедуры термотренировки, специальных критериев отбраковки по величине динамического напряжения и др.

В главе 18 рассмотрен типовой состав библиотек дизайн-китов (Process Design Kits (PDK) и особенности их применения при проектировании микросхем с субмикронными проектными нормами. Рассмотрены структура стандартного PDK и процесс разработки нового (в случае такой необходимости). При проектировании субмикронных ИМС важной особенностью является необходимость учета и глубокого анализа особенностей используемого технологического процесса при проведении компьютерного моделирования проектируемой ИМС.

Описаны необходимые правила стандартизации PDK, порядок и особенности проектирования смешанных аналогово-цифровых микросхем, приведены описание информационной модели их проектирования, а также способы определения состава библиотек проектирования и перечня элементов, требующие стандартизация.

Основной раздел главы посвящен детальному описанию важных для практического применения особенностей цифровых библиотек проектирования заказных ИМС с субмикронными и «глубокосубмикронными» технологическими номами.

Изложение материала сопровождается анализом конкретных демонстрационных примеров (модели источников тока, схемы сдвига уровня, управления питанием, библиотеки схем ввода-вывода и т.п.).

В конце главы приводится описание открытого учебного (Educational Design Kit) PDK компании SYNOPSYS, а также состав учебных PDK, представляемых известным международным центром микроэлектроники IMEC.

Глава 19 посвящена «некремниевой» микроэлектронике – арсениду галлия, нитриду галлия. В силу ограниченного объема книги здесь в рамках одной главы приведена основная информация о свойствах этих полупроводниковых материалов, приведены основные особенности технологии и конструкции современных

высокочастотных транзисторов и микросхем на их основе. Рассмотрены основные сферы применения СВЧ ИМС, в том числе для построения фазированных антенных решеток. Дан краткий обзор отечественных предприятий и их достижений в области СВЧ-техники.

Последняя глава – ***глава 20*** носит в определенной степени полемический характер. Она в основном предназначена не техническим специалистам (хотя будет, безусловно, интересна и им), а менеджерам, руководителям предприятий космической и оборонной промышленности, руководителям федеральных и государственных органов, имеющих отношение к разработке и реализации государственной и ведомственной политики в отношении вышеуказанных отраслей.

В этой главе изложены результаты исследований авторами возможных путей решения острой проблемы обеспечения этих приоритетных для государства отраслей ЭКБ с гарантированной надежностью и в требуемых для поступательного развития объемах.

В начале главы авторы на конкретном примере из собственного опыта попытались развеять активно обсуждаемый современными средствами массовой информации миф о недееспособности отечественных разработчиков РЭА КН.

В качестве этого примера изложена история создания РЛС ФАР «Волга», где секретным решением ЦК КПСС и Правительства СССР предписывалось создать станцию на основе собственных оригинальных алгоритмов обработки информации и только с использованием отечественной ЭКБ. Тогда специалисты НИИ ДАР совместно с НИИ ЦЭВТ (г. Москва) разработали алгоритмы и технические задания на ЭКБ, для реализации которых в этот момент в СССР не было даже соответствующей интегральной технологии. Но поскольку было принято политическое решение, их новые технологии и новые, не имеющие зарубежных аналогов, микросхемы были разработаны и освоены в серийном производстве НПО «Интеграл» (параллельно решена задача унификации – вместо 200 ИМС все функции были реализованы на 7-ми ИМС).

Проведен анализ возможных источников стабильного получения современной ЭКБ для космических и военных применений – отечественные, США, Европа и Китай. В результате простого статистического анализа показано, что в настоящее время и в ближайшем будущем отечественная полупроводниковая промышленность не в состоянии удовлетворить в требуемом объеме как текущие, так и возрастающие перспективные потребности РКП и СВ и ВТ в ЭКБ, а поставка иностранной ЭКБ из США и Европы будет проблематичной как по ряду чисто технических вопросов, так и по соображениям геополитического характера. В этой связи в рамках отдельного параграфа представлены в сжатом виде результаты анализа состояния и динамики государственных инвестиций, производственных возможностей и ресурсов разрабатывающих дизайн-центров Китая, который, по мнению авторов, должен стать в ближайшей и среднесрочной перспективе стратегическим партнером России в области совместного производства и поставок ЭКБ для приоритетных отраслей отечественной промышленности – по объемам ежегодных финансовых инвестиций и по их нарастающей динамике, по количеству крупных серийных производственных линий полупроводниковых фабрик (в Китае – больше 170, в СНГ только три – «Микрон» и «Ангстрем» в Зеленограде и «ИНТЕГРАЛ» в Минске), по

количеству разрабатывающих дизайн-центров (в РФ – больше 30-ти, в КНР – более 370-ти). Сравнение не в пользу отечественной полупроводниковой отрасли. В области освоения космоса Китай проходил в анализируемый период времени все этапы быстрее РФ – то, на что в СССР (РФ) уходило 4-5 лет, Китай преодолевал за год-полтора, а его последние разработки КА уже далеко не копии советских (российских) КА.

Частота отказов и аварий китайских КА почти в два раза меньше отечественных и имеет стойкую тенденцию к снижению, чего нельзя сказать в отношении российских запусков.

20 лет назад США полностью запретили поставки ЭКБ КН в Китай (в отличие от РФ), что послужило стимулом развития оригинальной китайской ЭКБ КН, у которой пока еще много проблемных вопросов, о которых говорится в одном из параграфов этой главы.

В качестве альтернативы закупкам ЭКБ с Запада в этой главе читателю предлагается обсудить два варианта (кроме стратегического альянса с китайской полупроводниковой промышленностью).

Первый вариант – «лобовое решение» – создание в России специализированного (только под задачи РКП и ОПК) научно-производственного полупроводникового кластера в составе крупного интегрирующего центра системного проектирования и двух полупроводниковых фабрик – кремниевой и арсенид-галлиевой (включая опции «нитрид-галлия»).

Второй вариант – создание целой сети небольших мелкосерийных кластеров на основе методов бесшаблонной литографии, которые будут располагаться непосредственно на предприятиях-разработчиках РЭА стратегического назначения, обеспечивая независимость отрасли от поставок иностранной (в перспективе – и китайской) ЭКБ. Включая материалы главы в эту книгу, авторы преследовали только одну цель – активизировать полемику в среде технических специалистов, экспертов, руководителей профильных предприятий РКП и ОПК, чиновников соответствующих министерств, ведомств по поиску путей обеспечения приоритетных отраслей промышленности и оборонного комплекса качественной, надежной и сложнофункциональной ЭКБ.

Перечень условных обозначений

АЛУ – арифметико-логическое устройство
АФТ – алгоритмические функциональные тесты
БАКА – бортовая аппаратура космических аппаратов
БиКМОП БИС – большая интегральная схема на основе биполярных транзисторов и комплементарных МОП-транзисторов
БИС – большая интегральная схема
БЛЭ – базовый логический элемент
БПС – быстрые поверхностные состояния
БПФ – быстрое преобразование Фурье
БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина
БЭ – базовые элементы
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ВПР – время потери работоспособности
ВФХ – вольт-фарадная характеристика
ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
ДМ – диэлектрик-металл
ДП – диэлектрик-полупроводник
ДЦ – дизайн-центр
ЗУ – запоминающее устройство
ИИ – ионизирующее излучение
ИИИ – импульсное ионизирующее излучение
И2Л – интегральная инжекционная логика
ИКН – интегральные компараторы напряжений
ИМС – интегральная микросхема
ИОУ – интегральные операционные усилители
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КА – космический аппарат
КЛА – космический летательный аппарат
КМОП ИМС – интегральная микросхема на комплементарных МОП-транзисторах
КН – компараторы напряжений
КНИ – «кремний-на-изоляторе»
КНС – «кремний-на-сапфире»
КО – катастрофические отказы
ЛЭ – логический элемент
МДП – металл-диэлектрик-полупроводник
МКС – межпланетная космическая станция
МНОП – металл-нитрид-окисел-полупроводник
МОП – металл-окисел-полупроводник
МОПТ – МОП-транзистор
ННЗ – неосновные носители заряда
НПО – научно-производственное объединение
НТЦ – научно-технический центр

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОУ – операционные усилители
ПЗС – микросхема на основе использования поверхностных зарядовых состояний
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ППЗУ – постоянное программируемое ЗУ
ПС – поверхностные состояния
РД – радиационные дефекты
РН – ракета-носитель
РПЗУ – репрограммируемое ПЗУ
РС – радиационная стойкость
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
СА – спускаемый аппарат
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВВФ – специальные внешние воздействующие факторы
СЖР – сверхжесткое рентгеновское (излучение)
СИИ – стационарное ионизирующее излучение
СН – стабилизаторы напряжения
СОЗУ – статическое оперативное запоминающее устройство
ТКН – температурный коэффициент напряжения
ТНЧ – тяжелые незаряжанные частицы
ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
ТТЛШ – транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки
ТУ – технические условия
ТЭ – тиристорный эффект
УБР – уровень бессбойной работы
УСИ – уровень сохранности информации
УФО – уровень функционального отказа
ФК – функциональный контроль
ЭЗ – элементы защиты
ЭКБ – элементно-компонентная база
ЭМИ – электромагнитное излучение
ЭНПО – экспериментальное научно-производственное объединение
ЭП – элементы памяти
ЭС – элементы согласования
ЭСЗ – электростатический заряд
ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика
ЭСП – эффект сверхглубокого проникновения
ЭСППЗУ – электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство (EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)
ЭСР – электростатический заряд
ЭТТ – электротермотренировка
ЯП – ячейка памяти

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

1.1. Основные направления развития космической промышленности

В настоящее время космические технологии так широко вошли в современную жизнь человечества, что отказ от них отбросил бы развитие цивилизации далеко назад, поскольку только с использованием возможностей космической отрасли возможно решение задач развития как современного индустриального общества в целом, так и отдельного суверенного и индустриально развитого государства.

Главной целью государственной политики в области развития космической промышленности любой современной страны в конечном счете является выход этой страны на качественно новый уровень науки, технологий и промышленных возможностей. Прежде всего – это защита государственных, научных и экономических интересов страны в области космической деятельности; укрепление обороны и безопасности государства; укрепление кадрового потенциала промышленности; разработка современных и перспективных отечественных космических средств, приборов, стратегических материалов, средств связи и управления; накопление и совершенствование научных знаний о Земле, Вселенной и космическом пространстве, расширение международной космической кооперации в деле совместных научных исследований и освоения космоса и многое другое.

Говоря прагматичным языком, приобретение страной статуса космической державы должно принести конкретную пользу и материальную выгоду социально-экономическому развитию страны.

Кроме очевидных задач обеспечения обороны, национальной безопасности (космическая разведка, космическая связь и управление, системы раннего обнаружения пусков баллистических ракет) и технологической независимости только использование космических технологий может обеспечить государству решение многообразных народнохозяйственных и технических задач в следующих сферах:

- глобальная многоканальная связь;
- многопрограммные радио- и телевещание;
- высокоточная оперативная навигация всех транспортных и других объектов;
- достоверное метеорологическое обеспечение;
- оповещение о чрезвычайных ситуациях;
- экологический мониторинг;
- глобальное оперативное спасение;
- изучение природных ресурсов – дистанционный поиск полезных ископаемых;
- новейшие высокие технологии и материалы;
- расширение знаний о Вселенной;
- медико-биологические исследования.

Реализация наиболее насущных потребностей каждого государства в этих сферах в настоящее время осуществляется в рамках национальных космических программ, направленных на создание перспективной космической техники и технологий.

В то же время в мире наблюдается тенденция интеграции космических средств и технологий различных стран с целью обеспечения более эффективного использования выделяемых национальными бюджетами весьма значительных бюджетных финансовых средств, необходимых для развития КП, что позволяет ускорить развитие и совместное использование их космического потенциала в интересах решения социально-экономических, оборонных и научных задач, стоящих перед этими странами. Необходимость и актуальность такой интеграции средств и технологий подтверждается общими потребностями стран в:

- обеспечении потребителей недорогой качественной космической информацией дистанционного зондирования Земли, в том числе с использованием центров предоставления космических услуг;
- развитии международного сотрудничества в области создания и совместного использования космического потенциала;
- создании устойчивой кооперации предприятий и организаций по разработке перспективных космических средств и технологий, включая микро- и нанотехнологии.

В качестве примера практической реализации таких интеграционных процессов в научно-технологической и производственной сферах на постсоветском пространстве следует отметить успешную реализацию по космической тематике ряда совместных программ Союзного государства Российской федерации и Республики Беларусь [1–3].

Первой стала запущенная в 1998 году программа «Разработка и использование космических средств и технологий получения, обработки и отображения космической информации» («Космос-БР»), одной из задач которой, помимо собственно реализации заданий программы, было восстановление разорванных с распадом СССР научно-производственных связей между предприятиями и организациями космической отрасли двух государств.

Продолжением «Космос-БР» стала вторая совместная программа «Разработка и исследование перспективных космических средств и технологий в интересах социально-экономического развития Союзного государства» на 2004–2007 годы («Космос-СГ»), в результате реализации которой белорусские и российские партнеры создали современный технический комплекс приемной космической информации системы дистанционного зондирования Земли, целый ряд современных технических и программных средств и технологии обработки и дешифровки космических снимков, мобильный образец контрольно-корректирующей станции для высокоточного определения координат и многое другое.

В 2011 году завершилась реализация третьей российско-белорусской программы «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» на 2008–2011 годы («Космос-НТ»). В ее рамках были созданы более чем 25 экспериментальных образцов космических средств и 18 экспериментальных наукоемких технологий в интересах космической отрасли Беларуси и России.

Завершена также совместная программа «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» на 2009–2012 годы («Нанотехнология-СГ»).

Актуальность полученных результатов обусловлена необходимостью повышения устойчивости космических средств к факторам космического пространства, потребностью в снижении их массогабаритных характеристик и удешевлении производства элементной базы для применения в космической, а также в других отраслях техники.

Необходимо в этой связи отметить только два важнейших направления дальнейшего российско-белорусского сотрудничества в сфере космических технологий и их применений.

Прежде всего, это разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли, а также создание соответствующих центров предоставления космических услуг. Эта задача занимает наиболее важную роль в интеграции космических средств и технологий России и Беларуси. В ходе ее реализации будут обеспечены возможности получения доступной и качественной космической информации широким кругом потребителей, создание средств, технологий и программных комплексов в интересах повышения надежности, работоспособности и живучести космических средств дистанционного зондирования Земли.

Второе направление относится к совместной разработке комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств, целью которого является достижение существенного снижения массы и габаритов КА, а также повышение надежности и сроков функционирования элементов, устройств и систем ракетно-космической техники, сокращение затрат на их разработку и эксплуатацию.

В частности, это позволит создать и освоить в космической промышленности комплексные технологии создания широкой номенклатуры элементов ракетно-космической техники с повышенными эксплуатационными характеристиками, в том числе:

- системы терморегулирования и электропитания;
- бортовые комплексы управления;
- широкую номенклатуру унифицированной ЭКБ КН;
- специальные узлы и элементы малогабаритных космических аппаратов;
- высоконадежные теплонапряженные узлы двигательных установок;
- наноэлектронные устройства сверхнизкого энергопотребления;
- функциональные наноструктурные сенсоры различного назначения и многое другое, что позволит повысить функциональные характеристики космических средств и их надежность в период ввода в строй и эксплуатации.

За последнее десятилетие в производстве российской ракетно-космической техники произошли существенные изменения. Резко сократился объем производства, ряд серийных изделий сняты с производства, одновременно идет процесс освоения новых высокотехнологичных изделий. При этом РКП в основном сохранила существовавшие ранее организационно-технологическую структуру пред-

приятий, парк технологического оборудования и оснащения, принципы технологической подготовки производства.

Государственная политика по развитию и технологической модернизации ракетно-космической промышленности России реализуется в соответствии со «Стратегией развития ракетно-космической промышленности на период до 2015 года» по следующим целевым программам [4, 5, 6]:

- Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы (ФКПР-2015);
- ФЦП «Глобальная навигационная система» на 2002–2011 годы (ФЦП «ГЛОНАСС»);
- ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007–2010 годы и на период до 2015 года» (ФЦП «Развитие ОПК-2015»);
- ФЦП «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы, а также в проектах:
- ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии РФ» на 2007–2010 годы;
- ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы.

Следует отметить, что успех любых космических, в том числе и военных программ напрямую зависит от номенклатуры, функциональных возможностей и качества элементной базы, составляющей основу любой современной аппаратуры как общего, так и специального назначения.

Космическая микроэлектроника как самостоятельное направление научно-технического процесса включает в себя целый комплекс взаимосвязанных направлений – от исследований свойств новых материалов и физических механизмов применения параметров микросхем в условиях их работы в космосе, до разработки новых технологий и методов проектирования микросхем, специальных методов повышения их помехоустойчивости, надежности, устойчивости к ионизирующим воздействиям, снижения статического и динамического энергопотребления при существенном возрастании как плотности упаковки кристаллов, так и их рабочих (тактовых) частот.

Приоритетными направлениями государственной политики РФ в этой области являются следующие.

1. ***Создание космических комплексов и систем*** нового поколения с техническими характеристиками, обеспечивающими их высокую конкурентоспособность на мировом рынке, в том числе:

- развитие современных средств выведения, модернизация действующих ракет-носителей и разработка новых ракет-носителей и разгонных блоков;
- создание ракеты-носителя среднего класса для выведения пилотируемого космического корабля нового поколения, космических спутников с увеличенным сроком активного существования;
- подготовка к реализации прорывных проектов в области космических технологий и исследований космического пространства.

2. ***Завершение создания и развитие системы ГЛОНАСС***, в частности:

- развертывание спутниковой группировки на базе аппаратов нового поколения с длительным сроком активного существования (не менее 12 лет) и повышенными техническими характеристиками;

- создание наземного комплекса управления и создание оборудования для конечных пользователей, его продвижение на мировой рынок, обеспечение сопряженности аппаратуры ГЛОНАСС и GPS.

3. ***Развитие спутниковой группировки***, в том числе создание группировки спутников связи, обеспечивающих рост использования всех видов связи – фиксированной, подвижной, персональной (на всей территории Российской Федерации); создание группировки метеорологических спутников, способных передавать информацию в реальном масштабе времени.

В долгосрочной перспективе интересы поддержания высокой конкурентоспособности на рынке передачи информации потребуют качественного скачка в повышения интервала «конкурентного существования» спутников связи. Это может быть достигнуто только путем создания технологий производства «многоразовых» спутников связи, т.е. таких, которые будут изначально проектироваться и создаваться с возможностью их обслуживания, заправки ракетным топливом, ремонта и модернизации непосредственно на орбите. В итоге такого технологического развития планируется появление к 2025 году массивных орбитальных платформ, на которых будет размещаться различная целевая аппаратура и другое оборудование, в том числе энергетическое, допускающее обслуживание или замену.

4. ***Расширение присутствия России на мировом космическом рынке***, в том числе:

- удержание лидирующих позиций на традиционных рынках космических услуг (коммерческие пуски – до 30%);
- расширение присутствия на рынке производства коммерческих космических аппаратов;
- расширение продвижения на внешние рынки отдельных компонент ракетно-космической техники и соответствующих технологий;
- выход на высокотехнологические сектора мирового рынка (производство наземной аппаратуры спутниковой связи и навигации, дистанционное зондирование земли);
- создание и модернизация системы российского сегмента международной космической станции (МКС).

5. ***Модернизация наземной космической инфраструктуры и технологического уровня ракетно-космической промышленности***, в частности:

- техническое и технологическое перевооружение предприятий отрасли, внедрение новых технологий, оптимизация технологической структуры отрасли;
- развитие системы космодромов, оснащение новым оборудованием наземных средств управления, систем связи, экспериментальной и производственной базы ракетно-космической промышленности.

Государственной программой развития ракетно-космического комплекса РФ на период до 2025 г. предусмотрено первоочередное развитие следующих технологических направлений:

- космические системы навигации;
- космические системы ретрансляции информации;
- гидрометеорологические космические средства;
- космические средства дистанционного зондирования Земли;

- спутниковые системы связи и вещания;
- космические средства геодезического и картографического обеспечения;
- космические средства связи и боевого управления;
- космические средства предупреждения о ракетном нападении;
- космические средства радиоэлектронной разведки;
- космические комплексы оптикоэлектронного наблюдения;
- космические средства многоцелевого радиолокационного наблюдения;
- космические средства наблюдения за морскими акваториями.

Решение одной из основных проблем, оказывающих негативное влияние на реализацию программ развития отечественной ракетно-космической техники, ее обеспечение современной радиационно-стойкой электронной компонентной базой предусматривается за счет реализации (при координирующей роли Минпромторга России) мероприятий в рамках федеральной целевой программы по развитию радиоэлектронной промышленности.

Независимый доступ в космическое пространство предусматривается обеспечить за счет развития и использования космодрома «Плесецк», аренды космодрома «Байконур» и строительства нового отечественного космодрома «Восточный», создаваемого во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 6 ноября 2007 г. «О космодроме «Восточный».

В результате реализации государственной программы должны быть:

- создан и принят в эксплуатацию космический ракетный комплекс «Ангара-А5», модернизированы объекты и обеспечена эффективная эксплуатация космодромов «Плесецк» и «Байконур»;
- созданы первая (2015 год) и вторая (2018 год) очереди объектов нового российского космодрома «Восточный»;
- развернута орбитальная группировка космических аппаратов в интересах удовлетворения государственных нужд в количестве: 95 космических аппаратов в 2015 году, 113 космических аппаратов в 2020 году, в том числе развернутый российский сегмент Международной космической станции в составе 6 модулей – в 2015 году, 7 модулей в 2018 году;
- обеспечен необходимый состав орбитальной группировки системы ГЛОНАСС, обновленный космическими аппаратами «Глонасс-К» с расширенными функциональными возможностями. К 2015 году система будет обеспечивать точность определения местоположения потребителями порядка 1,4 м, а к 2020 году – около 0,6 м;
- создан научно-технический задел по перспективным образцам ракетно-космической техники, в том числе обеспечена в 2018 году готовность транспортно-энергетического модуля с перспективной двигательной установкой к летно-конструкторским испытаниям;
- разработаны новые конкурентоспособные производственные технологии, технологии спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли, навигационного обеспечения, поиска и спасания терпящих бедствие, мониторинга чрезвычайных ситуаций, слежения и мониторинга подвижных объектов с использованием космической автоматической идентификационной системы и персональных радиобуев.

В области фундаментальных космических исследований будут реализованы проекты, которые позволят преодолеть сложившееся отставание от ведущих космических держав в этой области и обеспечить выход российской науки на ведущие позиции в основных направлениях наук о космосе, а в долгосрочной перспективе – стать одним из мировых лидеров в исследованиях Вселенной. В частности, планируется:

- создание трех космических обсерваторий – «Спектр-УФ», «Спектр-М» («Миллиметрон») и «Гамма-400» для проведения исследований астрофизических объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра и гамма-излучения в диапазоне высоких энергий;
- развертывание программы по углубленному изучению Луны – осуществление миссий орбитального аппарата «Луна-Глоб», посадочных аппаратов «Луна-Ресурс» (этапы 1 и 2), а также миссии по доставке на Землю образцов лунного грунта для детального изучения;
- развитие целого класса новых технологий – технологий межпланетных полетов и напланетной деятельности человека;
- создание перспективной пилотируемой транспортной системы, способной обеспечить полеты человека к Луне.

К результатам государственной программы, способствующим расширению спектра предоставляемых услуг к 2020 году, относятся:

в части космических средств связи, вещания и ретрансляции –

- создание полномасштабной многофункциональной космической системы ретрансляции, что позволит повысить эффективность использования отечественных низкоорбитальных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, средств выведения и российского сегмента Международной космической станции;
- наращивание орбитальной группировки систем фиксированной связи, подвижной президентской связи и телерадиовещания космическими аппаратами нового поколения до 39 аппаратов, что позволит осуществлять предоставление указанных услуг связи практически на всей территории Российской Федерации, включая Арктический регион;

в части средств дистанционного зондирования Земли и гидрометеорологического наблюдения –

- увеличение до 24 космических аппаратов орбитальной группировки за счет развертывания принципиально новых космических систем, предназначенных для решения задач картографии, контроля состояния природной среды, оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, инвентаризации природных ресурсов, обеспечения рационального ведения сельскохозяйственной, водной и других видов деятельности, мониторинга Арктического региона.

Успешное выполнение мероприятий государственной программы будет способствовать развитию и использованию отечественной космической техники в интересах социально-экономической сферы, расширению присутствия России на мировом космическом рынке, решению амбициозных задач исследования и освоения космического пространства, обеспечению гарантированного доступа Рос-

сии в космическое пространство со своей территории, сохранению ведущих позиций в пилотируемых полетах [7].

1.2. Классификация современных космических аппаратов

Космический аппарат (КА) – общее название технических устройств, используемых для выполнения разнообразных задач в космическом пространстве, а также проведения исследовательских и иного рода работ вблизи или на поверхности различных небесных тел. Средствами доставки космических аппаратов на орбиту служат ракеты-носители или ракетоносители (РН).

Космический аппарат, одной из основных задач которого является транспортировка людей или оборудования в верхней части земной атмосферы – так называемом ближнем космосе, называют космическим кораблем (КК) или космическим летательным аппаратом (КЛА).

В зависимости от областей использования КА подразделяются на:

- суборбитальные;
- околоземные орбитальные, движущиеся по геоцентрическим орбитам искусственных спутников Земли;
- межпланетные (экспедиционные);
- напланетные (луноходы, марсоходы и пр.).

Принято различать автоматические спутники (ИСЗ) Земли и пилотируемые космические аппараты. К пилотируемым космическим аппаратам, в частности, относят все виды пилотируемых космических кораблей (КК) и орбитальных космических станций (ОС). Несмотря на то, что современные орбитальные станции совершают свой полет в области ближнего космоса и формально могут называться космическими летательными аппаратами, в сложившейся традиции их называют космическими аппаратами.

Название «космический летательный аппарат» иногда также используется для обозначения активных (то есть маневрирующих) ИСЗ с целью подчеркивания их отличий от пассивных спутников. В большинстве же случаев значения терминов «Космический летательный аппарат» и «космический аппарат» синонимичны и взаимозаменяемы.

В активно исследуемых в последнее время проектах создания орбитально-гиперзвуковых летательных аппаратов как частей авиационно-космических систем (АКС) часто используют еще названия *«воздушно-космический аппарат»* (ВКА), обозначая *космопланы* и *космолеты* АКС, предназначенные для выполнения управляемого полета как в безвоздушном космическом пространстве, так и в плотной атмосфере Земли.

В то время как стран, имеющих ИСЗ, несколько десятков, наиболее сложные технологии автоматических возвращаемых и межпланетных КА освоили всего несколько стран – СССР/Россия, США, Китай, Япония, Индия, Европа/ESA. Пилотируемые КК имеют только первые три из них (кроме того, Япония и Европа имеют КА, посещаемые людьми на орбите, в виде модулей и грузовиков МКС).

Также только первые три из них имеют технологии перехвата ИСЗ на орбите (хотя Япония и Европа близки к ней ввиду проведения стыковок).

Еще типы КА различают в зависимости от их режимов работы, выполняемых функций, по наличию функции возвращения на Землю, в зависимости от их массы, по типу управления, по типу двигательной установки, для ближнего или дальнего космоса.

По ***режиму работы*** различают следующие типы космических аппаратов:

- искусственные спутники Земли – общее название всех аппаратов, находящихся на геоцентрической орбите (вращающихся вокруг Земли);
- автоматические межпланетные станции (или космические зонды) – аппараты, осуществляющие перелет между Землей и другими космическими телами Солнечной системы; при этом они могут как выходить на орбиту вокруг изучаемого тела, так и исследовать их с пролетных траекторий, некоторые аппараты после этого направляются за пределы Солнечной системы;
- космические корабли, автоматические или пилотируемые, используются для доставки грузов и человека на орбиту Земли; существуют планы полетов на орбиты других планет;
- орбитальные станции – аппараты, предназначенные для долговременного пребывания и работы людей на орбите Земли;
- спускаемые аппараты – используются для доставки людей и материалов с орбиты вокруг планеты или межпланетной траектории на поверхность планеты;
- планетоходы – автоматические лабораторные комплексы или транспортные средства, для перемещения по поверхности планеты и другого небесного тела.

По наличию ***функции возвращения*** КА подразделяются на две группы:

- возвращаемые – предусматривают возвращения людей и материалов на Землю, осуществляя мягкую либо жесткую посадку;
- невозвращаемые – при выработке ресурса обычно сходят с орбиты и сгорают в атмосфере.

По ***выполняемым функциям*** выделяют следующие классы КА:

- метеорологические;
- навигационные;
- спутники связи, телевещания, телекоммуникационные спутники;
- научно-исследовательские;
- геофизические;
- геодезические;
- астрономические;
- дистанционного зондирования Земли;
- разведывательные и военные спутники;
- другие.

Следует отметить, что многие современные космические аппараты выполняют сразу несколько функций.

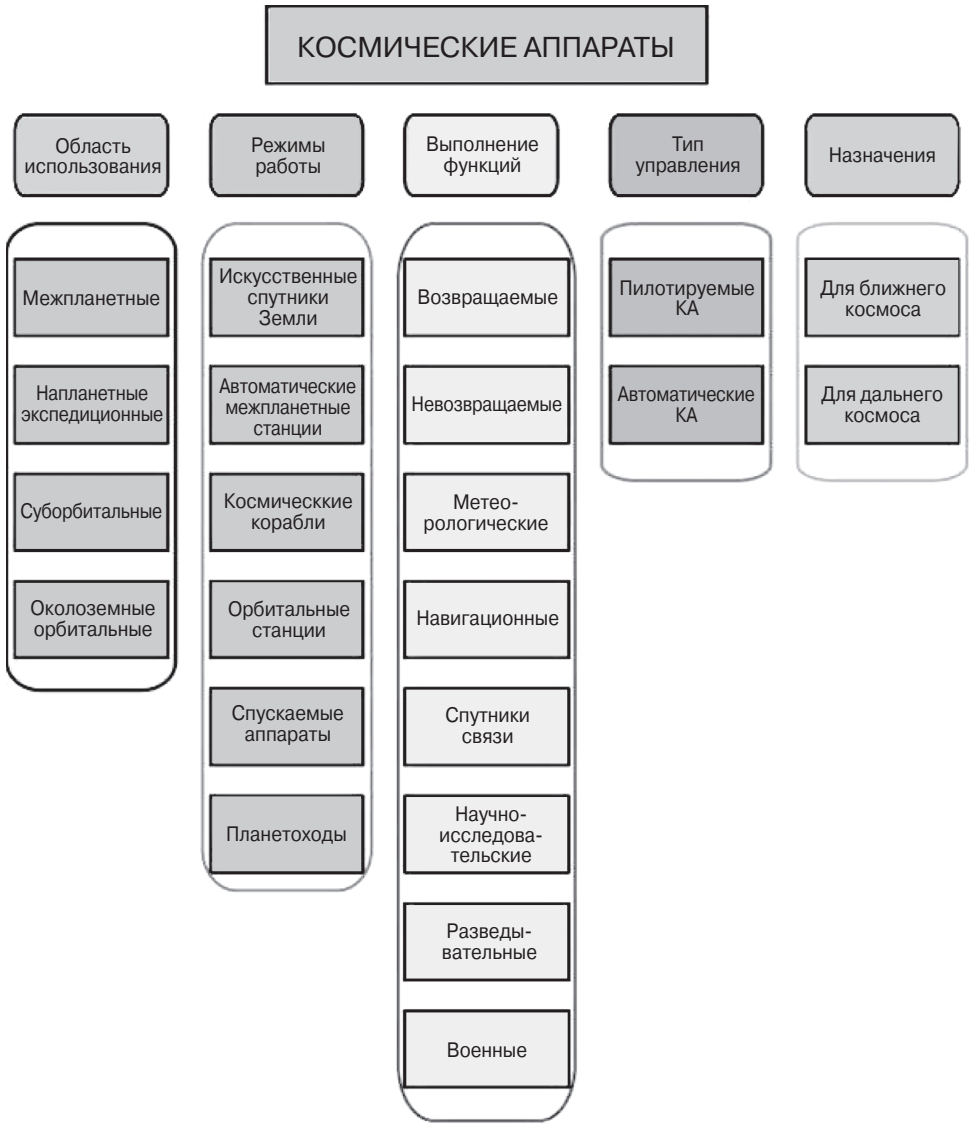


Рис 1.1. Классификация космических аппаратов

По ***массовым характеристикам*** КА принято классифицировать следующим образом:

- фемто- – до 100 г;
- пико- – до 1 кг;
- нано- – 1–10 кг;
- микро- – 10–100 кг;
- мини- – 100–500 кг;
- малые – 500–1000 кг;
- большие – более 1000 кг.

Следовательно, любой КА с весом больше 10 кг, но меньше 100 кг должен называться микроспутником, а КА с весом от 500 кг до одной тонны будет называться малым космическим аппаратом.

По типу управления КА разделяют на автоматические и пилотируемые. По типу используемых двигательных установок КА различают следующим образом:

КА с двигательными установками большой тяги, КУ с двигательными установками на ядерном топливе, КУ на двигательных установках на химическом (жидком или твердом) топливе.

Различают КА по областям использования – ближнего и дальнего космоса.

КА для ближнего космоса: околоземные КА (ИСЗ, обсерватории, обитаемые орбитальные станции). КА для дальнего космоса: межпланетные КА (спутники планет, десантные, пролетные).

1.3. Конструкции и устройство космических аппаратов

Первый в мире космический аппарат был запущен в СССР 4 октября 1957 г., первый пилотируемый космический аппарат-корабль «Восток-1» под управлением гражданина СССР Ю.А. Гагарина – 12 апреля 1961 г. За прошедшие почти семь десятилетий с момента первого космического старта (не считая двадцати предыдущих лет исследований и экспериментов) конструкции космических аппаратов (КА) непрерывно совершенствовались. Значительный вклад в эволюцию конструкций КА внесли так называемые «испытательные» космические аппараты, которые проектировались специально для проверки и отработки в реальных условиях космического полета элементов конструкции, систем, узлов, агрегатов и блоков, способов их оптимального применения, возможных путей их унификации.

Если в СССР в качестве автоматических испытательных КА широко использовались различные модификации КА практически только одной серии «Космос», то в США – целый ряд КА: «ATS», «GGTS», «0V», «Додж», «TTS», «SERT», «RW» и др.

Несмотря на большое многообразие конструкций КА, общим для всех устройств является наличие корпуса с набором различных конструктивных элементов (так называемое «обеспечивающее» оборудование) и специальная (целевая) радиоэлектронная аппаратура [7].

Корпус КА является конструктивно-компоновочной основой для установки и размещения всех его элементов и соответствующей аппаратуры. Например, для автоматического КА обеспечивающее оборудование предусматривает наличие как минимум следующих бортовых систем: ориентации и стабилизации, терморегулирования, энергопитания, телеметрии, траекторных измерений, управления и навигации, командно-программной, различных исполнительных органов и т.п.

На пилотируемых КА и космических станциях, кроме того, имеются системы жизнеобеспечения, аварийного спасения и т.п.

В свою очередь, целевая аппаратура КА может быть оптической (оптико-электронной), фотографической, телевизионной, инфракрасной, радиолокационной, радиотехнической, спектрометрической, рентгеновской, радиосвязи и ретранс-

ляции, радиотехнической, радиометрической, калориметрической и т.п. Более детально описание этих систем приведено в следующем параграфе, но отметим, что все эти системы (их структура, функции, конфигурация и т.п.), используют самую современную ЭКБ.

Естественно, конфигурации КА зависят от их назначения и уже поэтому значительно различаются – это ракеты-носители (РН), осуществляющие выведение КА на требуемые орбиты и траектории, разгонно-тормозные блоки КА, включающие маршевые и корректирующие двигатели, топливные отсеки, агрегаты и системы обслуживания (обеспечивают переход КА с низкой орбиты на более высокую или межпланетную, осуществляют обратные переходы – с высокой орбиты на низкую, коррекцию траекторных параметров и т.д.).

С конструкцией КА неразрывно связано понятие «компоновка» КА – наиболее рациональное и максимально плотное пространственное размещение составляющих элементов. При этом различают внутреннюю и внешнюю (аэродинамическую) компоновку КА [7].

Задача разработки конструкции конкретного КА является достаточно сложной, поскольку необходимо учитывать очень много факторов, зачастую противоречащих друг другу. Например, необходимо обеспечивать минимальное количество связей КА с наземным комплексом (особенно это касается РН), безопасность и комфортность экипажа (для пилотируемых КА), безопасную эксплуатацию и обслуживание на стартовой позиции и в полете, обеспечение заданных параметров устойчивости, управляемости, тепловых режимов и аэродинамических характеристик работы КА и многое другое [8, 9].

Задача конструкторов КА усложняется тем, что критерием оптимальности их решения является не только минимизация массы КА, но и его стоимости и сроков создания при гарантированном обеспечении параметров надежности, многофункциональности и др.

На нижеследующих рисунках представлена эволюция типовых конструкций различных КА.

Так, на рис. 1.2 представлен внешний вид первого космического аппарата Земли «Восток-1», поднявшего первого человека на околоземную орбиту.

Как известно, стартовавший с Байконура корабль выполнил всего лишь один (на зато первый в истории человечества) оборот вокруг планеты Земля, причем полет проходил полностью в автоматическом режиме, при котором первый космонавт Земли был как бы «пассажиром», готовым в любой момент переключить управление на себя. Хотя реально по нашей классификации это был не «пилотируемый» полет, а полет полностью в автоматическом режиме, но это как раз тот случай, когда классификация не всегда правильно отражает суть происходящего процесса (явления, события).

На рис. 1.3 представлен общий вид конструкции одного из первых (1977 г.) КА дальнего проникновения (так называемый «космический зонд») серии Voyager (наиболее известные КА – Voyager-1 и Voyager-2). По некоторым литературным источникам, этот 723-килограммовый автоматический зонд, запущенный 5 сентября 1977 г. и предназначенный для исследований Солнечной системы и ее ближайших окрестностей, к удивлению его создателей до сих пор находится в нор-

мальном рабочем состоянии и в связи с этим обстоятельством выполняет даже новую (дополнительную) миссию – по определению местонахождения границ Солнечной системы, включая «пояс Койпера» (Пояс астероидов), хотя по замыслу разработчиков его первоначальная основная миссия заключалась лишь в исследовании двух планет – Юпитера и Сатурна (он был первым зондом, сделавшим детальные снимки всех спутников этих планет).

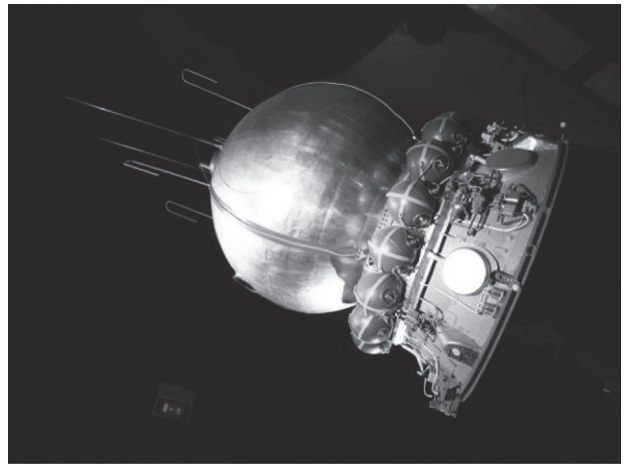


Рис. 1.2. Пилотируемый корабль «Восток-1»

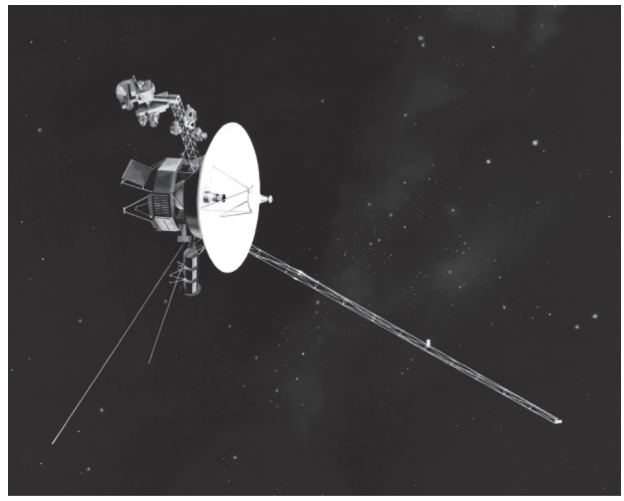


Рис. 1.3. Космический аппарат дальнего проникновения серии Voyager

Такое длительное активное существование КА обусловлено прежде всего оптимальными принятыми инженерными решениями при создании электронной бортовой аппаратуры, грамотным выбором соответствующей ЭКБ для комплектации его бортовых систем.

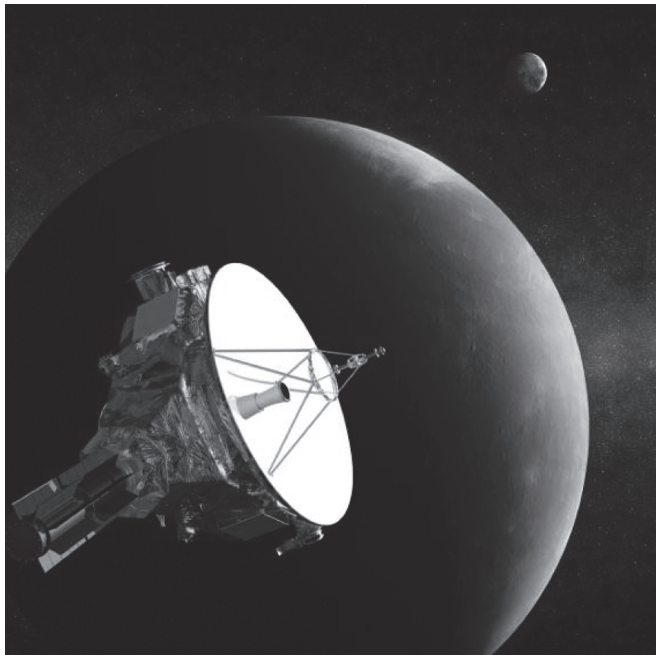


Рис. 1.4. Общий вид конструкции автоматической межпланетной станции НАСА, разработанной в рамках программы «Новые рубежи»

На рис. 1.4 представлен общий вид конструкции автоматической межпланетной станции НАСА (США), предназначенной для изучения Плутона и его естественного спутника Харона. Миссия предусматривает, кроме изучения Плутона и его спутника, достижение к 2015 году орбиты Плутона и изучение Пояса астероидов («пояса Койпера»).

Как видно из сравнения рис. 1.3 и 1.4, общий вид конструкций различных КА внешне примерно одинаков, но при рассмотрении деталей и конструктивных элементов становится очевидным их различие, связанное с различным функциональным назначением. Причем если унификация конструктивных решений КА имеет свои ограничения, то унификация технических решений электронных бортовых систем является жизненно важной задачей, одним из условий успешного решения которой является унификация номенклатуры и технических характеристик используемой ЭКБ. К сожалению, отечественным разработчикам РКТ эту задачу до сих пор решить не удалось.

На рис. 1.5 на фоне «колец Сатурна» представлен общий вид конструкции другого межпланетного зонда Cassini-Huygens, предназначенного для исследований сразу двух планет Солнечной системы – Сатурна (его «колец» и спутников) и Титана.

В отличие от предыдущих КА, разработанных Россией и США, этот КА является первым плодом глобализации в космической отрасли – объединения усилий сразу нескольких космических держав и организаций – США (НАСА), Европейского космического агентства и Итальянского космического агентства.

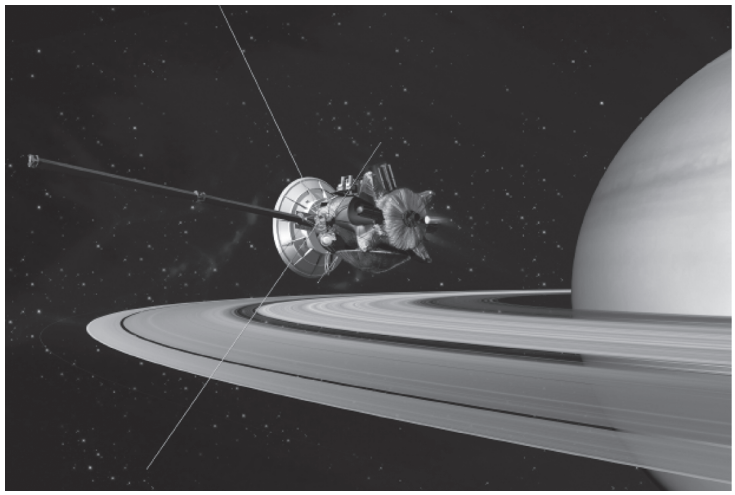


Рис. 1.5. Межпланетный зонд Cassini-Huygens

Конструкция аппарата состоит из двух самодостаточных элементов – станции Cassini и «спускаемого» аппарата (зонда) Huygens, предназначенного для автоматической посадки и автономной работы на Титане.

Этот пример демонстрирует высокую эффективность объединения усилий конструкторов разных стран и школ на решение амбициозных программ научных исследований. Как известно, этот комбинированный межпланетный КА был запущен в 1997 г. и в 2004 г. успешно достиг системы Сатурн, выполнил весь цикл необходимых исследований и продолжил миссию – 25 декабря 2004 г. зонд Huygens штатно отделился от головного КА и через год достиг окрестностей Титана, выполнив все запланированные маневры, и совершил успешный спуск в непростых условиях атмосферы этого спутника.

Станция Cassini в результате этой эксплуатации стала первым искусственным спутником Сатурна.

На рис. 1.6 представлен общий вид конструкции стартующего широко известного многоразового транспортного КА «Шаттл».

Как видим, его конструкция является гибридной – «ракетоноситель + собственно КА» и принципиально отличается от вышерассмотренных конструкций КА, представленных на рис. 1.2–1.5. Основное назначение этих космических «челноков» – доставлять полезные грузы на орбитальные космические станции и обратно. Всего было построено пять таких космических систем (причем два из них погибли в катастрофах), и один прототип (по принятой в этой книге классификации – испытательный КА). Программа просуществовала двадцать лет (с 1981 по 2011 г.) и в итоге была признана неэффективной.

Действительно, планировалось что каждый из этих КА будет стартовать два раза в месяц (24 старта в год) и каждый из них совершит не менее ста полетов в космос. На практике в силу ряда объективны причин они использовались значительно меньше (выполнено 135 пусков). Причем больше всего полетов (39) совершил наиболее отработанный вариант «Дискавери».

Рис. 1.6. Американский многоразовый транспортный космический корабль

И, наконец, следует сказать несколько слов о наиболее сложных межпланетных КА – пилотируемых межпланетных кораблях с посадочными возвращающимися модулями, при проектировании которых в максимальной степени анализировались и использовались все полученные ранее знания, опыт, последние достижения микроэлектроники, космического аппаратостроения, материаловедения, космической психологии и др.

На рис. 1.6 представлена сделанная непосредственно после посадки на Луну в далеком 1969 году фотография одного из целой серии межпланетных КА США «Апполон» («Апполон-11»). Опять же, его конструкция и внутренне устройство отличаются от всех вышеописанных КА в силу конкретного целевого назначения и выполняемых функций.

Вот вошедшие уже в историю факты – командир экипажа легендарный Нил Амстронг и пилот Эдвин Ондрин оставались на поверхности Луны в специальном КА «Лунном модуле» в течение 21 часа 36 минут и 21 секунды. Все это время пилот второго КА «командного модуля» Майкл Коллинз ожидал их на так называемой окололунной орбите, поддерживая постоянную радио-видеосвязь как с ними, так и наземным центром управления полетом. Астронавты (к нашему сожалению, не космонавты) совершили один первый выход на поверхность Луны, который продлился долгих 2 часа 31 минуту, 40 секунд, после чего они успешно (почти успешно) вернулись в лунный модуль и успешно стартовали с поверхности Луны, а затем не менее успешно (по плану) стыковались с командным модулем и успешно вернулись на родную землю.

Безусловно, успех этой исторической миссии был обусловлен как использованием новейших достижений в области промышленных технологий, материаловедения, конструкторских решений, информационно-коммуникационных техно-

логий, так и правильным выбором состава ЭКБ КН категории «Спейс» при создании различной бортовой аппаратуры командного и лунного модулей.

Хотя данная книга носит сугубо технический характер, для понимания роли и места микроэлектронных технологий в космическом приборостроении необходимо провести известный только узкому кругу специалистов один из многих неприятных эпизодов, которые могли фактический грандиозный триумф превратить в катастрофу миссии.

Как известно, габариты помещений на обитаемых КА данного типа жестко ограничены, это касается и командных, и лунных модулей данной экспедиции. Возвратившись с поверхности Луны после исторической мисси в лунный модуль в громоздких космических скафандрах, последний входивший член лунной экспедиции при закрытии входного люка случайно повредил (отломал) небольшой пластиковый рычажок, расположенный рядом с этим люком. Рычажок имел всего два положения – «вверх» и «вниз». Его одна, но жизненно важная функция – управление запуском стартового двигателя лунного модуля: положение «вниз» означало «спящий режим», положение «вверх» – означало «старт» (включение автоматической системы управления процессом старта с поверхности Луны).

Поскольку рычажок сломался в положении «вниз», чтобы перевести механические металлизированные контакты в положение, эквивалентное «вверх», астронавтам, а также всем обеспечивающим полет службам пришлось пережить более тридцати крайне неприятных минут.

Кажущуюся анекдотичность ситуации характеризирует следующий факт – после доклада ситуации командиром экипажа астронавту, находящемуся в командном модуле и его передачи описания ситуации в наземный центр управления НАСА, после пятиминутного всеобщего замешательства оттуда последовала первая «ценная» рекомендация одной из многочисленных групп экспертов, всегда присутствующих в ЦУПах: «Возьмите стержень от шариковой ручки и его острой (пишущей) частью механически переместите «ползунок» контакта «вверх». Действительно здравая практическая рекомендация, но для земных условий, а где взять шариковую ручку на Луне? Но одной из отличительных психологических особенностей как наших космонавтов, так и американских астронавтов, является неординарность мышления (есть даже специальные тесты, по которым бракуются от 10 до 15 процентов кандидатов в космонавты (астронавты), у которых все другие параметры полностью соответствуют требованиям).

«Замурованные» в лунном модуле астронавты нашли и использовали острый и тонкий эквивалент стержня шариковой ручки, после чего стартовый двигатель сработал штатно, и вся цепь мероприятий по стыковке с командным модулем и последующим триумфальным возвращением астронавтов на Землю прошла штатно.

В итоге принципиальному инженеру, настойчиво предлагавшему заменить этот механический переключатель на микроэлектронный сенсорный MEMS-ключ, руководство НАСА в суточный срок в порядке компенсации выделило премию в размере оклада и месячную оплаченную путевку для отдыха на Канарских островах (подальше от журналистов), а в конструкцию аналогичных переключателей были введены соответствующие изменения, базирующиеся опять же на достижениях микроэлектронных технологий.

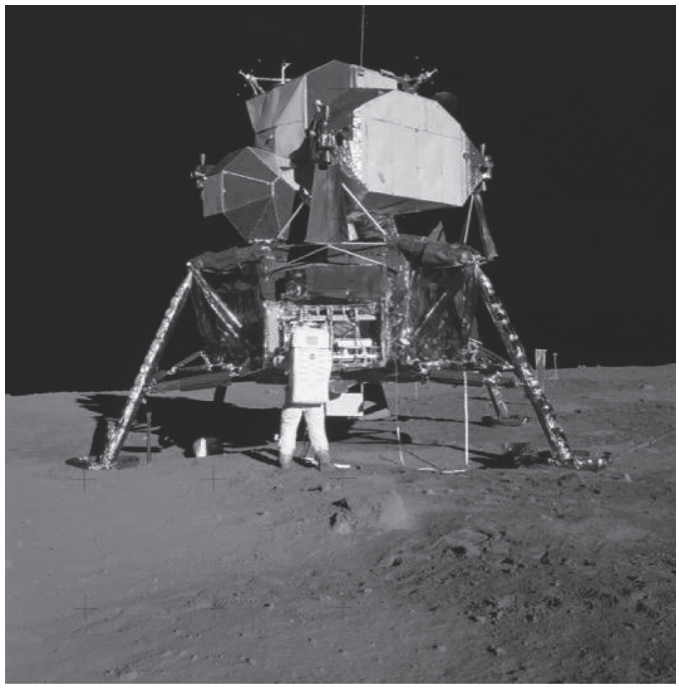


Рис. 1.7. Межпланетный КА «Апполон-11» на Луне

По результатам последующего детального разбора полета непосредственного руководителя этого инженера по-тихому уволили из НАСА с «белым билетом».

Таким образом, можно сделать следующие общие выводы – устройство конкретного КА определяется прежде всего его целевым назначением, но основой организации всех бортовых электронных систем является современная микроэлектронная элементная база, которая должна полностью удовлетворять целому ряду специфических требований, которые будут изложены в последующих главах этой книги.

На рис. 1.8 представлены в общем виде основные области применения микроэлектронной ЭКР в КА. Здесь в правой части рисунка перечислены основные функции, которые должны выполнять бортовые системы КА – накопление и хранение данных, обработка информации и генерация соответствующих команд, интерфейс с экипажем наземных служб, управление различными исполнительными механизмами, организация электропитания, операции преобразования измеряемых величин в аналоговые электрические сигналы и, наоборот, первичная обработка сигналов и др.

В левой части рисунка представлены конкретные направления (классы) ЭКБ, предназначенной для обеспечения реализации этих функций – датчики, операционные усилители, интерфейсные микросхемы, драйверы, схемы силовой электроники, стандартные логические микросхемы, цифровые и аналоговые микросхемы, стабилизаторы напряжений, солнечные элементы (батареи) и пр.

Рис. 1.8. Основные области применения микроэлектронной элементной базы в КА

1.4. Бортовые системы космических аппаратов

1.4.1. Классификация бортовых систем космических аппаратов

Для обеспечения жизнеспособности разнообразных уже эксплуатируемых и только еще проектируемых космических аппаратов (КА) и выполнения ими целевых программ необходимо решить достаточно широкий круг общих задач, присущих всем типам КА. В числе этих задач следующие [13]:

- обеспечение обмена информацией с наземным комплексом управления (НКУ);
- обеспечение снабжения аппарата электроэнергией;
- распределение электропитания на КА между потребителями;
- сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации;
- управление работой систем и оборудования КА в соответствии с программой полета КА и с учетом его реального состояния;
- поддержание требуемого теплового режима на КА;
- определение и поддержание ориентации КА в пространстве;
- обеспечение движения КА в пространстве (перемещение его центра масс);
- обеспечение углового движения КА в пространстве (перемещения вокруг центра масс);
- определение и прогнозирование местоположения КА на орбите;
- управление вращающимися солнечными батареями (при их наличии).

При проектировании первых КА каждая задача решалась автономно – использовалась отдельная специализированная система, содержащая свою сенсорную ап-

паратуру, свои исполнительные органы и соответствующим образом запрограммированную автоматику управления. С усложнением внутреннего устройства КА и увеличением числа решаемых ими задач появилась необходимость в централизации устройств управления и контроля за работой бортовых систем КА, прежде всего, в части рационального расходования и пополнения энергоресурсов, приоритетности и времени выполнения полетных и регламентных операций, автономного реагирования на нештатные ситуации на основе результатов оперативной диагностики и тестирования бортовой аппаратуры и др. Разработка и внедрение на КА вычислительных средств с развитым программным обеспечением (ПО) позволили, в принципе, решить эту проблему. По аналогии с *наземным* комплексом управления (НКУ) появилось понятие *бортового* комплекса управления (БКУ), объединяющего в себе все основные бортовые системы КА и включающего в себя также бортовую вычислительную систему, систему управления движением и навигацией, систему управления бортовой аппаратурой, бортовую аппаратуру служебного канала управления, систему бортовых измерений, а также соответствующее программное обеспечение БКУ, главного интеграционного звена БКУ.

Для более детального рассмотрения принципов построения БКУ автоматических КА с целевой направленностью (связные спутники, КА наблюдения участков звездного пространства, космические аппараты зондирования Земли) перечислим эти основные бортовые системы (рис. 1.9) [13]:

- бортовая вычислительная система в виде совокупности вычислительных средств и устройств сопряжения (интерфейсов и адаптеров связи), обеспечивающая информационное взаимодействие с бортовыми абонентами и предоставляющая свои вычислительные ресурсы для решения задач управления системами КА и задач контроля их работы;
- система управления движением и навигации (иначе – система ориентации и управления движением), предназначенная для управления движением КА как материальной точки (перемещением центра масс), так и для управления угловым движением КА (движением вокруг центра масс);
- система управления бортовой аппаратурой, выполняющая функции коммутации электропитания, усиления и преобразования электрических сигналов, а также выдачи команд управления в системы и приборы КА в соответствии с временными или логическими условиями;
- система бортовых измерений, предназначенная для сбора, обработки и передачи в НКУ телеметрической информации о результатах измерений, характеризующих состояние систем КА и протекающие на КА процессы;
- бортовая аппаратура служебного канала управления или командной радиолинии, представляющая собой радиотехнический комплекс для обеспечения своевременного обмена служебной информацией между НКУ и БКУ;
- объединенная двигательная установка, состоящая из комплекта двигателей для обеспечения перемещения КА относительно орбиты и углового движения КА;
- система обеспечения определенного теплового режима внутри КА;
- система энергоснабжения (СЭС) для преобразования первичной (солнечной) энергии в электрическую.

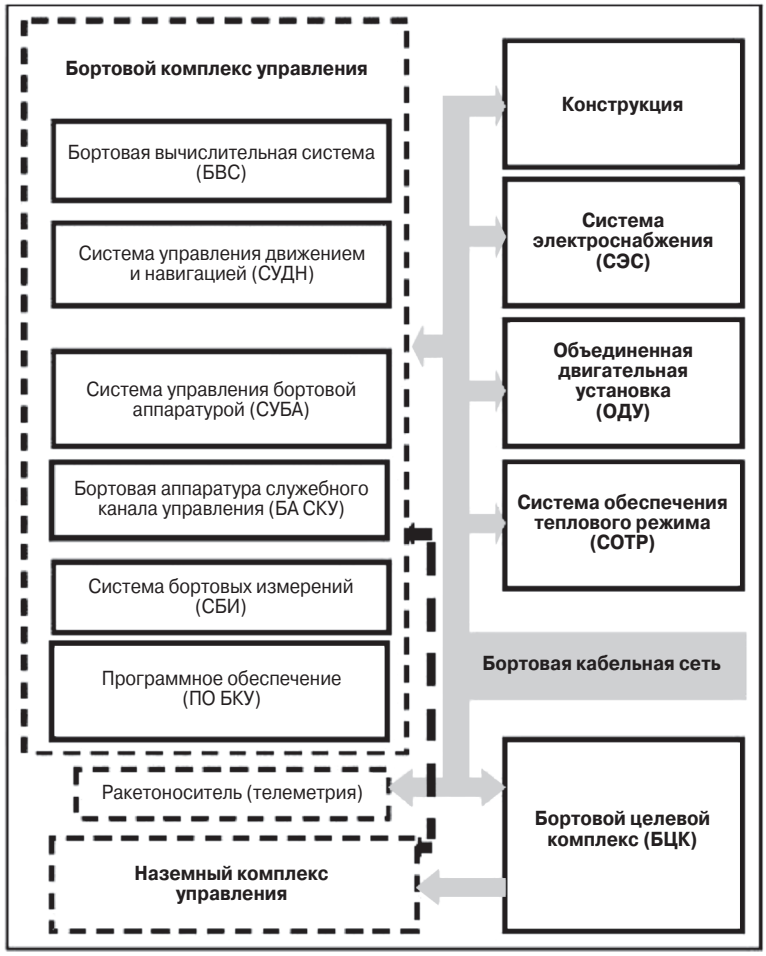


Рис. 1.9. Бортовые системы космического аппарата

В некоторых классах КА в качестве отдельной структурной единицы рассматривается бортовая кабельная сеть.

Внедрение на КА вычислительных средств и новых конструктивно-технологических решений, применение современной элементной базы и средств комплексирования ПО позволили создать основу для построения интегрированных БКУ. Возможность оперативного контроля состояния систем КА и «умного» выполнения программы полета КА с учетом внешней обстановки, текущего статуса бортовых систем и имеющихся на текущий момент времени ресурсов позволила перенести многообразные функции контроля и управления КА в БВС, точнее – в ее ПО. Тенденция концентрации этих функций в бортовой вычислительной системе (ПО БКУ) продолжает усиливаться по мере развития программных и аппаратных средств. Программное обеспечение сформировалось как отдельный (и один из самых главных) компонент БКУ (рис. 1.10). Программное обеспечение БКУ построено по иерархическому принципу [13]:

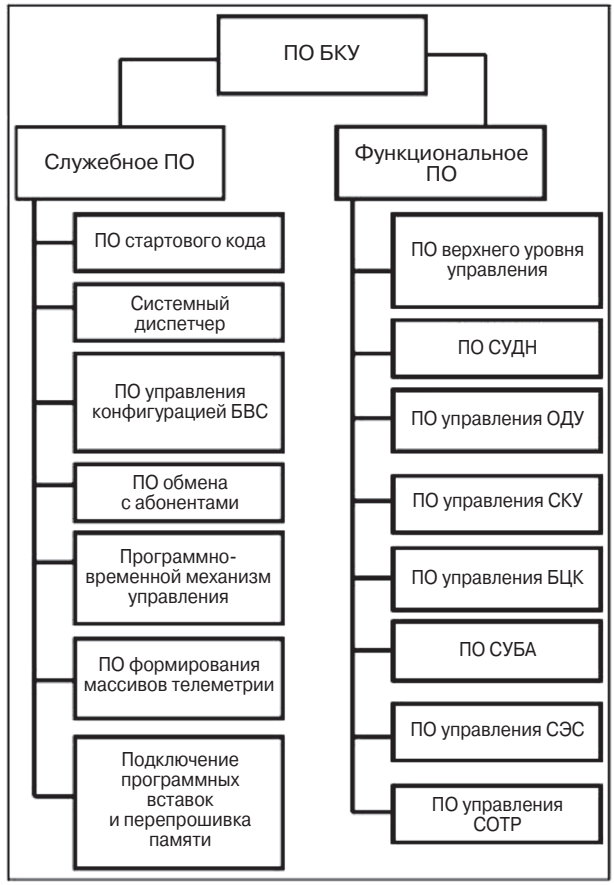


Рис. 1.10. Структура программного обеспечения [13]

- первый, или нижний уровень составляют драйверы обмена с аппаратурой и программы организации вычислительного процесса;
- второй уровень составляют программы обеспечения управления и контроля работы бортовых приборов и оборудования;
- программы третьего уровня включают в себя программы обеспечения полетных режимов бортовых систем и расчетные программы;
- четвертый, или верхний уровень составляют программы планирования и организации режимов работы всего БКУ и контроль состояния систем КА.

Архитектура ПО БКУ подразделяет все программы на служебные (диспетчер, обмен, управление конфигурацией БВС, таймирование и др.) и функциональные (программы включения/выключения конкретных приборов, программы расчета различной подготовительной и сопроводительной информации, программы формирования управляющих воздействий на отдельные приборы и т. п.). Каждая программа (программный модуль) имеет свои настроечные параметры и логико-информационные связи с другими программами. Построение ПО БКУ предполагает детерминированное циркулирование обменной информации между програм-

мами всех уровней, причем управляющая информация поступает сверху вниз (от программ верхних уровней до программ нижних уровней), а контрольно-диагностическая информация – снизу вверх. Для обеспечения функционирования ПО БКУ в реальном масштабе времени каждой программе определяются последовательность и конкретное время подключения на вычислительном такте бортового компьютера, а также ее вычислительные ресурсы.

Интеграционный характер ПО БКУ позволяет выполнять, кроме функций контроля и управления, и другие важные функции и задачи, как, например:

- задачи повиткового планирования полета КА;
- задачи оптимизации расхода бортовых ресурсов;
- функции обеспечения автономности существования КА;
- функции оперативного реагирования на многие нештатные ситуации.

Получение цифровой информации от бортовых систем (напрямую или через СБИ), обмен информацией с НКУ (через БА СКУ), обработка и использование полученной информации в вычислительных задачах, реализованных в ПО, – все это выдвинуло БВС и ПО БКУ на главенствующее место в бортовом комплексе управления. Системы БА СКУ и СБИ в такой конфигурации являются неотъемлемой частью БКУ как источники циркулирующей на КА информации и необходимые звенья, поддерживающие информационно-логические интерфейсы. Следует отметить, что здесь имеются связи между БВС, БА СКУ и СБИ как физические (проводные, через бортовую кабельную сеть и интерфейсные устройства сопряжения), так и «виртуальные» (информационные, через каналы информационного обмена).

Неотъемлемой и основной частью БКУ следует считать и систему управления бортовой аппаратурой. Две важные функции СУБА носят интеграционный характер и являются прерогативой БКУ [13]:

- обеспечение физического (проводного) интерфейса с системами и оборудованием КА и управление ими путем формирования соответствующих команд и сигналов.
- обеспечение всех бортовых потребителей электропитанием.

Все остальные из вышеперечисленных систем решают свои конкретные задачи, жизненно важные для КА, но не являющиеся интеграционными с точки зрения структурного построения БКУ. Из этих систем особо выделим СУДН, часто включаемую разработчиками КА в состав БКУ благодаря следующим аспектам:

- задачи СУДН (ориентация, стабилизация, наведение КА для решения целевых задач и т.д.) – важнейшие и первоочередные;
- данная система (как и СУБА) – одна из первых бортовых систем, она проектировалась и разрабатывалась уже для первых КА;
- программы управления СУДН тесно привязаны к программам управления других систем и программам верхнего уровня ПО БКУ и др.

В состав СУДН включены чувствительные элементы в виде оптико-спектральных датчиков и датчиков угловых скоростей, преобразующие устройства и блоки формирования управляющих сигналов, а также исполнительные органы в виде силовых гироприборов (например, маховиков или гиродинов). Исполнительными органами СУДН служат также двигатели двигательной установки. Состав ап-

паратуры СУДН может дополняться различными навигационными приборами и аппаратурой спутниковой навигации.

Например, основой построения СУДН разработки РКК «Энергия» является корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система, позволяющая в реальном масштабе времени определять текущее положение связанных осей КА относительно инерциальной системы координат путем интегрирования составляющих абсолютной угловой скорости (рис. 1.11) [13].

Функционирование СУДН обеспечивается работой трех контуров управления:

- навигационный контур позволяет определять (прогнозировать) в реальном масштабе времени с заданной точностью местоположение КА на орбите по начальным условиям, определяемым в НКУ или в бортовой навигационной аппаратуре с использованием расчетных гравитационных и магнитных моделей Земли и информации от бортовых навигационных датчиков КА;
- кинематический контур управления ориентацией позволяет определять угловое рассогласование приборного базиса СУДН с неким опорным базисом, задаваемым режимом ориентации; кроме того, кинематический контур уточняет (корректирует) данный опорный базис;
- динамический контур управления ориентацией позволяет совмещать с заданной точностью связанный базис КА с опорным базисом; кроме того динамический контур обеспечивает стабилизацию КА в процессе коррекции орбиты и других динамических операций.

К служебным системам автоматических КА рассматриваемого класса предъявляются сходные по своему составу требования, обусловленные полезной нагрузкой (или БЦК) к служебным системам этих аппаратов. В головных предприятиях космической отрасли наметилась положительная тенденция разработки универсальных космических платформ (УКП), единых для различных типов автоматических КА. Интеграция готовой УКП с новым БЦК путем преемственности систем и приборов УКП и минимизации этапов проектирования и наземной отработки позволяет существенно сократить сроки создания новых КА и финансовые затраты при сохранении показателей качества и надежности.

Степень преемственности существующей космической платформы к применению на КА с новой целевой аппаратурой определяется исходя из характеристик этой аппаратуры и состава требований к УКП, ее обусловленных. Основные характеристики БЦК: энергопотребление, масса, количество фидеров питания, тип интерфейсов и др. В число задач, определяемых условиями работы БЦК, включаются:

- обеспечение точности ориентации и стабилизации КА при работе БЦК;
- обеспечение точности наведения и ее оценка;
- обеспечение заданных параметров рабочей орбиты и длительности эксплуатации КА;
- выполнение заданных режимов работы БЦК и др.

В такой схеме БКУ рассматривается как ядро УКП [13]. Другими словами, БКУ является совокупностью основных служебных систем и бортового ПО, обеспечивающей интеграцию систем УКП при реализации функциональных задач КА на программно-логическом и физическом уровнях через соответствующие интерфейсы.

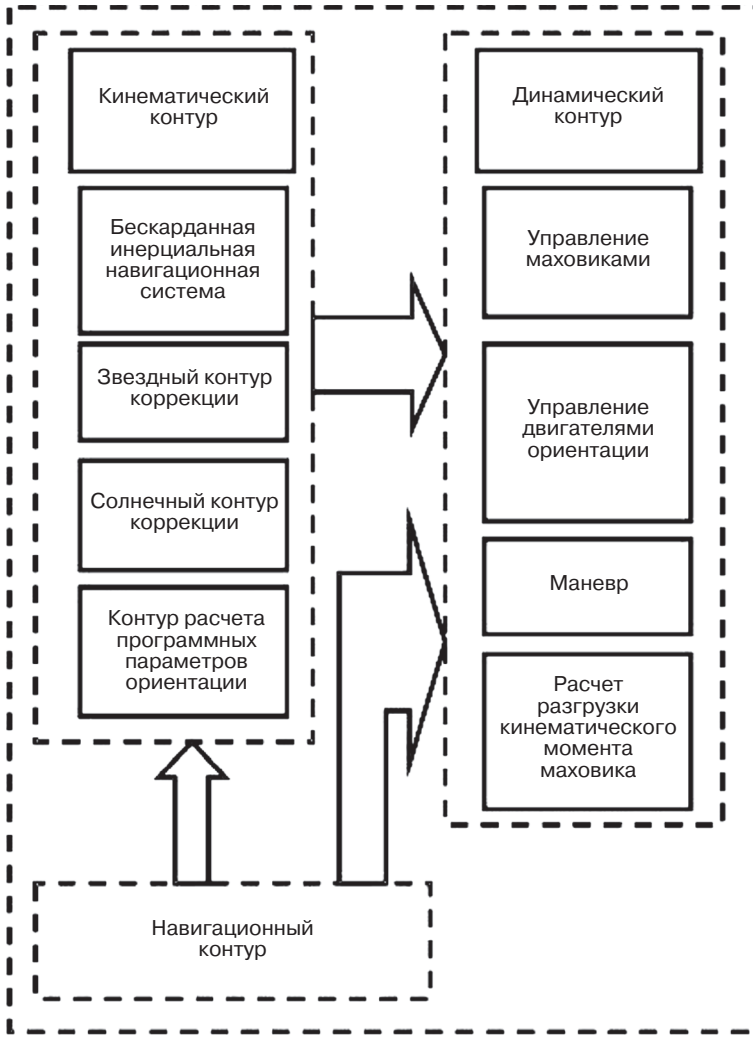


Рис. 1.11. Структура СУДН на базе двухконтурной бесплатформной инерциальной системы [13]

Основные задачи БКУ:

- сбор, первичная обработка, хранение и телеметрирование информации оперативного контроля, а также ее использование в задачах управления УКП;
- организация информационно-командного взаимодействия с БЦК;
- координированное управление функционированием УКП и КА в целом при наземной отработке КА и штатном выполнении программы полета в автоматическом режиме и по информации от НКУ;
- диагностика состояния УКП и ее систем, обнаружение, локализация и парирование расчетных нештатных ситуаций в автоматическом режиме.

Решение бортовым комплексом управления перечисленных задач сопровождается подтверждением таких качественных характеристик, как:

- высокий уровень комплексирования, т.е. организация комбинированной работы систем УКП и поддержка интерфейсов при реализации всех полетных режимов и операций в реальном масштабе времени;
- строгая иерархичность многоуровневой структуры построения БКУ и детерминированность движения потоков информации (командно-управляющей информации сверху вниз от «ядра» БКУ к каждому элементу и контрольно-диагностической информации снизу вверх от периферийных элементов до «ядра»);
- развитая гибкость управления, реализованная в алгоритмах управления ПО БКУ и обеспечивающая на базе целеуказаний от НКУ и обработанной диагностической информации от датчиковой аппаратуры эффективный расход ресурсов и задействование резервов, а также адаптивность к отказам и парирование нештатных ситуаций.

Отработанная и готовая к применению в составе целого класса космических аппаратов платформа создает особенную привлекательность для заказчиков перспективных космических изделий. Развитие и совершенствование БКУ предполагается в следующих направлениях:

- повышение надежности и увеличение гарантированного срока функционирования отдельных приборов и БКУ в целом путем применения современных типономиналов ЭКБ, а также благодаря внедрению функционального резервирования на аппаратном и программном уровнях;
- при сохранении целевых функций и показателей БКУ снижение его общей массы и экономия интерфейсных ресурсов в интересах полезной нагрузки благодаря унификации разнотипных интерфейсов, оптимизации размещения бортовой кабельной сети, переходу в отдельных позициях структуры БКУ на дублирование вместо троирования аппаратных средств.

1.4.2. Особенности проектирования бортовых информационно-управляющих систем с использованием микросхем программируемой логики

Структура современной бортовой аппаратуры космических аппаратов подразумевает высокую степень конструктивной интеграции ее элементов. Как показано выше, основным элементом, обеспечивающим управление этой сложной аппаратурой, является бортовой информационно-управляющий комплекс (БИУК). Решение этих задач является достаточно ресурсоемким и осуществляется с использованием бортовых вычислительных комплексов. При этом для эффективного решения в зависимости от целевых назначений и характеристик космического аппарата могут потребоваться как минимальные, так и предельные максимальные вычислительные ресурсы. Например, большинство современных высокоорбитальных спутниковых систем связи предусматривает работу аппаратуры спутников-ретрансляторов в режиме непосредственной ретрансляции или ретрансляции с переносом частоты, что обеспечивается лишь переключением различных полукомплектов приемо-передающей аппаратуры и не требует решения сложных вычислительных задач в рамках реализации целевой программы космического ап-

парата. Другим примером являются низкоорбитальные оптико-электронные спутники наблюдения и дистанционного зондирования Земли, более подробно рассматриваемые в следующем разделе, функционирование которых подразумевает постоянное получение и сложную вычислительную обработку изображений подстилающей поверхности в совокупности с постоянным слежением за местоположением и ориентацией космического аппарата, обеспечивающим точность получаемых данных. Построение бортовой аппаратуры на вновь разрабатываемых каждый раз и под задачу микросхемах является достаточно дорогостоящей и длительной стадией разработки. Кроме того, при сохранении высокой динамики развития микроэлектронной технологии такие разработки быстро устаревают. Как уже отмечалось, одной из основных тенденций развития современной бортовой аппаратуры является унификация ее элементов. Поэтому для ее построения часто используются прошедшие апробацию стандартизованные технологии проектирования, реализованные по следующим принципам [11]:

1) многомодульное построение элементов БИУК на базе стандартных микроконтроллеров и микропроцессоров;
2) иерархическое построение БИУК с реализацией основных требуемых вычислительных ресурсов центральным элементом (бортовой микроЭВМ) и использованием дополнительных элементов для решения вспомогательных задач;
3) построение по принципу «система на кристалле» (system on chip) – реализация всех функций БИУК в одной микросхеме сверхбольшой степени интеграции.

Первый вариант построения основан на использовании стандартизованных модулей и микросхем. Примером может служить стандарт PC 104, предусматривающий «этажерочную» конструкцию бортовой аппаратуры, в которой каждый модуль имеет стандартизованные размеры (форм-фактор) и элементы коммутации для взаимодействия. Центральным модулем, обеспечивающим в том числе управление, является модуль центрального процессора. Другой вариант такого построения БИУК базируется на модульном принципе реализации на нескольких микроконтроллерах, имеющих упрощенную внутреннюю структуру, например, на PIC-контроллерах.

Иерархическая реализация БИУК подразумевает использование бортовой ЭВМ с достаточно высокой производительностью. Однако, как правило, такие ЭВМ обладают большими с точки зрения бортовой аппаратуры массогабаритными и энергетическими потребностями. Поэтому использование данного варианта возможно лишь в средних и больших космических аппаратах.

Концепция «система на кристалле», более подробно рассматриваемая в гл. 11, является наиболее приемлемой для использования в бортовой аппаратуре перспективных космических аппаратов, так как обеспечивает максимальную степень интеграции элементов аппаратуры в совокупности с малыми размерами и энергопотреблением. Для ее реализации могут быть разработаны специализированные интегральные схемы, изготовленные специально для данного конкретного космического аппарата. Однако разработка и штучное изготовление таких элементов требуют больших экономических и временных затрат и оправдано лишь при серийном производстве космических аппаратов и платформ. Кроме того, усложняются процессы модернизации и реконструкции таких элементов.

В общем случае «система на кристалле» может включать в себя различные типы блоков: программируемые процессорные ядра, блоки специализированных интегральных схем, блоки программируемой логики, памяти, периферийных устройств, аналоговые компоненты и различные интерфейсные схемы. Не обязательно все такие блоки должны быть физически реализованы на одном кристалле: процессоры, блоки памяти могут использоваться как отдельные компоненты.

Значительное повышение эффективности разработки высокоинтегрированных БИУК по технологии «система на кристалле» достигается при использовании интегральных микросхем с программируемой логикой (ПЛИС). Эта технология известна и распространена достаточно широко, однако в последнее время благодаря повышению степени интеграции и быстродействия элементной базы появились возможности для ее активного внедрения в бортовую аппаратуру космического аппарата. ПЛИС представляют собой относительно новое, быстроразвивающееся направление микроэлектроники, и в условиях жесткой конкуренции их популярность настолько выросла, что, по некоторым прогнозам [11], более 60% приборов с применением специализированных интегральных микросхем будут использовать ПЛИС и только 21% – специализированные вентильные матрицы.

Использование ПЛИС значительно повышает технологичность процесса проектирования цифровых устройств и переводит практически весь этот процесс на ПЭВМ. Образно говоря, любое цифровое устройство реализуется на базе ПЛИС прямо на столе разработчика при помощи только персональной ЭВМ и соответствующего программатора.

К классу программируемых логических интегральных схем относятся интегральные схемы, построенные по следующим технологиям:

– FPGA (Field Programmable Gate Array);
– EPLD ((E)EPROM technology based complex Programmable Logic Devices);
– CPLD (CMOS FastFlash complex Programmable Logic Devices);
– MPLD (Mask Programmable Logic Devices).

Технологии EPLD, CPLD, MPLD предполагают использование комбинации полностью программируемых матриц вентилей и/или банков макроячеек. Макроячейки образуют функциональные блоки, выполняющие различные комбинаторные или последовательные логические функции. Технология программируемых пользователем базовых матричных кристаллов (FPGA) является более совершенной, так как позволяет реализовать внутреннюю структуру интегральной схемы путем программирования внутренней матрицы.

Основными разработчиками и производителями элементной базы с программируемой логикой являются компании QuickLogic, Actel, Xilinx, Altera. В области использования ПЛИС в космических системах отдельное место занимает продукция компании Actel. Особенностью ПЛИС компании Actel является применение так называемой Antifuse-технологии, представляющей собой создание металлизированной перемычки при программировании. Данная технология обеспечивает высокую надежность и гибкие ресурсы трассировки, при этом не требуется конфигурационное ПЗУ. Продукция, производимая компанией, предусматривает варианты коммерческого, промышленного и радиационностойкого исполнения, соответствующие требованиям стандартов надежности и устойчивости функцио-

нирования в сложных условиях. Проектирование схем на базе ПЛИС предусматривает выполнение следующих операций [11]:

- ввод описания разрабатываемой логической схемы на нескольких языках высокого уровня (описание функционального поведения элемента, графический ввод его схемы в базисе стандартизованных микросхем средней степени интеграции или с использованием библиотек типовых компонентов);
- экспертный выбор модели ПЛИС для реализации описанной схемы, осуществляемый с учетом требуемого количества программируемых ячеек и условий функционирования компонента;
- перевод логического описания схемы элемента в модель ПЛИС и ее оптимизация (трансляция, оптимизация, размещение);
- функциональное и временное моделирование разработанного компонента с целью проверки соответствия требований к компоненту;
- верификацию разработанного компонента и редактирование его модели;
- загрузку отлаженной модели в ПЛИС с помощью ПЭВМ через соответствующий порт или программирование внутреннего постоянного запоминающего устройства в случае технологии FPGA, которая при включении питания сама в себя загружает конфигурационные данные.

Чипы CPLD с памятью FAST FLASH после загрузки в них конфигурационных данных при выключении питания их сохраняет. Чаще всего для описания компонентов ПЛИС используют язык VHDL – язык описания логической структуры цифровых компонентов. Кроме того, для большинства применений разработаны библиотеки компонентов, распространяемые бесплатно фирмами-производителями ПЛИС.

Рис. 1.12. Пример реализации БИУК космического аппарата на базе микросхемы ПЛИС [11]

Вариант реализации БИУК перспективного космического аппарата связи представлен на рис. 1.12 [11]. ПЛИС в этом случае является центральным элементом, осуществляющим сбор и обработку специальной информации, а также управление и контроль состояния всех элементов бортовой аппаратуры. Структура БИУК на ПЛИС предусматривает использование внутренних шин обмена данными между различными компонентами. Ориентировочное число используемых при этом вентилей составляет порядка одного-полутора миллионов, что реализуемо в рамках одной микросхемы ПЛИС серии ProAsic. На рис. 1.13 [11] показан внешний вид платы разработчика компонентов ПЛИС с интегрированной микросхемой серии ProAsic Plus, а также элементами, обеспечивающими отработку операций взаимодействия с внешними устройствами.

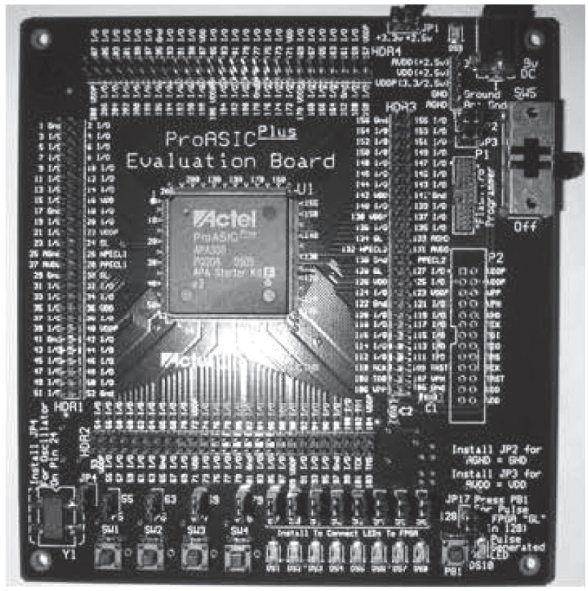


Рис. 1.13. Отладочная плата микросхем с программируемой логикой [11]

Дальнейшая модернизация бортовой аппаратуры благодаря наличию программных моделей и наработанных библиотек стандартных компонентов фактически не будет требовать дополнительных затрат, что в случае массового использования данной технологии позволит обеспечить серийное производство перспективных космических аппаратов.

1.5. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли

Развитие информационных технологий в начале XXI в. привело к качественным изменениям в отрасли дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [14–20]: появились космические аппараты со съемочными системами нового поколения,

позволяющие получать снимки со сверхвысоким пространственным разрешением (до 41 см у спутника GeoEye-1). Съемки ведутся в гиперспектральном и многоканальном мультиспектральном (в настоящее время до 8 каналов у спутника WorldView-2) режимах. Основными тенденциями последних лет является появление новых спутников сверхвысокого разрешения с улучшенными характеристиками (французская система Pleiades), разработка концепции оперативной и глобальной съемки земной поверхности с высоким разрешением с помощью группировок малых спутников (группировка немецких спутников RapidEye, пополнение группировки DMC спутником высокого разрешения, перспективные спутники SkySat, NovaSAR и т.д.). В технологиях ДЗЗ, помимо традиционных направлений (улучшение пространственного разрешения, добавление новых спектральных каналов, автоматизация процессов обработки и оперативного предоставления данных), появляются разработки, связанные с оперативной видеосъемкой объектов из космоса (например, разработки компании SkyBox Imaging, США).

В данном параграфе приведены сравнительные характеристики некоторых наиболее интересных космических аппаратов ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, как уже запущенных на орбиту, так и планируемых к запуску в ближайшие три-четыре года [21].

1.5.1. Космические аппараты ДЗЗ Российской Федерации и Республики Беларусь

В соответствии с Федеральной космической программой в 2012 г. был осуществлен запуск малого космического аппарата (КА) «Канопус-В». Он предназначен для обеспечения подразделений Роскосмоса, МЧС России, Минприроды России, Росгидромета, РАН и других заинтересованных ведомств оперативной информацией. Среди задач, стоящих перед спутником, можно выделить:

- обнаружение очагов лесных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ в природную среду;
- мониторинг техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, в том числе стихийных гидрометеорологических явлений;
- мониторинг сельскохозяйственной деятельности, природных (в том числе водных и прибрежных) ресурсов;
- землепользование;
- оперативное наблюдение заданных районов земной поверхности.

Кроме спутника «Канопус-В», в настоящее время в составе российской орбитальной группировки ДЗЗ завершают работу спутники «Ресурс-ДК1» (запущен в 2006 г.) и «Монитор-Э» (запущен в 2005 г.). Особенностями КА «Ресурс-ДК1» являются повышенные оперативные и точностные характеристики получаемых изображений (разрешение 1 м в панхроматическом режиме, 2-3 м – в мультиспектральном). Данные со спутника активно используются для создания и обновления топографических и специальных карт, информационного обеспечения рационального природопользования и хозяйственной деятельности, инвентаризации лесов и сельскохозяйственных земель, других задач.

Продолжением миссии отечественных спутников природно-ресурсного назначения высокого разрешения является оптико-электронный КА «Ресурс-П», запущенный 25 июня 2013 г. При создании спутника применялись технические решения, наработанные при создании КА «Ресурс-ДК1». Использование круговой солнечно-синхронной орбиты высотой 475 км позволило существенно улучшить условия наблюдения. С шести до трех суток улучшилась периодичность наблюдения.

Съемка будет проводиться в панхроматическом и 5-канальном мультиспектральном режимах. Дополнительно к оптико-электронной аппаратуре высокого разрешения на спутнике установлены гиперспектральный спектрометр (ГСА) и широкозахватный мультиспектральный съемочный комплекс высокого (ШМСА-ВР) и среднего (ШМСА-СР) разрешения.

Таблица 1.1. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА «КАНОПУС-В»

Режим съемки	**Панхроматический**	**Мультиспектральный**
Спектральный диапазон, мкм	0,52–0,85	0,54–0,60 (зеленый) 0,63–0,69; 0,6–0,72 (красный) 0,75–0,86 (ближний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	2,1	10,5
Ширина полосы обзора, км	Более 20 (при высоте 510 км)	
Производительность съемки, млн кв. км/сут.	Более 2	
Периодичность съемки, сут.	5	
Скорость передачи данных на наземный сегмент (X-диапазон), Мбит/с	$2 \times 122{,}8$	

В ближайших планах наращивания российской орбитальной группировки ДЗЗ запуск спутников серии «Обзор». Группировка из четырех оптико-электронных КА «Обзор-О» предназначена для оперативной мультиспектральной съемки России, прилегающих территорий соседних государств и отдельных районов Земли. На первом этапе (2015–2017 гг.) планируется запустить два космических аппарата, на втором (2018–2019 гг.) – еще два. Система «Обзор-О» будет служить для обеспечения данными космической съемки МЧС России, Минсельхоза России, РАН, Росреестра, других министерств и ведомств, а также регионов России. На КА «Обзор-О» № 1 и № 2 планируется установить опытные образцы гиперспектральной аппаратуры.

Согласно техническим требованиям к системе «Обзор-О» она должна состоять из четырех спутников, способных вести съемку в восьми спектральных диапазонах, в том числе в видимом и инфракрасном. Разрешение камер в видимом диапазоне будет составлять пять метров, в инфракрасном – не хуже двадцати метров. При этом на первом этапе создания системы, когда на орбите будут работать два аппарата, «Обзор-О» должен обеспечить съемку всей территории России не более чем за 30 суток; когда к работе приступят все четыре спутника – не более чем за 7 суток.

Таблица 1.2. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры «РЕСУРС-П»

Режим съемки	Оптико-электронная аппаратура высокого разрешения		ШМСА		ГСА
	Панхроматический	Мультиспектральный	ШМСА-ВР	ШМСА-СР	
Спектральный диапазон, мкм	0,58–0,80	0,45–0,52 (синий) 0,52–0,60 (зеленый) 0,61–0,68 (красный) 0,72–0,80; 0,67–0,70; 0,70–0,73 (красный + ближний ИК)	Панхроматический режим 0,43–0,70 Мультиспектральный режим 0,43–0,51 (синий) 0,51–0,58 (зеленый) 0,60–0,70 (красный) 0,70–0,90 (ближний ИК-1) 0,80–0,90 (ближний ИК-2)		0,4–1,1 (96–255 спектральных каналов)
Пространственное разрешение (в надире), м	1	3–4	12 (панхроматический режим) 24 (мультиспектральный режим)	60 (панхроматический режим) 120 (мультиспектральный режим)	25
Точность геопозиционирования, м	CE90 mono = 3,1–21				
Ширина полосы съемки, км	38		96	480	25
Ширина полосы обзора, км	950		1300		950
Производительность съемки, млн кв. км/сут.	1				
Периодичность съемки, сут.	3				

Радарный КА «Обзор-Р» предназначен для проведения съемки в X-диапозоне в любое время суток (вне зависимости от погодных условий) в интересах социально-экономического развития Российской Федерации. «Обзор-Р» будет служить для обеспечения данными радарной съемки МЧС России, Минсельхоза России, Росреестра, других министерств и ведомств, а также регионов России.

Таблица 1.3. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры «ОБЗОР-О»

Режим съемки	Мультиспектральный	
	1-й этап	2-й этап
Спектральный диапазон, мкм	7 одновременно работающих спектральных каналов: 0,50–0,85 0,44–0,51 0,52–0,59 0,63–0,68 0,69–0,73 0,76–0,85 0,85–1,00	8 одновременно работающих спектральных каналов: 0,50–0,85 0,44–0,51 0,52–0,59 0,63–0,68 0,69–0,73 0,76–0,85 0,85–1,00 1,55–1,70

Таблица 1.3 (окончание)

Режим съемки	**Мультиспектральный**	
	1-й этап	**2-й этап**
Пространственное разрешение (в надире), м	Не более 7 (для канала 0,50–0,85); не более 14 (для остальных каналов)	Не более 5 (для канала 0,50–0,85); не более 20 (для канала 0,55–1,70); не более 14 (для остальных каналов)
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12	
Точность геопозиционирования, м	30–45	20–40
Ширина полосы съемки, км	Не менее 85	Не менее 120
Производительность съемки каждого КА, млн кв. км/сут.	6	8
Периодичность съемки, сут.	30	7
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с	600	

Таблица 1.4. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры «ОБЗОР-Р»

Спектральный диапазон	**X-диапазон (3,1 см)**			
Периодичность съемки, сут.	**2 (в полосе широт от 35 до 60° с. ш.)**			
Режим	**Номинальное пространственное разрешение, м**	**Полоса обзора, км**	**Ширина полосы съемки, км**	**Поляризация**
Высокодетальный кадровый режим (ВДК)	1	2 × 470	10	Одинарная (по выбору – H/H, V/V, H/V, V/H)
Детальный кадровый режим (ДК)	3	2 × 600	50	Одинарная (по выбору – H/H, V/V, H/V, V/H); двойная (по выбору – V/(V+H) и H/(V+H))
Узкополосный маршрутный режим (УМ)	5	2 × 600	30	
	3	2 × 470		
Маршрутный режим	20	2 × 600	130	
	40		230	
Широкополосный маршрутный режим	200	2 × 600	400	
	300		600	
	500	2 × 750	750	

Запущенный в 2012 г. вместе с российским КА «Канопус-В» белорусский спутник БКА (Белорусский космический аппарат) обеспечивает полное покрытие территории страны космической съемкой. По международной классификации космический аппарат относится к классу малых спутников (он полностью идентичен КА «Канопус-В»). Полезная нагрузка БКА включает панхроматическую и

мультиспектральную камеры с полосой захвата 20 км. Полученные снимки позволяют рассмотреть объекты на земной поверхности с разрешением 2,1 м в панхроматическом режиме и 10,5 м – в мультиспектральном. Этого достаточно для того, чтобы выполнять различные задачи, связанные с мониторингом, например, выявление очагов пожаров и т.д. Однако в будущем стране может понадобиться спутник с более высоким разрешением, поэтому белорусские ученые начали разработку космического аппарата с разрешением до 0,5 м, его запуск можно ожидать не ранее 2017 г.

В июле 2013 года с Байконура выполнен пуск РН «Союз-ФТ» с разгонным блоком «Фрегат», предназначенный для выведения на орбиту целой серии космических аппаратов: российских «Канопус-В», МКА-ФКИ («Зонд-ПП»), белорусского БКА, германского TET-1 и канадского ADS-1B.

«Канопус-В»

Космический аппарат «Канопус-В» № 1 входит в состав космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В», создаваемого федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-производственное предприятие – Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом имени А.Г. Иосифьяна» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ») по заказу Роскосмоса.

«Канопус-В» предназначен для обеспечения пользователей оперативной гидрометеорологической информацией в целях решения следующих основных задач:

- мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, в том числе стихийных гидрометеорологических явлений;
- картографирования;
- обнаружения очагов лесных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ в природную среду;
- регистрации аномальных физических явлений для прогнозирования землетрясений;
- мониторинга сельскохозяйственной деятельности, водных и прибрежных ресурсов;
- землепользования;
- высокооперативного наблюдения заданных районов земной поверхности.

Таблица 1.5. Основные технические характеристики КА «Канопус-В»

Назначение	Дистанционное зондирование Земли
Масса КА	400 кг
Масса полезной нагрузки	110 кг
Габариты КА	0,9 x 0,75 м
Срок активного существования	5 лет
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная
Высота	~510 км
Наклонение	~98˚
Период обращения	94,75 мин.
Точность ориентации	5 угл. мин.
Точность стабилизации	0,001 ˚/с

Таблица 1.5 (окончание)

Время перенацеливания (±40°)	2 мин.
Среднесуточная мощность	300 Вт
Характеристики съемочных систем	
Панхроматическая камера	
Полоса захвата	23 км
Разрешение (проекция пикселя)	2,1 м
Спектральный диапазон	0,52–0,85 мкм
Мультиспектральная камера	
Полоса захвата	20 км
Разрешение (проекция пикселя)	10,5 м
Спектральные диапазоны	0,54–0,6; 0,63–0,69; 0,69–0,72; 0,75–0,86 мкм
Характеристики целевой радиолинии	
Объем памяти	24 Гбайт
Диапазон рабочих частот	8084–8381,5 МГц
Количество каналов передачи	2
Скорость передачи данных	61,4 Мбит/с

«МКА-ФКИ» («Зонд-ПП»)

Космический аппарат МКА-ФКИ № 1 входит в состав космического комплекса малых космических аппаратов для фундаментальных космических исследований (МКА-ФКИ). Данный космический комплекс научного назначения разрабатывается федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина») по заказу Роскосмоса.

Научные задачи, которые позволит решать информация с космического аппарата МКА-ФКИ:

- исследование температурно-влажностного состояния лесоболотных систем;
- изучение биометрических характеристик растительности;
- изучение солености водных акваторий;
- исследование гляциальных и мерзлотных зон;
- изучение энергообмена системы океан–суша–атмосфера;
- исследование геотермальной деятельности;
- картирование влажности почв.

Таблица 1.6. Основные технические характеристики МКА-ФКИ № 1

Назначение	Дистанционное зондирование Земли в научных целях
Масса КА	110 кг
Срок активного существования	3 года
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная
Высота	~817 км
Наклонение	~97,4°
Точность ориентации	6 угл. мин.
Точность стабилизации	0,0015 °/с

Таблица 1.6 (окончание)

Среднесуточная мощность	220 Вт
Диапазон рабочих частот	
передача	2268,946–2271,054 МГц
прием	2289,238–2091,346 МГц
Объем памяти	8 Гбайт
Скорость передачи данных	До 3 Мбит/с
Полезная нагрузка	Малогабаритный двухлучевой панорамный СВЧ-радиометр L-диапазона «Зонд-ПП»
Масса	13 кг
Полоса обзора	800 км
Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенной системы	$22° \times 15°$

БКА

Белорусский космический аппарат (БКА) входит в состав Белорусского космического комплекса дистанционного зондирования Земли, создаваемого в соответствии с контрактом между Национальной академией наук Беларуси и ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

Белорусский космический комплекс должен обеспечивать:

- регулярное и оперативное удовлетворение потребностей Республики Беларусь в целевой информации дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением;
- оперативный прием космической информации на наземные пункты приема;
- управление БКА на всех этапах его активного существования;
- создание основы для формирования в будущем многоспутниковых систем оперативного наблюдения земной поверхности.

Основными областями применения информации, получаемой Белорусским космическим комплексом, являются:

- контроль за землепользованием и сельскохозяйственным производством;
- контроль естественных и восполняемых природных ресурсов;
- контроль чрезвычайных ситуаций;
- обновление топографических карт;
- экологический мониторинг окружающей среды.

Таблица 1.7. Основные технические характеристики БКА

Назначение	Дистанционное зондирование Земли
Масса КА	400 кг
Масса полезной нагрузки	110 кг
Габариты КА	$0{,}9 \times 0{,}75$ м
Срок активного существования	5 лет
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная
Высота	~510 км
Наклонение	~98°

Таблица 1.7 (окончание)

Период обращения	94,75 мин.
Точность ориентации	5 угл. минут
Точность стабилизации	0,001 °/с
Время перенацеливания (±40°)	2 мин.
Среднесуточная мощность	300 Вт
Характеристики съемочных систем	
Панхроматическая камера	
Полоса захвата	23 км
Разрешение (проекция пикселя)	2,1 м
Спектральный диапазон	0,52–0,85 мкм
Мультиспектральная камера	
Полоса захвата	20 км
Разрешение (проекция пикселя)	10,5 м
Спектральные диапазоны	0,54–0,6; 0,63–0,69; 0,69–0,72; 0,75–0,86 мкм
Характеристики целевой радиолинии	
Объем памяти	24 Гбайт
Диапазон рабочих частот	8084–8381,5 МГц
Количество каналов передачи	2
Скорость передачи данных	61,4 Мбит/с

ExactView 1 (ADS-1B)

ExactView 1 (EV 1), известный также под наименованием ADS-1B, – это космический аппарат для отслеживания судов, созданный ведущим разработчиком малых спутников Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) для компании COM DEV Canada, канадского производителя космического оборудования.

Космический аппарат, основанный на платформе SSTL-100, станет частью группировки exactEarth AIS компании COM DEV, используемой кораблями для наблюдения за передвижениями судов в оживленных каналах и гаванях, а также для получения информации о глобальном траффике кораблей.

Полезная нагрузка космического аппарата состоит из приемника VHF-диапазона, бортового блока обработки данных (OBDH) и передатчика C-диапазона для ретрансляции информации на Землю.

Помимо обработки данных в задачи OBDH входит функция хранения информации до прохождения спутника над наземной станцией. Кроме того, два мощных передатчика S-диапазона находятся на космическом аппарате в качестве резерва. Также с помощью радиолинии S-диапазона обеспечивается управление космическим аппаратом.

Таблица 1.8. Характеристики KA EV 1

Назначение	Связь, навигация
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная
Высота	817 км
Наклонение	98,88°
Заказчик	COM DEV Canada

Таблица 1.8 (окончание)

Подрядчик	SSTL
Платформа	SSTL-100
Масса КА	95 кг
Срок активного существования	5 лет
Точность ориентации	
по углам крена и тангажа	< 3°
по углу рысканья	< 5°
Среднесуточная мощность	66 Вт
Полезная нагрузка	
Передатчик С-диапазона	1
Рабочая частота	5183 МГц
Скорость передачи данных	20 Мбит/с
Приемник VHF-диапазона	1
Рабочая частота	162 МГц
Командная радиолиния S-диапазона	
Объем памяти	16 Гбайт
Количество каналов передачи	3
Передача данных	
низкоскоростная	38,4 Кбит/с
высокоскоростная	До 8 Мбит/с
Рабочие частоты передачи	
низкоскоростной	2230 МГц
высокоскоростной	2233,333 МГц
ретранслятора	2275,11 МГц

TET-1

TET-1 – технологический микроспутник, созданный германской компанией Kayser-Threde GmbH для Германского аэрокосмического центра DLR.

TET является центральным элементом программы орбитальных испытаний (OOV) DLR, которая дает возможность немецкому промышленному и научно-космическому сообществу проводить демонстрацию технологий на орбите.

КА TET-1 основан на платформе спутника BIRD (биспектральное обнаружение по инфракрасному излучению), запущенного в 2001 году. Концепция BIRD была адаптирована с учетом новых доступных компонентов для получения более высоких характеристик, большего объема и массы полезных нагрузок и значительного повышения надежности системы.

Новая спутниковая платформа отличается от своего предшественника принципом управления данными на борту.

Кроме того, были модифицированы датчики и приводы спутника и добавлена новая полезная нагрузка.

На спутнике TET-1 установлено 11 полезных нагрузок. Среди нагрузок литиево-полимерный аккумулятор, гибкие солнечные батареи, двигательная установка для пико- и наноспутников, камеры инфракрасного и видимого диапазонов для съемки Земли и другие тестируемые электронные и конструктивные элементы. Девять полезных нагрузок размещены в отсеке полезной нагрузки, и еще три закреплены на средней солнечной панели и панели ПН.

Таблица 1.9. Характеристики КА TET-1

Назначение	Демонстрация технологий
Рабочая орбита	Солнечно-синхронная
Высота	539–560 км
Наклонение	97,6°
Заказчик	Германский аэрокосмический центр DLR
Генеральный подрядчик	Kayser-Threde GmbH
Масса КА	117,3 кг
Срок активного существования	1 год
Потребляемая мощность ПН	
непрерывно	20 Вт
непродолжительно	160 Вт
Частоты приема	
сигналы GPS	1575,42 МГц
команды управления	2032,5 МГц
частота передачи	2203,707 МГц

Ракета-носитель «Союз-ФГ»

Ракета-носитель (РН) «Союз-ФГ» является дальнейшей модификацией серийной ракеты «Союз». Модернизация серийной РН «Союз» заключается в использовании на центральном и боковых блоках двигателей с улучшенными энергетическими характеристиками.

Головным разработчиком и изготовителем РН «Союз-ФГ» является Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара, заказчиком – Федеральное космическое агентство.

Конструктивно РН «Союз-ФГ» выполнена по схеме с параллельным отделением боковых ракетных блоков в конце работы первой ступени и поперечным отделением ракетного блока второй ступени по окончании его работы. На первом этапе полета работают двигатели четырех боковых и центрального блоков, на втором, после отделения боковых блоков, – только двигатель центрального блока.

Маршевые двигатели первой и второй ступеней РН «Союз-ФГ» по сравнению с двигателями РН «Союз» имеют повышенные энергетические характеристики за счет применения в смесительных головках однокомпонентных форсунок, обеспечивающих улучшенное смесеобразование.

Ракета-носитель «Союз-ФГ» обеспечивает выведение на орбиты всей номенклатуры космических аппаратов, выводимой РН «Союз».

Система управления РН «Союз-ФГ» заимствуется с базовой РН «Союз» и обеспечивает требуемые, как на РН «Союз», точностные характеристики выведения на орбиту с незначительной доработкой. Для контроля состояния систем, агрегатов и конструкции РН на участке выведения блоки первой и второй ступеней РН «Союз-ФГ» и блок третьей ступени оснащены радиотелеметрическими системами, которые заимствуются с РН «Союз».

Для контроля состояния систем, агрегатов и конструкции РН на участке выведения блоки первой и второй ступеней РН «Союз-ФГ» и блок третьей ступени оснащены радиотелеметрическими системами, которые заимствуются с РН «Союз».

Таблица 1.10. Основные характеристики ступеней РН «Союз-ФГ»

	Первая ступень (боковой блок)	Вторая ступень (центральный блок)	Третья ступень (блок «И»)
Количество блоков	4	1	1
Длина, м	19,6	27,1	6,7
Диаметр, м	2,68	2,95	2,66
Масса заправленного блока, т	43,4	99,5	25,3
Сухая масса, т	3,80	6,55	2,41
Двигатель	РД-107А	РД-108А	РД-0110
Количество	1	1	1
Компоненты топлива:			
окислитель/горючее	жидкий кислород/ керосин	жидкий кислород/ керосин	жидкий кислород/ керосин
Тяга, кН:			
на Земле/в пустоте	838,5/1021,3	792,48/990,18	–/297,93
Время работы, с	118	280	230

Первая ступень ракеты-носителя включает четыре боковых блока конической формы, закрепленных в шаровых опорах центрального блока.

Вторая ступень (центральный блок) состоит из хвостового отсека, в котором установлен двигатель однократного включения РД-108А (содержащий четыре маршевых камеры и четыре рулевых сопла), отсека бака перекиси водорода, в котором также установлен бак жидкого азота, отсека бака горючего, межбакового отсека, отсека бака окислителя и приборного отсека.

Третья ступень (блок «И»), состоящая из переходного отсека, бака горючего, бака окислителя, хвостового отсека и двигателя, установлена на центральном блоке и соединена с ним с помощью ферменной конструкции.

Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать – уже первые космические снимки, полученные спутниками «Канопус-В» и БКА, наглядно показывают, что отечественная космическая отрасль успешно преодолела важный Рубикон. У союзного государства появилась своя собственная, мощная и эффективная система мониторинга Земли из космоса.

НПП ВНИИЭМ представило новые космические снимки, полученные аппаратами «Канопус-В» и БКА (Белорусский космический аппарат, «БелКА») на этапе летных испытаний и калибровки целевой аппаратуры – в том числе цветные (мультиспектральные). В настоящее время обнародованы изображения объектов на территории Греции, ОАЭ и Бахрейна [19].

Геометрическое и радиометрическое качество даже у самых первых, калибровочных снимков находится на высоком уровне и с передачей спутников в штатную эксплуатацию будет улучшено. Пространственное разрешение составляет около 2 метров на пиксель и, очевидно, также соответствует ТТХ. Можно без труда опознать, к примеру, характерный силуэт находящегося на стояночной площадке аэродрома Джебель Али отечественного транспортного самолета. Однако главное – не в этом.

Несмотря на хорошее, хотя и не рекордное пространственное разрешение получаемых аппаратами изображений, новые спутники ДЗЗ являются принципиально новыми для отечественной отрасли аппаратами, обладающими рядом важ-

ных и принципиальных отличий от предшественников. Отметим лишь некоторые из них.

Орбитальное построение группировки и использование солнечно-синхронной орбиты позволяет обеспечить гарантированную производительность системы и возможность съемки любого произвольного района Земного шара.

Использование стандартных спектральных диапазонов и возможность гарантированного их получения позволяет использовать их в решении широкого круга хозяйственных задач – например, в классификации растительности. Важность этого нельзя недооценивать – например, еще недавно съемка в коротковолновом «синем» диапазоне представляла собой неразрешимую проблему для отечественного спутника высокого разрешения.

Спутники выполнены на негерметичной платформе и имеют на порядок меньшую, чем у прежних отечественных аналогов, массу. Это позволило снизить расходы на их выведение и минимизирует эксплуатационные расходы в дальнейшем.

Создание аппаратов совместно с Белоруссией позволило включить в космическую производственную кооперацию мощное белорусское точное и оптическое приборостроение, сумевшее сохранить не только материальную базу, но и, что не менее важно, кадровую преемственность.

На последующих рисунках представлены фотографии некоторых оригинальных микроэлектронных приборов, разработанных в Беларуси и используемых в качестве ЭКБ при создании оптико-электронной системы КА ДЗЗ.

Это приборы с зарядовой связью (ПЗС, в основе физики работы которых положен эффект обмена зарядами между близко расположенными на поверхности полупроводникового кристалла МОП-конденсаторами. Манипулируя смещениями, прикладываемыми к таким МОП-конденсаторам, заряды можно не только накапливать, но и перемещать их, разделять, объединять, т.е. фактически можно осуществлять обработку информации на таких дискретных элементах. Если у появившихся более 45 лет назад на фирме Bell Laboratorics первых ПЗС структур таких элементов было всего 8, то в современных число этих элементов (пикселей) может составлять более ста миллионов. Наиболее активно развивалось направление, связанное с использованием ПЗС в качестве многоэлементных фотоприемников, фотодетекторов для различных космических оптико-электронных приборов и камер, в том числе для КА ДЗЗ с высоким разрешением.

Уже при полетах в 1981–1984 гг. КА Shuttle (STS-7 и STS-11) использовались две модификации на основе так называемых линеек ПЗС с длиной строки по1728 пикселей (общая длина составляла 6912).

Параметры:

- формат фотозоны 2048×128;
- размер ячейки 8×8 мкм;
- частота считывания 2×20 МГц;
- секционирование 8, 16, 32, 64, 128;
- четырехфазное управление фотозоны;
- динамический диапазон – 2000;
- зарядовая вместимость ≥ 150 Ке;
- прямая и «зеркальная» топология для интегральных сборок.

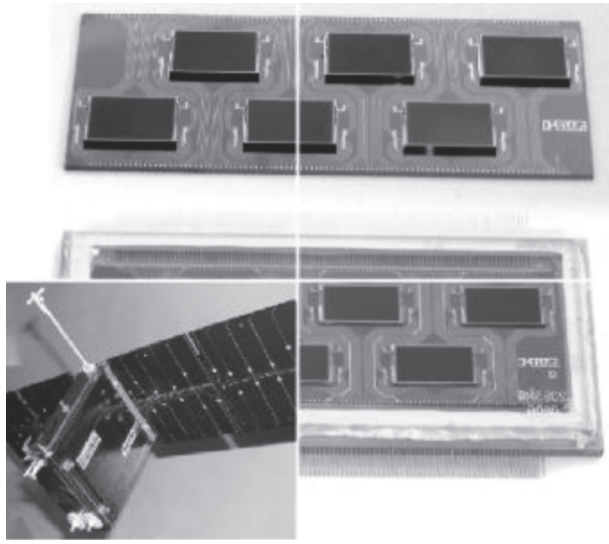


Рис. 1.14. Первые фоточувствительные ПЗС матрицы ОАО «Интеграл»

На рис. 1.14 представлены первые интегральные микросборки ФПЗС для космических аппаратов дистанционного зондирования, содержащие шесть взаимосвязанных расположенных на кремниевой «плате» ПЗС матриц, а на рис. 1.15 и рис. 1.16 – их дальнейшее развитие.

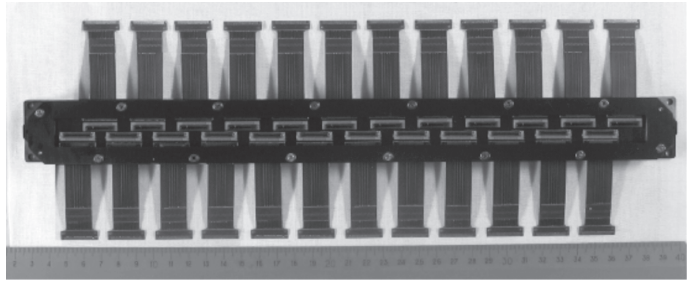


Рис. 1.15. Микросборки ПЗС BAI 2093M6

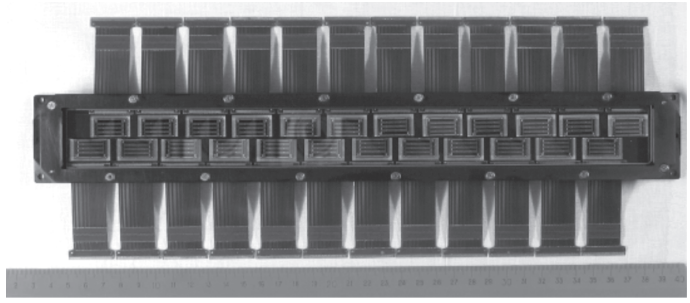


Рис. 1.16. Микросборки ПЗС BAI 2093M4

Спутники дистанционного зондирования Земли «Канопус-В» и БКА ориентированы на реальные потребности отечественных потребителей и позволят решить первостепенную именно на данном историческом этапе задачу аккумулирования документально точной, контекстной информации в глобальном масштабе.

Оптическая система аппаратов, впервые в российской практике, будет иметь открытую для пользователей математическую модель в виде так называемых RPC-полиномов, что позволит значительно упростить работу с данными.

Проектирование системы велось с учетом не только технологических, но и общенаучных изменений, связанных со сменой географической парадигмы. Принципы Неогеографии и Ситуационной Осведомленности заложены в систему изначально, что обеспечит высокую удельную производительность, соответствие требованиям заказчиков и высокий потенциал развития и модернизации. В частности, формирование полетных заданий осуществляется с помощью неогеографического геоинтерфейса «Неоглобус», разработанного в НПП ВНИИЭМ и позволяющего оперативно оптимизировать полетные задания с учетом множества факторов – наличия или отсутствия ретроспективной съемки, рельефа местности и положения КА, метеоусловий, общего контекста и т.д.

Создание оптимально сбалансированной, эффективной и удобной для пользователей системы дистанционного зондирования чрезвычайно важно – бессистемность развития дистанционного зондирования, при которой исходные данные производятся такими ударными темпами, что никто уже не успевает их обрабатывать, способна сама по себе дезорганизовать государственное управление. С этой проблемой уже в полной мере столкнулись США, и России стоит поучиться уже на американских ошибках, а не на собственных.

Что означает для России и для Союзного государства появление группировки «Канопус-В» – БКА? Чтобы это понять, необходимо осознать ситуацию недавнего прошлого.

Полвека спустя после полета Юрия Гагарина Россия по возможностям своих космических аппаратов дистанционного зондирования Земли из космоса уступала уже не только таким странам, как Индия и Канада, но и таким державам, как Нигерия. Космические снимки из экспорта стали импортом. Даже такие аппараты, как «Ресурс-ДК», способные иногда производить съемку с субметровым разрешением, являлись не столько правилом, сколько исключением из него. Отсутствие у крупнейшей страны мира собственных данных о самой себе и приобретение их на внешнем рынке открывало очевидные и соблазнительные перспективы манипуляций. Начались подделки космических снимков, началась монополизация ключевых орбитальных ресурсов.

С запуском «Канопуса» и БКА ситуация изменилась – у Союзного государства появился собственный добротный источник ДДЗ. Началось накопление опыта, освоение возможностей, восстановление промышленности – и в первую очередь, прецизионного приборостроения.

В заключение необходимо отметить очевидный факт – чем больше средств вкладывает государство в развитие космической промышленности, тем более мощную инфраструктуру создает в итоге реализации национальных космических программ.

Рис. 1.17. Намывная территория «Пальма» в Дубае (ОАЭ). Панхроматический снимок. Изображение: ВНИИЭМ

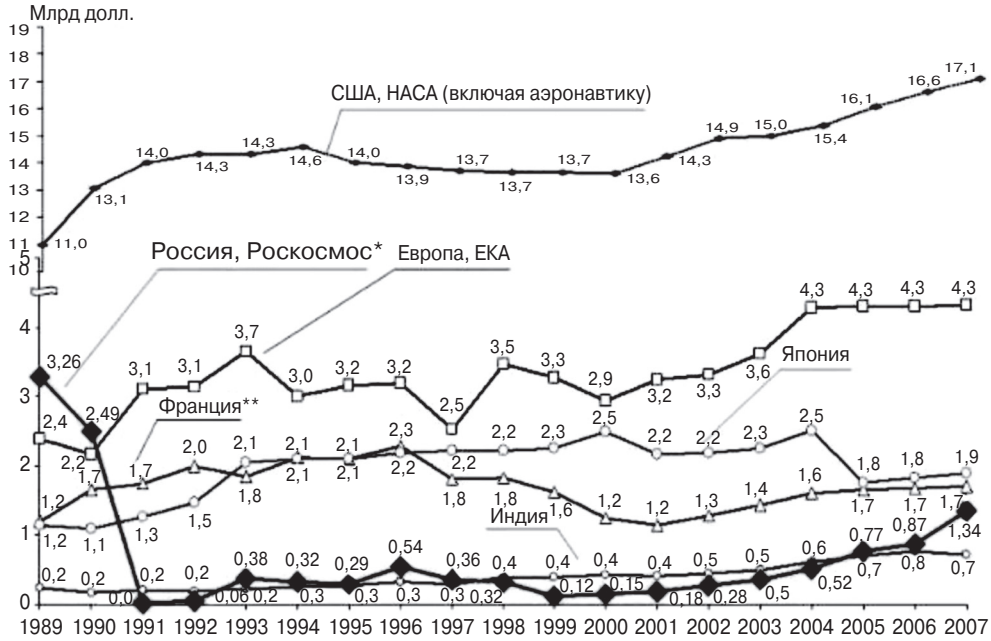


Рис. 1.18. Финансирование гражданских космических программ ведущими странами мира [22]

Эту аксиому наглядно демонстрирует рис. 1.18, на котором представлена динамика финансирования шестью ведущими мировыми космическими державами за период с 1989 по 2007 год только сегмента гражданских космических программ. Безусловно, лидирующее положение здесь занимают США, на втором месте – Европейское космическое агентство. Почетные третье-четвертое места с переменным успехом делят Франция с Японией, а относительно активно стартовавшая в 1989 году Россия (Советский Союз) с 1991 года все последующие шестнадцать лет также с переменным успехом сражалась с Индией за не очень почетные последнее и предпоследние места в этой космическо-финансовой гонке.

1.5.2. Космические аппараты ДЗЗ Украины

Запуск КА «Сич-2» был осуществлен в рамках национальной космической программы Украины с целью дальнейшего развития системы космического мониторинга и геоинформационного обеспечения народного хозяйства страны. Спутник оснащен оптико-электронным сенсором с тремя спектральными и одним панхроматическим каналами, а также сканером среднего инфракрасного диапазона и комплексом научной аппаратуры «Потенциал». Среди главных задач, стоящих перед КА «Сич-2», мониторинг аграрных и земельных ресурсов, водных объектов, состояния лесной растительности, контроль районов чрезвычайных ситуаций. Спутник был выведен из эксплуатации в мае 2013 г. Государственное космическое агентство Украины планирует в ближайшем будущем запустить КА «Сич-3-О» с разрешением лучше 1 м. Спутник создается в КБ «Южное».

Таблица 1.11. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА «СИЧ-2»

Режим съемки	**Панхроматический**	**Мультиспектральный**
Спектральный диапазон, мкм	0,51–0,90	0,51–0,59 (зеленый) 0,61–0,68 (красный) 0,80–0,89 (ближний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	8,2	
Ширина полосы обзора, км	48,8	

1.5.3. Космические аппараты ДЗЗ США

В США отрасль ДЗЗ активно развивается прежде всего в секторе сверхвысокого разрешения. 1 февраля 2013 г. две ведущие американские компании DigitalGlobe и GeoEye – мировые лидеры в области поставки данных сверхвысокого разрешения – объединились.

Новая компания оставила название DigitalGlobe.

В результате объединения компания DigitalGlobe в настоящее время обладает уникальными возможностями для предоставления широкого набора космических снимков и геоинформационных сервисов. Несмотря на монопольное положение в самом доходном сегменте рынка, основную часть доходов (75–80%) объединенной компании приносит оборонный заказ по 10-летней программе EnhanctdView (EV) общей стоимостью 7,35 млрд долл. США, предусматривающий госзакупку ресурсов коммерческих спутников в интересах Национального агентства геопространственной разведки (NGA).

В настоящее время DigitalGlobe является оператором спутников ДЗЗ сверхвысокого разрешения WorldView-1 (разрешение 50 см), WorldView-2 (46 см), QuickBird (61 см), GeoEye-1 (41 см) и IKONOS (1 м). Общая суточная производительность системы – более 3 млн кв. км.

В 2010 г. компания DigitalGlobe заключила контракт с компанией Ball Aerospace на разработку, создание и запуск спутника WorldView-3. Стоимость контракта составляет 180,6 млн долл. США. Компания Exelis VIS получила контракт на создание бортовой съемочной системы для спутника WorldView-3 на сумму 120,5 млн долл. США. Съемочная система World-View-3 будет аналогична той, которая установлена на КА WoldView-2. Кроме того, съемка будет проводиться в режимах SWIR (8 каналов; разрешение 3,7 м) и CAVIS (12 каналов; разрешение 30 м).

Таблица 1.12. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА WORLDVIEW-3

Режим съемки	**Панхроматический**	**Мультиспектральный**
Спектральный диапазон, мкм	0,50–0,90	0,40–0,45 (фиолетовый или coastal) 0,45–0,51 (синий) 0,51–0,58 (зеленый) 0,585–0,625 (желтый) 0,63–0,69 (красный) 0,63–0,69 (крайний красный или red-edge) 0,77–0,895 (ближний ИК-1) 0,86–1,04 (ближний ИК-2)
Пространственное разрешение (в надире), м	0,31	1,24
Максимальное отклонение от надира, град.	40	
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	11	
Точность геопозиционирования, м	CE90 mono = 3,5	
Ширина полосы съемки, км	13,1	
Периодичность съемки, сут.	1	
Возможность получения стереопары	Да	
Формат файлов	GeoTIFF, NITF	

Перспективный КА GeoEye-2 начал разрабатываться еще в 2007 г. Планируется, что он будет иметь следующие технические характеристики: разрешение в панхроматическом режиме – 0,25–0,3 м, улучшенные спектральные характеристики. Производитель сенсора – компания Exelis VIS. Первоначально запуск спутника планировался в 2013 г., однако после объединения компаний DigitalGlobe и GeoEye было принято решение, завершив создание спутника, поставить его на хранение для последующей замены одного из спутников на орбите либо до момента, когда спрос сделает его запуск выгодным для компании.

11 февраля 2013 г. был осуществлен запуск нового КА Landsat-8 (проект LDCM – Landsat Data Continuity Mission). Спутник продолжит пополнение банка изображений, получаемых с помощью спутников серии Landsat на протяжении уже 40 лет и охватывающих всю поверхность Земли. На КА Landsat-8 установлены два сенсора: оптико-электронный (Operational Land Imager, OLI) и тепловой (Thermal InfraRed Sensor, TIRS).

Таблица 1.13. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА LANDSAT-8

Режим съемки	VNIR	SWIR	PAN	TIR
Спектральный диапазон, мкм	0,43–0,45 (фиолетовый или coastal) 0,45–0,52 (синий) 0,53–0,60 (зеленый) 0,63–0,68 (красный) 0,85–0,89 (ближний ИК)	1,36–1,39 (Cirrus) 1,56–1,66 (SWIR-1) 2,10–2,30 (SWIR-2)	0,50–0,68	10,40–12,50
Пространственное разрешение (в надире), м	30	30	15	100
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12			

1.5.4. Космические аппараты ДЗЗ Франции

Во Франции основным коммерческим оператором спутников ДЗЗ является компания Astrium GEO-Information Services – геоинформационное подразделение международной компании Astrium Services. Компания создана в 2008 г. в результате объединения французской компании SpotImage и группы компаний Infoterra. Astrium Services-GEO-Information является оператором оптических спутников высокого и сверхвысокого разрешения SPOT и Pleiades, радарных спутников нового поколения TerraSAR-X и TanDEM-X. Центральный офис Astrium Services-GEO-Information расположен в Тулузе, кроме того, имеется 20 офисов и более 100 дистрибьюторов по всему миру.

Компания Astrium Services входит в состав европейской аэрокосмической корпорации EADS (European Aeronautic Defence and Space Company).

Спутниковая система наблюдения за поверхностью Земли SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre) спроектирована Национальным космическим агентством Франции (CNES) совместно с Бельгией и Швецией. Система SPOT включает в себя ряд космических аппаратов и наземных средств. В настоящее время на орбите работают спутники SPOT-5 (запущен в 2002 г.) и SPOT-6 (запущен в 2012 г.).

Спутник SPOT-4 был выведен из эксплуатации в январе 2013 г. КА SPOT-7 планируется запустить в 2014 г. Спутники SPOT-6 и SPOT-7 имеют идентичные характеристики.

С запуском в 2011–2012 гг. КА Pleiades-1A и Pleiades-1B Франция начала программу съемки Земли со сверхвысоким разрешением, вступив в конкурентную борьбу с американскими коммерческими системами ДЗЗ.

Программа Pleiades High Resolution является составной частью европейской спутниковой системы ДЗЗ и ведется под руководством французского космического агентства CNES начиная с 2001 г.

Спутники Pleiades-1A и Pleiades-1B синхронизированы на одной орбите таким образом, чтобы иметь возможность обеспечить ежедневную съемку одного и того же участка земной поверхности. Использование космических технологий нового поколения, таких как оптиковолоконные системы гиростабилизации, дает космическим аппаратам, оборудованным самыми современными системами, беспрецедентную маневренность. Они могут проводить съемку в любом месте 800-километровой полосы меньше чем за 25 с с точностью геопозиционирования меньше 3 м

(CE90) без использования наземных опорных точек и 1 м – с использованием наземных точек. Спутники способны снимать более 1 млн кв. км в день в панхроматическом и мультиспектральном режимах.

Таблица 1.14. Основные технические характеристик съемочной аппаратуры КА SPOT-6 и SPOT-7

Режим съемки	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон, мкм	0,48–0,71	0,50–0,59 (зеленый) 0,61–0,68 (красный) 0,78–0,89 (ближний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	2	8
Точность геопозиционирования, м	CE90 = 10	
Ширина полосы съемки, км	60	
Возможность получения стереопары	Да	
Производительность съемки, млн кв. км/сут.	3	

1.5.5. Космические аппараты ДЗЗ Японии

Наиболее известным японским спутником ДЗЗ являлся ALOS (оптико-электронная съемка с разрешением 2,5 м в панхроматическом режиме и 10 м – в мультиспектральном, а также радарная съемка в L-диапазоне с разрешением 12,5 м). КА ALOS был создан в рамках японской космической программы и финансируется Японским космическим агентством JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency).

КА ALOS был запущен в 2006 г., а 22 апреля 2011 г. возникли проблемы с управлением спутником. После трехнедельных безуспешных попыток восстановить работу космического аппарата 12 мая 2011 г. была дана команда на отключение питания оборудования спутника. В настоящее время доступны только архивные снимки.

На смену спутнику ALOS придут сразу два космических аппарата – один оптико-электронный, второй радарный. Таким образом, специалисты агентства JAXA отказались от совмещения на одной платформе оптической и радарной систем, что было реализовано на спутнике ALOS, на котором установлены две оптические камеры (PRISM и AVNIR) и один радар (PALSAR).

Радарный КА ALOS-2 запланирован к запуску в 2013 г.

Запуск оптико-электронного КА ALOS-3 запланирован на 2015 г. Он будет способен выполнять съемку в панхроматическом, мультиспектральном и гиперспектральном режимах.

Следует отметить также японский проект ASNARO (Advanced Satellite with New system ARchitecture for Observation), который был инициирован USEF (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer) в 2008 г. В основе проекта лежат инновационные технологии создания мини-спутниковых платформ (массой 100–500 кг) и съемочных систем. Одна из целей проекта ASNARO – создание мини-спутника сверхвысокого разрешения нового поколения, который бы мог конкурировать со спутниками других стран, аналогичными по своим характеристикам, за счет удешевления данных и возможности проектировать и изготавливать аппараты в более сжатые сроки. Спутник ASNARO предназначен для съемки земной поверхности в интересах правительственных организаций Японии.

Таблица 1.15. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА ALOS-2

Спектральный диапазон, мкм		**L-диапазон**
Периодичность съемки, сутки		14
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с		800
Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
SpotLight	1–3	25
StripMap	3–10	50–70
ScanSAR	100	350

Таблица 1.16. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА ALOS-3

Режим съемки	**Панхроматический**	**Мульти спектральный**	**Гипер-спектральный**
Пространственное разрешение (в надире), м	0,8	5	30
Ширина полосы съемки, км	50	90	30

Таблица 1.17. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА ASNARO

Режим съемки	**Панхроматический**	**Мультиспектральный**
Количество спектральных каналов	1	6
Пространственное разрешение (в надире), м	0,5	2
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12	
Ширина полосы съемки, км	10	

1.5.6. Космические аппараты ДЗЗ Индии

В стране на базе плановой системы государственного финансирования космической отрасли создана одна из самых эффективных программ ДЗЗ. В Индии успешно эксплуатируется группировка из космических аппаратов различного назначения, в том числе серии КА RESOURCESAT и CARTOSAT.

В дополнение к уже работающим на орбите спутникам в апреле 2011 г. был запущен КА RESOURCESAT-2, предназначенный для решения задач предотвращения стихийных бедствий, управления водными и земельными ресурсами.

Таблица 1.18. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА RESOURCESAT-2

Режим съемки	**LISS-4**		**LISS-3 (мульти-спектральный)**	**AWiFS (мульти-спектральный)**
	Моно-спектральный	**Мульти-спектральный**		
Спектральный диапазон, мкм	0,62–0,68	0,52–0,59 (зеленый) 0,62–0,68 (красный) 0,77–0,86 (ближний ИК)	0,52–0,59 (зеленый) 0,62–0,68 (красный) 0,77–0,86 (ближний ИК) 1,55–1,70 (средний ИК)	0,52–0,59 (зеленый) 0,62–0,68 (красный) 0,77–0,86 (ближний ИК) 1,55–1,70 (средний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	5,8		23,5	56
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	10		10	12
Ширина полосы съемки, км	70		141	740

Таблица 1.19. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА RISAT-1

Спектральный диапазон	С-диапазон			
Режим	**Номинальное пространственное разрешение, м**	**Ширина полосы съемки, км**	**Диапазон углов съемки, град.**	**Поляризация**
Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight – HRS)	< 2	10	20–49	Одинарная
Высокого разрешения (Fine Resolution Stripmap-1 – FRS-1)	3	30	20–49	
Высокого разрешения (Fine Resolution Stripmap-2 – FRS-2)	6	30	20–49	Четверная
Среднего разрешения / низкого разрешения (Medium Resolution ScanSAR– MRS / Coarse Resolution ScanSAR – CRS)	25/50	120/240	20–49	Одинарная

26 апреля 2012 г. был осуществлен запуск КА RISAT-1 с многофункциональным радиолокатором С-диапазона частот (5,35 ГГц). Спутник предназначен для круглосуточной и всепогодной съемки Земли в различных режимах. Съемка земной поверхности проводится в С-диапазоне длин волн с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV).

На орбите работает группировка оптико-электронных космических аппаратов картографической серии CARTOSAT. Очередной спутник серии CARTOSAT-3 планируется запустить в 2014 г. Он будет снабжен оптико-электронной аппаратурой с беспрецедентным пространственным разрешением 25 см.

1.5.7. Космические аппараты ДЗЗ Китая

Китай в течение последних 8 лет создал многоцелевую орбитальную группировку спутников ДЗЗ, состоящую из нескольких космических систем: спутники видовой разведки, а также предназначенные для океанографии, картографии, мониторинга природных ресурсов и чрезвычайных ситуаций.

В 2011 г. Китай запустил больше других стран спутников ДЗЗ: два спутника видовой разведки Yaogan (YG)-12 (с оптико-электронной системой субметрового разрешения) и Yaogan (YG)-13 (с радаром с синтезированной апертурой); КА Hai Yang (HY)-2A с микроволновым радиометром для решения океанографических задач; многоцелевой спутник мониторинга природных ресурсов Zi Yuan (ZY)-1-02C в интересах Министерства земельных и природных ресурсов (разрешение 2,3 м в панхроматическом режиме и 5/10 м в мультиспектральном режиме с полосой съемки шириной 54 км и 60 км); оптический микроспутник (35 кг) TianXun (TX) с разрешением 30 м.

В 2012 г. Китай опять стал лидером по количеству запусков – национальная группировка ДЗЗ (не считая метеорологических спутников) пополнилась еще пятью спутниками: Yaogan (YG)-14 и Yaogan (YG)-15 (видовая разведка), Zi Yuan (ZY)-3 и Tian Hui (TH)-2 (картографические спутники), радиолокационный КА Huan Jing (HJ)-1C.

Таблица 1.20. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА ТН-1 и КА ТН-2

Режим съемки	Панхроматический-	Мультиспектральный	Стереотриплет
Спектральный диапазон, мкм	0,51–0,69	0,43–0,52 (синий) 0,52–0,61 (зеленый) 0,61–0,69 (красный) 0,76–0,90 (ближний И К)	0,51–0,69
Расчетный срок функционирования, лет	2	10	5
Точность геопозиционирования, м	CE90 = 25		
Ширина полосы съемки, км	60	90	60
Периодичность съемки, сут.	9		
Возможность получения стереопары	Да		

Космические аппараты ТН-1 и ТН-2 – первые китайские спутники, которые могут получать стереоснимки в виде триплета для геодезических измерений и картографических работ. Они идентичны по своим техническим характеристикам и работают по единой программе. Каждый спутник оснащен тремя камерами – стереокамерой для получения стереотриплет снимков, панхроматической камерой высокого разрешения и мультиспектральной камерой, которые могут выполнять съемку всей земной поверхности для научных исследований, мониторинга земельных ресурсов, геодезии и картографии.

Спутники предназначены для решения многих задач:

- создание и обновление топографических карт;
- создание цифровых моделей рельефа;
- создание 3D-моделей;
- мониторинг изменений ландшафтов;
- мониторинг землепользования
- мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности;
- мониторинг лесопользования и состояния лесов;
- мониторинг ирригационных сооружений;
- мониторинг качества воды.

1.5.8. Космические аппараты ДЗЗ европейского космического агентства

В 1998 г. для обеспечения всеобъемлющего мониторинга окружающей среды руководящими органами Европейского союза было принято решение о развертывании программы GMES (Global Monitoring for Environment and Security), которая должна была осуществляться под эгидой Еврокомиссии в партнерстве с Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA) и Европейским агентством по окружающей среде (European Environment Agency, EEA). Являясь на сегодняшний день наиболее масштабной программой наблюдения Земли, GMES обеспечивает государственные органы и других пользователей Евросоюза высокоточной, современной и доступной информацией для улучшения контроля изменений окружающей среды, понимания причин изменения климата, обеспечения безопасности жизни людей и решения других задач.

На практике в законченном виде GMES будет состоять из сложного комплекса систем наблюдения: спутников ДЗЗ, наземных станций, морских судов, атмосферных зондов и т.д. [21].

Космический компонент GMES будет опираться на два типа систем ДЗЗ: спутники Sentinel, специально предназначенные для программы GMES (их оператором будет ESA), и национальные (или международные) спутниковые системы ДЗЗ, включенные в так называемые миссии содействия GMES (GMES Contributing Missions; GCMs).

Запуск первых спутников Sentinel начался с 2013 г. Предусмотрительно, что они будут вести съемку с использованием различных технологий, например, с помощью радаров и оптико-электронных мультиспектральных сенсоров.

Для реализации программы GMES под общим руководством ESA ведется разработка пяти типов спутников ДЗЗ Sentinel, каждый из которых будет осуществлять определенную миссию, связанную с мониторингом Земли.

Так, каждая миссия Sentinel будет включать в себя группировку из двух спутников для обеспечения наилучшего охвата территории и ускорения повторных съемок, что послужит повышению надежности и полноты данных для GMES.

Миссия Sentinel-1 будет представлять собой группировку из двух радарных спутников на полярной орбите, оснащенных радаром с синтезированной апертурой (SAR) для съемок в С-диапазоне.

Съемка радарных спутников Sentinel-1 не будет зависеть от погоды и времени суток. Первый спутник миссии был запущен в 2013 г., а второй – в 2015 г. Предназначенная специально для программы GMES миссия Sentinel-1 продолжит радарные съемки С-диапазона, начатые и продолжаемые спутниковыми системами ERS-1, ERS-2, Envisat (оператор – ESA) и RADARSAT-1,2 (оператор – компания MDA, Канада).

Группировка Sentinel-1, как ожидается, будет обеспечивать съемками всю территорию Европы, Канады, а также основные морские судоходные пути каждые 1–3 дня независимо от погодных условий. Радарные данные будут поставляться в течение часа после проведения съемки – это большой шаг вперед по сравнению с существующими радарными спутниковыми системами.

Таблица 1.21. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры KA SENTINEL-1

Спектральный диапазон	**С-диапазон**		
Периодичность съемки, сут.	1–3		
Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км	Поляризация
«Interferometric Wide Swath»	5 × 20	250	Двойная (по выбору – HH/HV или VV/VH)
«Extra Wide Swath»	20 × 40	400	
«Stripmap»	5 × 5	80	
«Wave»	20 × 5	20 × 20	Одинарная (по выбору – VV или HH)

Таблица 1.22. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры KA SENTINEL-2

Режим съемки	**VNIR**										**SWIR**		
Спектральные каналы	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	12
Спектральный диапазон, мкм	0,44	0,49	0,56	0,66	0,70	0,74	0,78	0,84	0,86	0,94	1,38	1,61	2,19
Пространственное разрешение (в надире), м	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20
Ширина полосы съемки, км	290												
Периодичность съемки, сут.	От 5 (на экваторе) до 2–3 (в средних широтах)												

Пара спутников Sentinel-2 будет регулярно поставлять космические снимки высокого разрешения на всю Землю, обеспечивая непрерывность получения данных с характеристиками, аналогичными программам SPOT и Landsat.

Sentinel-2 будет оснащен оптикоэлектронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в том числе и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние на качество съемки атмосферы.

Орбита высотой в среднем 785 км, наличие в миссии двух спутников позволят проводить повторные съемки каждые 5 дней на экваторе и каждые 2–3 дня в средних широтах. Первый спутник планируется запустить в 2014 г.

Увеличение ширины полосы обзора наряду с высокой повторяемостью съемок позволит отслеживать быстро изменяющиеся процессы, например характер растительности в течение вегетационного периода.

Уникальность миссии Sentinel-2 связана с сочетанием большого территориального охвата, частых повторных съемок и как следствие – систематическим получением полного покрытия всей Земли мультиспектральной съемкой высокого разрешения.

Основной целью миссии Sentinel-3 является наблюдение за топографией поверхности океана, температурой поверхности моря и суши, цветом океана и суши с высокой степени точности и надежности для поддержки систем прогнозирования состояния океана, а также для мониторинга окружающей среды и климата.

Sentinel-3 – наследник хорошо себя зарекомендовавших спутников ERS-2 и Envisat. Пара спутников Sentinel-3 будет иметь высокую повторяемость съемок. Орбиты спутников (815 км) обеспечат получение полного пакета данных каждые 27 дней. Запуск первого спутника миссии Sentinel-3 запланирован на 2013 г., сразу же после Sentinel-2. Спутник Sentinel-3B планируется запустить в 2018 г. Миссии Sentinel-4 и Sentinel-5 предназначены для обеспечения данными о составе атмосферы соответствующих сервисов GMES. Обе миссии будут реализовываться на платформе метеорологических спутников, оператором которых является Европейская организация спутниковой метеорологии EUMETSAT.

Спутники планируется запустить в 2017–2019 гг. [21].

1.5.9. Космические аппараты ДЗЗ других стран

Кроме вышерассмотренных индустриально развитых государств, направленное дистанционное зондирование Земли активно развивается и в ряде других государств [21].

Канада планирует и дальше развивать серию спутников RADARSAT, укрепляя лидирующие позиции на рынке радарной съемки. В настоящее время на орбите находятся спутники RADARSAT-1 и RADARSAT-2.

Компания MDA 9 января 2013 г. объявила о подписании контракта стоимостью 706 млн долл. с Канадским космическим агентством на создание и запуск группировки из трех радарных спутников RADARSAT Constellation Mission (RCM). Срок действия контракта – 7 лет.

Группировка RCM обеспечит круглосуточное покрытие радарной съемкой территории страны. Данные могут включать в себя повторные снимки одних и тех же районов в разное время суток, что значительно улучшит мониторинг прибрежных зон, территорий северных, арктических водных путей и других областей стратегических и оборонных интересов. Система RCM также будет включать комплекс автоматизированного дешифрирования снимков, который в сочетании с оперативным получением данных позволит немедленно обнаруживать и идентифицировать морские суда по всему Мировому океану. Предполагается значительное ускорение обработки данных.

С начала работ по реализации космической программы в 1992 г. в ***Республике Корея*** создана национальная система ДЗЗ.

Корейский институт аэрокосмических исследований (K ARI) разработал серию спутников наблюдения Земли KOMPSAT (Korean Multi-Purpose Satellite). КА KOMPSAT-1 использовался для военных целей до конца 2007 г. В 2006 г. на орбиту был выведен спутник KOMPSAT-2.

Запущенный в 2012 г. КА KOMPSAT-3 является продолжением миссии KOMPSAT и предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 0,7 м в панхроматическом режиме и 2,8 м в мультиспектральном режиме.

Проект KOMPSAT-5 является частью Корейского национального плана развития MEST (Министерство образования, науки и технологии), который стартовал в 2005 г. КА KOMPSAT-5 также разрабатывается Корейским институтом аэрокосмических исследований (KARI). Основная задача заключается в создании радарной спутниковой системы для решения мониторинговых задач. Съемка земной поверхности будет проводиться в С-диапазоне с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV).

В ***Великобритании*** компания DMC International Imaging Ltd. (DMCii) является оператором группировки спутников DMC (Disaster Monitoring Constellation) и работает как в интересах правительств стран – владельцев спутников, так и осуществляет поставки космических снимков для коммерческого использования. Группировка DMC обеспечивает оперативную съемку районов стихийных бедствий для государственных агентств и коммерческого использования. Спутники также ведут съемку для решения задач сельского, лесного хозяйства и др. Разра-

ботчик спутников – британская компания Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL). Все спутники находятся на солнечно-синхронной орбите для обеспечения ежедневных глобальных покрытий съемками.

Входящий в группировку DMC британский КА UK-DMC-2 был запущен в 2009 г. Он ведет съемку в мультиспектральном режиме с разрешением 22 м в полосе шириной 660 м. На 2014 г. запланирован запуск трех новых спутников DMC-3a,b,c с улучшенными характеристиками. Они будут вести съемку в полосе шириной 23 км с разрешением в панхроматическом режиме 1 м и в 4-канальном мультиспектральном режиме (включая инфракрасный канал) – 4 м.

В настоящее время компания SSTL завершает разработку нового бюджетного радарного спутника: 400-килограммовый КА NovaSAR-S будет представлять собой платформу SSTL-300 с инновационным радаром для съемки в S-диапазоне. Подход SSTL к инжинирингу и проектированию позволяет развернуть миссию NovaSAR-S в полном объеме в течение 24 месяцев с момента заказа.

NovaSAR-S будет вести радарную съемку в четырех режимах с разрешением 6–30 м в различных комбинациях поляризации. Технические параметры спутника оптимизированы для широкого спектра задач, включая мониторинг наводнений, оценку состояния сельскохозяйственных культур, мониторинг лесов, классификацию растительного покрова, борьбу со стихийными бедствиями и наблюдения за акваториями, в частности для слежения за кораблями, обнаружения разливов нефти.

В ***Испании*** формируется национальная испанская группировка спутников ДЗЗ. В июле 2009 г. на орбиту был выведен спутник Deimos-1, который входит в состав международной группировки DMC. Он ведет съемку в мультиспектральном режиме с разрешением 22 м в полосе шириной 660 м. Оператор спутника, компания Deimos Imaging, появилась в результате сотрудничества испанской авиационно-космической инжиниринговой компании Deimos Space и Лаборатории ДЗЗ при Вальядолидском университете (Remote Sensing Laboratory of the University of Valladolid (LATUV). Основная цель новой компании – разработка, внедрение, эксплуатация и коммерческое использование систем Д ЗЗ. Компания расположена в г. Вальядолиде (Испания).

В настоящее время компания Deimos Imaging разрабатывает спутник высокого разрешения Deimos-2, запуск которого запланирован на 2013 г. КА Deimos-2 предназначен для получения недорогих мультиспектральных данных ДЗЗ высокого качества. Вместе с КА Deimos-1 спутник Deimos-2 составит единую спутниковую систему Deimos Imaging.

В ближайшие два года начнется реализация национальной программы наблюдения Земли из космоса PNOTS (Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite). КА Paz (в переводе с испанского языка – мир; другое название – SEOSAR – Satélite Español de Observación SAR) – первый испанский радарный спутник двойного назначения – является одним из компонентов этой программы. Спутник будет способен проводить съемку в любых погодных условиях, днем и ночью, и в первую очередь будут выполняться заказы испанского правительства, связанные с вопросами безопасности и обороны. КА Paz будет снабжен радаром с синтезированной апертурой, разработанным компанией Astrium GmbH на платформе радара спутника TerraSAR-X.

КА Amazonia-1 также будет снабжен британской оптико-электронной системой RALCam-3, которая будет вести съемку с разрешением 10 м в полосе обзора 88 км. Малый радарный спутник MAPSAR (Multi-Application Purpose) – совместный проект INPE и Аэрокосмического центра Германии (DLR). Спутник предназначен для работы в трех режимах (разрешение – 3, 10 и 20 м). Его запуск запланирован на 2015 г.

В рамках этого раздела мы не ставили задачу проанализировать все новые и перспективные национальные системы ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения. Сейчас уже ***более 20 стран*** обзавелись своими собственными спутниками наблюдения Земли. Помимо упомянутых в статье стран такие системы имеют ***Германия*** (группировка оптико-электронных спутников RapidEye, радарные космические аппараты TerraSAR-X и TanDEM-X), ***Израиль*** (КА EROS-A,B), ***Италия*** (радарные КА COSMO-SkyMed-1-4) и др. Каждый год этот своеобразный космический клуб пополняется новыми странами и системами ДЗЗ. В 2011–2012 гг. своими спутниками обзавелись ***Нигерия*** (Nigeriasat-X и Nigeriasat-2), ***Аргентина*** (SAC-D), ***Чили*** (SSOT), ***Венесуэла*** (VRSS-1) и др. Запуск в декабре 2012 г. спутника Gokturk-2 (разрешение в панхроматическом режиме 2,5 м, в мультиспектральном – 10 м) продолжил турецкую программу ДЗЗ (на 2015 г. запланирован запуск третьего спутника серии Gokturk). В 2013 г. ***Объединенные Арабские Эмираты*** планируют запуск собственного спутника сверхвысокого разрешения Dubaisat-2 (разрешение в панхроматическом режиме 1 м, в мультиспектральном – 4 м). Ведутся работы над созданием принципиально новых систем космического мониторинга. Так, американская компания Skybox Imaging, базирующаяся в Силиконовой долине, работает над созданием самой высокопроизводительной в мире инновационной группировки миниспутников ДЗЗ – SkySat. Она позволит получать космические снимки высокого разрешения на любой район Земли по нескольку раз в день. Данные будут использованы для оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, мониторинга окружающей среды и т.д. Съемка будет вестись в панхроматическом и мультиспектральном режимах. Первый спутник группировки, SkySat-1, планируется запустить в 2013 г. После полного развертывания группировки (а всего планируется иметь на орбите до 20 спутников) у пользователей будет возможность просмотра любой точки Земли в режиме реального времени. Планируется также возможность проведения видеосъемки из космоса.

1.6. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли

Сегодня среди космических аппаратов радиолокационного дистанционного зондирования наибольшее практическое применение получили радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) [15, 16, 23]. Такие РЛС позволяют получить радиолокационное изображение очень высокого качества, поскольку их разрешающая способность существенно возрастает в сравнении с системами, имеющими реальные размеры апертуры антенны.

В основу этого параграфа положены материалы краткого, но качественного обзора космических аппаратов ДЗЗ, имеющих на борту РЛС базового обзора с РСА [23].

Анализ этих материалов показал, что уже создано немало космических систем с аппаратами дистанционного зондирования, оснащенными РСА, позволяющими получать качественное радиолокационное изображение, сопоставимое со снимками поверхности Земли оптических и оптико-электронных систем.

Современные радиолокаторы землеобзора с синтезированной апертурой антенны имеют огромные информационные возможности при условии дальнейшего совершенствования как способов дистанционного зондирования, алгоритмов и технических средств обработки и интерпретации доставляемой информации, так и совершенствования элементной базы для реализации глобальной аэрокосмической системы непрерывного отслеживания динамических процессов природного и техногенного характера, контроля состояния экосистем и мониторинга вооруженных конфликтов.

Уже создана аппаратурная база для реализации космических РСА, в основном удовлетворяющих требования гражданских и военных потребителей информации в рамках ограничений регламента радиосвязи по выделенным частотным диапазонам для дистанционного зондирования Земли из космоса.

Непременным фактором извлечения тематической информации по результатам радиолокационного зондирования, как показано в [23], является применение измерительных технологий.

Наряду с использованием амплитудных (или энергетических) изображений, позволяющих измерять эффективную площадь рассеяния (ЭПР) объектов и удельную ЭПР земных покровов при разной поляризации, получает все большее применение интерферометрическая обработка комплексных изображений (построение карт рельефа местности, дифференциальная интерферометрия, измерение скорости компактных и распределенных объектов, поляриметрическая интерферометрия) [23].

Активно применяется зондирование в разных диапазонах волн с помощью РСА, размещаемых на разных космических аппаратах. Обеспечивается получение радиолокационных снимков с высоким разрешением (0,5–1,5 м) в 3-см диапазоне волн для решения задач видовой разведки, обнаружения малоразмерных объектов на открытой местности, а также с разрешением от 3 м в диапазонах волн 3 и 5,6 см для мониторинга растительного покрова и других задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В отличие от сантиметровых диапазонов, зондирование в дециметровом диапазоне 23 см с разрешением от 3-7 м имеет преимущества: можно обнаружить объекты техники под лиственным покровом, значительно увеличивается стабильность фазы сигнала для интерферометрической обработки (построение карт рельефа и обнаружение изменений в оперативной обстановке методом дифференциальной интерферометрии). Возрастают возможности оценки объема биомассы и определения типа и состояния растительного покрова.

Важное направление совершенствования РСА, обусловленное улучшением пространственного и радиометрического разрешения, – это широкое внедрение методов радиовидения и многопозиционного зондирования с получением трехмерных радиолокационных портретов объектов, детально выявляющих их форму, а также применение автоматических методов классификации объектов по их радиолокационным портретам и текстуре изображения.

Многопозиционное зондирование и миниатюризация приемных датчиков на дешевых мини-спутниках и беспилотных летательных аппаратах позволит обеспечить непрерывный контроль локальных районов для сопровождения военных операций и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Разрабатываемые перспективные средства дистанционного зондирования Земли с помощью многорежимных многофункциональных РСА интегрируются в геоинформационную систему (ГИС), что дает возможность вести более точные расчеты формы геоида для составления высокоточных цифровых карт рельефа, климатических исследований, исследований взаимодействия океан – атмосфера.

Кардинальная проблема дистанционного зондирования Земли, в которой намечены только первые шаги, – это решение обратной задачи определения и описания свойств наблюдаемой поверхности, наземных и подземных (подводных) объектов с использованием радиолокационной информации.

Широкие возможности дистанционного изучения Земли появились в конце 1960-х годов с внедрением в практику гражданских исследований радиолокационных и сканерных методов, разработанных для военной разведки, которые позволили проводить съемки в ранее не использовавшихся диапазонах электромагнитных волн и получать качественно иную информацию, в том числе изображения разных по площади участков поверхности Земли. Появились такие методы съемки, как многозональное и инфракрасное (ИК) фотографирование, тепловые и пассивные методы картографирования в СВЧ-диапазоне. Системы, работающие на основе этих методов, позволяют собирать данные о поверхности Земли путем анализа ее СВЧ- и ИК-излучений и отраженных электромагнитных колебаний в видимой и ближней ИК-областях спектра. Все датчики указанных систем, по существу, являются пассивными, то есть воспринимают только ту энергию, которая излучается поверхностью Земли или переизлучается ею в процессе отражения солнечного излучения.

Принципиально новые возможности дает применение радиолокационных систем, работающих в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения. РЛС БО, установленная на борту КА ДЗЗ, посылает к поверхности Земли сфокусированный антенной узконаправленный высокочастотный электромагнитный импульсный сигнал. Отразившись от сканируемой поверхности, он вновь принимается приемной антенной и регистрируется на борту носителя приемной аппаратурой. Поскольку такие системы используют свою собственную энергию излучения и работают на относительно длинных волнах, такие съемки можно проводить в любое время суток, при любых погодных условиях и облачности, так как поток электромагнитного излучения в определенном диапазоне длин волн, направляемый антенной системы, беспрепятственно проходит сквозь облака, дождь и туман. Кроме того, такие системы предоставляют уникальную возможность непрерывного контроля динамических процессов на поверхности планеты.

В силу изложенных причин радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли находят очень широкое применение. На практике применяются как РЛС БО с реальной апертурой (их называют также некогерентными РЛС БО), так и радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны – так называемые когерентные РЛС БО [15]. Разрешающая способность некогерен-

тных РЛС БО определяется размерами реальной апертуры антенны, и их преимущество заключается в относительной простоте самого радиолокатора и системы обработки информации, а также в более широкой полосе обзора. Недостатком является низкая разрешающая способность. Когерентные РЛС БО дают возможность получать более высокое разрешение, но требуют довольно сложной системы обработки сигналов.

Радиолокационные системы бокового обзора относятся к числу наиболее универсальных и информативных датчиков дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне. Пространственная разрешающая способность радиолокационной аппаратуры ДЗЗ (10–100 м для РСА и 1–2 км для некогерентных РЛС БО) сопоставима с разрешением оптических систем [14].

Наибольшее практическое применение в настоящее время находят РЛС с синтезированной апертурой антенны. Их принцип действия основан на использовании перемещения бортовой антенны РЛС для последовательного формирования антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна при этом имеет небольшие размеры и широкую диаграмму направленности. В каждой точке траектории полета носителя РСА формирует вполне определенную амплитудную и фазовую информацию о просматриваемых участках местности и объектах на ней, соответствующую мгновенным значениям их текущих координат относительно КА. Выделяется эта информация (радиоголограмма) из совокупности принимаемых импульсных радиосигналов [24].

Несмотря на сложность и высокую стоимость РСА космического базирования (РСА КБ), их разработка и эксплуатация позволяют решать множество важных задач, зачастую доступных только лишь этому способу дистанционного зондирования. Именно такие системы находят свое применение и при решении навигационных задач. Для их успешного решения, с целью как можно более точной привязки получаемого радиолокационного изображения (РЛИ) к объектам на местности, необходимо получение РЛИ с как можно более высоким пространственным разрешением, что может обеспечить лишь только синтезирование апертуры.

В связи с этим из всего множества КА ДЗЗ рассмотрим только системы, оснащенные РСА. Кроме орбитальных параметров движения каждый КА ДЗЗ имеет много различных технических характеристик и параметров функционирования установленного на борту целевого оборудования (излучаемая мощность, частотный диапазон, поляризация сигнала, ширина полосы сканирования и др.). Но одной из важнейших характеристик систем зондирования является разрешающая способность. Она может быть пространственной и радиометрической (яркостной). Радиометрическая разрешающая способность определяется количеством уровней дискретизации яркости и зависит от ширины динамического диапазона.

Пространственная разрешающая способность зависит от длины волны, размера апертуры антенны и высоты орбиты [14]:

$$r \sim (\lambda/D)H,$$

где r – пространственное разрешение; λ – длина волны; D – размер апертуры антенны; H – высота орбиты.

Из приведенного соотношения видно, что для получения высокого пространственного разрешения необходимо стремиться к увеличению размера апертуры антенны и иметь как можно меньшую длину волны. Длина волны определяется рабочим диапазоном частот электромагнитного излучения РЛС и имеет достаточно большую величину в сравнении со световым диапазоном оптических средств. В связи с этим для увеличения пространственной разрешающей способности РЛС БО необходимо увеличивать размеры апертуры антенны. Однако это практически нереализуемо технически, так как для получения требуемого разрешения необходимо иметь очень большие габаритные размеры реальной апертуры антенны в некогерентных РЛС.

На помощь приходит принцип синтезирования апертуры, при котором размер апертуры увеличивается за счет движения относительно небольшой антенны вдоль обследуемой поверхности. В таких (когерентных) РЛС две соседние цели разрешаются благодаря различиям во временных задержках отраженных сигналов и в доплеровских частотах, изменяющихся во времени. Следует заметить, что эти различия не зависят от расстояния до цели, и в связи с этим разрешающая способность РЛС БО с РСА существенно не зависит от высоты орбиты КА ДЗЗ.

На сегодня в космическом пространстве используются различные типы космических систем ДЗЗ с синтезом апертуры: ERS, Radarsat, IGS-3R, Yaogan, COSMO SkyMed, TerraSAR-X, SAR-Lupe, TECSAR, ENVISAT, ALOS, SIR-X SAR и другие (таблица).

Ниже представлены основные технические характеристики некоторых из таких систем [14].

Европейская космическая система дистанционного зондирования земли ERS (European Remote Sensing satellite)

Целевая аппаратура космических аппаратов ERS включает аппаратуру микроволнового зондирования AMI (Active Microwave Instrument), которая устанавливается на обоих космических аппаратах (ERS-1 и -2) и обеспечивает различные режимы работы. Режим построения радиолокационных изображений подстилающей поверхности с использованием синтезирования апертуры антенны (AMI-SAR image mode) имеет такие характеристики:

- излучаемая мощность: 1270 Вт;
- частота излучения: 5,3 ГГц;
- ширина спектра излучаемых сигналов: 15,5 ± 0,06 МГц;
- поляризация излучаемых и принимаемых волн: вертикальная линейная;
- длительность импульса: 37,1 мкс;
- пространственное разрешение: 30 м;
- точность определения высоты наземных объектов при интерферометрических измерениях: 10 м;
- радиометрическое разрешение: 2,5 дБ (при пространственном разрешении 30 м) и 1 дБ (при пространственном разрешении 100 м);
- ширина полосы сканирования: 100 км при угле падения излучаемых ЭМВ на поверхность Земли 23° в центре полосы обзора.

Таблица 1.23. Основные орбитальные параметры и технические характеристики различных КА ДЗ с РСА

Космический аппарат	Высота орбиты КА, км	Наклонение орбиты КА	Рабочая длина волны, см (частота, ГГц)	Режим функционирования РСА	Пространственное разрешение (азимут-дальность), м	Ширина полосы обзора (размер кадра), км
ERS-1	782 × 785	98,5°	(5,3)	–	30	100
ERS-2	782 × 798	98,54°				
ENVISAT-1	820	98,55°	7,69–4,84 (3,9–6,2)	7 избираемых полос	30	100
				Обзорный	100	400
				Глобальный	1000	400
JERS-1	567 × 569	97,7°	(1,275)	–	18	75
ALOS	700	98,1°	(1,275)	Высокое разрешение	5–10	70
				Низкое разрешение	–	250
Radarsat	743	98,6°	(5,263)	Стандартный	28 × 25	500
				Широкий обзор	28 × 35	300
				Высокое разрешение	9 × 10	200
				Обзорный	30 × 35	300
				Обзорный	50 × 50	300
				Обзорный	55 × 32	500
				Обзорный	100 × 100	500
				Экспериментальный	28 × 30	300
				Экспериментальный	28 × 40	170
Алмаз-1А	280	72,7°	(3)	–	15	30
Алмаз-1Б	400	–	3,5	–	5–7	20–35
			9,6	Детальный	5–7	30–55
				Промежуточный	15	60–70
				Обзорный	15–40	120–170
			70	–	20–40	120–170
COSMO	600–650	98°	(9,65)	–	3	40
					6–12	100–120

Таблица 1.23 (окончание)

Космический аппарат	Высота орбиты КА, км	Наклонение орбиты КА	Рабочая длина волны, см (частота, ГГц)	Режим функционирования РСА	Пространственное разрешение (азимут-дальность), м	Ширина полосы обзора (размер кадра), км
COSMO-SkyMed 1	614,4 × 633	97,86°	3,1 (9,6)	В зависимости от требуемого разрешения	Менее 1	(10 x 10)
					3–15	40
					30	100
					100	200
Lacrosse	676 × 696	68°	(9,5–10,5)	Детальный	Менее 1	(2–4 × 2–4)
				Обзорный	2–3	(6–20 × 6–20)
					10–15	100
SIR-C/X-SAR (Space Shuttle)	233 × 240	57°	(5,298)	–	30 × 13–26	15–90
			(9,6)			15–40
			–	Телескопический	8–10	–
Osiris	600–800	90°	3	–	3–5	30–50
TerraSAR-X	507,7 × 512,5	97,45°	(9,65)	Прожекторный	1–2	(5–10 x 10)
				Маршрутный	3	(30 x 50)
				Обзорный	16	(100 x 150)
				Сверхдетальный	0,5–1	–

Космический аппарат дистанционного зондирования земли ENVISAT-1

Аппаратура дистанционного зондирования ИСЗ ENVISAT-1 имеет в своем составе усовершенствованную радиолокационную систему ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), которая является усовершенствованным вариантом РЛС с синтезированной апертурой, использованной на ИСЗ серии ERS. Система ASAR работает на частотах С-диапазона (3,9–6,2 ГГц или 7,69–4,84 см) и обеспечивает всепогодное наблюдение до семи избираемых полос вдоль трассы ИСЗ общей шириной 100 км с разрешением 30 м либо одной полосы шириной 400 км с разрешением 100 м. В режиме глобального наблюдения осуществляется просмотр полосы шириной 400 км с разрешением 1 км. Радиометрическая точность измерений составляет 0,65 дБ, радиометрическое разрешение – 1,5–3,5 дБ.

Японский космический аппарат разведки природных ресурсов JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite, японское название Fuyo-1)

Радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны (реальные размеры антенной решетки – 11,9 × 2,5 м) предназначена для всепогодной съемки земной поверхности и береговой зоны моря с получением радиолокационных изображений высокого разрешения. Она имеет следующие характеристики:

- рабочая частота: 1275 МГц;
- пространственное разрешение: 18 м;
- ширина полосы обзора: 75 км, край полосы обзора смещен на 326 км вправо от трассы ИСЗ;
- мощность в импульсе: 1,3 кВт;
- длительность импульса: 35 мкс.

Японский ИСЗ разведки природных ресурсов ALOS (Advanced Land Observation Satellite)

ИСЗ имеет на борту радиолокационную систему высокого разрешения VSAR, обладающую следующими техническими характеристиками:

- рабочая частота: 1,275 ГГц;
- ширина спектра излучаемых сигналов: 15 МГц;
- предельное пространственное разрешение: 10 м (по наклонной дальности), 5 м (вдоль трассы ИСЗ);
- точность измерения ЭПР поверхности: ±1 дБ;
- ширина полосы обзора: 70 км (в режиме высокого разрешения),250 км (в режиме низкого разрешения).

Канадская система разведки природных ресурсов Земли Radarsat (Radar Satellite)

Размеры антенны РЛС – 15 × 1,5 м. Многофункциональная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны, устанавливаемая на ИСЗ серии Radarsat, предназначена для всепогодной съемки поверхности планеты, наблюдения за движением судов и перемещением ледового покрова, картографирования земной поверхности и многого другого.

РСА космического аппарата Radarsat имеет следующие основные характеристики:

- рабочая частота: 5,263 ГГц;
- пространственное разрешение: 9–100 м (в зависимости от режима работы);

- поляризация излучаемых и принимаемых сигналов: линейная горизонтальная;
- средняя излучаемая мощность: 300 Вт;
- импульсная излучаемая мощность: 5 кВт;
- ширина полосы пропускания: 11,6, 17,3 и 30 МГц;
- частота дискретизации: 12,9, 18,5 и 32,3 МГц;
- длительность импульса: 42 мкс;
- частота повторения импульсов: 1270–1390 Гц.

РЛС может изменять положение полосы обзора относительно трассы космического аппарата. Ширина полосы обзора варьируется в пределах от 45 до 500 км в соответствии с требуемым сектором углов наблюдения и пространственным разрешением.

Российская программа «Алмаз»

Программа «Алмаз» по изучению ресурсов Земли с использованием космических аппаратов с РСА. Радиолокационная система с синтезированной апертурой космических аппаратов «Алмаз-1А» включала две волноводные антенные решетки размером 1,5 × 15 м, формирующие два отдельных луча, и имела следующие характеристики:

- рабочая частота: 3 ГГц;
- пространственное разрешение: 15 м;
- поляризация передаваемых и принимаемых сигналов: линейная горизонтальная;
- излучаемая мощность: 190 Вт (импульсная), 80 Вт (средняя);
- длительность зондирующих импульсов: 0,07 и 0,1 мс;
- частота повторения импульсов: 3 кГц;
- ширина луча РСА на местности: 30 км;
- ширина полосы захвата: 350 км;
- протяженность записи радиолокационного изображения вдоль трассы ИСЗ: 20–240 км.

В продолжение программы «Алмаз» создан КА «Алмаз-1Б», бортовой радиолокационный комплекс которого предназначен для всепогодного наблюдения земной поверхности и состоит из трех подсистем, обеспечивающих зондирование на различной частоте и в разных режимах:

- РСА-3: рабочая длина волны 3,5 см, разрешение на местности 5-7 м, ширина полосы обзора 20–35 км;
- РСА-10: рабочая длина волны 9,6 см, разрешение на местности 5-7 м и ширина полосы обзора 30–55 км (детальный режим), разрешение на местности 15 м и ширина полосы обзора 60–70 км (промежуточный режим), разрешение на местности 15–40 м и ширина полосы обзора 120–170 км (обзорный режим);
- РСА-70: рабочая длина волны 70 см, разрешение на местности 20–40 м, ширина полосы обзора 120–170 км.

В российском научно-производственном предприятии «Вега» проектируется многофункциональный радиолокационный комплекс нового поколения «Экор-1В» для КА «Алмаз-1В». Трехчастотный радиолокационный комплекс «Экор-1В» работает в сантиметровом диапазоне: 3,49 см (разрешающая способность 5-7 м при

ширине полосы обзора 20–35 км); 9,58 см (разрешающая способность по дальности: 5–7 м и 22 м, по азимуту: 5 м и 15 м при ширине полосы обзора 25–100 км); 69,8 см (разрешающая способность 20–40 м при ширине полосы обзора 100–150 км).

Российский модуль дистанционного зондирования Земли «Природа»

Модуль «Природа» являлся космической платформой, оснащенной разнообразной аппаратурой ДЗЗ и действовавшей в составе орбитальной станции «Мир» с апреля 1996 года. Радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны «Траверс» имела следующие основные характеристики: рабочая длина волны – 9,3 и 23 см; пространственное разрешение – 50–150 м; ширина полосы обзора – 50 км.

Космические аппараты ДЗЗ COSMO (Италия, Испания, Греция)

КА ДЗЗ COSMO оснащаются РСА, функционирующей на рабочей частоте 9,65 ГГц, которая обеспечивает пространственное разрешение 3 м при ширине полосы обзора 40 км и 6–12 м при 100–120 км соответственно.

КА ДЗЗ двойного назначения COSMO-SkyMed (Италия)

Разворачиваемая с июня 2007 года орбитальная группировка КА ДЗЗ двойного назначения COSMO-SkyMed имеет в своем составе четыре космических аппарата [25]. На КА COSMO-SkyMed 1 установлен радар SAR-2000 с синтезированием апертуры, имеющий размеры антенны 5,7 × 1,4 м. Радиолокатор работает в X-диапазоне длин волн (6,2–10,9 ГГц или 4,84–2,75 см) на частоте 9,6 ГГц (длина волны 3,1 см). В различных режимах работы он обеспечивает разрешение на местности менее 1, 3–15, 30 и 100 м при соответствующей ширине полосы обзора 10 × 10, 40, 100 и 200 км.

Система радиолокационной разведки Lacrosse

Характерным примером КА ДЗЗ военного назначения является система Lacrosse, созданная в США компанией Martin Marietta. Ориентировочно начальная стоимость разработки системы составляла около 3 млрд долл., один КА стоил 0,5–1 млрд долл. Предполагалось, что орбитальная группировка должна будет насчитывать шесть КА. Наиболее вероятно, что рабочий частотный диапазон РЛС КА Lacrosse находится в пределах полосы 9,5–10,5 ГГц; разрешающая способность радиолокационного снимка на местности в детальном режиме менее 1 м, размер кадра – 2-4 на 2-4 км; в обзорном режиме – разрешение 2-3 м, размер кадра 6–20 на 6–20 км. Не исключена возможность ведения съемки полосой шириной около 100 км, при этом разрешающая способность составит 10–15 м. Разведка, проводимая КА Lacrosse, является стратегической, и эта КА предназначена для длительного наблюдения с высокой разрешающей способностью небольших участков местности.

Радиолокационный комплекс

SIR-C/X-SAR Комплекс разработан по заказам НАСА (США) и космических управлений Германии и Италии [26]. Разработчики аппаратуры – лаборатория реактивного движения и фирма Ball Communication (США), компании Domier (Германия) и Selena (Италия). Комплекс состоит из трех РЛС с синтезом апертуры, работающих в диапазонах L (1248 МГц), C (5298 МГц) и X (9600 МГц). Мощность излучения в импульсе составляет 4,3; 2,25 и 3,3 кВт соответственно. Ширина полосы обзора – 15–90 км (SIR-C) и 15–40 км (X-SAR). Разрешающая способность

по азимуту составляет 30 м, по дальности 13 или 26 м (два варианта). В телескопическом режиме может быть получено разрешение по дальности 8-10 м.

Французский КА ДЗЗ Osiris на базе проекта Radar 2000

Заказчик – министерство обороны Франции, исполнители – фирмы Matra Marconi Space и Alcatel Espace. КА имеет РСА сантиметрового диапазона, которая обеспечивает разрешающую способность 3-5 м при ширине полосы обзора 30–50 км.

Примером современного коммерческого КА ДЗЗ с РСА, способного решать широкий круг задач, в том числе военного назначения, служит выведенный 15 июня 2007 года на солнечно-синхронную орбиту немецкий спутник радиолокационной съемки Земли TerraSAR-X [16]. Космическое агентство Германии DLR взяло на себя основную долю расходов по TerraSAR-X и стало партнером германского отделения Astrium GmbH европейского концерна EADS. В проекте стоимостью 130 млн евро доля DLR составила 102 млн, а EADS – 28 млн евро. Аппаратурой целевого назначения спутника является радар с синтезированной апертурой TSX-SAR – поляриметрический многоканальный комплекс массой 394 кг с активной ФАР X-диапазона (частота 9,65 ГГц) с высоким пространственным и радиометрическим разрешением, сравнимым с разрешением авиационных РСА. Радар создан на базе технологий, приобретенных европейцами в ходе полетов шаттлов с радиолокаторами SIR-C и SRTM в 1994 и 2000 г. Бортовая активная ФАР имеет габаритные размеры $4{,}8 \times 0{,}8 \times 0{,}15$ мм и состоит из 384 приемо-передающих модулей.

Радиолокационный комплекс обеспечивает съемку поверхности планеты в трех основных режимах: прожекторном, маршрутном и обзорном ScanSAR. Пространственное разрешение (по азимуту):

- 1-2 м (прожекторный);
- 3 м (маршрутный);
- 16 м (обзорный ScanSAR).

Размер кадра:

- $(15–10) \times 10$ км (прожекторный);
- 30×50 км, длина маршрута 1500 км (маршрутный);
- 100×150 км, длина маршрута 1500 км (обзорный ScanSAR).

Ширина полосы обзора: 463 (до 622) км (прожекторный); 287 (до 622) км (маршрутный); 287 (до 577) км (обзорный ScanSAR).

РЛС TSX-SAR имеет дополнительно несколько экспериментальных режимов:

1) сверхдетальный режим с разрешением по дальности менее 1 м (до 0,5 м) с использованием радиосигналов с шириной спектра 300 МГц;
2) режим маршрутной интерферометрии ATI (Along Track Interferometry), при котором благодаря дублированию электронных модулей ФАР радар может принимать радиосигналы по отдельным каналам от двух подрешеток ФАР (Dual Receive Antenna, DRA) длиной по 2,4 м, и после сравнения сигналов от двух подрешеток можно выделять движущиеся объекты. Космическое агентство Германии DLR приступило к разработке двух дополнительных проектов – TanDEM-X и TerraSAR-X2. Проект TanDEM-X стоимостью 85 млн евро также финансируется по схеме партнерства: 56 млн евро выделяет агентство DLR, 26 млн евро – Astrium EADS, 3 млн евро – другие инвесторы.

Учитывая высокую стоимость КА ДЗЗ с РСА, перспективным направлением является создание легких РСА КБ высокого разрешения для малых КА. В российском научно-производственном предприятии «Вега» проектируются легкие РСА КБ, которые будут выводиться на орбиту баллистическими ракетами, снятыми с боевого дежурства. Такие РСА сверхвысокого разрешения для малых КА будут работать на длине волны 9,6 см, охватывать полосу перенацеливания 500 км и обеспечивать разрешающую способность:

- 2 м при детальном наблюдении и ширине полосы обзора 10–20 км;
- 5-7 м при наблюдении со сниженным разрешением и ширине полосы обзора 50–100 км;

15 м при наблюдении с низким разрешением и ширине полосы обзора 150–200 км. При этом масса всей радиолокационной аппаратуры не будет превышать 250 кг, и энергопотребление ограничится на уровне 1300 Вт.

Исходя из выше изложенного в работе [23] сформулированы следующие основные выводы.

1. Требования к построению РСА очень специфичны и зачастую противоречивы, так как зависят от многих факторов. Для использования радиолокационной информации ДЗЗ при решении навигационных задач необходим охват больших по площади участков планеты, при этом нужно получить как можно лучшее разрешение. Однако обеспечить высокую разрешающую способность, как правило, можно лишь при небольшой ширине полосы обзора или малых размерах кадра. Для подавляющего большинства РСА КБ отношение ширины полосы обзора к разрешающей способности в азимутальном направлении меньше 10000, то есть при разрешении 5 м не приходится рассчитывать на получение полосы обзора больше 50 км.
2. Представленный выше обзор КА ДЗЗ с РСА показывает большой интерес космических держав, да и множества других стран, к таким системам, получившим бурное развитие в последнее время, несмотря на их чрезвычайно высокую стоимость. Направления дальнейшего развития КА ДЗЗ с РСА во многом определяются требованиями потребителей информации, но имеют теоретические и технические ограничения, обусловленные, например, дифракционной границей получения высокого разрешения, энергетическим ресурсом РЛС, сложностью алгоритмов обработки информации и быстродействием вычислительных машин, пропускной способностью линии передачи данных и т.д.
3. Принимая во внимание противоречие между получением высокой разрешающей способности и желанием иметь широкую полосу обзора, все же можно оправдать стремление к развитию РСА по пути улучшения их разрешения. Это существенно расширяет возможности таких систем, и, кроме того, в какой-то мере разрешить это противоречие можно при переходе от узкополосных сигналов к широкополосным с одновременным использованием широкоугольных апертур. Поскольку теоретический предел разрешения еще не достигнут, необходимо продолжать научные исследования и поиски новых методов и способов повышения разрешающей способности.

Достижение высокого разрешения РСА особенно актуально для использования радиолокационной информации дистанционного зондирования при решении задач навигации и управления движением.

Очевидно, что успешно решить проблему дальнейшего развития этого перспективного технического направления возможно только путем применения последних достижений микроэлектроники, используя современную ЭКБ.

1.7. Воздействие космической радиации на КА

Основными источниками радиационного воздействия на корпус и аппаратуру КА являются следующие [7, 8]:

1) так называемые радиационные пояса Земли, состоящие из двух слоев. Внутренний слой характеризуется наличием протонов высоких энергий, его зона имеет протяженность не менее 3,5 тыс. км. Во внешнем слое наибольшую опасность представляют электроны высоких энергий, зона его максимальной протяженности 15–25 тыс. км. Конструкторам КА этот слой наиболее «неприятен» с точки зрения сложности обеспечения мер защиты от протонов;
2) космические лучи, представляющие поток частиц высокой энергии;
3) ультрафиолетовое и рентгеновское г-излучение Солнца;
4) корпускулярное излучение Солнца.

Солнечная активность имеет период 11 лет. При солнечных вспышках уровень солнечной активности повышается в 10–100 раз по отношению к периоду спокойного состояния. Вспышки бывают почти через каждые 10 дней, но современные методы прогнозирования позволяют заранее предупреждать космонавтов об этой опасности по состоянию солнечной хромосферы.

В зависимости от длины волны все виды электромагнитных излучений подразделяются на гамма-излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое, световое, инфракрасное и радиоизлучение.

На ультрафиолетовую область (2000–4000 Å) солнечного спектра приходится почти 10% общей энергии, и она является определяющей. Радиационное воздействие сказывается, в первую очередь в явном виде, на оптических свойствах материала, а косвенно – через отказы отдельных микросхем и приборов КА.

В табл. 1.24 приведены усредненные дозы радиации от различных источников радиационного воздействия [8].

Таблица 1.24. Годовые дозы космической радиации $\left(\times\frac{1}{6{,}25}\cdot 10^{-5}\right)$

Источник радиации	Дозы радиации, МэВ/г	
	на поверхности	под зашитой в 1 г/см^2
Внутренний радиационный пояс Земли (протоны)	10^{10}–10^{12}	10^{7}–10^{9}
Внешний радиационный пояс Земли (электроны)	10^{13}–10^{15}	10^{6}–10^{8}
Солнечное излучение	10^{7}–10^{9}	10^{4}–10^{6}
Космические лучи	10^{2}–10^{3}	10^{2}–10^{3}*

* Частицы высоких энергий (тяжелые ядра) очень слабо поглощаются защитой.

Таблица 1.25. Дозы радиации, изменяющие свойства материалов $\left(\times\frac{1}{6{,}25}\cdot 10^{-5}\right)$

Материалы и нарушаемые свойства	**Доза радиации, МэВ/г**
Пластики (электрические и механические свойства)	10^7–10^9
Прозрачные пластики (прозрачность)	10^6–10^{10}
Эластомеры (упругость)	10^8–10^{11}
Стекло (прозрачность)	10^5–10^{10}
Стекло, керамика (механические свойства)	10^{11}
Кварц (прозрачность)	10^7–10^{11}
Полупроводники (электрические свойства)	10^8–10^{10}

Корпус КА существенно ослабляет воздействие электронной радиации, но значительно меньше защищает от воздействия протонной радиации; к сожалению, практически не ослабляются корпусом КА космические лучи, так как они являются частицами большой массы и больших энергий.

Кроме вспышек интенсивных излучений во время повышения активности Солнца всегда имеется как трудно прогнозируемое непостоянное излучение, так и постоянное (постоянный фон – протоны, электроны, ядра гелия), которое заметно ослабляется обшивкой корпуса КА.

Допустимые дозы радиации для различных материалов приведены в табл. 1.25 [8], откуда можно сделать ряд общих выводов и рекомендаций.

При превышении допустимой дозы радиации пластические материалы теряют механические и электрические свойства (прозрачные – мутнеют), керамические материалы и стекло теряют свои механические, электрические и оптические свойства, резиновые материалы – эластичность, а для полупроводниковых приборов наблюдается существенное снижение коэффициентов усиления транзисторов, вплоть до потери ими своих усилительных и переключательных свойств.

Поэтому в качестве наружных покрытий КА пластики обычно не применяются, в особенности для КА, проходящих через пояса радиации;

Необходимо зашторивать соответствующие иллюминаторы, остекленные прозрачными пластиками, или шторки оптических приборов, а шторки рекомендуется открывать только в режиме активной работы оптических датчиков.

Таким образом, если сопоставить табл. 1.24 и 1.25, можно увидеть, что особенно тяжелыми условиями для работы КА являются радиационные пояса.

К выбору защитных материалов для КА нужно подходить с очень большой осторожностью, поскольку уровень защиты от радиации прямо зависит от массы используемого защитного материала.

В условиях воздействия повышенной радиации существенно снижается эффективность работы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) вплоть до того, что они часто отказывают при солнечных вспышках и теряют эффективность при длительной работе в радиационных поясах.

Ультрафиолетовое излучение (УФИ) составляет постоянный фон солнечного излучения. Хотя все металлы безразличны к УФИ, оно вредно для оптики, поэтому наружное остекление иллюминаторов КА делают из кварцевого стекла с защитными шторками. На пластические материалы УФИ действует аналогично ра-

диации, поэтому необходимо использовать методы экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), но в этом случае нужно исключить возможность разрушения пластиков от нарушения теплового режима работы.

При воздействии УФИ на эмалевые краски красители теряют свои свойства: например, белая краска на основе TiO_2 желтеет, нарушаются оптические свойства, а даже незначительное изменение оптических свойств поверхности КА, длительное время функционирующего в космосе, может привести к нарушению теплового режима работы бортовой аппаратуры. Поэтому в настоящее время используются только керамические краски.

1.8. Микрометеоритное воздействие на КА

Активное воздействие (в виде пробоев) микрометеоров на КА пока еще не обнаружено, возможно, из-за относительно малого времени работы аппаратов подобного типа, а воздействие космической пыли будет подробно рассмотрено в гл. 12.

Основное воздействие микрометеоров – это эрозия оптики.

На низких орбитах Земли микрометеорное воздействие на оптику 200 Å/год, вдали от Земли это воздействие существенно меньше и вне сферы действия Земли ($r \geq 1$ млн км) составляет 1 Å/год А(10^{-10} м).

Исследования, проведенные на ИСЗ, показали, что вблизи Земли много микрометеоритной пыли (пылевые частицы массой $m = 10^{-12}$ г), которая вызывает эрозию оптики.

Для борьбы с эрозией стремятся оптику ставить перпендикулярно направлению движения и зашторивать (особенно оптические датчики системы ориентации КА). Если полет КА идет от Земли, то целесообразно оптическую аппаратуру ориентировать на Землю. По оценке столкновения с микрометеорами имеется довольно большая информация, которая отражается на графике данных по количеству метеоров в окрестности Земли в зависимости от их массы (рис. 1.19).

Из графика видно, что для низких орбит ИСЗ количество метеоров возрастает из-за наличия мелкого пылевого облака вблизи Земли.

Для оценки радиуса кратера, выбиваемого метеоритом, можно воспользоваться формулой Бьерка:

$$r = K(mV)^{\frac{1}{3}},$$

где m – масса метеорита, г; V – скорость метеорита, м/с; K – коэффициент, зависящий от материала ($K = 1{,}09$ для алюминиевого бойка, ударяющего по алюминиевой стенке, $K = 0{,}606$ – железо по железу, $K = 1{,}3$ – свинец по свинцу; $K = 0{,}9$ – алюминий по железу).

Для ориентировочных расчетов можно принять $K = 1$.

Условием пробиваемости стенки является выбор толщины стенки, в 1,5–2 раза превышающей радиус кратера, т.е. $\delta_{ст} = (1{,}5–2)\, r$.

Для расчета толщины метеорной защиты может быть использована формула, полученная на основе теории гидродинамического удара:

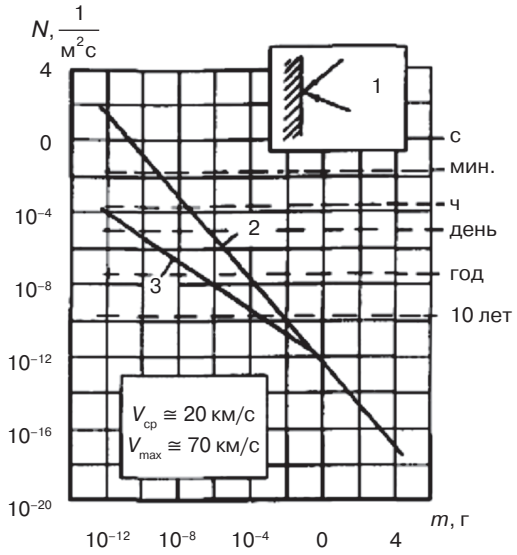


Рис. 1.19. Зависимость частоты ударов метеоров от их массы: 1 – удар в одну сторону метеорных тел с массой > m; 2 – для спутников на низких орбитах; 3 – вдали от Земли

$$\frac{\delta}{d} = \frac{4}{3}\frac{1}{\sigma}\lg\frac{V_н}{V_к},$$

где δ – толщина стенки; d – диаметр ударяющей частицы; $\sigma = \frac{\rho_{ст}}{\rho_м}$ – отношение плотности материала стенки к плотности материала метеора; $V_к \geq 1{,}5$ км/с – конечная скорость метеора; $V_н$ – начальная скорость метеора.

Что касается скорости встречи метеора с КА, то принимается средняя скорость $V_{ср} = 20$ км/с; максимальная – $V_{max} = 70$ км/с [7, 8].

В космосе имеются постоянный фон метеорных частиц и потоки частиц, встречаемых при прохождении метеорных потоков. Длительность ливней метеорных потоков не превышает нескольких дней; ливней не более 20, и все они известны.

Повышенная защита аппарата за счет увеличения толщины корпуса нецелесообразна, так как приводит к утяжелению конструкции КА. Поэтому следует разрабатывать защиту в двух направлениях:

1) секционирование КА с одновременным дублированием аппаратуры и служебных систем, чтобы в случае выхода из строя одного отсека обеспечить работу другого (основное средство защиты);
2) создание защитных противометеорных экранов. В этом случае метеор пробивает обшивку экрана и распадается на большое количество мелких частиц, которые уже не опасны для обшивки КА, что позволяет значительно уменьшить толщину основной обшивки.

Расстояние, на которое необходимо установить экран, чтобы обеспечить наивыгоднейшие условия для защиты обшивки КА, можно определить по формуле [8]:

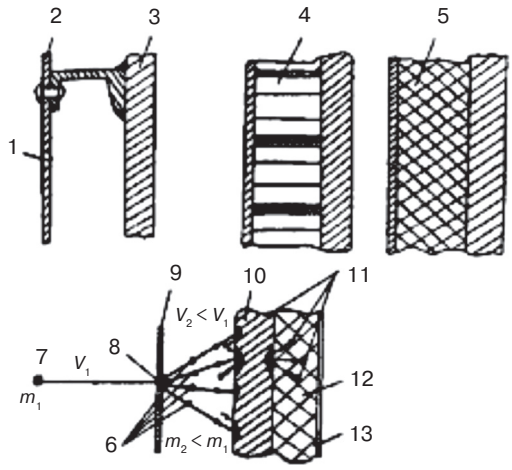


Рис. 1.20. Метеорная защита и схема дробления метеора на экране: 1 – дренаж; 2 – экран; 3 – обшивка; 4 – соты; 5 – пенопласт; 6 – осколки метеора; 7 – метеор; 8 – пробои экрана; 9 – экран; 10 – обшивка; 11 – осколки обшивки; 12 – тепло- и звукоизоляция; 13 – внутренняя обшивка

$$s = 2\delta_{\text{общ}}\left(\frac{\delta_{\text{общ}}}{\delta_{\text{экр}} - \rho_{\text{экр}}}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где $\delta_{\text{общ}}$ – толщина обшивки, мм; $\delta_{\text{экр}}$ – толщина экрана, мм; $\rho_{\text{экр}}$ – плотность материала экрана, г/см^3.

Пример. Для алюминиевого экрана с $\frac{\delta_{\text{общ}}}{\delta_{\text{экр}}} = 10$ расстояние $s = 4\rho_{\text{общ}}$.

В литературе встречаются рекомендации делать экран из бериллия, у которого высокая ударная вязкость. В этом случае при том же соотношении $\frac{\delta_{\text{общ}}}{\delta_{\text{экр}}} = 10$ получаем $s \approx (5\text{-}6)\ \rho_{\text{общ}}$.

Для защиты жизненно важных частей ИСЗ с толщиной обшивки $\delta_{\text{общ}} = 2$ мм размещаем экран $\delta_{\text{экр}} = 0{,}2–0{,}3$ мм на расстоянии $s = 5\ \delta_{\text{общ}} = 10$ мм, и это расстояние между экраном и обшивкой заполняем сотовым наполнителем.

Кроме внешнего экрана, необходим еще и внутренний экран, так как при ударе выбивается обшивка с внутренней стороны (рис. 1.20), осколки которой могут повредить элементы бортовых систем. Этот экран, размещенный на тонкой металлической подложке, может одновременно служить тепло- и звукоизоляцией.

1.9. Проблема космического мусора на орбите Земли

Впервые о масштабном загрязнении космоса ученые заговорили в 1980-х, когда концентрация космического мусора на орбите Земли достигла такой плотности, что баллистикам требовалось хорошенько поработать, чтобы безопасно размес-

тить среди него тот или иной спутник. В последнее десятилетие ситуация только ухудшилась. Количество мусора в околоземном пространстве столь велико, что это создает реальную опасность для работающих там автоматических станций и различных космических аппаратов [27, 28]. Полезные орбиты вокруг Земли оказались усеянными брошенными спутниками, использованными ступенями ракет, просто выброшенным в космос мусором и другими обломками.

В сентябре 2012 года американская сеть Space Surveillance Network насчитала на орбитах примерно 23 000 объектов, размер которых превышает 5–10 см. На основе этих данных было подсчитано, что на околоземных орбитах находится в общей сложности около 750 000 объектов размером больше 1 см.

Значительная часть из зарегистрированных объектов появилась в результате известных испытаний китайской антиспутниковой системы в 2007 году, а также в результате «космического ДТП» – случайного столкновения двух спутников в 2009 году. Когда объекты, находящиеся на разных орбитах, встречаются друг с другом, столкновение происходит на скорости, составляющей тысячи километров в час.

К чему это может привести?

Столкновение на орбитальных скоростях даже с крохотным обломком может иметь разрушительные последствия. Пуля диаметром 1,2 см, набравшая скорость 6,8 км/с, входит в алюминиевый блок толщиной 18 см почти на половину его толщины. Обшивка космического корабля и корпуса ракет намного тоньше, чем этот блок. Частица диаметром 10 см, врезающаяся в космический аппарат, приведет к его разрушению.

Это, как следствие, приведет к появлению еще большего количества обломков на орбитах, выведению из строя космических аппаратов, нарушению функционирования различных космических систем, таких как связь, навигация и других. И хотя вероятность вывода из строя орбитальных спутников космическим мусором пока еще не очень велика, подобные неприятные инциденты уже были, в том числе с пилотируемыми космическими кораблями и орбитальными станциями.

В 1983 году экипаж печально знаменитого шаттла Challenger обнаружил на лобовом стекле своего корабля небольшой след от столкновения с посторонним предметом. След был всего 2,5 мм в глубину и столько же в ширину, но заставил поволноваться инженеров NASA. После приземления корабля специалисты тщательно осмотрели повреждения и пришли к выводу, что причиной повреждения стала микрочастичка краски, отслоившаяся от какого-то другого космического аппарата.

Пострадала от космического мусора и советская орбитальная станция «Салют-7», поверхность которой была буквально испещрена микроскопическими кратерами от соударения с частицами мусора. Уже не раз и МКС приходилось маневрировать, изменять курс, чтобы избежать столкновений с космическим мусором. Был зафиксирован случай, когда по команде с Земли космонавтам даже пришлось искать убежища в модуле аварийного выхода космического аппарата «Союз», пока опасность не миновала.

Сегодня такого мусора уже накопилось в космосе катастрофически много. С учетом того, что в ближайшие 10–15 лет на орбиту будет выведено еще около полутора тысяч спутников, резко возрастет вероятность столкновений как между отдельными обломками, так и между космическими аппаратами. Что может при-

вести к тому, что орбитальное пространство станет вскоре абсолютно непроходимым. Закономерно предположить, что в ряде случаев столкновение с обломками разобьет космический аппарат на еще большее число обломков. Некоторые из этих новых обломков врежутся в другой космический аппарат, с которым произойдет та же история. То есть количество мусора на орбите начнет разрастаться в геометрической прогрессии. Возникнет реальная угроза потери работающих на орбите спутников, обеспечивающих человечество средствами космической связи, телевещания, навигации, метеорологии, исследования природных ресурсов Земли. А в дальнейшем, в принципе, все это может привести даже к прекращению исследования космического пространства на околоземной орбите с помощью космических аппаратов. Низкая орбита станет слишком опасной для того, чтобы на нее выводить спутники, а тем более космические корабли, пилотируемые людьми.

Наиболее показательные примеры столкновений в космосе:

1991 год, декабрь – «Космос-1934» столкнулся с фрагментом разрушившегося аппарата «Космос-926»;

1996 год, июль – французский аппарат «Церес» столкнулся со ступенью французской ракеты-носителя «Ариан»;

2005 год, январь – ступень американской ракеты-носителя «Тор» столкнулась с фрагментом ступени китайской ракеты-носителя КСЛ-4;

2006 год, март – космический аппарат «Экспресс-АМ-11» столкнулся с объектом космического мусора;

2009 год, февраль – космический аппарат «Иридиум-25» столкнулся со спутником «Космос-2251».

Случаи падения тяжелых космических аппаратов на Землю:

- сход с орбиты в неуправляемом режиме орбитальной станции «Скайлэб» (масса 77 тонн);
- неуправляемый сход с орбиты и падение на территорию Южной Америки орбитальной станции «Салют-7» (масса ~ 40 тонн);
- падение вследствие неудачного запуска межпланетной космической станции «Марс-96» (масса ~ 5 тонн);
- управляемый сход с орбиты орбитальной станции «Мир» (масса ~130 тонн);
- падение вследствие неудачного запуска аппарата «Фобос-Грунт» (масса ~9 тонн).

Но это в космосе.

Возможны последствия, связанные и с падением обломков на поверхность Земли. Мы знаем, что уже сегодня примерно один раз в неделю с орбиты сходят объекты размером более одного метра. Большая часть их сгорает в атмосфере, а оставшаяся разрушается на куски и несется к Земле металлическим дождем. В будущем массовые выпадения искусственного происхождения метеорных дождей вполне могут приобрести характер стихийных бедствий. А поскольку немало космических аппаратов имеет на борту ядерные энергетические установки, разрушение их может привести к радиоактивному загрязнению территорий. И хотя такие случаи редки, но они есть [29].

Например, в конце октября 1977 года спутник «Космос-954» внезапно разгерметизировался, из-за чего бортовые системы вышли из строя. Неуправляемое снижение аппарата под действием верхних слоев атмосферы завершилось 24 января 1978 года сходом с орбиты и падением на северо-западе Канады. Большая часть

его сгорела в атмосфере, тем не менее отдельные фрагменты радиоактивного космического мусора, как потом было установлено, оказались разбросанными на площади несколько тысяч квадратных километров.

Наблюдения за космическим мусором ведутся уже давно: угроза с его стороны слишком реальна, чтобы ее игнорировать. Ученым удалось отслеживать мусорные частицы размерами 10 см и более. Однако меньшие по размеру частицы мусора также представляют большую опасность для космических аппаратов.

Чтобы дальнейшее развитие событий не пошло по этому худшему варианту, коллективы ученых ведущих космических держав активно работают над соответствующими техническими решениями – разрабатываются планы по созданию специальных технических средств для удаления космических обломков с околоземных орбит, рассматриваются различные варианты по захвату и буксировке «мертвых» спутников, изменению их орбиты и т.д. [30].

Среди предлагавшихся пилотируемых миссий можно отметить проекты Phoenix американского военного агентства DARPA, CleanSpace One, щвейцарского Swiss Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), представляющие собой космические аппараты специальной конструкции, предназначенные для захвата орбитального мусора и его дальнейшего уничтожения или адаптации к использованию в новых космических проектах. Также разрабатываются проекты специальных наземных лазеров, способных уменьшать скорость движения орбитальных обломков с последующим их сгоранием в нижних слоях атмосферы.

Но, поскольку экономически приемлемых методов массовой очистки космического пространства от мусора пока не существует, основное внимание в ближайшем будущем будет уделено мерам контроля, исключающим образование нового мусора, таким как предотвращение орбитальных взрывов, увод отработавших ресурс космических аппаратов на орбиты захоронения, торможение об атмосферу и т.п. Что касается таких крупных объектов, как международная космическая станция МКС, предполагается, что после срока их полезного использования они будут возвращатъея на Землю по частям. Жизнь спутников должна заканчиваться не в космическое пространстве в виде мусора, а на Земле.

1.10. Применение микроэлектронных технологий для создания миниатюрных реактивных двигателей космического назначения

1.10.1. Проблемы микроминиатюризации космических аппаратов

В технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС-технологии) существует и развивается направление, связанное с созданием устройств, преобразующих химическую энергию, выделяющуюся при сгорании вещества, в механическую [31–35]. Одной из перспективных областей применения подобных микросистем является создание двигателей различной конструкции для миниатюрных летательных аппаратов авиационного и космического применения (с массой менее 500 кг) [36]. Миниатюрные космические аппараты, применяемые в качестве искусственных спутников земли, делятся на несколько классов, описанных в табл. 1.26.

Таблица 1.26. Классификация миниатюрных космических аппаратов

	Масса, кг	Объем аппарата, л	Мощность, Вт
Малые спутники	500–100	< 100	14–160
Микроспутники	100–10	< 15	6–14
Наноспутники	10–1	< 0,5	2,4
Пикоспутники	0,1–1		
Фемтоспутники	0,01–0,1		

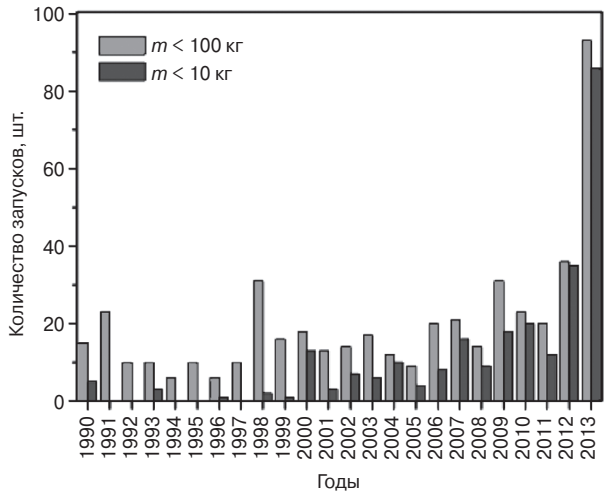


Рис. 1.21. Количество микро- (с $m < 100$ кг) и наноспутников (с $m < 10$ кг), выведенных на орбиту с 1990 по 2013 годы [37, с использованием данных SpaceWorks Enterprises, Inc.]

Технология создания миниатюрных космических летательных аппаратов получила бурное развитие в последние два десятилетия. На рис. 1.21 приведены статистические данные по количеству миниатюрных космических искусственных спутников Земли с массой меньше 100 и меньше 10 кг, выведенных на орбиту за последние два десятилетия. Можно отметить экспоненциальный рост общего количества миниатюрных космических аппаратов за период 1990–2013 гг. Также возросло количество запущенных наноспутников с массой < 10 кг по сравнению с числом запущенных микроспутников с массой < 100 кг. Предполагается, что такая тенденция будет сохраняться и в ближайшие десятилетия.

Ключевым преимуществом миниатюрных космических аппаратов является низкая себестоимость. Уменьшение массогабаритных параметров космических аппаратов позволяет использовать менее мощные носители для вывода их на орбиту либо осуществлять одновременный запуск большего количества устройств. При уменьшении размеров спутников снижаются затраты на их изготовление и появляется возможность серийного производства, еще в большей степени уменьшая их себестоимость. Одновременный запуск большого количества однотипных спутников позволяет создавать большие массивы или группировки работающих совместно устройств, способных покрывать бóльшую площадь поверхности Зем-

ли и предназначенных, например, для коммуникации или исследовательских задач. В последние годы, по данным Space Works Enterprises, Inc., в спектре решаемых микроспутниками задач все большую долю занимают наблюдение и удаленное зондирование, при этом процент задач, связанных с отработкой различных технологий, используемых в таких устройствах, уменьшается. Низкая себестоимость и небольшие затраты на осуществление запуска способствуют развитию коммерческих микроспутников, которые, по прогнозам, в будущем будут составлять основную массу аппаратов подобного класса, существенно превосходя по количеству спутники гражданского и военного назначения.

Миниатюризация спутников приводит к необходимости разработки новых подходов к проектированию и разработке как компоновочных схем, так и энергетических установок таких аппаратов.

Двигатели миниатюрных спутников предназначены для выполнения нескольких основных функций, это:

- изменение орбиты и положения космического аппарата;
- точное позиционирование, в том числе относительно других аппаратов (в составе группировки);
- маневрирование малых спутников для обслуживания и ремонта крупногабаритных спутников и космических станций;
- маневрирование для активной защиты крупногабаритных космических аппаратов;
- выход из полей тяготения малых космических объектов (астероидов);
- выход на орбиту при отделении от носителя.

Данные задачи можно классифицировать в зависимости от величины требуемого сообщаемого импульса и характера сообщаемого движения следующим образом (табл. 1.27).

Видимым преимуществом уменьшения размеров двигателей для миниатюрных космических аппаратов является увеличение удельной тяги – отношение величины тяги к массе двигателя. Приведенные в табл. 1.26 данные показывают, что уменьшение линейных размеров спутников (характерного размера l) приводит к ограничениям по объему и массе функционального оборудования, в то же время, как показано в табл. 1.27, энергетические установки должны работать в широких диапазонах изменения тяги для выполнения всех необходимых операций. Величина тяги пропорциональна квадрату характерных линейных размеров двигателя l^2, в то время как его масса пропорциональна объему, то есть кубу l^3.

Таблица 1.27. Соотношение требуемой величины тяги для типичных операций, выполняемых микродвигателями [8]

Вращение	Величина тяги	Перемещение
Точное позиционирование по направлению	Малая	Точное положение на орбите
Управление ориентацией		Удержание на орбите
Гашение вращательных импульсов	↓	Поддерживание положения в формации
Вращение		Выведение на орбиту, смена формации
	Большая	Изменение орбиты

Таким образом, удельная тяга пропорциональна $l^2/l^3 = l^{-1}$, то есть линейно возрастает с уменьшением размера. Но для миниатюрных спутников характерно иное соотношение массы самого двигателя и его вспомогательных узлов: насосов, клапанов, трубопроводов. Так, масса двигательной установки для малых спутников может составлять 4–8% от общей массы при массе топлива не более 30%, в то время как в больших космических аппаратах масса топлива может составлять до 80% [38]. Это приводит к уменьшению энерговооруженности малых спутников. Для увеличения этого параметра необходимо уменьшать соотношение конечной и начальной массы спутника с топливом, для чего необходимо либо увеличить объем или плотность энергии в топливе, либо уменьшить размеры самого спутника. Трудность уменьшения массогабаритных показателей двигательных систем связана со сложностью уменьшения массы отдельных их компонентов, что приводит к снижению их эффективности. Для ее повышения необходимо использовать топливо с большей плотностью энергии, применять однокомпонентные виды горючего для выполнения всех типовых процедур по маневрированию или сокращать число вспомогательных узлов двигателя, что позволит уменьшить массу всей системы в целом. Для уменьшения массы возможна также интеграция конструкции двигательной установки с конструктивными элементами космического аппарата.

Возможные типы энергетических установок для миниатюрных спутников разделяются на химические, электрические и на холодном газе. Химические типы двигателей по типу используемого топлива делятся на твердотопливные и жидкостные. Последние могут быть разделены на однокомпонентные и двухкомпонентные.

Для уменьшения массы двигателей миниатюрных космических аппаратов особое внимание привлекает использование МЭМС-технологии и монокристаллического кремния в качестве основного конструктивного материала. Для создания объемных структур в данной технологии применяются широко используемые в микроэлектронике методы фотолитографии, сочетающиеся с приемами химического травления и вакуумного осаждения слоев. Кремний обладает относительно высокой температурой плавления (1414,85 °C), обладает высокой механической прочностью и является основным материалом в микроэлектронике. МЭМС-технология позволяет собирать сложные трехмерные устройства, состоящие из множества планарных слоев. Достоинствами этого технологического подхода при создании энергетических устройств являются:

- обеспечение очень высокой точности изготовления (ограниченной только возможностями фотолитографии, то есть менее микрометра);
- параллельное изготовление большего числа одинаковых устройств (обеспечивающее низкую стоимость единичного изделия);
- однотипное и одновременное изготовление механических, электрических и прочих компонент устройств в едином технологическом маршруте.

В настоящий время известно множество различных конструкций микродвигателей для микро- и наноспутников на основе кремниевой МЭМС-технологии. На основе МЭМС-технологии разработаны конструкции микродвигателей, работающие на различных принципах: холодном или горячем газе [39], испарительного типа [40, 41] и на двухкомпонентном топливе [42].

Большинство предложенных конструкций включает сложные в изготовлении системы клапанов, заслонок и переключателей, существенно уменьшающих их надежность. Некоторое время назад значительное интерес вызвал новый подход к конструированию микродвигателей. Согласно новой идее вместо одного управляемого двигателя с регулируемым значением импульса или тяги изготавливается матрица однотипных одноразовых двигателей, каждый из которых обладает относительно небольшим значением развиваемого импульса и может быть сработан независимо [43–46]. Такая конструкция позволяет получить требуемый импульс не за счет непрерывной работы, а путем «набора» его из дискретных значений. В случае необходимости можно регулировать как суммарный импульс, так и тягу, выбирая последовательное или одновременное срабатывание отдельных двигателей. Регулирование шага изменения импульса может быть обеспечено использованием в составе одной матрицы единичных двигателей с отличающимися параметрами.

Преимуществом таких «матричных» одноразовых двигателей является то, что в них полностью отсутствуют подвижные части. При использовании твердого топлива нет необходимости в большом резервуаре или повышенном давлении внутри. Такие двигатели обладают высочайшей надежностью срабатывания. При этом стоимость такой матрицы, изготовленной по МЭМС-технологии, будет существенно ниже благодаря использованию процессов групповой обработки пластин.

В настоящее время конструкции одноразовых твердотопливных микродвигателей, изготовленных по кремниевой МЭМС-технологии, могут быть условно разделены на два типа. Первый тип – вертикальный – предполагает изготовление всех элементов двигателя в кремниевой пластине таким образом, что вектор тяги направлен перпендикулярно плоскости пластины. Максимальный импульс, создаваемый такими микродвигателями, определяется объемом топливного резервуара, в данном случае ограниченного толщиной пластины. Такие двигатели отличаются малыми размерами и подходят для микро- и наноспутников. Второй тип – горизонтальный – предполагает сборку двигателя из нескольких планарных модулей, расположенных горизонтально друг над другом и включающих элементы топливного резервуара, объем которого может изменяться в широких пределах, устройство поджига и, как правило, сопло для увеличения эффективности работы двигателя. Вектор тяги в таких двигателях направлен параллельно плоскости кремниевой пластины.

1.10.2. Миниатюрные реактивные двигатели горизонтальной конструкции

Реактивные двигатели составной конструкции можно разделить на моноблочные, когда все элементы двигателя, включая топливные резервуары, камеру сгорания, сопло, расположены на одной пластине, и составные, конструкция которых включает несколько блоков, каждый из которых является отдельным конструктивным элементов двигателя: соплом, камерой сгорания и т.д.

Примером моноблочного составного миниатюрного двигателя может служить конструкция, предложенная Массачусетским технологическим институтом [42].

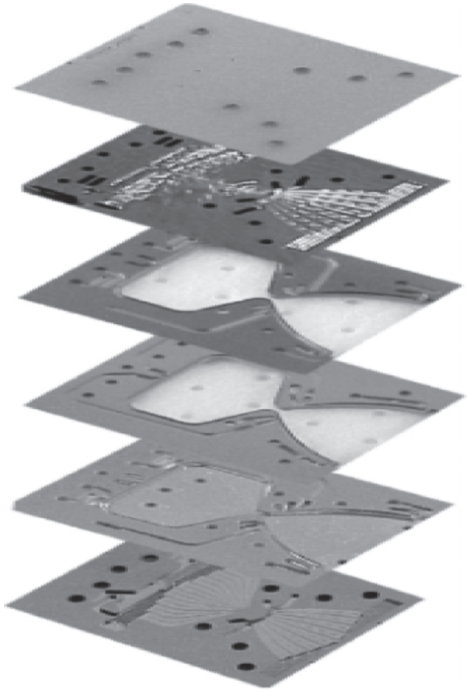


Рис. 1.22. Шесть профилированных кремниевых пластин, входящих в конструкцию составного жидкостно-реактивного двигателя на двухкомпонентном топливе, выполненного по МЭМС-технологии [12]

Разработанный двигатель является жидкостно-реактивным, работающим на двухкомпонентном топливе. При габаритных размерах $15 \times 7{,}5 \times 3$ мм принцип работы двигателя остается идентичным схеме работы крупногабаритных ЖРД. Конструкция единичного двигателя включает шесть кремниевых пластин, в объеме которых сформированы элементы камеры сгорания двигателя, системы подвода горючего и окислителя, каналов для охлаждения камеры сгорания и сопла, а также вспомогательные элементы (насосы, направляющие) (рис. 1.22).

Жидкие реагенты подаются в камеру сгорания через систему встречных инжекторных отверстий (по 242 для горючего и окислителя). Двигатель снабжен системой охлаждения камеры сгорания и сопла, так как температура горения топлива может превышать температуру плавления кремния в два раза, в которой циркулирует этанол в качестве охлаждающей жидкости. Для изготовления деталей двигателя требуется 10 процессов фотолитографии и 18 операций анизотропного сухого травлений. Основными проблемами при изготовлении данной конструкции являются:

- воспроизводимость процесса травления инжекторных отверстий с высоким аспектным отношением в кремниевых пластинах;
- изготовление каналов охлаждения с существенным закруглением в области изгибов для уменьшения механических напряжений при циркуляции по ним жидкости под давлением;
- сплавление шести кремниевых пластин с точностью до 3 мкм.

Двигатель может быть оснащен внутренними насосами для окислителя и топлива, выполненными по МЭМС-технологии, что требует проведения дополнительных операций при его изготовлении. Масса полностью собранного двигателя со-

ставляет величину около 1 г, при этом обеспечивается тяга в 15 Н (1,5 кгс) тяги (удельная тяга около 1500), при расходе горючего около 5 г/с топлива (жидкий кислород и этанол) при давлении в камере сгорания до 125 атм. [42]. Двигатель такой конструкции позволяет изменять сообщаемый космическому аппарату импульс в широких пределах, однако обладает высокой сложностью и стоимостью изготовления.

Примером составного двигателя для получения импульсов большой величины может служить конструкция матричного микродвигателя, предложенная и реализованная учеными Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). Данная конструкция отличается тем, что двигатель состоит из нескольких функциональных модулей, каждый из которых представляет собой отдельную структурную единицу: блока камер сгорания, модуля поджига топлива, блока сопел и герметизирующей крышки (рис. 1.23). Все элементы выполнены с использованием стандартных приемов планарной кремниевой технологии в объеме пластин монокристаллического кремния. Матричный двигатель включает 25 единичных двигателей, расположенных в виде массива размерностью 5×5. В качестве твердого топлива использовался глицидилазид полимер (ГАП) с наполнителями.

Для сборки двигателя блок камер сгорания герметично соединяется с модулем поджига, который представляет собой пластину с мембранами и расположенными на них резистивными нагревательными элементами – напротив каждой камеры сгорания. После чего на модуле поджига герметично закрепляется блок сопел. После заполнения блока камер сгорания топливом производится герметизация устройства.

Для срабатывания двигателя на соответствующий нагревательный элемент подается импульс тока, вызывающий разогрев терморезистора и поджиг топлива в соответствующей камере сгорания. Увеличивающееся давление разрушает мембрану, в результате чего поток газов выходит через сопло, служащее для увеличения создаваемого двигателем импульса и задания направления вектора тяги [47].

Блок камер сгорания микродвигателя представляет собой матрицу размерностью 5×5 и состоит из меньших блоков размерностью 5×1, каждый из которых в свою очередь собран из двух профилированных кремниевых модулей, обработанных методом щелочного анизотропного химического травления. Основные этапы процесса изготовления блока камер сгорания представлены на рис. 1.24.

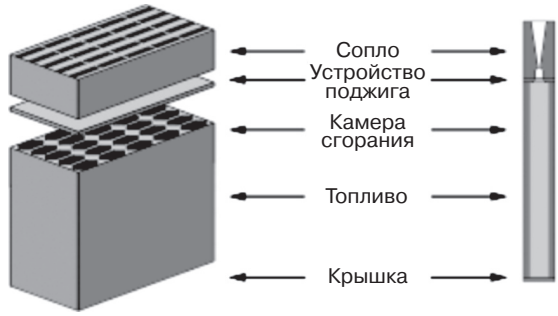


Рис. 1.23. Конструкция матричного микродвигателя: схематичный сборочный чертеж и поперечный разрез единичного микродвигателя

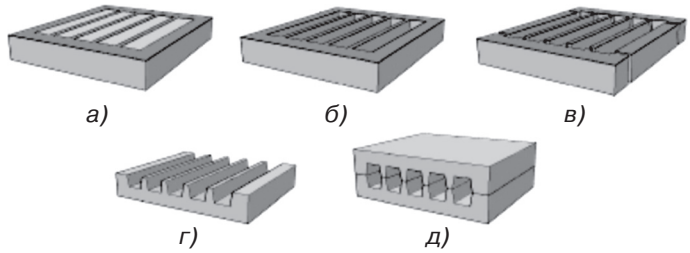


Рис. 1.24. Основные этапы процесса изготовления блока камер сгорания микродвигателя. Кремниевая пластина с маской нитрида кремния (*а*), та же пластина с вытравленными через маску канавками (*б*), разделение кремниевой пластины на модули блока камер сгорания (*в*), отделенный модуль без маски нитрида кремния (*г*), два соединенных в блок камер сгорания размерностью 5 × 1 модуля (*д*)

Рис. 1.25. Внешний вид лицевой (*а*) и обратной стороны (*б*) готового модуля поджига

Для соединения модулей между собой использовалась методика непосредственного соединения кремниевых пластин. Прочность соединения после термической обработки достигала 3 Дж/м^2, что характерно для данного метода [48]. Внутренний объем одной камеры составил 80 мкл.

Модуль поджига представляет собой матрицу поликремневых резисторов размерностью 5 × 5, расположенных на кремниевых мембранах толщиной 22 мкм (рис. 1.25). Механическая прочность таких мембран достаточна для достижения оптимального с точки зрения горения топлива начального давления в камере сгорания.

Конструкция блока сопел аналогична конструкции блока камер сгорания. Каждый блок сопел с размерностью 5 × 5 состоит из 10 модулей. Для получения желаемого профиля сопла, близкого к профилю Лаваля, в подложке создается несколько областей, отличающихся глубиной и профилем, с использованием двойной маски из нитрида кремния и пористого кремния в качестве жертвенного слоя (рис. 1.26).

Для сборки всех блоков двигателя использовался высокотемпературный керамический адгезив. Внешний вид полностью собранного миниатюрного реактивного двигателя представлен на рис. 1.27.

Импульс, создаваемый при срабатывании единичного двигателя в матрице, составляет 42 ± 2 мН·с. Масса двигателя приблизительно равна 21 г при габаритных размерах 33,5 × 34 × 13,5 мм. Двигатели данной конструкции обладают высоким значением импульса, что позволяет использовать их для космических аппаратов класса микроспутников. Гибкость технологии позволяет изготавливать двигатели с величиной импульса, изменяющейся в широких пределах, что может быть достигнуто простым изменения линейных размеров камеры сгорания, служащей одновременно топливным резервуаром. Размерность матричного двигателя также может быть изменена.

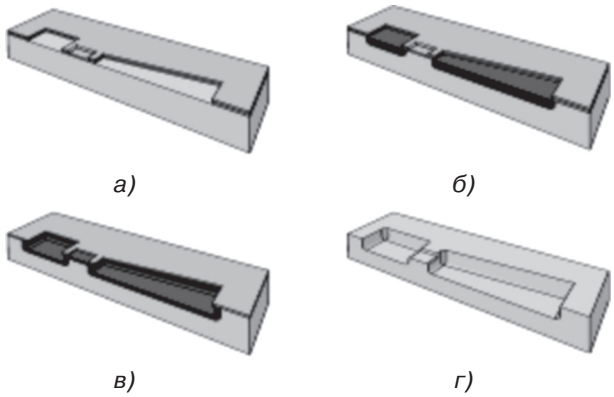


Рис. 1.26. Основные этапы изготовления модуля блока сопел: кремниевая пластина со слоем нитрида кремния и поликремния (*а*), кремниевая пластина со слоем пористого кремния, сформированным во входной и выходной областях сопла (*б*), второй слой пористого кремния, сформированный во всех областях сопла после удаления пленки поликремния (*в*), модуль сопел после удаления слоя пористого кремния и маски нитрида кремния (*д*)

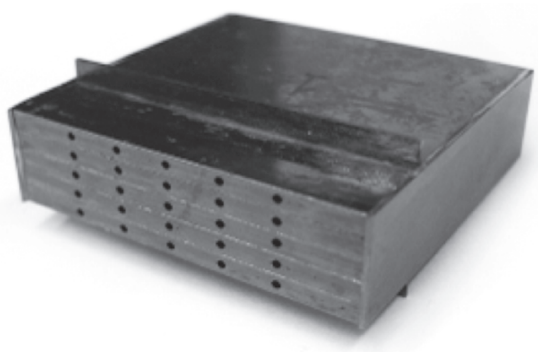
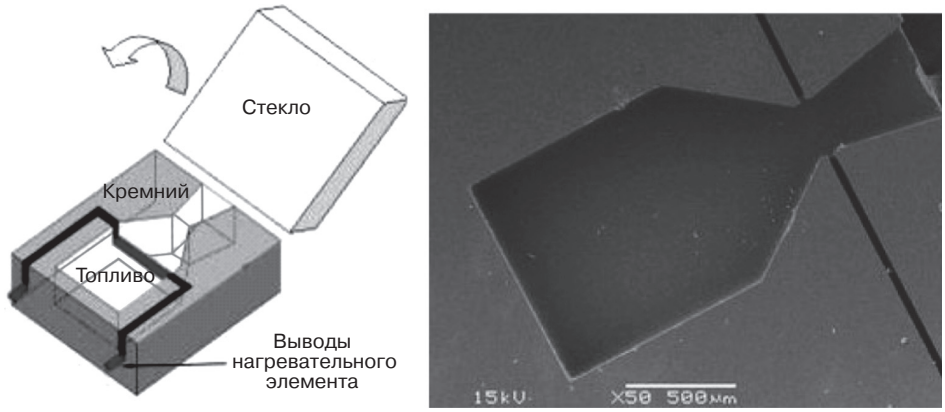


Рис. 1.27. Внешний вид собранного микродвигателя

Были разработаны и более простые конструкции горизонтальных моноблочных миниатюрных реактивных двигателей, работающие на основе твердого топлива. Конструкция, предложенная в Национальном университете Сингапура [47], изготавливается на основе пластин монокристаллического кремния. Ее схематическое изображение представлено на рис. 1.28.

В кремниевой пластине методом глубокого реактивного ионного травления изготавливаются камера сгорания и сопло, а также канавки для размещения нагревательных элементов, служащих для инициации горения топлива. Нагревательный элемент помещен над местом стыка камеры сгорания и сопла. При его расположении в глубине камеры сгорания на стороне, противоположной соплу, при воспламенении может происходить выброс значительного количества несгоревшего топлива. Сверху конструкция закрыта стеклянной подложкой. В качестве топлива используется смесь на основе полибутадиена и перхлората аммония с алюминиевым наполнителем.



а) *б)*

Рис. 1.28. Схематическое изображение конструкции (*а*) и внешний вид камеры сгорания с соплом (*б*) миниатюрного реактивного двигателя [47]

Масса единичного двигателя, изготовленного по данной технологии составляет всего около 22 мг, при этом масса топлива составляет 1,1 мг. Размеры единичного двигателя приблизительно $2 \times 1{,}5 \times 1$ мм. Импульс, создаваемый единичным двигателем такой конструкции, составляет 122 мкН·с.

Основным недостатком конструкции является необходимость использования дорогостоящего процесса глубокого реактивного ионного травления кремния для изготовления камеры сгорания и сопла. Расположение нагревательных элементов на боковых стенках камеры существенно затрудняет разводку металлических проводников. Кроме того, даже небольшая асимметрия сопла может приводить к отклонению вектора тягового импульса двигателя от продольной оси двигателя. Существенный недостаток данной конструкции – это сложность создания на ее основе матричных двигателей с большой размерностью. Матричные двигатели с величиной импульса порядка нескольких десятков микроньютонов и менее целесообразно выполнять по вертикальной конструкции.

1.10.3. Миниатюрные реактивные двигатели вертикальной конструкции

Двигатели данного типа отличаются существенно меньшими габаритами по сравнению с горизонтальной конструкцией, что позволяет применять их на нано- и пикоспутниках, и большим потенциалом увеличения размерности матриц таких двигателей, так как размерность изменяется простым увеличением количества единичных одноразовых твердотельных двигателей в плоскости одной кремниевой пластин.

Устройства, в которых реализуется данный принцип, были предложены компанией TRW совместно с Аэрокосмических агентством и Калифорнийским технологическим институтом [43]. Данный двигатель представляет собой матрицу твердотопливных единичных реактивных двигателей, состоящую из кремниевых и стеклянных подложек. Схематическое изображение конструкции такого двигателя представлено на рис. 1.29. Внешний вид готового устройства представлен на рис. 1.30.

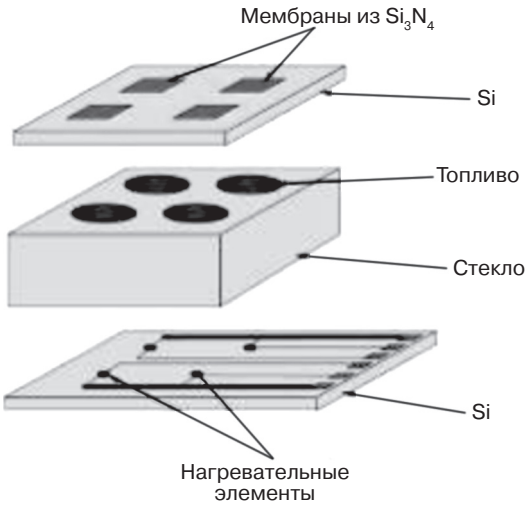


Рис. 1.29. Схематическое изображение элементов конструкции миниатюрного матричного двигателя вертикальной конструкции [43]

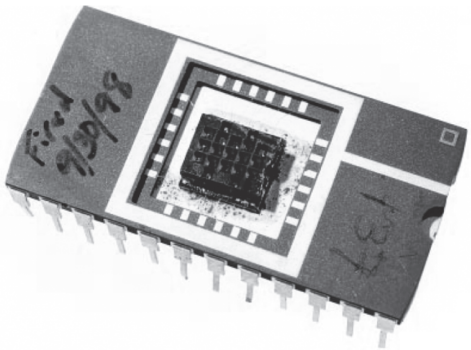


Рис. 1.30. Внешний вид матричного двигателя вертикальной конструкции [43]

Трехслойная конструкция включает верхний слой, содержащий матрицу тонких квадратных диафрагм из нитрида кремния толщиной 0,5 мкм, полученных в результате сквозного щелочного анизотропного химического травления кремниевой пластины, покрытой слоем нитрида. Средний слой представляет собой подложку из фоточувствительного стекла толщиной 1,5 мм, в которой лазером изготовлены круглые отверстия, заполненные твердым топливом – стифнатом свинца. На нижнем слое расположены поликремниевые резисторы со слоем металлизации, служащей для адресации одиночных двигателей при запуске. В данном слое при необходимости может также быть расположена управляющая электроника. Все элементы конструкции соединяются цианокрилатом. Чип может быть помещен в стандартный керамический 24-выводовый корпус для интегральных схем.

Данная конструкция обладает рядом преимуществ, характерных для всех матричных реактивных двигателей [43]:

– отсутствие подвижных частей и малое количество составляющих элементов (около 3);

– высокая надежность, так как отказ одного из двигателей не приводит к нарушению работы системы в целом благодаря взаимозаменяемости всех двигателей в матрице;
– срабатывание двигателей может быть запрограммировано для задания определенных комплексных маневров.

На одной подложке может быть сформировано до 10^6 единичных двигателей.

Один модуль, содержащий 15 отдельных микродвигателей, имеет размеры $6 \times 6 \times 2{,}5$ мм и обеспечивает создание импульсов тяги от 0,1 мН·с с суммарной мощностью около 100 Вт [43].

Поджиг топлива в двигателях вертикальной конструкции может осуществляться как «снизу» структуры, то есть со стороны, противоположной соплу, так и «сверху» со стороны сопла. В первом случае при полном заполнении камеры топливом, типичны для миниатюрных двигателей возникает проблема, связанная с выбросом не успевшего сгореть топлива наружу через сопло, что снижает эффективность работы микродвигателя. Второй подход лишен этого недостатка.

Конструкция вертикального матричного двигателя, в котором инициация горения топлива осуществляется «сверху», была предложена в рамках европейского проекта, финансируемого грантом Еврокомиссии, выполнявшимся в Национальном центре научных исследований Франции, представляет собой выполненную по МЭМС-технологии систему, состоящую из нескольких кремниевых и стеклянных подложек, планарно соединенных с друг другом (рис. 1.31) [49]. Данная конструкция включает блок сопел, изготавливаемых методом глубокого реактивного ионного травления в пластине монокристаллического кремния, блока резистивных устройств поджига, представляющих собой матрицу поликремневых резисторов, находящихся непосредственно под соплами, и стеклянных или кремниевых подложек со сформированными в них элементами топливных резервуаров. Объем топлива может быть изменен за счет наращивания количества пластин, образующих топливные резервуары. Сборка деталей двигателя осуществляется методом анодного сплавления и склейки термостойкими эпоксидными клеями.

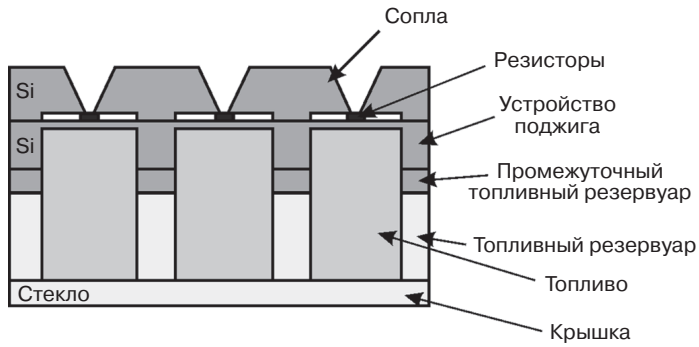


Рис. 1.31. Схематическое изображение поперечного сечения матричного реактивного двигателя с системой поджига, расположенной возле сопла [49]

По данной технологии были изготовлены матричные двигатели размерностью 10 × 10. Приблизительные размеры устройства 15 × 15 × 2 мм. Величина импульса, создаваемого единичным двигателем, составляет 0,3 – 1,3 мН·с в зависимости от конфигурации сопла при использовании в качестве топлива ГАП с перхлоратом аммония и мелкодисперсным порошком циркония [19].

Еще более структурно упрощенная конструкция вертикального матричного двигателя была предложена в БГУИР. Она представляет собой две кремниевые пластины (рис. 1.32), в одной из которых сформирована матрица тонких кремниевых мембран толщиной около 20 мкм, на которых с внешней стороны расположены поликремневые резисторы и металлизация. Пространство под мембраной герметично закрыто второй кремниевой пластиной и заполнено твердым топливом на основе ГАП. Малая толщина мембраны позволяет разогреть топливо под ней при помощи поликремневого резистора до температуры инициации горения. На рис. 1.33 показан внешний вид такого двигателя.

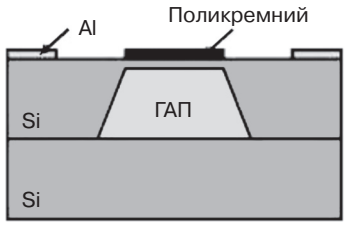


Рис. 1.32. Схематическое изображение конструкции единичного вертикального матричного микродвигателя

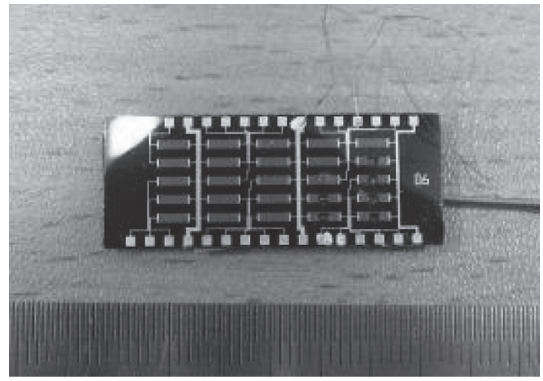


Рис. 1.33. Внешний вид конструкции вертикального матричного микродвигателя. Видны сработавшие единичные двигатели и контактные провода

Импульс, создаваемый единичным двигателем, составляет величину порядка 10 мкН·с. Данная конструкция обладает всеми преимуществами, характерными для описанной выше, но кроме того обеспечивает более полное сгорание топлива.

Подводя итоги вышеизложенному, необходимо отметить следующее.

Высокий интерес к разработке и использованию для различных задач малогабаритных космических аппаратов массой до 100 кг, а в последнее десятилетие и до 10 кг, привел к появлению большого количества различных конструкций микро-

двигателей, предназначенных для осуществления орбитальных маневров, выполняемых такими устройствами. Было определено, что наиболее целесообразным является использование матричных твердотопливных двигателей, позволяющих снизить массу вспомогательного оборудования, необходимого для обеспечения их работы, и тем самым повысить количество топлива, которое может быть помещено в топливные ячейки двигателя. Простота конструкции и возможность применения массового производства при использовании для изготовления микродвигателей кремниевой МЭМС-технологии позволяет снизить себестоимость как самих двигательных установок, так и спутников с их применением в целом, а также реализовать интеграцию двигателей с управляющими микроэлектронными схемами и датчиками, еще в большей степени уменьшая массогабаритные показатели всей системы.

Предлагаемые конструкции матричных твердотельных двигателей, выполненных на базе кремниевой МЭМС-технологии, обычно имеют схожую структуру, обусловленную их функциональным назначением. Они всегда включают сопла для задания направления вектора тяги, устройство поджига из поликремневых резисторов и резервуары для топлива, однако могут быть различного размера и предназначаться для создания импульсов различной величины от десятков миллиньютонов до единиц микроньютона. Для одиночных и матричных двигателей малой размерности с большим импульсом (1–100 мН·с) больше подходит горизонтальная конструкция, позволяющая существенно увеличить запас топлива двигателя. Для матричных двигателей большой размерности, но с малыми величинами импульса (0,1–100 мкН·с) лучше применять вертикальную конструкцию, в которой может быть достигнута большая плотность упаковки единичных двигателей.

Общей тенденцией в направлении развития таких систем является увеличение удельного импульса, создаваемого единичным двигателем при сохранении его объема и массы, повышение надежности, оптимизация конструкции с учетом новых знаний и результатов моделирования газодинамических и тепловых процессов, протекающих в таких устройствах, отличающихся от таковых в полноразмерных двигательных системах.

1.11. Космические аппараты военного и специального назначения

1.11.1. Система предупреждения о ракетном нападении

Система предупреждения о ракетном нападении (СПРН) – специальная комплексная система для предупреждения руководства государства о применении противником ракетного оружия против государства и отражения его внезапного нападения.

Предназначена для обнаружения нападения с применением ракетного оружия до того, как ракеты достигнут своих целей. Состоит из двух эшелонов – наземные РЛС и орбитальная группировка спутников системы раннего предупреждения.

СПРН предназначена для обнаружения в автоматическом режиме с высокой достоверностью ракетного нападения и выдачи информации предупреждения о

старте баллистических ракет (БР), ракетном нападении, государстве-агрессоре, атакуемых районах, времени до падения ракет, масштабе ракетного удара, факте и степени противодействия системе и ее текущих боевых возможностях на пункты управления (ПУ) вооруженных сил.

Эта система является также важнейшим источником информации о космической обстановке для системы контроля космического пространства и ПКО и основным источником для целеуказаний системам и комплексам ПРО.

Последнее обстоятельство является концептуальным в создании и развитии СПРН. Создание всех систем и комплексов ракетно-космической обороны (РКО) – СПРН, СККП, ПРО и ПКО, работающих по единому алгоритму, взаимоувязанных по решаемым задачам и взаимно дополняющих друг друга, является наиболее дешевым способом решения задач предупреждения о ракетном нападении, контроля космического пространства, противоракетной и противокосмической обороны.

В рамках боевых возможностей СПРН является источником информации об испытательных и учебно-боевых пусках отечественных и иностранных БР, а также информации о военных конфликтах с применением БР, происходящих в любой точке земного шара.

В состав СПРН входят следующие компоненты:

- космические системы обнаружения стартов БР;
- группировка средств надгоризонтной радиолокации;
- система передачи данных и внешней оперативно-командной связи;
- командные пункты;
- комплексы доведения и отображения информации предупреждения на оповещаемых пунктах управления (ПУ).

Анализ требований, предъявляемых к СПРН в современных условиях, показал, что их выполнение представляет собой весьма сложную техническую задачу.

В особенности это относится к требованию по обнаружению ракетного нападения с высокой достоверностью в любых вариантах ракетных ударов с любого направления, что требует от СПРН гарантированного обнаружения малоразмерных боевых блоков и определения их прогнозируемой точки падения с достаточно высокой точностью.

В настоящее время эффективного решения этой проблемы из космоса, удовлетворяющего требованиям глобальности, независимости от времени года и суток и всепогодности, ни в России, ни в США не найдено. Один из путей гарантированного решения этой проблемы – усиление «наземного эшелона». Это создание группировки мощных наземных радиолокационных средств метрового или верхней части дециметрового диапазонов (типа «Дарьял») с дальностью действия по боевому блоку более 6 тыс. км.

Основная задача, которую призвана решать система предупреждения, – обнаружение ракетной атаки до того, как ракеты достигли своих целей. Своевременное обнаружение ракетной атаки позволяет определить ее источник, масштаб, оценить возможный ущерб и использовать эту информацию для выбора варианта ответных действий. Наличие системы раннего предупреждения необходимо для осуществления варианта ответно-встречного удара, который предполагает, что пуск ракет должен быть произведен до того, как атакующие ракеты смогут достичь своих целей.

Создание системы раннего предупреждения – исключительно сложная техническая задача. Чтобы обеспечить необходимую эффективность, система должна производить обнаружение атакующих ракет на максимально ранних стадиях их полета и гарантировать высокую степень достоверности предоставляемой ей информации об источнике и масштабе атаки. Поскольку система может выдать предупреждение только после начала реальной атаки, время, которое находится в ее распоряжении для обнаружения ракет, обработки полученной информации и формирования сигнала предупреждения, очень ограничено.

Предельно малое время, которое имеется в распоряжении у системы раннего предупреждения для обнаружения нападения, требует очень высокой степени интеграции между СПРН и системой боевого управления стратегическими силами. Это, в свою очередь, предъявляет предельно высокие требования к надежности системы.

Важная роль, которую система предупреждения о ракетном нападении играет в процедурах управления, и исключительно серьезные последствия, которые могла бы иметь ошибка в определении факта ракетной атаки, обусловила повышенное внимание к состоянию СПРН. В частности, в последние несколько лет неоднократно появлялись сообщения, в которых поднимался вопрос об опасности, которую может представлять ухудшающееся состояние российской системы предупреждения.

Советский Союз начал работу над созданием системы предупреждения о ракетном нападении в начале 60-х годов. Первые радиолокационные станции (РЛС) раннего предупреждения, развернутые в конце 60-х – начале 70-х годов, представляли собой модификации РЛС, разработанных для работы в составе системы контроля космического пространства и противоспутниковых систем. Основной задачей первых РЛС раннего предупреждения было предоставление информации о ракетной атаке создававшимся системам противоракетной обороны, а не обеспечение возможности ответно-встречного удара.

Концепция интегрированной системы предупреждения о ракетном нападении, включающая в себя как наземные радиолокационные станции, так и космические средства, и которая была бы способна обеспечить реализацию ответно-встречного удара, была разработана в Советском Союзе только в 1972 г. Эта концепция была разработана вскоре после реструктуризации управления предприятиями, вовлеченными в процесс создания систем противоракетной и противокосмической обороны, предупреждения о ракетном нападении и контроля космического пространства, которую Советский Союз предпринял в начале 70-х годов.

Подготовленный в 1972 г. эскизный проект предусматривал создание интегрированной системы раннего предупреждения, которая включала в себя надгоризонтные и загоризонтные РЛС и космические средства. Спутники СПРН и загоризонтные РЛС должны регистрировать пуски баллистических ракет во время прохождения ими активного участка траектории, обеспечивая тем самым максимально возможное время предупреждения. Размещенные на спутниках датчики должны регистрировать инфракрасное излучение, излучаемое выхлопом ракетного двигателя. Загоризонтные РЛС призваны регистрировать радиосигнал, отраженный стартующей ракетой.

Расположенные на территории Советского Союза загоризонтные РЛС могли регистрировать пуски на территории США за счет того, что их сигнал, претерпевая отражения от ионосферы, мог распространяться на большие расстояния.

Эскизный проект также предусматривал развертывание системы надгоризонтных РЛС, которые были призваны производить обнаружение боевых частей ракет на поздних участках баллистической траектории. РЛС обеспечивают очень важный эшелон системы, предоставляя возможность обнаружения ракетной атаки с помощью физических принципов, отличных от тех, которые используются космическим эшелоном системы, и тем самым заметно увеличивая надежность всей системы.

В соответствии с проектом надгоризонтные радиолокационные станции должны были также использоваться в интересах контроля космического пространства. Проект предусматривал тесную интеграцию существовавших и будущих радиолокационных средств систем ПРН и ККП с тем, чтобы обеспечить возможность сопровождения космических объектов.

Советский Союз осуществил развертывание всех компонентов системы – надгоризонтных и загоризонтных РЛС и спутников раннего предупреждения. В процессе развертывания выяснилось, что загоризонтные РЛС не оправдали возлагавшихся на них надежд и не играли сколько-нибудь существенной роли в работе СПРН. Программы создания надгоризонтных РЛС и космического эшелона СПРН оказались более успешными. В то же время реализация обеих программ неоднократно сталкивалась с трудностями и задержками. Распад Советского Союза также серьезным образом замедлил их реализацию. Как результат существующая сегодня российская система предупреждения очень далека от той интегрированной многоэшелонной системы, создание которой предусматривалось советскими планами.

1.11.2. Наземный эшелон СПРН

Наземный эшелон СПРН составляют радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО), а также наземная инфраструктура (командные пункты, центры управления и др.).

Работы по созданию РЛС дальнего обнаружения начались после принятия в 1954 г. решения Правительства СССР о разработке предложений по созданию противоракетной обороны (ПРО) Москвы. Ее важнейшими элементами должны были стать и РЛС ДО для обнаружения и определения с высокой точностью координат ракет противника и головных частей на расстоянии нескольких тысяч километров.

Строительство первых РЛС раннего предупреждения велось в 1963–1969 годах. Это были две РЛС типа «Днестр-М», размещенные в Оленегорске (Кольский полуостров) и Скрунде (Латвия). В августе 1970 г. система была принята на вооружение. Она была рассчитана на обнаружение баллистических ракет, запускаемых с территории США или из акваторий Норвежского и Северного морей. Основной задачей системы на данном этапе было предоставление информации о ракетном нападении для системы противоракетной обороны, разворачиваемой вокруг Москвы.

Таблица 1.28. Перечень и основные технические характеристики РЛС СПРН, созданных в СССР

РЛС	Западное обозначение	Тип антенны Длина волны	Количество антенн, размер антенны, закрываемый ею сектор	Комментарий
Днестр	Hen House	ФАР, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции, сканирование по углу места отсутствует 1,5–2 м	2 антенны 200 × 20 м, 30°	РЛС СККП
Днестр-М	Hen House	ФАР, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции, сканирование по углу места отсутствует 1,5–2 м	2 антенны 200 × 20 м, 30°	РЛС СПРН. Модификация РЛС «Днестр»
Днепр	Hen House	ФАР, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции, сканирование по углу места отсутствует 1,5–2 м	2 антенны 200 × 20 м, 60°	РЛС СПРН. Модификация «Днестр»/»Днестр-М»
Даугава	Pechora	ФАР 1,5–2 м	Передатчик, 30 × 40 м, ~60°	Передатчик-прототип РЛС «Дарьял»
Дарьял, Дарьял-У, Дарьял-УМ	Pechora	ФАР 1,5–2 м	Передатчик 30 × 40 м и приемник 80 × 80 м, разнесенные на 0,5–1,5 км, ~110°	РЛС СПРН
Дунай-3	Dog House	ФАР с непрерывным излучением, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции ~0,1 м	Передатчик и приемник, разнесенные на 2,4 км, ~45°	РЛС была построена как часть системы ПРО Москвы А-35. Две одинаковых РЛС расположены на одном узле
Дунай-3У	Cat House	ФАР с непрерывным излучением, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции ~0,1 м	Передатчик и приемник, разнесенные на 2,8 км, 51°	РЛС была построена как часть системы ПРО Москвы А-35. Две одинаковых РЛС расположены на одном узле
Волга		ФАР с непрерывным излучением, азимутальное сканирование с помощью частотной модуляции ~0,1 м	Передатчик и приемник, разнесенные на 3 км, 50°	РЛС СПРН
Дон-2Н	Pill Box	ФАР ~0,01 м	4 антенны, круговой приемник с диаметром 6 м и излучатель 10 × 10 м, 90°	РЛС системы ПРО Москвы А-135

В 1967–1968 гг., одновременно со строительством РЛС в Оленегорске и Скрунде, было начато строительство четырех РЛС типа «Днепр» (модернизированная версия РЛС «Днестр-М»). Для строительства были выбраны узлы в Балхаше-9 (Казахстан), Мишелевке (возле Иркутска), Севастополе. Еще одна была построена на узле в Скрунде, в дополнение к уже работающей там РЛС «Днестр-М». Эти станции должны были обеспечить более широкий сектор обзора системы предупреждения, расширив его на Северную Атлантику, районы Тихого и Индийского океана.

В начале 1971 г. на базе командного пункта раннего обнаружения в Солнечногорске был создан командный пункт системы предупреждения о ракетном нападении.

В табл. 1.28 [20] представлены перечень и основные технические характеристики РЛС СПРН, созданных в СССР. Можно выделить следующие семейства РЛС, сходные по архитектуре и принципам работы. Это: «Днестр», «Днепр», «Даугава», «Дарьял», «Дунай», «Волга» и «Дон». Вместо этой отечественной «речной» классификации за рубежом используются их другие обозначения Heu House, Dog House, Cat House, Pechora, Pill Box.

Важным этапом развития отечественных и зарубежных РЛС СПРН явился переход на РЛС с фазированными антенными решетками, что явилось революционным техническим решением, которое обеспечило успехи в развитии микроэлектронных технологий. «Дарьял», «Дунай», «Волга» и «Дон» уже использовали в своей конструкции эти ФАР.

На рис. 1.34–1.35 представлен внешний вид некоторых элементов «наземного эшелона» СПРН. Так на рис. 1.34 представлена фотография наземной ФАР СПРН на Аляске, США, а на рис. 1.35, 1.36 – фотографии отечественных РЛС метрового диапазона «Воронеж-М» и Печорской РЛС с ФАР.

Рис. 1.34. Наземная ФАР системы предупреждения о ракетном нападении на Аляске, США

Рис. 1.35. РЛС СПРН метрового диапазона «Воронеж-М» в Лехтуси под Санкт-Петербургом

Рис. 1.36. Печорская радиолокационная станция

1.11.3. Фазированные антенные решетки

Основным техническим элементом наземного эшелона как СПРН, так и других систем наземного и космического базирования является фазированная антенная решетка – тип антенн, конструктивно выполненных в виде группы антенных излучателей, в которых относительные фазы сигналов изменяются комплексно так, что эффективное излучение антенны усиливается в каком-то одном, желаемом направлении и подавляется во всех остальных направлениях.

Управление фазами (фазирование) позволяет радару с применяемой ФАР:

- формировать (при весьма разнообразных расположениях излучателей) необходимую диаграмму направленности (ДН) антенны (например, остронаправленную ДН типа луч);
- изменять направление луча неподвижной антенны, таким образом осуществляя быстрое (в ряде случаев практически безынерционное) сканирование – качание луча;

- управлять в определенных пределах формой ДН – изменять ширину луча, интенсивность (уровни) боковых лепестков и т.п. (для этого в ФАР иногда осуществляют также управление и амплитудами волн отдельных излучателей).

Эти (и некоторые другие) свойства ФАР, а также возможность применять для управления ФАР современные средства автоматики и вычислительной электроники обусловили их перспективность и широкое использование в радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и т.д. ФАР, содержащие большое число управляемых элементов, входят в состав различных наземных (стационарных и подвижных), корабельных, авиационных и космических радиоустройств.

Применение подобных антенных решеток дает следующие преимущества.

Решетка из *n* элементов позволяет увеличить приблизительно в *n* раз коэффициент направленного действия (КНД) (и, соответственно, усиление) антенны по сравнению с одиночным излучателем, а также сузить луч для повышения точности определения угловых координат источника излучения в навигации и радиолокации.

С помощью решетки удается поднять электрическую прочность антенны и увеличить уровень излучаемой (принимаемой) мощности путем размещения в каналах решетки независимых усилителей высокочастотной энергии.

Важным преимуществом решетки является возможность быстрого (безынерционного) обзора пространства за счет качания луча антенны электрическими методами (электрического сканирования).

Имеется ряд конструктивно-технологических преимуществ по сравнению с другими классами антенн. Так, например, улучшение массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры происходит за счет использования печатных антенных решеток. Снижение стоимости больших радиоастрономических телескопов достигается благодаря применению зеркальных антенных решеток.

До конца 1980-х годов создание такой системы требовало применения большого количества устройств, из-за чего фазированные решетки, полностью управляемые электроникой, использовались, главным образом, в больших стационарных радарах типа массивного BMEWS (Ballistic Missile Warning Radar) и несколько меньшего американского морского радара противовоздушной обороны SCANFAR (развитие AN/SPG-59), установленного на американском тяжелом атомном ракетном крейсере «Лонг-Бич» и атомном авианосце «Энтерпрайз». Его потомок SPY-1 Aegis устанавливался на крейсерах класса Ticonderoga и позже на эсминцах Arleigh Burke. Единственными известными применениями на самолетах был большой радар «Заслон» (радар), установленный на советском перехватчике МиГ-31, и радар нападения на B-1B Lancer [20]. В настоящее время применяется в Су-35 и F-22.

Такие радары не устанавливались на самолетах главным образом из-за их большого веса, поскольку первое поколение технологии фазированных решеток использовало обычную радарную архитектуру. В то время как антенна изменилась, все остальное еще оставалось прежним, но были добавлены дополнительные вычислители, чтобы управлять фазовращателями антенны. Это привело к увеличению веса антенны, количества вычислительных модулей, а также повысило нагрузку на систему электропитания.

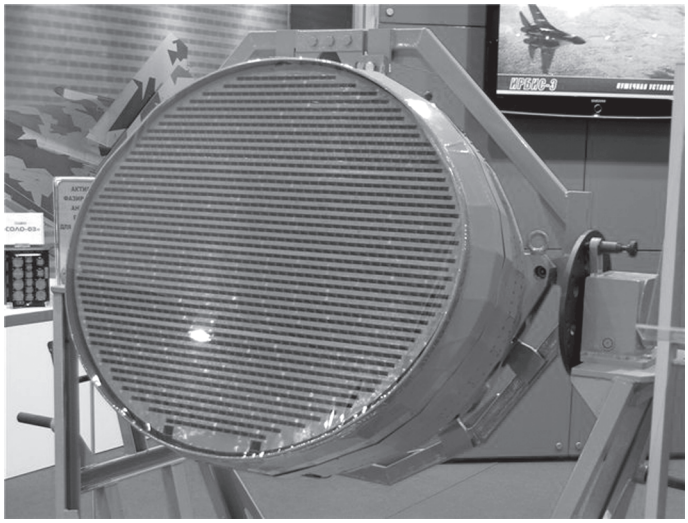


Рис. 1.37. Активная фазированная антенная решетка (АФАР)

Общепринятой считается следующая классификация антенных решеток: а) линейная; б) дуговая; в) кольцевая; г) плоская; д) цилиндрическая; е) коническая; ж) сферическая; з) неэквидистантная.

По способу возбуждения АР различают следующие типы:

- с последовательным питанием;
- с параллельным питанием;
- с комбинированным (последовательно-параллельным);
- с пространственным (оптическим, «эфирным») способом возбуждения.

Активная фазированная антенная решетка (АФАР) – разновидность фазированой антенной решетки (ФАР), в которой каждый элемент решетки или группа элементов имеют свой собственный миниатюрный микроволновый передатчик, обходясь без одной большой трубки передатчика, применяемой в радарах с пассивной фазированной решеткой. В активной фазированной решетке каждый элемент состоит из модуля, который содержит щель антенны, фазовращатель, передатчик и часто также приемник.

Если в обычной пассивной решетке один передатчик мощностью несколько киловатт питает несколько сотен элементов, каждый из которых излучает только десятки ватт мощности. Современный микроволновый транзисторный усилитель может также произвести десятки ватт, и в радаре с активной фазированной решеткой несколько сотен модулей, каждый мощностью в десятки ватт, создают в целом мощный главный луч радара в несколько киловатт.

В то время как результат идентичен, активные решетки намного более надежны, поскольку отказ одного приемо-передающего элемента решетки искажает диаграмму направленности антенны, что несколько ухудшает характеристики локатора, но в целом он остается работоспособным. Катастрофического отказа лампы передатчика, которая является проблемой обычных радаров, просто не может произойти. Дополнительная выгода – экономия веса без большой лампы

высокой мощности, связанной с ней системой охлаждения и большого блока питания высокого напряжения.

Другой особенностью, которая может использоваться только в активных решетках, является способность управлять усилением индивидуальных приемно-передающих модулей. Если это может быть сделано, диапазон углов, через которые луч может быть отклонен, существенно увеличивается, и таким образом многие из ограничений геометрии решеток, которые имеют обычные фазированные решетки, могут быть обойдены. Такие решетки называют решетками суперувеличения. Из изданной литературы неясно, использует ли какая-либо существующая или проектируемая антенная решетка эту технику.

К сожалению, успехи в дальнейшем развитии ФАР зависят от решения двух силовых проблем – рассеивания мощности и снижения стоимости.

Первая проблема – рассеивание мощности. Из-за недостатков современных транзисторных усилителей (СВЧ-диапазона (MMIC)) эффективность передатчика модулятипично меньше чем 45%. В результате АФАР выделяет большое количество теплоты, которая должна быть рассеяна, чтобы предохранить чипы передатчика от расплавления – надежность GaAs MMIC-чипов улучшается при низкой рабочей температуре. Традиционное охлаждение воздухом, используемое в обычных ЭВМ и авионике, плохо подходит при высокой плотности упаковки элементов АФАР, в результате чего современные АФАР охлаждаются жидкостью (американские проекты используют polyalphaolefin (PAO) – хладагент, подобный синтетической гидравлической жидкости). Типичная жидкая система охлаждения использует насосы, вводящие хладагент через каналы в антенне и выводящие затем его к теплообменнику – им может быть как воздушный охладитель (радиатор), так и теплообменник в топливном баке – со второй жидкостью, охлаждающей петлю теплообмена, чтобы увести высокую температуру от топливного бака.

Так, по сравнению с обычным радаром истребителя с воздушным охлаждением, АФАР является более надежным, однако будет потреблять бóльшее количество электроэнергии и требовать более интенсивного охлаждения. Но АФАР может обеспечить намного большую передающую мощность, что необходимо для большей дальности обнаружения цели (увеличение передающей мощности однако имеет недостаток – увеличение следа, по которому радиоразведка противника или RWR могут обнаружить радар).

Другая проблема – стоимость массового производства модулей. Для радара истребителя, требующего типично от 1000 до 1800 модулей, стоимость АФАР становится неприемлемой, если модули стоят больше чем сто долларов каждый. Ранние модули стоили приблизительно 2 тыс. долл., что не допускало массового использования АФАР. Однако стоимость таких модулей и MMIC-чипов постоянно уменьшается, поскольку себестоимость их разработки и производства постоянно снижается, как будет показано в одной из номенклатурных глав.

Несмотря на недостатки, активные фазированные решетки превосходят обычные радарные антенны почти во всех отношениях, обеспечивая более высокую следящую способность и надежность, пусть и при некотором увеличении в сложности и, возможно, стоимости.

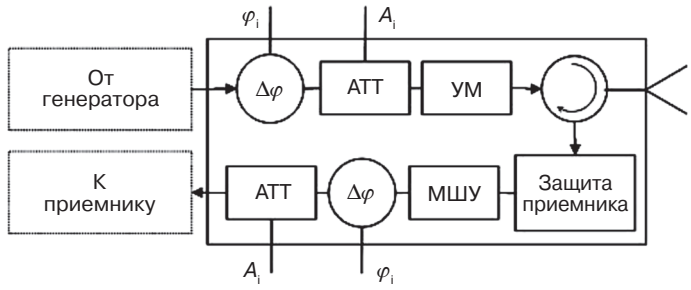


Рис. 1.38. Структура приемо-передающего модуля АФАР

На рис. 1.38 представлена типовая структура главного элемента АФАР – приемо-передающего модуля.

Приемо-передающий модуль – это основа пространственного канала обработки сигнала в любом АФАР.

В его состав входит активный элемент – усилитель, который делает это устройство электродинамически невзаимным. Поэтому для обеспечения возможности работы устройства как на прием, так и на передачу в нем разделяют передающий и приемный каналы. Разделение осуществляется либо коммутатором, либо циркулятором.

В состав приемного канала входят следующие устройства.

Устройство защиты приемника – обычно либо разрядник, либо другое пороговое устройство, предотвращающее перегрузку приемного канала.

Малошумящий усилитель – два или более каскадов активного усиления сигнала.

Фазовращатель – устройство фазовой задержки сигнала в канале для задания фазового распределения по всему раскрыву решетки.

Аттенюатор – устройство задания (понижения, ослабления) амплитуды сигнала для задания амплитудного распределения по раскрыву решетки.

Состав передающего канала схож с составом приемного канала. Отличие заключается в отсутствии устройства защиты и меньших требованиях к усилителю по шумам. Тем не менее передающий усилитель должен обладать большей выходной мощностью, чем приемный.

1.11.4. Космический эшелон СПРН

В соответствии с проектом системы раннего предупреждения, разработанном в СССР в начале 70-х годов, система, наряду с надгоризонтными и загоризонтными РЛС «наземного эшелона» должна была включать в себя космический эшелон, который был призван существенно расширить ее возможности за счет своей способности обнаруживать баллистические ракеты практически сразу после старта [20].

Работа над стратегией построения космического эшелона системы предупреждения была поручена ЦНИИ «Комета», а разработка космических аппаратов – КБ им. С.А. Лавочкина.

В соответствии с проектом, разработанным в ЦНИИ «Комета», космическая система предупреждения, известная как «УС-КС», или «Око», включает в себя группировку спутников, размещенных на высокоэллиптических орбитах, и пункт управления вблизи Москвы. На спутниках размещаются детекторы излучения инфракрасного и видимого диапазонов, которые способны регистрировать сигнал, излучаемый работающим двигателем стартующих баллистических ракет. Сигнал должен устойчиво фиксироваться на фоне космического пространства (но не на фоне земной поверхности). Система начала работу в сокращенном составе в 1978 г., а поставлена на боевое дежурство в 1982 г.

Одновременно с развертыванием системы «УС-КС» шла работа над выработкой технических требований для новой системы, получившей наименование «УС-КМО» (на Западе эту систему иногда называют «Прогноз», что не совсем корректно). Эта система была призвана обеспечивать наблюдение за пусками ракет морского базирования из акватории мирового океана, а также пуски ракет с территории США и Китая. Для решения этой задачи средства новой системы должны были осуществлять обнаружение стартующих ракет уже на фоне земной поверхности. Вплоть до 1984 г. продолжались проблемы, которые вынуждали взрывать космические аппараты на орбите.

Космическая система обнаружения стартов ракет с континентальной части США «Око» включала в себя: спутники «УС-КС» на высокоэллиптических орбитах со станцией управления и приема информации (СУПИ) и стартовый комплекс. Создание космической системы обнаружения стартов ракет было поручено КБ Челомея в начале 1960-х гг. В 1962 г. был подготовлен аванпроект системы, включавшей 20 спутников массой в 1400 кг, расположенных на одной полярной орбите высотой 3600 км.

Спутники выводились на орбиту РН «УР-200» и должны были обнаруживать ракеты по тепловому излучению факела двигателей первой ступени.

19 сентября 1972 г. с космодрома Плесецк РН «Молния» вывела на орбиту первый КА «Око» («Космос-520»). В следующие три года были осуществлены еще четыре запуска. Первые два КА были оснащены инфракрасными и телевизионными приборами обнаружения. Третий аппарат «Космос-665» – только телевизионной аппаратурой. Впервые 24 декабря 1972 г. он зафиксировал старт баллистической ракеты «Минитмен» в ночных условиях. В 1976 г. на орбиту был выведен «Космос-862» с первой в СССР бортовой ЭВМ на интегральных микросхемах. Начиная с 1977 г. произведена серия запусков, в результате которых к 1978 г. была создана работающая группировка из пяти спутников, послужившая прототипом космической системы раннего предупреждения.

Следует сказать, что в начале программы имелись серьезные проблемы с надежностью спутников. Из первых 13 спутников, запущенных в 1972–1979 гг., только семь проработали более 100 дней. Впоследствии срок активного существования КА удалось довести до 3 лет (американские аппараты «IMEWS-2» функционировали на орбите 5-7 лет). Развертывание системы «Око» началось запуском четырех аппаратов в 1979 г. до завершения отработки аппаратуры станции управления, приема и обработки информации. 5 апреля 1979 г. система была принята на вооружение, а уже в июле 1979 г. она зафиксировала старт ракеты-носителя с атолла Кваджалейн.

В 1980 г. на эллиптические орбиты были выведены шесть спутников, а сама система была сопряжена с системой предупреждения о ракетном нападении (СПРН). 30 декабря 1982 г. космическая система с шестью спутниками заступила на боевое дежурство.

До 1983 г. все спутники были оснащены электронной системой самоуничтожения, активировавшейся в случае потери связи с пунктом наземного контроля. По этой причине до 1983 г. было утрачено 11 из 31 КА (табл. 1.29), т.е. каждый третий спутник [50]. После 1983 г. было принято решение все-таки не активизировать системы самоликвидации в этой ситуации, что не намного улучшило статистику отказов на орбите.

Таблица 1.29. Российские спутники космического эшелона СПРН за период с 1972 по 1992 г.

Спутник	Номер NORAD	Международное обозначение	Тип	Дата запуска (дд.мм.гг)	Время старта (UTC)	Орбитальная плоскость или точка стояния	Окончание работы (оценка) дд.мм.гг	Комментарий
Космос-520	6192	1972-072A	HEO	19.09.72	19:19:03	4	??	
Космос-606	6916	1973-084A	HEO	02.11.73	13:01:56	4	30.04.74	
Космос-665	7352	1974-050A	HEO	29.06.74	15:59:58	2	07.09.75	
Космос-706	7625	1975-007A	HEO	30.01.75	15:02:00	7	20.11.75	
Космос-775	8357	1975-097A	GEO	08.10.75	00:30:00	??	??	Орбита не была стабилизирована
Космос-862	9495	1976-105A	HEO	22.10.76	09:12:00	5	15.03.77	Взорван
Космос-903	9911	1977-027A	HEO	11.04.77	01:38:00	7	08.06.78	Взорван
Космос-917	10059	1977-047A	HEO	16.06.77	04:58:00	9	30.03.79	Взорван
Космос-931	10150	1977-068A	HEO	20.07.77	04:44:00	2	24.10.77	Не достиг штатной орбиты. Взорван
Космос-1024	10970	1978-066A	HEO	28.06.78	02:58:00	2	24.05.80	Переведен на нештатную орбиту в октябре 1979 г.
Космос-1030	11015	1978-083A	HEO	06.09.78	03:04:00	4	10.10.78	Взорван. Орбита не была стабилизирована
Космос-1109	11417	1979-058A	HEO	27.06.79	18:11:00	9	15.02.80	Взорван. Орбита не была стабилизирована
Космос-1124	11509	1979-077A	HEO	28.08.79	00:17:00	4	09.09.79	Взорван. Орбита не была стабилизирована
Космос-1164	11700	1980-01 3A	HEO	12.02.80	00:53:00	9		Аварийный запуск
Космос-1172	11758	1980-028A	HEO	12.04.80	20:18:00	9	09.04.82	
Космос-1188	11844	1980-050A	HEO	14.06.80	20:52:00	2	28.10.80	
Космос-1191	11871	1980-057A	HEO	02.07.80	00:54:00	4	16.05.81	
Космос-1217	12032	1980-085A	HEO	24.10.80	10:53:00	2	20.03.83	
Космос-1223	12078	1980-095A	HEO	27.11.80	21:37:00	7	11.08.82	
Космос-1247	12303	1981-016A	HEO	19.02.81	10:00:00	5	20.10.81	Взорван
Космос-1261	12376	1981-031A	HEO	31.03.81	09:40:00	6	01.05.81	Взорван
Космос-1278	12547	1981-058A	HEO	19.06.81	19:37:04	4	05.07.84	Взорван в декабре 1986 г.
Космос-1285	12627	1981-071A	HEO	04.08.81	00:13:00	6	21.11.81	Не достиг штатной орбиты. Взорван

Таблица 1.29 (продолжение)

Спутник	Номер NORAD	Международное обозначение	Тип	Дата запуска (дд.мм.гг)	Время старта (UTC)	Орбитальная плоскость или точка стояния	Окончание работы (оценка) дд.мм.гг	Комментарий
Космос-1317	12933	1981-108A	НЕО	31.10.81	22:54:00	9	26.01.84	Взорван
Космос-1341	13080	1982-016A	НЕО	03.03.82	05:44:38	5	01.02.84	
Космос-1348	13124	1982-029A	НЕО	07.04.82	13:42:00	9	22.07.84	
Космос-1367	13205	1982-045A	НЕО	20.05.82	13:09:00	1	30.09.84	
Космос-1382	13295	1982-064A	НЕО	25.06.82	02:28:00	7	29.09.84	
Космос-1409	13585	1982-095A	НЕО	22.09.82	06:23:00	2	05.01.87	
Космос-1456	14034	1983-038A	НЕО	25.04.83	19:34:00	4	13.08.83	Взорван
Космос-1481	14182	1983-070A	НЕО	08.07.83	19:21:00	6	09.07.83	Не достиг штатной орбиты. Взорван
Космос-1518	14587	1983-126A	НЕО	28.12.83	03:48:00	5	01.06.84	
Космос-1541	14790	1984-024A	НЕО	06.03.84	17:10:00	3	31.10.85	
Космос-1546	14867	1984-031A	GEO	29.03.84	05:53:00	1,4	16.11.86	
Космос-1547	14884	1984-ОЗЗА	НЕО	04.04.84	01:40:04	7	23.08.85	
Космос-1569	15027	1984-055A	НЕО	06.06.84	15:34:00	5	26.01.86	
Космос-1581	15095	1984-071A	НЕО	03.07.84	21:31:00	8	19.08.85	
Космос-1586	15147	1984-079A	НЕО	02.08.84	08:38:00	4	01.04.85	
Космос-1596	15267	1984-096A	НЕО	07.09.84	19:13:00	9	26.11.86	
Космос-1604	15350	1984-107A	НЕО	04.10.84	19:49:13	1	27.09.85	
Космос-1629	15574	1985-016A	GEO	21.02.85	07:57:00	4, 3, 1	16.01.87	
Космос-1658	15808	1985-045A	НЕО	11.06.85	14:27:00	6	03.09.87	
Космос-1661	15827	1985-049A	НЕО	18.06.85	00:40:26	??	21.10.89	Переведен на нештатную орбиту в начале работы
Космос-1675	15952	1985-071A	НЕО	12.08.85	15:09:00	8	18.01.86	
Космос-1684	16064	1985-084A	НЕО	24.09.85	01:18:10	4	09.03.89	
Космос-1687	16103	1985-088A	НЕО	30.09.85	19:23:00	2	30.09.85	Орбита не была стабилизирована
Космос-1698	16183	1985-098A	НЕО	22.10.85	20:24:00	3	24.08.86	
Космос-1701	16235	1985-105A	НЕО	09.11.85	08:25:00	8	23.11.87	Переведен на нештатную орбиту в декабре 1986 г.
Космос-1729	16527	1986-011A	НЕО	01.02.86	18:11:56	5	14.05.88	
Космос-1761	16849	1986-050A	НЕО	05.07.86	01:16:47	3	23.10.88	
Космос-1774	16922	1986-065A	НЕО	28.08.86	08:02:43	7	17.07.88	
Космос-1783	16993	1986-075A	НЕО	03.10.86	13:05:40	1	03.10.86	Не достиг штатной орбиты
Космос-1785	17031	1986-078A	НЕО	15.10.86	09:29:18	9	16.01.91	Переведен на нештатную орбиту в декабре 1989 г.
Космос-1793	17134	1986-091A	НЕО	20.11.86	12:09:20	2	13.08.91	Переведен на нештатную орбиту в июне 1990 г.
Космос-1806	17213	1986-098A	НЕО	12.12.86	18:35:36	5	20.11.88	
Космос-1849	18083	1987-048A	НЕО	04.06.87	18:50:23	1	20.05.90	
Космос-1851	18103	1987-050A	НЕО	12.06.87	07:40:28	6	23.11.89	
Космос-1894	18443	1987-091A	GEO	28.10.87	15:15:00	1	22.12.91	

Таблица 1.29 (окончание)

Спутник	Номер NORAD	Международное обозначение	Тип	Дата запуска (дд.мм.гг)	Время старта (UTC)	Орбитальная плоскость или точка стояния	Окончание работы (оценка) дд.мм.гг	Комментарий
Космос-1903	18701	1987-105A	HEO	21.12.87	22:35:42	8	11.11.92	
Космос-1922	18881	1988-01 ЗА	HEO	26.02.88	09:31:12	5	30.07.90	
Космос-1966	19445	1988-076A	HEO	30.08.88	14:14:54	3	14.12.90	
Космос-1974	19554	1988-092A	HEO	03.10.88	22:23:39	7	20.05.93	
Космос-1977	19608	1988-096A	HEO	25.10.88	18:02:31	6	12.07.90	
Космос-2001	19796	1989-011A	HEO	14.02.89	04:21:11	4	15.03.93	
Космос-2050	20330	1989-091A	HEO	23.11.89	20:35:44	9	08.10.93	
Космос-2063	20536	1990-026A	HEO	27.03.90	16:40:08	2	21.06.95	
Космос-2076	20596	1990-040A	HEO	28.04.90	11:37:02	1	30.10.92	
Космос-2084	20663	1990-055A	HEO	21.06.90	20:45:52	6	21.06.90	Не достиг штатной орбиты
Космос-2087	20707	1990-064A	HEO	25.07.90	18:13:56	6	21.01.92	
Космос-2097	20767	1990-076A	HEO	28.08.90	07:49:13	3	30.04.95	
Космос-2105	20941	1990-099A	HEO	20.11.90	02:33:14	3	04.04.93	Переведен на нештатную орбиту в феврале 1992 г.
Космос-2133	21111	1991-010A	GEO	14.02.91	08:31:56	4, 3, 2, 1,4	09.11.95	
Космос-2155	21702	1991-064A	GEO	13.09.91	17:51:02	1	16.06.92	
Космос-2176	21847	1992-003A	HEO	24.01.92	01:18:01	6	13.04.96	
Космос-2196	22017	1992-040A	HEO	08.07.92	09:53:14	5	23.06.94	
Космос-2209	22112	1992-059A	GEO	10.09.92	18:01:18	1	16.11.96	
Космос-2217	22189	1992-069A	HEO	21.10.92	10:21:22	8	07.11.96	
Космос-2222	22238	1992-081A	HEO	25.11.92	12:18:54	1	03.12.96	
Космос-2224	22269	1992-088A	GEO	17.12.92	12:45:00	2, 1,2	17.06.99	
Космос-2232	22321	1993-006A	HEO	26.01.93	15:55:26	4	04.06.98	

В 1984 г. на геостационарной орбите начал работу КА «УС-КС» системы «Око-С». Спутник помещался в точку стояния на 240 западной долготы, обеспечивая наблюдение за центральной частью территории США. Этот спутник видел пуски ракет с территории США под точно таким же углом, как спутник на высокоэллиптической орбите (ВЭО) во время рабочей части своей орбиты, не изменяя свою позицию относительно Земли.

Введение геостационарных спутников сделало систему значительно более надежной. Спутник на ГСО способен обнаружить запуски, даже если высокоэллиптические спутники не развернуты вовсе. При этом могут пострадать качество покрытия и надежность обнаружения, но система не будет оставаться полностью слепой. На ГСО спутники «УС-КС» выводятся с помощью РН «Протон-К», на ВЭО – при помощи РН «Молния-М». Аппаратура КА регистрирует инфракрасное излучение стартующих ракет только на краю видимого диска Земли (на фоне атмосферы) и передает инфракрасное изображение на землю в реальном времени. За период с 1972 по 2002 г. запущено 86 аппаратов «УС-КС» (4 на ГСО). Наибольшее число пусков (по 8) произведено в 1984–1985 гг.

В феврале 1991 г. с запуском второго КА «УС-КМО» (аббревиатура КМО – Континенты, Моря, Океаны) началось развертывание системы «Око-1», обна-

руживающей старты МБР не только с континентальной территории США, но и из остальных районов земного шара. Ее отличительной особенностью стала возможность вертикального наблюдения за стартом ракет на фоне земной поверхности, что позволяет определять азимут полета МБР. «Око-1» («Прогноз») со спутником на ГСО была принята на вооружение в 1996 г. В полной конфигурации система должна включать до семи спутников на ГСО и около четырех на ВЭО. За период с 1988 по 2004 г. было запущено 11 КА. Продолжительность работы КА на орбите варьируется от 2 (для КА № 8) до 77 месяцев (для «УС-КМО» № 5).

Трассы спутников системы «Око» значительно смещены к западу, что позволяет наблюдать за территорией США из апогея, находясь одновременно в зоне радиовидимости России. Для наблюдения используются телекамеры-видиконы, приспособленные для ближнего ИК- и УФ-диапазонов.

Поскольку одной из задач данной книги является попытка понять связь между надежностью КА и используемой при их создании ЭКБ, подробнее остановимся на анализе этой ситуации.

По состоянию на январь 2002 г. было произведено всего 86 запусков спутников первого поколения, 79 из них были размещены на высокоэллиптических орбитах (ВЭО). Оставшиеся семь спутников первого поколения были размещены на геосинхронных орбитах (ГСО).

Из 79 запусков на высокоэллиптические орбиты три были аварийными. Оставшиеся 76 спутников можно разделить на три группы в соответствии с продолжительностью их жизни. Первая группа объединяет спутники, проработавшие менее одного года. Поскольку это заметно меньше, чем среднее время работы спутников, можно предположить, что спутники этой группы также прекратили работу в результате аварии. В состав этой группы также входят спутники, орбита которых не была стабилизирована: «Космос-931», «Космос-1030», «Космос-1109», «Космос-1124», «Космос-1261», «Космос-1285», «Космос-1481» и «Космос-1687». Эта группа состоит из 21 спутника и включает в себя как спутники, запуск которых производился в первые годы существования программы, так и спутники, запуск которых был произведен недавно.

Вторая группа объединяет спутники, запуск которых был произведен до 1985 г. Эти спутники работали в среднем около 20 месяцев. Третью группу по нашей классификации составляют спутники, запуск которых был произведен после 1985 г. и которые работали почти вдвое больше, чем спутники второй группы, – около 40 месяцев.

Анализ данных о времени жизни спутников свидетельствует в пользу предположения о том, что в середине 80-х годов была проведена серьезная модернизация космических аппаратов, увеличившая срок их жизни. Увеличение срока жизни было произведено в рамках программы, которая предполагала размещение спутников на геосинхронных орбитах. (Первый запуск такого спутника был совершен в 1984 г.).

Наиболее долгоживущим спутником первого поколения стал «Космос-2232», который работал 64 месяца.

Число спутников второго поколения слишком мало для того, чтобы можно было делать выводы о продолжительности их жизни. Наиболее долгоживущим

спутником стал «Космос-2224», который работал 77 месяцев (что больше, чем какой-либо другой спутник системы предупреждения). «Космос-2133» продолжал работу на протяжении 56 месяцев, «Космос-2209» – 50 месяцев. Такая продолжительность работы, по всей видимости, свидетельствует о том, что спутники работали до полной выработки своего ресурса. «Космос-2282» прекратил работу после 17 месяцев работы, скорее всего, из-за неисправности. «Космос-2350» работал лишь два месяца, что говорит о том, что завершение его работы было аварийным.

Выбор геометрии наблюдения и, соответственно, высокоэллиптических орбит для размещения спутников объясняется *отсутствием в Советском Союзе в то время технологии создания полупроводниковых приемников инфракрасного диапазона и микроэлектронных средств обработки данных*, которые позволили бы реализовать регистрацию ракет на фоне земной поверхности. Не имея подходящих ИК-приемников, Советский Союз был вынужден создавать систему, которая полагалась бы на геометрию наблюдения под скользящим углом и которая позволяла наблюдать сигнал стартующей ракеты на фоне космического пространства. Такие условия наблюдения предъявляли к приемникам гораздо менее жесткие требования, но требовали от государства привлечения больших объемов финансовых средств, поскольку в состав группировки на высокоэллиптических орбитах должно входить *большее количество спутников, чем требуется для создания геостационарной группировки*.

Поскольку основная тема данной книги – проблемы космической микроэлектроники, вышеприведенный пример из нашей недавней истории лишь подтверждает важную роль и место ЭКБ в космических проектах.

1.11.5. Военно-разведывательные спутники

Военно-разведывательный (разведывательный) спутник – искусственный спутник Земли, предназначенный для наблюдения Земли (телевизионная съемка, фотосъемка) в целях обеспечения разведывательной деятельности или спутник связи, применяющийся для разведки. Журналисты называют их «спутник-шпион» [51].

Функции разведывательных ИСЗ:

- фотографирование с высоким разрешением (видовая разведка);
- прослушивание систем связи и определение местоположения радиосредств (радиотехническая разведка);
- слежение за выполнением запрета на ядерные испытания;
- обнаружение пусков ракет (система предупреждения о ракетном нападении).

Информация об американских программах доступна в основном до 1972 года, о более поздних программах просочилась лишь небольшая информация. Несколько изображений, полученных с современных ИСЗ, было рассекречено по случайности или из-за утечки, например, как в случае с КН-11, фотографии с которого были посланы в Jane's Defence Weekly в 1985 году.

Российский документальный фильм «Секретный космос» сообщает, что на высокой орбите находится около 2 тысяч отработанных разведывательных ИСЗ только советского производства.

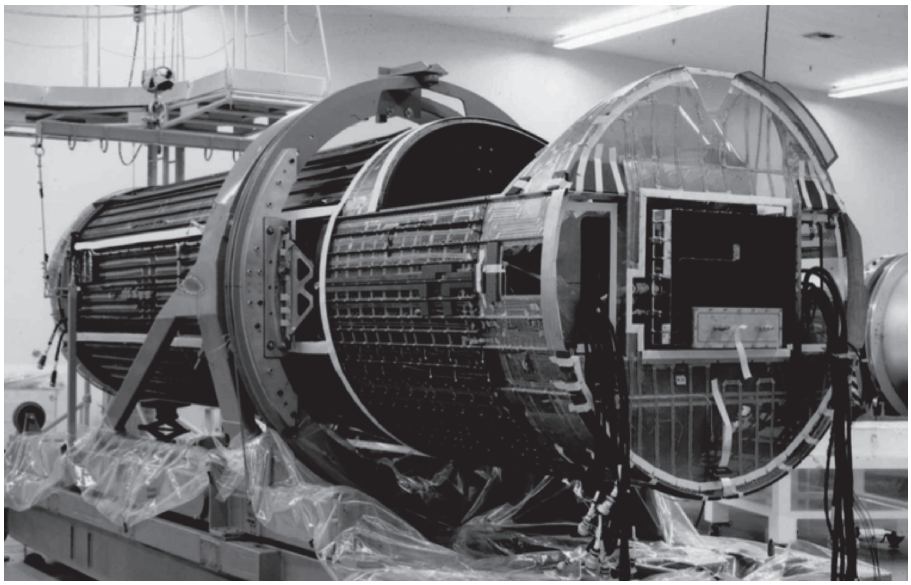


Рис. 1.39. Трехтонный спутник-шпион КН-8. Изображение рассекречено в сентябре 2011 г.

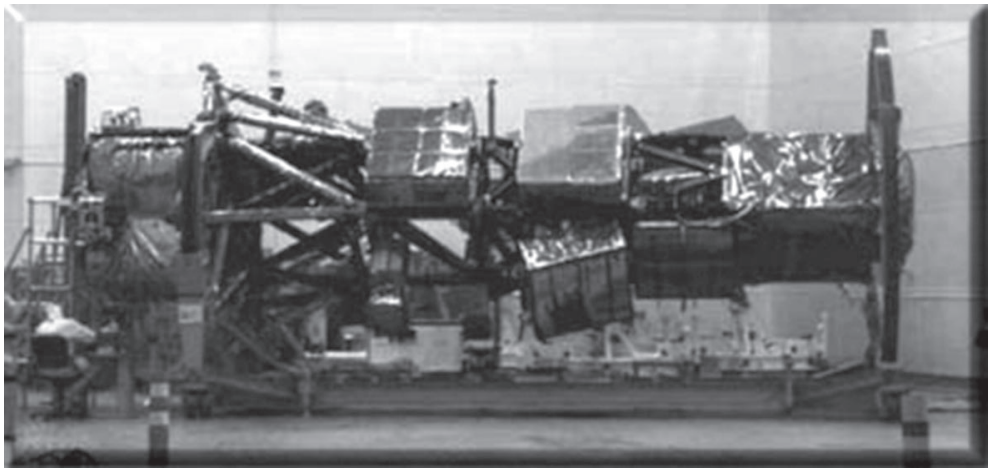


Рис. 1.40. Американский радиолокационный разведывательный спутник Lacrosse(en) во время сборки

Все разведывательные ИСЗ можно разделить на три группы – спутники видовой фотографической разведки, оптико-электронные и радиолокационные.

Разведывательные спутники заняли одно из главных мест в космических программах СССР и США. Если после запуска первого спутника С.П. Королев основное внимание сконцентрировал на лунной программе, то усилия американцев были направлены на осуществление военно-разведывательной программы «Дискавери».

Рис. 1.41. Модель немецкого разведывательного спутника SAR-Lupe (en) внутри ракеты «Космос-3М»

План запуска спутников, разработанный в 1956 г., предусматривал выполнение как разведывательных функций (наблюдение из космоса за объектами возможного противника), так и обнаружение запусков баллистических ракет. В период холодной войны военно-космическая программа США была нацелена на сбор разведывательной информации о Советском Союзе.

В 1954 г. США разработали программу «Перспективные разведывательные системы» [50–51], в рамках которой реализовывались два проекта разведывательных искусственных спутников Земли (ИСЗ): «Самос», находившийся в ведении ВВС США, и «Корона», решавший задачи ЦРУ.

Спутники «Дискаверер» предназначались для отработки методов военной космической фоторазведки (спутники-шпионы). На них также проводились предварительные исследования возможности полета животных и человека в космическом пространстве. Запуск первого ИСЗ «Дискаверер-1» был произведен 28 февраля 1959 г., положив начало серии запусков (38 спутников), которая была осуществлена в довольно короткие сроки – 3 года. Последний «Дискаверер-38» был

запущен 27 февраля 1961 г. Эти ИСЗ, снабженные специальной системой ориентации и устройствами для возвращения на Землю, запускались на полярные орбиты. Команда на спуск, по которой происходило отделение спускаемой капсулы и включение тормозной двигательной установки, давалась с пункта наблюдения на Гавайских островах. Возвращение капсул на Землю долгое время американцам не удавалось. Улавливанием и поиском капсулы занимались авиационные и военно-морские силы США. Программа возвращения экспонированной пленки со спутников на Землю реализовывалась в условиях наивысшей секретности. Первое успешное возвращение отснятой пленки было выполнено со спутника «Дискаверер-14», выведенного на орбиту 18 августа 1960 г. После того как возвращаемая капсула была выпущена со спутника на 17-м витке его полета, транспортный самолет С-130 при помощи специального трала с третьего захода поймал ее в воздухе. Поскольку возвращался не весь спутник, а только небольшая капсула (около 50 кг), она приземлялась не сама, а с помощью вертолета, подхватывавшего ее во время спуска на парашюте.

Из 38 запусков (1959–1961 гг.) около 13 были неудачными. Часть капсул подхватить вертолетами не удалось. После ИСЗ «Дискаверер-38» вся информация о спутниках, запускаемых на орбиту командованием ВВС США, была засекречена. Вновь она стала открытой лишь в 1990-х гг. ИСЗ получил название «Корона».

Два других проекта США «Самос» и «Мидас» были проектами военными.

По проекту «Мидас» (первый запуск 24 мая 1960 г.) отрабатывалась возможность использования спутников для раннего обнаружения запуска межконтинентальных ракет. Работоспособность системы была подтверждена в октябре 1961 г., зарегистрировав запуск баллистической ракеты «Титан» с мыса Канаверал. В связи с отработкой системы сообщение о запуске пришло только через 90 сек. Удачным в проекте «Мидас» был запуск в 1963 г. спутника-разведчика «Меркурий» весом до 1100 кг, предназначенного для фотографирования земной поверхности с высоты 160–200 км и исследования жизнедеятельности организма человека в условиях космического полета.

Национальное разведывательное управление, Агентство национальной безопасности и Научно-исследовательская лаборатория ВМС США недавно рассекретили информацию о запуске в период 1962–1971 гг. ряда спутников типа POPPY для радарного наблюдения за кораблями советского Военно-морского флота. POPPY были преемниками спутников GRAB (первый запуск 22.06.1960), запускавшихся в 1960–1962 гг.

В октябре 2002 г. США рассекретили документы, касающиеся полетов в 1960–1980-х гг. разведывательных спутников типа «КН-7» и «КН-9» (CORONA)[48]. Программа «КН» («Ки-Хоул» – от англ. «замочная скважина») имела ряд модификаций спутников «КН-7, -8, -9, -12» и т.д. Они использовались для целей ЦРУ до середины 1990-х гг. ИСЗ «КН-11А» приписывается способность различать объекты поперечным размером менее 10 см.

Эксплуатация первой серии спутников, оснащенных аппаратурой для съемки крупным планом, началась с июля 1963 г. Спутники «КН-7» делали снимки с разрешением 0,46 м. В 1967 г. на смену им пришли ИСЗ «КН-8» (с разрешением 0,3 м), эксплуатировавшиеся до 1984 г. Спутник «КН-9» со съемкой обширной террито-

рии с разрешением 0,6 м был запущен в 1971 г. Он имел размеры с железнодорожный вагон и массу более 9 т. Съемочная камера этого спутника разрабатывалась для пилотируемой орбитальной лаборатории MOL.

Существенный недостаток этих космических систем был связан со способом передачи информации на Землю. Во-первых, большой промежуток времени от съемки до доставки фотоинформации на Землю. Кроме того, после отделения капсулы с пленкой от спутника оставшееся на ИСЗ дорогостоящее оборудование становилось бесполезным. Эти проблемы были частично решены оснащением спутников (начиная с «KH-4B») несколькими капсулами с пленкой.

Кардинальным решением первой проблемы стала разработка системы электронной передачи данных в режиме реального времени. С 1976 г. до завершения программы в начале 1990-х гг. США запустили восемь спутников серии «KH-11» с электронной системой передачи данных.

11 февраля 1965 г. в США был запущен спутник LES-1 из серии военных спутников связи, которые предназначались для оценки мер по снижению уязвимости спутников военного применения к средствам военно-космической обороны (в СССР в те годы проходили испытания системы уничтожения спутников). К числу мер предохранения спутников относились: замена солнечных элементов радиоизотопными энергетическими установками; применение системы ориентации на базе двухстепенного гироскопа; использование линии связи «спутник-спутник» для того, чтобы при осуществлении дальней связи обходиться без промежуточных наземных станций-ретрансляторов.

Масса спутников LES составляла около 450 кг при длине около 3 м. На спутниках применялась трехосная система ориентации, обеспечивающая направленность одних бортовых антенн на Землю, а других – на второй ИСЗ для экспериментов по связи «спутник-спутник». Энергопитание ИСЗ обеспечивали две радиоизотопные установки, работающие на плутонии-238, которые давали начальную мощность 150 Вт и 130 Вт после пяти лет работы. Для связи со вторым спутником использовалась антенна с параболическим отражателем. Спутник имел устройство для защиты от радиопомех и для обеспечения устойчивой радиосвязи с малыми объектами мобильного характера, в том числе и с самолетами.

Активная эксплуатация спутниковых средств разведки позволила использовать в программе CORONA [51] ИСЗ второго поколения – «Феррет», «Джампсит», ИСЗ-ретрансляторы SDS, «Спук Берд» («Каньон»).

Спутники «Каньон», которые начали эксплуатироваться в 1968 г. на орбитах, близких к геостационарной, были нацелены на прослушивание советских систем связи. В конце 1970-х гг. они были заменены ИСЗ «Чейлет» и «Вортекс».

Спутники «Райолит» и «Аквакейд» (на геостационарной орбите, 1970-е гг.) предназначались для отслеживания данных телеметрии советских баллистических ракет. В 1980-е гг. они были заменены ИСЗ «Магнум» и «Орион», запускавшимися с многоразового транспортного космического корабля.

До 1999 г. по программе CORONA было произведено 145 пусков спутников с аппаратурой фоторазведки, 102 из которых прошли успешно.

Читатель должен понимать, что здесь представлена не полная картина событий, поскольку сведения о разведывательной космической технике США имеют

гриф «совершенно секретно», все данные, приводимые в открытой печати, носят ориентировочно-рекламный характер (а порой и явно дезинформационный).

Американцев интересовало наличие баллистических ракет в СССР и их количество, расположение космодромов на Севере и в Казахстане; расположение объектов ядерной энергетики; подводных лодок с межбаллистическими ракетами и мест их базирования и многое другое, относящееся к стратегически важным объектам.

Почти все объекты, выводимые в космос, имели двойное назначение: научно-исследовательское, прикладное, и военное. Примером тому могут служить серия американских спутников DMS, советские ИСЗ «Космос», запускавшиеся как простые спутники и как орбитальные станции.

Спутники серии DMS, в первую очередь, предназначались для нужд военных ведомств, обеспечивая информацией специальные стратегические программы, командные системы, системы управления в различных регионах земного шара. Они позволяли получать снимки с высоким разрешением (в видимом и инфракрасном диапазоне) в реальном масштабе времени, являясь на тот момент единственным источником подобных данных для береговых и корабельных метеостанций ВМС США. От метеорологической аппаратуры поступали данные о температуре, влажности и плотности атмосферы в подспутниковом вертикальном профиле. Метеоинформация могла приниматься с борта как в реальном режиме времени, так и в записи. Спутники этой серии запускались с начала 1970-х гг. 2 февраля 1988 г. на орбиту был выведен ИСЗ усовершенствованной модели DMS-5D-2.

В конце 1980-х гг. в эксплуатацию был введен спутник «Лакросс» с радиолокатором с синтезируемой апертурой [51]. Этот ИСЗ обеспечивал разрешение 0,9 м и обладал способностью «видеть» сквозь облака.

Спутниковые разведсистемы в СССР начали разрабатываться позже, чем в США.

Решение о разработке корабля-спутника для разведки и полета человека в космос в СССР было принято 22 мая 1959 г. (Постановление ЦК КПСС и СМ СССР № 569-264сс). Были созданы пилотируемый космический корабль (КК) «Восток» и фоторазведывательный КА «Зенит-2». 26 апреля 1962 г. со спутника «Космос-4» была проведена первая телевизионная съемка облачного покрова Земли. Это событие было революционным в деле прогнозирования погоды.

Космический аппарат «Зенит-2» стал первым отечественным разведывательным спутником. 10 марта 1964 г. «Зенит-2» был принят на вооружение ВС СССР. В отличие от американских спутников, на которых предусматривалось возвращение только пленки, на спутниках серии «Восток-Д» для возвращения на Землю использовалась более крупная капсула, содержавшая и камеры, и пленку. С 1962 г. до 1968 г. для фоторазведки использовались спутники семейства «Зенит-2, -4».

Спутники первого поколения запускалось теми же ракетами-носителями и на такие же орбиты, что и пилотируемые КК «Восток». Продолжительность полетов составляла, как правило, 8 суток, а частота запусков к 1964 г. возросла до 9 в год. Первый инцидент в этой программе произошел в конце 1964 г., когда «Космос-50» по завершении 8-суточного полета взорвался на орбите. 19 января 1968 г. с космодрома Плесецк был запущен разведывательный спутник «Космос-200» (типа «Целина-О»). «Зениты» были оснащены комплексом аппаратуры, состояв-

шим из фотоаппарата СА-20 с фокусным расстоянием 1м, фотоаппарата СА-10 с фокусным расстоянием 0,2 м, фототелевизионной аппаратуры «Байкал» и аппаратуры «Куст-12М» для радиоразведки, которые позволяли передавать информацию по радиоканалу в зоне видимости наземных пунктов приема. После испытательных полетов (КА «Космос-4, -7, -9, -15») комплект специальной аппаратуры был дополнен еще двумя аппаратами СА-20, что позволило увеличить ширину полосы съемки до 180 км при высоте полета 200 км.

В рамках летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) было проведено 13 запусков КА «Зенит-2», 3 из которых закончились аварией ракеты-носителя (РН на базе МБР Р-7). С 1968 по 1979 г. было произведено 69 успешных пусков КА «Зенит-2М», и лишь один закончился аварией РН. Ежегодно производилось по 8–11 пусков. Следующими модификациями КА «Зенит» (второе поколение) стали:

«Зенит-4» (1964 по 1970 г.); «Зенит-4М» («Ротор»), КА детальной фоторазведки (1968 по 1973 г.); «Зенит-4МК» (1969 по 1978 г.); «Зенит-4МКМ» («Геракл»), спутник оптической разведки (1977 до 1980 г.).

Следующей модификацией стал КА «Зенит-6» (1976 по 1980 г.).

12 июля 1963 г. США запустили новый космический аппарат оптической разведки «КН-7» Gambit с улучшенными характеристиками. В СССР разрабатывается аппарат новой серии «Янтарь», после принятия на вооружение получивший название «Феникс» (разработан Самарским ЦСКБ). Он стал прототипом серии спутников оптической разведки: спутника 1Ф622 «Янтарь-1» для обзорной фоторазведки и 1Ф623 «Янтарь-2» для детальной фоторазведки. Для ведения комплексной разведки из космоса одновременно велась разработка пилотируемого КА «Союз-Р». На смену ему пришел транспортный корабль 11Ф727К-ТК для снабжения станции «Алмаз». Параллельно активно прорабатывался военно-исследовательский корабль 11Ф73 «Звезда». Но ни один из этих проектов не был доведен до стадии ЛКИ. По проекту «Янтарь» был разработан КА 11Ф624 «Янтарь-2К» для детальной фоторазведки, ставший основой проекта программы развития средств оптической разведки: комплекса сверхдетального наблюдения 11Ф650 «Янтарь-6К», оперативного детального наблюдения 11Ф661 «Янтарь-6КС» и обзорного фотонаблюдения 11Ф630 «Янтарь-1КФ» и 11Ф649 «Янтарь-3КФ».

Комплекс «Янтарь-2К» («Феникс») был принят на вооружение в мае 1978 г. По техническим характеристикам он не уступал американскому многокапсульному спутнику «Большая птица». С 1974 по 1983 г. было произведено 30 пусков РН 11А511У «Союз-У» с КА «Янтарь-2К». Два раза отказывала РН. Дважды аппараты были подорваны на орбите из-за серьезных технических неисправностей.

На базе аппарата «Янтарь» был создан спутник оптикоэлектронной разведки «Неман», с преобразованием фотоизображения в цифровой сигнал и передачей его по радиоканалу на наземные пункты.

В 1980 г. ПО «Арсенал» стал серийно производить космические аппараты типа «Кобальт» (модификация КА «Янтарь-2К») для наблюдения и детальной фотосъемки земной поверхности (разработка ЦСКБ «Прогресс», Самара). На смену ему пришли космические аппараты «Кобальт-М» с возвращаемой на Землю капсулой с пленкой. Штатный срок активного существования этих аппаратов на орбите составляет 60–120 суток. 16 апреля 2010 г. с космодрома Плесецк произведен успеш-

ный запуск ракеты-носителя «Союз-У» с космическим аппаратом «Космос-2462» – спутником оптической разведки типа «Кобальт-М».

С 1979 по 1984 г. было произведено 16 пусков КА «Янтарь-4К1»(«Октан»), «Орлец», предназначенных для фотонаблюдения с высокодетальным разрешением.

В августе 1994 г. с космодрома Байконур был произведен запуск КА «Енисей», нового спутника оптикоэлектронной разведки с временем работы на орбите около года. Этот спутник цифровой фоторазведки пятого поколения, передающий данные в режиме, близком к реальному времени, является более долгоживущей модификацией КА «Дон» с 22 спускаемыми капсулами.

В июне 1997 г. с космодрома Байконур РН «Протон-К» запущен спутник-фоторазведчик 8-го поколения проекта 11Ф664 (серии «Янтарь»). В апреле 2009 г. на орбиту был выведен девятый КА семейства «Янтарь» (проект 11Ф695М).

Пятое поколение советских спутников оптической разведки с электронной передачей данных в режиме реального времени отсчитывается от «Космоса-1426», стартовавшего 28 декабря 1982 г. В отличие от спутников четвертого поколения они сохраняют почти круговую орбиту и поддерживают высоту в узком диапазоне. Длительность полетов этих спутников 6-8 месяцев. Штатный режим эксплуатации системы фоторазведки пятого поколения предусматривает функционирование одновременно двух спутников, находящихся на орбитах, отстоящих друг от друга на 910. Ввод в эксплуатацию долгоживущих спутников пятого поколения позволил сократить число обзорных полетов спутников третьего поколения, а в 1990 г. полностью их прекратить. Последней новинкой в советской программе оптической разведки стал КА «Космос-2031», запущенный в июле 1989 г.

Еще *одно из направлений космической разведки – радиоэлектронное наблюдение*.

Начало работ по созданию космических средств радиоэлектронного наблюдения относится к августу 1960 г., когда была поставлена задача создания в интересах Минобороны СССР экспериментального космического аппарата «ДС-К8» для отработки методов и средств определения параметров радиолокационных сигналов РЛС оборонного назначения. На первом этапе предусматривались: разработка унифицированных КА «ДС-У» и запуск двух экспериментальных космических аппаратов «ДС-К40», которые состоялись в 1965–1966 гг., но оказались неудачными из-за аварий ракеты-носителя. Вторым этапом стало создание КА радиотехнического наблюдения системы «Целина» с аппаратурой на микроэлементной базе (КБ «Южное», 1964 г.).

Запуск КА «Целина-О» – неориентируемого ИСЗ с солнечными источниками питания для обзорных радиотехнических наблюдений («Космос-189») был осуществлен в октябре 1967 г. с космодрома Плесецк. Система позволяла «слушать» один и тот же район земного шара несколько раз в сутки в разное время. Срок активного существования спутника составлял около 3 месяцев. С 1968 по 1982 г. было запущено 40 аппаратов этой модификации.

КА «Целина-Д» предназначался для детальных радиотехнических измерений с приемом, анализом и высокоточной привязкой к местности источников радиотехнических сигналов. Этот спутник относится к классу ориентируемых в орбитальной системе координат КА и отличается более сложным комплексом специальной и обеспечивающей аппаратуры. Уже в ходе испытаний КА «Целина-Д» было показано, что получаемая информация позволяет не только обнаружить ра-

диоизлучающие средства и определить их местоположение, но и точно установить их назначение, характеристики и режимы функционирования. С 1970 по 1994 г. на орбиту был выведен 71 КА, два пуска закончились аварией.

В 1980-х гг. была создана модификация «Целина-Р», оснащенная аппаратурой для наблюдения источников радиоизлучений, что позволило обеспечить решение задач радиоэлектронного наблюдения в полном объеме.

Своеобразный ответ американскому «Лакроссу» – спутник радиолокационной разведки «Алмаз-Т» (разработчик НПО ПМ) с разрешением 10–15 м был запущен в СССР в 1981 г.

Отдельного внимания заслуживает *система морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ)* «Легенда».

Разработка первой в мире космической системы обзора акватории Мирового океана комплексом разведывательных КА различных типов в интересах применения ударного противокорабельного оружия кораблями и подводными лодками ВМФ СССР стартовала в начале 1960-х гг. Система МКРЦ использовала аппараты двух типов: радиолокационной «УС-А» (Управляемый Спутник Активный) и радиотехнической разведки «УС-П» (Управляемый Спутник Пассивный). Головным разработчиком системы МКРЦ было КБ-1 (ЦНИИ «Комета», Москва). КА «УС-А» и «УС-П» разработаны ОКБ-52 («НПО «Машиностроения», г. Реутов). В те же годы проводились работы по созданию системы контроля радиотехнической обстановки «Целина», осуществлявшей регистрацию излучений в широком диапазоне частот. Но отсутствие решения о едином заказчике космических средств в Минобороны не позволило это сделать в 1960 г.

Для питания комплекса потребовалось использование ядерной энергетической установки (ЯЭУ) «Бук» с электрической мощностью 3 кВт. В период отработки бортового спецкомплекса несколько КА было запущено с химическими источниками. Первый пуск состоялся в 1965 г. После успешных летных испытаний система активной радиолокационной морской разведки и целеуказания с КА «УС-А» была принята в эксплуатацию в 1975 г., КА радиотехнической разведки «УС-П» – в 1978 г.

Из-за запрета использования КА с ЯЭУ на низких орбитах (высота орбит 250–290 км) производство «УС-А» было прекращено. Всего было осуществлено 37 запусков КА «УС», два из которых закончились аварией РН. В 1975–1976 гг. и 1981–1982 гг. производилось по 3-4 пуска. Первые аппараты выводились на орбиту при помощи РН серии «Союз», а после принятия на вооружение – РН «Циклон-2». 25.04.1973 г. из-за аварии РН «Циклон-2» спутник «УС-А» упал на территорию Канады. Корпус реактора выдержал удар, радиоактивного заражения не произошло, но тем не менее Советскому Союзу пришлось выплатить Канаде около 3 млн долларов.

КА «УС-П» осуществлял поиск и идентификацию надводных целей без радиолокационного облучения, регистрируя их электронные излучения, характерные для каждого типа корабля. На КА «УС-П» применялись солнечные энергетические установки и буферные аккумуляторные батареи. За период с 1974 по 1991 г. было запущено 37 КА этого типа. Пуски КА «УС-П» (и «УС-А») проводились только с космодрома «Байконур». Штатная группировка КА «УС-П» должна была включать 3 аппарата. Их орбиты фазировались так, чтобы все спутники двигались вдоль одной и той же трассы со сдвигом в 1 сутки друг от друга.

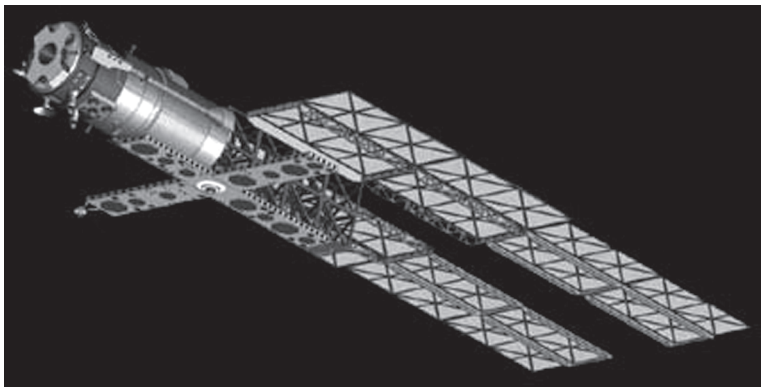


Рис. 1.42. КА «УС-ПМ»

По завершении активного существования КА выполняли маневр увода с рабочей орбиты. На аппаратах 1975–1987 гг. увод осуществлялся небольшим разгонным импульсом. Спутники оставались на орбите до нескольких лет и разрушались из-за взрывов остатков топлива в двигательной системе или гермоконтейнеров с буферными химическими батареями (рис. 1.42).

В завершение этого раздела в качестве примера использования военно-разведывательных спутников следует отметить ***роль военно-космической разведки США в современных локальных конфликтах***.

Актуальность данной темы заключается в том, что с принятием Пентагоном концепции Сетецентрических войн (Network Warfare) значительно возросла роль космической разведки при организации и ведении современного боя. Современные космические разведывательные аппараты способны выявить активность противника на этапе глубокой подготовки к боевым действиям, а быстродействие современных систем обработки и передачи данных позволяют в кратчайшие сроки выявить цель, опознать и создать условия для ее уничтожения.

Наиболее впечатляющей по масштабам использования данных от космических средств стала война в Ираке 2003 года. На рис. 1.43 представлены основные направления использования космических аппаратов в войне с Ираком.

Для американской армии эта война стала своеобразным полигоном для испытаний новых образцов вооружения. В полной мере это утверждение относится и к космическим средствам. Использовались разнообразные военные и коммерческие спутники наблюдения, связи, навигационные и метеорологические аппараты, а также спутники предупреждения о ракетном нападении. Задействованная в ходе войны орбитальная группировка содержала, по данным открытых источников, 50–59 военных космических аппаратов различного целевого назначения, 28 аппаратов системы GPS и большое число коммерческих КА связи и дистанционного зондирования Земли.

В подготовительный период операции космическая группировка США не наращивалась. Обеспечение боевых действий проводилось существующим составом находящихся на орбитах космических аппаратов, что говорит о достижении Соединенными Штатами такого положения в космосе, когда заблаговременно

развернутая и функционирующая в мирное время орбитальная группировка способна обеспечить проведение боевых операции подобного масштаба в любое время и в любом месте Земного шара.

Информационная поддержка из космоса действий вооруженных сил в XXI в. будет оставаться одной из ключевых задач, решение которой должны обеспечивать военно-космические средства: доведение космической информации до самых низших звеньев управления, а в перспективе – до отдельного солдата. По своим последствиям информационную войну можно сравнить только с созданием в середине XX в. ядерного оружия.

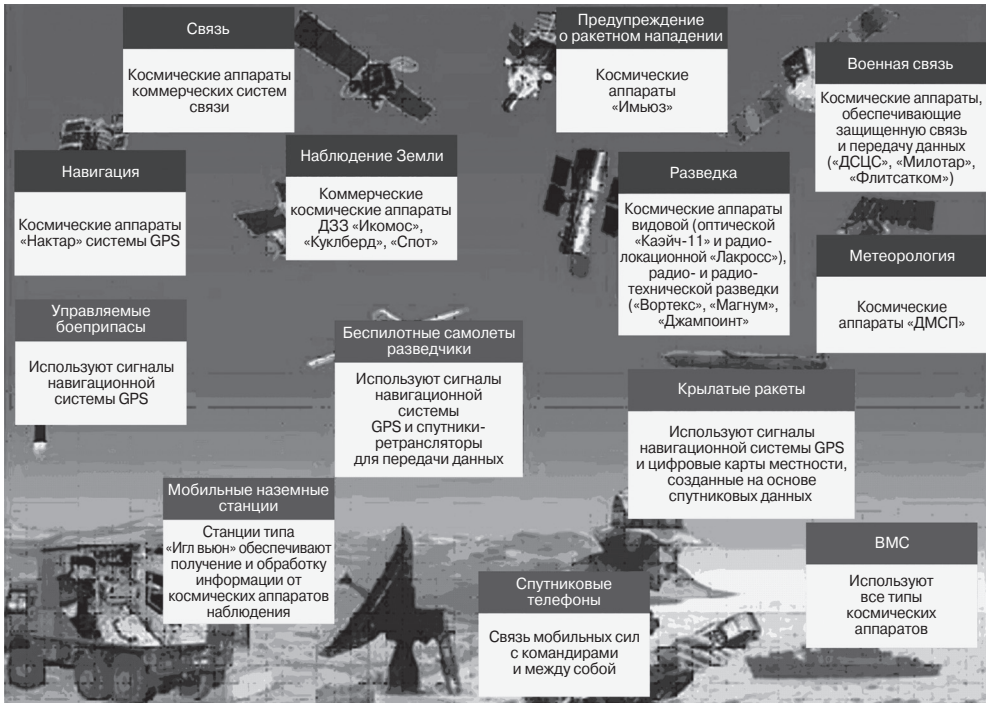


Рис. 1.43. Основные направления использования данных от космических средств [27]

Практика жизни и деятельности вооруженных сил в различных условиях оперативно-стратегической обстановки убедительно показывает, что в настоящее время без космических средств нормальное функционирование вооруженных сил в мирное время крайне затруднительно, а при ведении боевых действий практически невозможно. Другим возможным путем использования в войсках информации от космических разведывательных средств могло бы стать создание групп космической поддержки.

В российской армии имеется положительный опыт использования групп космической поддержки в оперативно-тактическом и тактическом звеньях. Основными задачами указанных групп являются оценка состояния и работоспособности КА и подготовка предложений по их использованию для получения оперативных

данных, а также предоставление полученной информации (разведывательной, метеорологической, навигационной и связной) различным звеньям управления. Группы космической поддержки – одно из наиболее перспективных направлений ликвидации «разрыва» между потенциальными возможностями космических средств и их практическим использованием в войсках.

Однако все эти перспективы должны основываться только на использовании новейших достижений микроэлектроники, микросистемной техники и силовой полупроводниковой электроники.

Литература к главе 1

1. ross-bel.ru/d/818179/d/belta_070514.doc
2. www.cosmoworld.ru/spaceencyclopedia/news_arch/1039.doc
3. В.Г. Безбородов, С.В. Пушкарский, М.А. Лукьященко. Организация и использование результатов космической деятельности в Российской Федерации / ФТБУ «Авиаметтелеком Росгидромета: Новые технологии и разработки»/ «Метеоспектр», № 1, 2014.
4. www.realeconomy.ru/files/Federal%20space%20program.doc
5. www.tsenki.com/projects/federal-program
6. innovation.gov.ru/sites/defoult/files/documents/2014/
7. Гущин В.Н., Панкратов Б.М., Родионов А.Д. Основы устройства и конструирования космических аппаратов: Учеб. пособие для ВУЗов. М.: Машиностроение, 1992. – 256 с.
8. Н.И. Паничкин, Ю.В. Слепушкин, В.П. Шишкин и др. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986 – 344 с.
9. Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
10. Бровкин А.Г., Будыгов Б.Г., Горддеенко С.В., и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учеб. пособие / Под ред. А.С. Сырова – М.: МАИ-ПРИНТ, 2010.
11. Кунгурцев В.В. Технологии построения бортовых информационно-управляющих комплексов космических аппаратов на базе интегральных схем с программируемой логикой // Информационно-управляющие системы. № 5. 2006.
12. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирования и программного обеспечения: Учеб. пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 336 с.
13. Микрин Е.А., Суханов Н.А., Платонов В.Н. и др. Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов / Сер. Автоматика, вычислительная техника, проблемы управления. 2004. № 3. С. 62–66.
14. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и В, 1997.
15. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учеб. пособие. М.: Логос, 2001.
16. Купейко А.В. Германия штурмует рынок геоинформатики // Новости космонавтики. 2007. № 8 (295).
17. Верба В.С. и др. Радиолокационные станции землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010.
18. dic.academic.ru/dic.nsf/enc-coliet/6661
19. geomatica.ru/pdf/2013-03/2013-02-16-36.pdf

20. spacestudy.ru/?a=page&item=dzz_methods
21. В.А. Дворкин, С.А. Дудкин. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 12. С. 16–36.
22. Сулейменов Е.З., Кульевская Ю.Г., Улезько Г.Г., Галанц Э.А. Состояние исследований в Казахстане по приоритетам научно-технического развития. Космические исследования (Аналитический обзор) / Национальный центр научно-технической информации Республики Казахстан. Алматы. – 2008.
23. Шпенст В. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли космического базирования // Компоненты и технологии. 2013. № 3. С. 154–158.
24. Антипов В.Н. Горяйков В.Г., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры системы. М.:Радио и связь, 1988.
25. Копик А. В космосе – итальянский радиолокационный разведчик / Новости космонавтики. 2007. № 8 (295).
26. Cantafio L.J. Space-based Radar Hand Book, 1989.
27. www.popmech.ru/5527-Kosmichesky-musor-oblomki-nedavnego-prosh
28. www.computerra.ru/vision/574213/
29. top.rbc.ru/tags/?tag-%EC%F3%F1%EE%F0
30. zetfail/ru/orbita-glazami-astronomov-svalka-visokih-technologiy/
31. Koeneman, P.B. Bush-Vishniac, I.J., and Wood, K.L., (1997) J. MEMS Systems 6, (4) 355.
32. Epstein A.H. et al. Power MEMS and Microengines // IEEE Transducers on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, IL, June, 1997.
33. Epstein A.H. et al. Micro-heat engines, gas turbines and rocket engines. The MIT Microengine Project, 28th AIAA Fluid Dynamics and 4th Shear Flow Control Conference, June, 1997.
34. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3–6.
35. Epstein A.H. et al. Shirbutton-sized gas turbines: the Ingineering Challenges of micro high speed rotating machinery // 8th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-8), Honolulu, HI, March 2000.
36. Bayt R.L., Ayon A.A., Breuer K.S. Micropropulsion for the Aerospace Industry // Sensors: Technology and Design. February, 2002.
37. Cheah K.H., Chin J.K. Performance improvement on MEMS micropropulsion system through a novel two-depth micronozzle design // Acta Astronautica. 2011. Vol. 69. P. 59–70.
38. Yetter R. A. Combustion issues and approaches for chemical microthrusters / R.A. Yetter, V. Yang, M. H. Wu, Y. Wang, D. Milius, I. A. Aksay, F. L. Dryer // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 2007. – Vol. 6. – P. 393–424.
39. Kohler J., Bejhed J., Bruhn K.F., Lindberg U., Hjort K., Stenmark L. A hybrid cold gas microthruster system for spacecraft // Sens. Actuators A.. 2002. Vol. 97–98. P. 587–598.
40. Kang T.G., Kim S.W., Cho Y.-H. High-impulse, low-power, digital microthrusters using low boiling temperature liquid propellant with high viscosity fluid plug // Sens. Actuators A. 2002. Vol. 97–98. P. 659–664.
41. Mulerjee E.V., Wallace A.P., Yan K.Y., Howard D.W., Smith R.L., Collins S.D. Vaporizing liquid microthruster // Sens. Actuators A. 2000. Vol. 83. P. 231–236.
42. London A.P., Epstein A.H., Kerrebrock J.L. High-pressure bipropellant microrocket engine // J. Propul. Power. 2001. Vol. 17, P. 780–787 (2001).
43. Lewis Jr. D.H, Janson S.W., Cohen R.B., Antonsson E.K. Digital micropropulsion // Sens. Actuators A. 2000. Vol. 80. P. 143–154.
44. Tanaka S., Hosokawa R., Tokudome S.-I., Hori K., Saito H., Watanabe M., Esashi M. MEMS-based solid propellant rocket array thruster with electrical feedthroughs // Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. 2003. Vol. 46. P. 47–51.

45. Kondo K., Tanaka S., Habu H., Tokudome S., Hori K., Saito H., Itoh A., Watanabe M., Esashi M. Vacuum test of a micro-solid propellant rocket array thruster // IEICE Electron. Express. 2004. Vol. 1. P. 222–227.
46. Rossi C., Orieux S., Larangot B., Conto T. Do, Estève D. Design, fabrication and modeling of solid propellant microrocket-application to micropropulsion // Sens. Actuators A. 2002. Vol. 99, P. 125–133.
47. Zhang K.L., Chou S.K., Simon S. Development of a solid propellant microthruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface // J. Micromech. Microeng. 2004. Vol. 14. P. 785–792.
48. Harendt C., Graf H.G., Hofflinger B., Penteker E. Silicon fusion bonding and its characterization // J. Micromech. Microeng. 1992. Vol. 2. P. 113–116.
49. Rossi, C. Matrix of 10 × 10 addressed solid propellant microthrusters: Review of the technologies / C. Rossi, D. Briand, M. Dumonteuil, T. Camps, Phuong Quyen Pham, N.F. de Rooij // Sensors and Actuators A. – 2006. – Vol. 126. – P. 241–252.
50. П.Л. Подвиг. История и современное состояние российской системы предупреждения о ракетном нападении / Центр по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии/ Московский физико-технический институт. Март 2002. 31 с.
51. http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=3299

ГЛАВА 2

ОТКАЗЫ И АВАРИИ РАКЕТОНОСИТЕЛЕЙ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2.1. Проблемы безопасности ракетно-космической техники

В настоящее время ракетно-космическая отрасль стала одним из важнейших и динамично развивающихся секторов мировой экономики, которые давно перешагнули миллиардные объемы прежде всего благодаря коммерциализации космических проектов (предоставления телекоммуникационных услуг, многоцелевому мониторингу поверхности Земли и др). Наличие аэрокосмической отрасли является важной составляющей авторитета любого государства в современном мировом сообществе. Очевидно, что успехи в этой области возможны только в условиях обеспечения высокой надежности и безопасности ракетно-космических систем как военного, так и общегражданского назначения. Этот фактор, особенно в условиях преобладания коммерческого вектора развития отрасли, в последнее время играет все большее экономическое значение, поскольку отказы, аварии и любые нештатные ситуации приводят не только к неполучению или недополучению прибыли, но и к прямым убыткам, измеряемым обычно десятками и сотнями миллионов долларов. Космические проекты, как правило, относятся к так называемым «mission critical applications», т.е. к приложениям, неудача в реализации которых приводит как к материальным потерям, так и к человеческим жертвам, к срыву многолетних научных, оборонных и иных важных государственных или коммерческих проектов и программ.

Поскольку на текущий момент нет четкой и установившейся терминологии в определении терминов «отказ», «сбой», «авария» и «катастрофа», здесь и далее под **отказом КА** понимаются выявившиеся на любом из этапов реализации проекта (запуск, вывод на орбиту, возвращение с орбиты, эксплуатация в условиях открытого космического пространства) факты невыполнения элементом (блоком, системой) заложенных на этапе проектирования целевых функций, не повлекших за собой в итоге срыв (невыполнение) основной задачи проекта.

Под **аварией КА** будем понимать возникший на любом этапе реализации проекта факт невыполнения элементом (блоком, устройством, системой) своих целевых функций, повлекший за собой невыполнение целевой функции всего проекта.

Под **катастрофой КА** обычно понимают аварию, повлекшую за собой человеческие жертвы или крупные материальные потери.

История отказов и аварий неразрывно связана с историей развития и отечественной космонавтики. Перечислим только некоторые, наиболее известные из них.

Так, в 1957 г. начались испытания первой советской межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) Р-7 конструкции С.Королева. Первые опытные образцы во многом не отвечали заданным требованиям, из тринадцати опытных экземпляров только два благополучно достигли цели.

27 апреля 1958 г. произошла авария ракеты-носителя (РН) «Спутник» (модификация Р-7) с третьим ИСЗ.

В 1958 г. произошло еще 3 аварии РН «Восток» (также на базе Р-7), сопровождавшиеся их взрывом.

В 1959 г. произошла авария с РН «Восток».

В 1960 г. было 6 аварий РН «Восток» и ее дальнейшего развития – РН «Молния».

В 1961 г. – 3 аварии с РН «Восток» и «Космос-1».

В 1963 г. – 8 аварий РН «Космос-1», «Восток», «Молния».

19 декабря 1978 г. – нештатная работа последней ступени РН «Протон» (РБ) «ДМ».

24 апреля 1967 г. при испытаниях корабля (КК) «Союз» (типа 7К-0К серийный № 4 «Союз-1») при посадке погиб летчик-космонавт В.М. Комаров.

30 июня 1971 г. при спуске с орбиты погиб экипаж КК «Союз-11» (типа 7К-Т (Г. Добровольский, В. Волков, В. Пацаев).

Самая крупная катастрофа произошла в марте 1980 г. – на космодроме во время подготовки к пуску РН «Союз» с разведывательным спутником произошли взрыв и пожар, в результате которых погибли 48 человек.

Кроме этого за **последующие сорок лет** было множество других инцидентов (отказов), которые не имели столь трагических последствий.

Даже итоги 2011 г., юбилейного года российской космонавтики, оказались для самой российской космонавтики весьма безрадостными – 4 аварии РКН, – это достаточно много, да еще «Фобос-Грунт» застрял у Земли. За последние годы у России худшим, наверное, был только 1996 г., когда из 24 запусков РН четыре были аварийными (тогда же, кстати, тоже амбициозная и оснащенная самой современной целевой аппаратурой автоматическая межпланетная станция «Марс-96» «не захотела» улетать на Марс). Если сравнивать с основными известными космическими конкурентами, то у них по 4 неудачных запуска в результате аварий РН было в 1995 и 1999 гг. (общее количество запусков 30 и 31 соответственно).

Перечислим только основные известные космические неудачи этого юбилейного 2011 года:

1 февраля 2011 г. при запуске на ракете-носителе «Рокот» в результате аварии разгонного блока «Бриз-КМ» (ошибка ПО) космический аппарат **«ГЕО-ИК-2»** выведен на нерасчетную орбиту и не мог использоваться по назначению.

4 марта 2011 г. при запуске на ракете-носителе Taurus XL космического аппарата «Glory» в результате несброса головного обтекателя ракета упала в океан. Утрачена основная полезная нагрузка – **КА Glory2**, а также сопутствующие **КА**: **KySat-1**, **Hermes** и **Explorer-1**.

17 августа 2011 г. при запуске на ракете-носителе «Прогресс-М» в результате аварии разгонного блока «Бриз-М» (ошибка ПО) космический аппарат «**Экспресс-АМ4»** не выведен на целевую орбиту и не мог использоваться по назначению.

18 августа 2011 г. при запуске на ракете-носителе Long March 2C в результате аварии 2-й ступени РН упал **КА Shi Jian 11-04**.

24 августа 2011 г. при запуске на ракете-носителе «Союз-У» в результате аварии 3-й ступени РН упал транспортный грузовой корабль **«Прогресс М-12М»**.

23 декабря 2011 г. при запуске на ракете-носителе «Союз-2-1Б» в результате аварии 3-й ступени РН упал **КА «Меридиан-5»**.

Кроме того, **8 ноября 2011 г.** РКН «Зенит-2SБ» вывела на опорную орбиту **АМС «Фобос-Грунт»**. Однако из-за отказа двигательной установки космического аппарата «Фобос-Грунт» не смог выйти на отлетную траекторию к Марсу и остался на опорной орбите.

С другой стороны, количество запусков российских КА за последние годы постоянно растет, отрабатываются новые ракеты-носители и их ступени, новые конструкции КА, новые двигатели, новые бортовые системы.

Приведем результаты небольшого статистического анализа [2] в привязке к этому, юбилейному 2011 г. за пять предшествующих ему лет и сравним достижения Российской Федерации и других космических стран, которые являются, с одной стороны, ее партнерами, а с другой – конкурентами.

Данные об отказах и авариях КА за первые сорок лет развития РКТ (1960–1990 гг.) были собраны в первом фундаментальном обзоре [1, 2]. Следует также отметить работы [3, 4], в которых были предприняты попытки проанализировать причины этих отказов РКТ в разрезе отдельных систем, их аппаратных и программных средств. При изложении нижеследующего материала авторы максимально близко к тексту использовали результаты основательной работы [5], подготовленной учеными и специалистами Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» и Национального космического агентства Украины.

На рис. 2.1 представлено общее количество запусков только ракет-носителей, произведенных в этот период в следующих странах – США, России, Китае, ЕС, Японии, Украины, Индии, Израиле, Иране и Кореи.

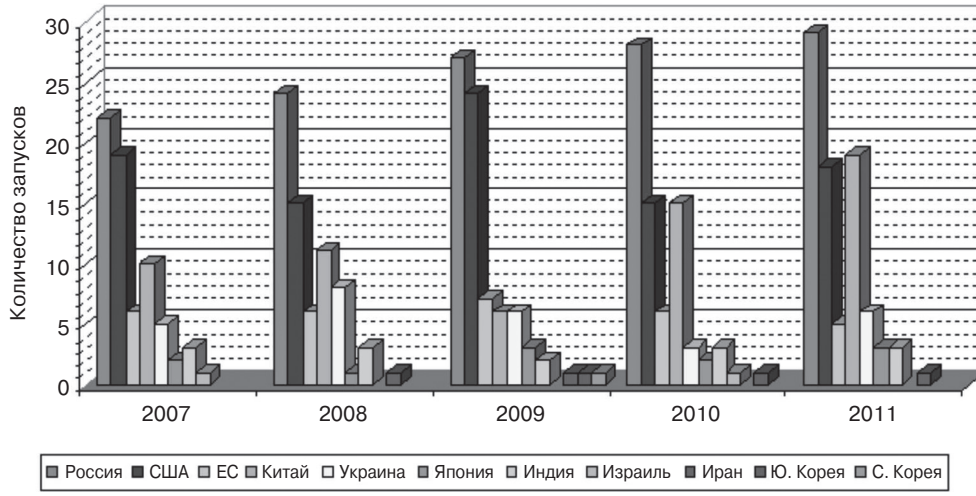


Рис. 2.1. Орбитальные запуски с 2007 по 2011 г. по странам-производителям ракет-носителей [2]

Несомненным мировым лидером по запускам в этот период времени являлась Россия – как по количеству запусков, так и по их динамике: если количество запусков РН в США в этот период то уменьшалось (2008 г.), то увеличивалось (2009 г.), опять уменьшалось (2010 г.) и даже с последующим увеличением (2011 г.) не выходило на уровень 2007 г., то Россия ежегодно увеличивала количество запусков, невзирая даже на мировой экономической кризис 2008 года. Эту же нарастающую тенденцию (хотя и с двукратным отставанием от России по количеству запусков) демонстрировал и Китай, догнавший в 2010 г. США, а в 2011 г. и перегнавший их.

На рис. 2.2 представлена динамика количества запусков РН за более длительный период (с 1992 по 2011 г.) ведущей пятерки мировых космических лидеров (России, США, ЕС, Китая и Украины).

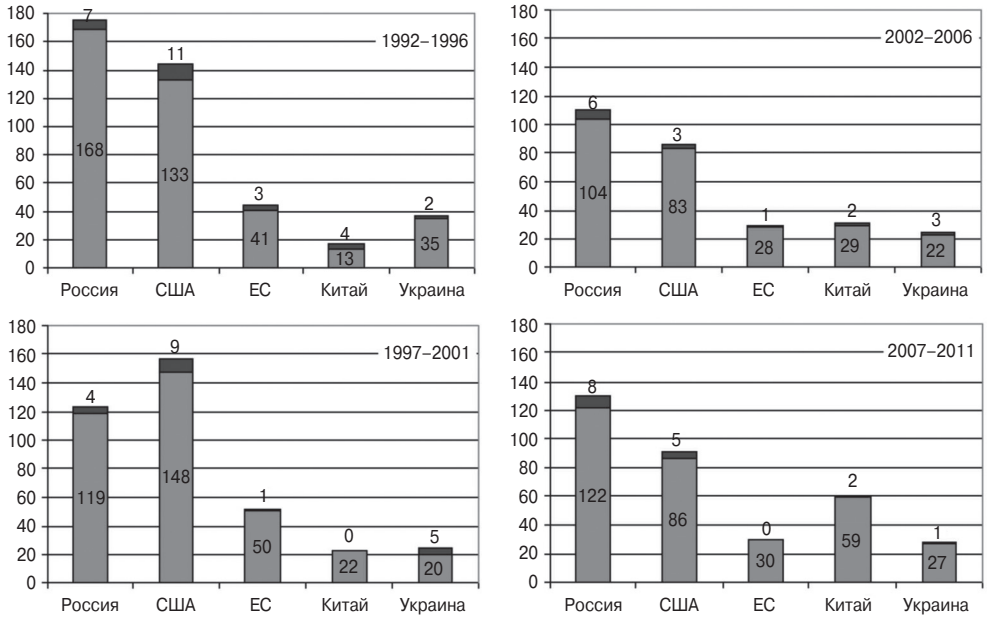


Рис. 2.2. Динамика количества успешных и неуспешных орбитальных запусков по основным странам-производителям ракет-носителей за период с 1992 по 2011 г. [2]

Здесь приведены с разбивкой по пятилеткам как общее количество запусков, так и имевшее место в этот период времени количество аварийных (неуспешных) запусков.

Визуально эти данные достаточно сложно анализировать. Так, в этот период, соотношение аварийных запусков РН к успешным в Китае имело следующий характер: 4/13 в период с 1992 по 1996 г., 0/22 в период с 1997 по 2001 г., 2/29 в период с 2002 по 2006 г. и 2/59 в период с 2007 по 2011 г.

Очевидно, что удельный вес аварийных запусков китайских РН после крайне неудачного первого периода имеет тенденцию к уменьшению.

В России в эти же временные периоды наблюдалась такая тенденция: 7/168; 4/119; 9/104 и 8/123. Сравнение с тем же Китаем арифметического соотношения удачных и неудачных запусков за второй – четвертый периоды этого космического матча не в пользу России.

Поэтому одна из частных задач данной книги, которую поставили себе авторы, – провести детальный анализ имеющейся информации и показать, что одной из основных причин этого и других неприятных для отечественного космического приборостроения казусов является различие в подходах к методам проектирования, выбора и применения в КА микроэлектронной элементной базы, которые используют китайские и отечественные разработчики КА. В этой главе будут представлены более детальные результаты анализа статистики отказов и аварий КА, а пока для понимания общей картины полезно привести еще две диаграммы.

Так, на рис. 2.3 представлена динамика общего количества орбитальных запусков РН, выполненных этими же странами за 20 лет, предшествующих юбилейному 2011 году, из которых надо сделать пока только один очевидный вывод – в космическую гонку за мировое лидерство активно включился Китай, который уже в 2010 году в этой гонке разделил 2 и 3 место со второй сверхдержавой – США и имеет все шансы в самое ближайшее время прочно утвердиться пока на почетном втором месте (как по общему количеству запусков, так и по количеству успешных запусков).

На рис. 2.4 в обобщенном и более удобном для анализа виде представлены статистические данные предыдущего рис. 2.1.

Приведенные примеры позволяют сделать вывод о том, что положение дел в области обеспечения надежности и безопасности как мировой, так и отечественной ракетно-космической техники оставляет желать лучшего и требует постоянного анализа и принятия решений, направленных на снижение рисков отказов и аварий.

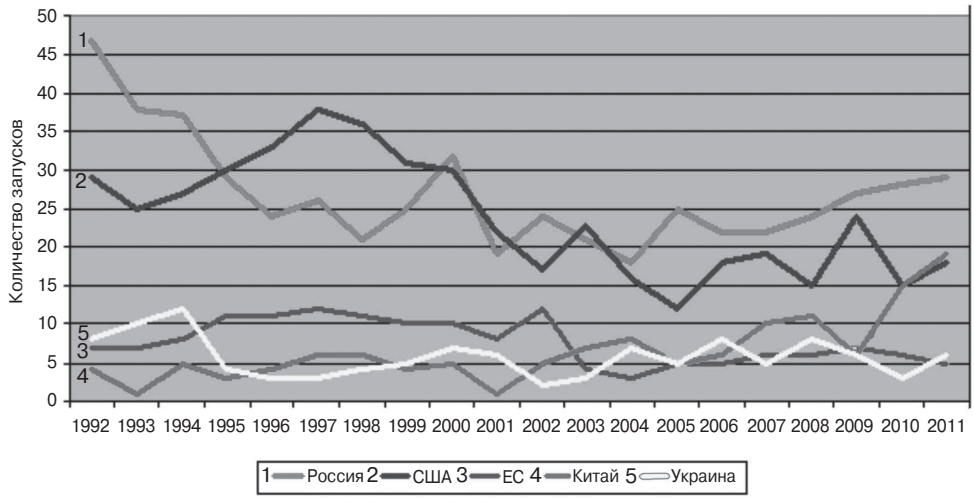


Рис. 2.3. Динамика количества орбитальных запусков по странам-производителям ракет-носителей [2]

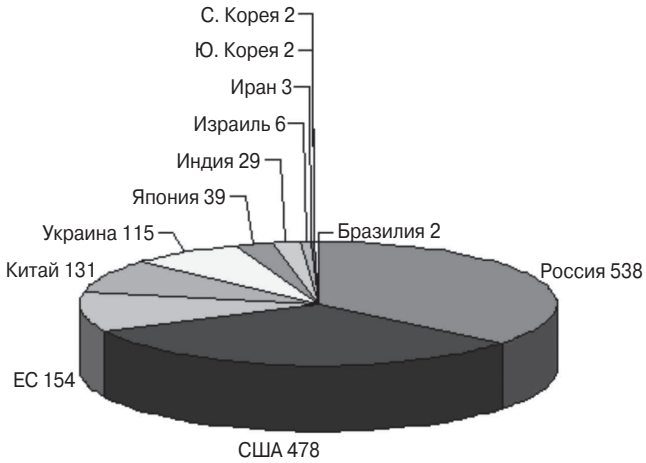


Рис. 2.4. Общее количество орбитальных запусков (включая неудачные) за последние 20 лет (1992–2011) по странам-производителям ракет-носителей

В работах [2, 4] проанализированы конкретные причины аварий вследствие отказов различных устройств, блоков и систем ракетно-космической техники (РКТ), при этом основное внимание было уделено влиянию надежности не ЭКБ, а в основном компьютерных бортовых устройств, их аппаратных и программных средств. Отмечалась возрастающая зависимость ракетно-космических комплексов от характеристик бортовых компьютерных систем управления и, прежде всего, программных средств, их растущего влияния на безопасность. По результатам анализа рисков аварий за 40 лет с 1960 по 2000 гг. [2] каждый сотый пуск завершался аварией вследствие дефектов (недоработок) программных средств, а 6 из 7 отказов компьютерных систем РКТ однозначно были обусловлены такими дефектами.

Следует отметить, что доля программно реализуемых и поддерживаемых функций в авиационных и ракетно-космических комплексах постоянно возрастает. По данным, опубликованным Министерством обороны США еще десять лет назад [3], доля программно выполняемых функций боевого самолета возросла с 8% для F-4 в 1960-е гг. до 80% для F-22 в 2000 г. Для систем РН и КА характерны схожие тенденции. Это особенно важно учитывать потому, что программные средства являются одним из наиболее вероятных источников отказов даже при использовании традиционных методов резервирования (дублирования, мажоритирования, временной избыточности и др.). Парирование отказов, вызываемых дефектами программных средств, возможно только путем применения многоверсионных технологий разработки или введения механизмов оперативной коррекции в полете [6].

Целью данной главы является обобщение и краткий анализ рисков аварий РКТ, произошедших в первом десятилетии XXI века, вследствие отказов оборудования РН и КА, их компьютерных систем, аппаратных и программных средств. Материалы главы построены также на результатах исследований, которые были опубликованы в [2–7], чтобы попытаться получить наиболее полную картину за пятьдесят лет космической эры.

2.2. Анализ причин отказов ракет-носителей

Актуальность проблемы анализа причин отказов систем и изделий ракетно-космической техники обусловлена тем очевидным фактором, что современные ракетно-космические системы несут в себе огромную потенциальную угрозу как природе Земли, так и всему человечеству. Если на первом месте из всех вышеизложенных техногенных объектов – источников нарушения глобальной безопасности обычно называют атомные электростанции (АЭС), то второе место следует присудить изделиям ракетно-космической техники – прежде всего ракетоносителям (РН). Причем к этой потенциально опасной группе следует отнести не только боевые РН, оснащенные ядерными боеголовками, но и многочисленные так называемые «мирные» РН, используемые при решении коммерческих и различных научно-исследовательских задач.

Проблема эта имеет три основные составляющие. Во-первых, сегодня ракетно-космическая промышленность по праву является одной из важных отраслей глобальной мировой экономики, годовой объем которой оценивается минимум миллиардами долларов и эта тенденция имеет нарастающий характер.

Во-вторых, от уровня ее развития в государстве непосредственно зависит и уровень его национальной безопасности и обороноспособности.

В-третьих, так сложилось исторически, что наличие развитой космической промышленности во многом определяет авторитет государства в мировом сообществе, его космический имидж, и любые неудачи, аварии и отказы техники наносят существенный удар по этому имиджу.

Чтобы понять основные тенденции и причины отказов и аварий в этой сфере, необходимо прежде всего обратиться к статистическим данным. К сожалению, до сих пор нет полностью достоверных данных о всех авариях, произошедших как в основных космических государствах – СССР (РФ) и США, так и в других государствах, членах «космического клуба» – Китай, Япония, Франция, Великобритания и др. Как правило, в открытой печати не публикуются данные по катастрофам и отказам баллистических ракет-носителей и крылатых ракет военного назначения, военных спутников.

Наиболее полная картина аварий изделий ракетно-космической техники была представлена и проанализирована в работе [5], основные результаты которой мы рассмотрим ниже, хотя приведенная информация может и расходиться с данными других источников, поскольку нет достаточно достоверных данных о всех катастрофах, произошедших в СССР (РФ), США, Франции и Великобритании за весь период развития в этих странах ракетно-космической техники. Как показано в работах [5, 6], целесообразно рассматривать статистику отказов и аварий отдельно для трех групп изделий КН – для ракет-носителей (РН), космических аппаратов (КА) и отдельных блоков и устройств РН и КА.

В основу статистического анализа отказов были положены прежде всего данные о запусках РН и КА [4–7].

Так, например, за период с 1957 по 2000 г. было произведено более четырех тысяч запусков РН в том числе: СССН (РФ) – 2634, США – 1220, Франция – 10, Япония – 53, Китай – 65, Индия – 9. Как видим, за этот период в СССР количе-

ство запусков РН более чем в два раза превышало количество запусков в США, соответственно и количество наблюдаемых отказов техники было более статистически значимым. Как показывает открытая статистика, из всего 2634 запусков за период с 1957 по 2000 г. в СССР было зафиксировано 120 аварий РН.

На рис. 2.5 представлено статистическое распределение аварий РН в СССР (РФ) и США. Этот рисунок пока говорит нам лишь о том, что количество аварий РН как и у СССР, так и у США, к сожалению, было весьма значительным на первых этапах освоения космического пространства (1961–1971), но через 15–20 лет усилиями ученых и инженеров удалось почти на порядок снизить эту величину, хотя каждая такая авария в любом случае приносит существенные экономические потери, создает отрицательные экономические и политические последствия стране-изготовителю РН. Как видим, абсолютное количество аварий имело место при запусках отечественных РН – 120 против 100 у американцев, но надо учитывать тот факт, что эти аварии случались при различных количествах запусков РН – если у СССР (РФ) было за этот период 2034 запуска, то у США – всего 1220.

Причем и для российских, и для американских запусков мы видим, что максимальное количество аварий наблюдалось именно на первой фазе освоения космоса – с 1961 по 1978 г., а затем аварии носили уже единичный характер.

Следует обратить внимание и на тот факт, что если с 1961 по 1971 г. США очень активно работали в этом направлении – если они обеспечили запуск всего 578 РН, а СССР – 621 РН, то у США количество аварий РН составило 61 (10,5%), а у СССР – 82 (13,2%), то можно конечно считать их статистически равными величинами и предполагать наличие общих причин, приводящих к этим катастрофам.

В работе [5] введено понятие «риск запуска», оценивающее вероятность аварии, определяемое как отношение числа аварийных пусков $N_{ав}$ к общему числу успешных $N_{усп}$ и аварийных пусков:

$$Risk = N_{ав}/(N_{усп}+N_{ав}). \quad (2.1)$$

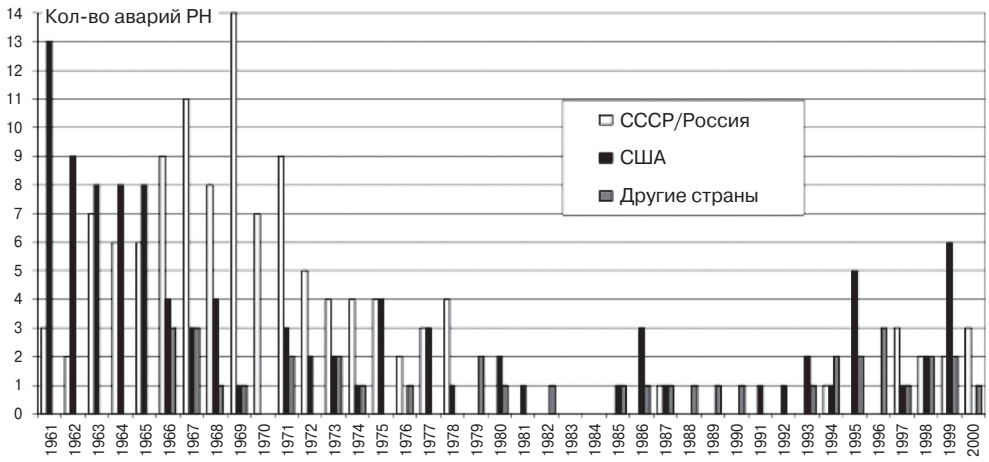


Рис. 2.5. Гистограмма аварий ракетоносителей основных стран-изготовителей

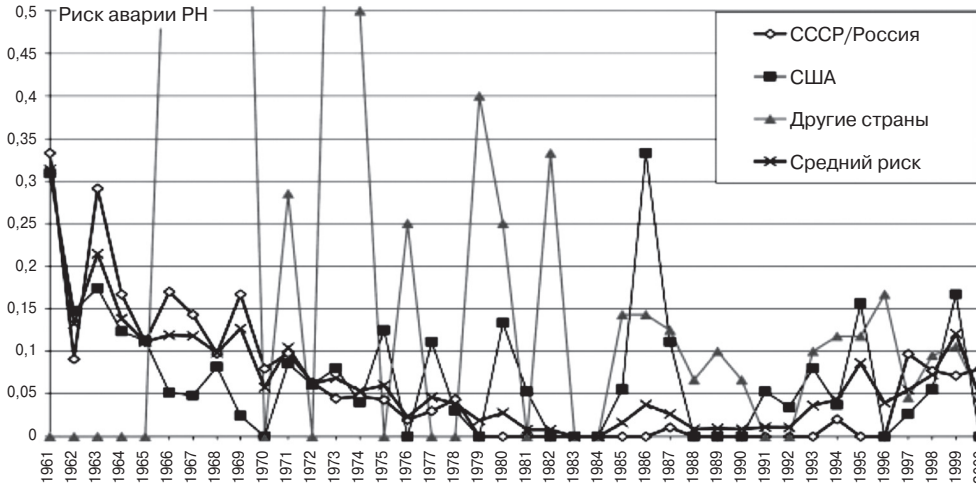


Рис. 2.6. График изменения коэффициента рисков аварии ракетоносителей для основных стран-изготовителей

Средние значения рисков авторами [5] рассчитывались от общего количества пусков и аварий, а не как среднее арифметическое от трех показателей по странам. Следует отметить, что количество аварий РН, как и численное значение коэффициентов риска аварии и для России, и для США, с самого начала освоения космоса имело стойкую тенденцию к снижению, и во многом именно благодаря целенаправленной работе инженеров и исследователей по выявлению условий и причин этих аварий, во многом обусловленных отказами ЭКБ электронных систем.

Риск аварии РН снизился от 30% в начале 60-х гг. до нулевого значения в середине 80-х. Остальные страны в то время отставали в развитии техники создания РКТ от СССР и США. Количество пусков во всем остальном мире (исключая СССР и США) тогда не превышало десятка в год, электронные системы управления и конструкции РН проходили сложные этапы приработки, поэтому численные значения рисков были весьма велики и отличались значительными флуктуациями.

Со второй половины 80-х гг. наблюдается увеличение как количества аварий РН, так и соответствующих рисков. Отчасти это можно объяснить возросшим количеством «коммерческих» пусков, обусловленным бурным развитием телекоммуникационных технологий. Хотя значения рисков аварий имеют значительные флуктуации, их максимальные значения не превосходят величины 0,167 (другие страны – 1995 г., США – 1999 г.). Среднее значение рисков аварий во второй половине 90-х гг. уже колеблется в более узком диапазоне 0,05–0,10. Похоже, что данная тенденция в ракетно-космической отрасли приняла устойчивый характер и может сохраняться в ближайшие годы.

Будут наблюдаться аварии от 5 до 10 ракет на каждые 100 пусков, если разработчики не предпримут дальнейших активных усилий по выяснению и исключению соответствующих факторов риска.

2.3. Анализ отказов космических аппаратов

Кроме ракет-носителей значительное количество катастроф и аварий в истории развития ракетно-космической техники имело место и с космическими летательными аппаратами, которые соответственно и выводились на заданные орбиты с помощью этих ракет-носителей. И здесь история аварий носит не менее драматичный характер – и человеческие жертвы, и многомиллионные потери, и ощутимые удары по имиджу космической державы, не говоря уже об опасных экологических последствиях этих катастроф.

Чтобы понять всю сложность проблемы, в табл. 2.1 [5] приведена полная статистика известных данных по отказам КА, сгруппированных в соответствии со странами-разработчиками РН, с помощью которых эти КА выводились на орбиты, (СССР/Россия, США, другие страны).

Здесь также коэффициенты рисков аварии КА определялись из расчета на один успешный пуск [5]:

$$Risk_{КА} = N_{ав\ КА}/N_{усп.п.}. \qquad (2.2)$$

Понятно, что под успешным пуском КА здесь понимается не только его вывод на расчетную орбиту, но и его эксплуатация в течение всего установленного срока службы.

Визуальное отображение данных из табл. 2.1 представлено на рис. 2.7, 2.8.

Надо отметить, что в 60-е гг. большее (по сравнению с США) число аварий в этой сфере происходило с советскими КА, что было обусловлено разным подходом к организации работ исследователей, инженеров и конструкторов США и СССР. Ситуация между СССР и США выровнялась в начале 70-х гг., а к концу 70-х гг. аварии КА практически прекратились. Это объясняется тем, что технологии проектирования, изготовления и эксплуатации КА достигли к этому времени определенного совершенства, а наиболее сложные программы межпланетных полетов к Луне, Марсу, Венере были уже выполнены. Другие страны в это время эксплуатировали незначительное количество КА, поэтому как абсолютное количество аварий, так и относительные значения рисков аварий КА для них имеют практически нулевое значение.

К сожалению, к началу 90-х гг. опять мы наблюдаем возрастание количества аварий КА, которое было непосредственно связано с развитием телекоммуникационных технологий, усложнением выполняемых задач и использованием новой, более функциональносложной ЭКБ. К концу 90-х гг. значения рисков КА даже превысили численные показатели, характерные для времени начала космической эры, превысили критическое значение – 25%. Соответственно, каждый четвертый КА в этот период времени не доживает до конца запланированного срока эксплуатации. Разумеется, этот факт не может не тревожить разработчиков и заказчиков, так как цена таких отказов крайне велика, а последствия отказов могут быть весьма неприятными как для страны-изготовителя, так и для страны (территории), ставшей невольным заложником аварийной ситуации.

На рис. 2.5, 2.6 [2] проведен сравнительный анализ количества аварий и значений рисков для РН и КА.

Таблица 2.1. Анализ рисков для отказов космических аппаратов в период 1961–2000 гг.

Год	СССР/Россия			США			Другие страны			Всего		
	Кол-во успешных запусков	Кол-во аварий КА	Риск	Кол-во успешных запусков	Кол-во аварий КА	Риск	Кол-во успешных запусков	Кол-во аварий КА	Риск	Кол-во успешных запусков	Кол-во аварий КА	Риск
1961	6	1	0,167	29	1	0,034	0	0	–	35	2	0,057
1962	20	2	0,1	52	0	0	0	0	–	72	2	0,028
1963	17	3	0,176	38	0	0	0	0	–	55	3	0,055
1964	30	2	0,067	57	1	0,018	0	0	–	87	3	0,034
1965	48	8	0,167	63	1	0,016	1	0	0	112	9	0,08
1966	44	0	0	73	2	0,027	1	0	0	118	2	0,017
1967	66	2	0,03	59	1	0,017	2	0	0	127	3	0,024
1968	74	4	0,054	45	0	0	0	0	–	119	4	0,034
1969	70	3	0,043	40	0	0	0	0	–	110	4	0,036
1970	81	0	0	29	1	0,034	4	1	0,25	114	2	0,018
1971	83	5	0,06	32	1	0,031	5	0	0	120	6	0,05
1972	74	0	0	31	0	0	1	0	0	106	0	00
1973	86	3	0,035	23	2	0,087	0	0	–	109	5	0,045
1974	81	2	0,025	24	1	0,042	1	0	0	106	3	0,028
1975	89	2	0,022	28	0	0	8	0	0	125	2	0,016
1976	99	4	0,04	26	0	0	3	0	0	128	4	0,031
1977	98	4	0,041	24	2	0,083	2	0	0	124	6	0,048
1978	88	1	0,011	32	0	0	4	0	0	124	1	0,008
1979	87	0	0	16	0	0	3	0	0	106	0	0
1980	89	0	0	13	0	0	3	0	0	105	0	0
1981	93	0	0	18	0	0	7	0	0	123	0	0
1982	101	0	0	18	0	0	2	0	0	121	0	0
1983	98	0	0	22	0	0	7	0	0	127	0	0
1984	97	0	0	22	0	0	10	0	0	129	0	00

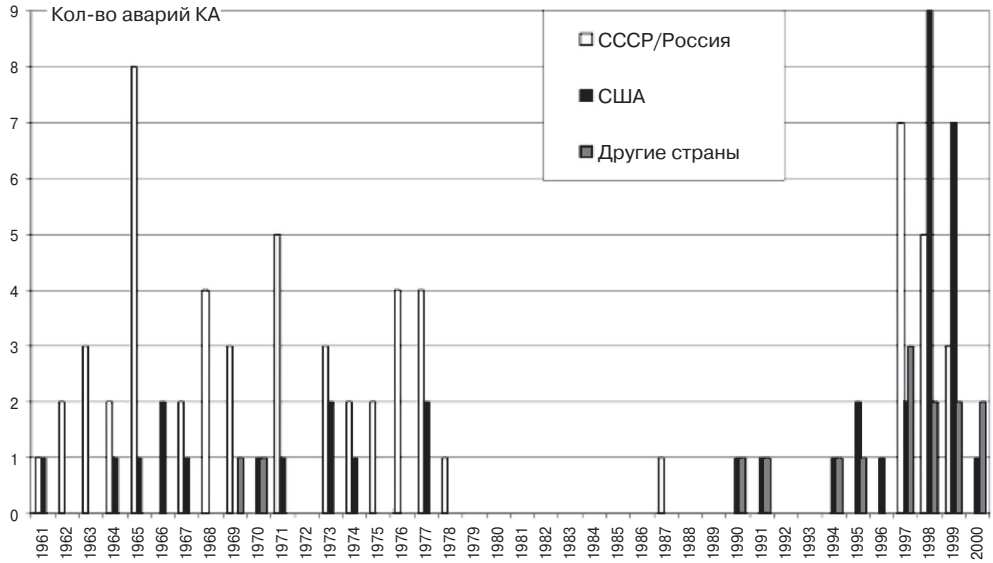


Рис. 2.7. Гистограмма аварий космических аппаратов между странами-изготовителями (1961–2000 гг.)

Рис. 2.8. Динамика изменения численных значений коэффициента риска аварии космических аппаратов (1961–2000 гг.)

На рис. 2.6, кроме средних значений рисков аварий КА и РН, добавлено значение суммарного риска выполнения задачи КА, составляющими которого являются риск аварии КА и риск аварии РН.

Для определения численного значения риска выполнения задачи КА используем формулы из работы [2].

Вероятность выполнения задачи определяем из следующего выражения:

$$P_{\text{Вып.з.}} = 1 - Risk_{\text{Вып.з.}} \qquad (2.3)$$

В то же время

$$P_{\text{Вып.з.}} = P_{\text{РН}} \cdot P_{\text{КА}} = (1 - Risk_{\text{РН}}) \cdot (1 - Risk_{\text{КА}}). \quad (2.4)$$

Отсюда

$$1 - Risk_{\text{Вып.з.}} = (1 - Risk_{\text{РН}}) \cdot (1 - Risk_{\text{КА}}) \quad (2.5)$$

и окончательно

$$Risk_{\text{Вып.з.}} = Risk_{\text{РН}} + Risk_{\text{КА}} - Risk_{\text{РН}} \cdot Risk_{\text{КА}}. \quad (2.6)$$

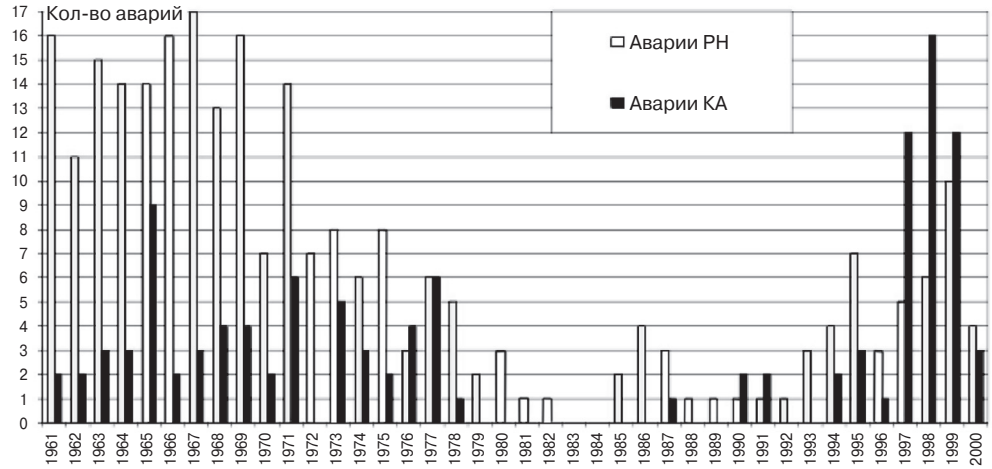


Рис. 2.9. Гистограмма общего количества аварий ракетоносителей и космических аппаратов (1961–2000 гг.)

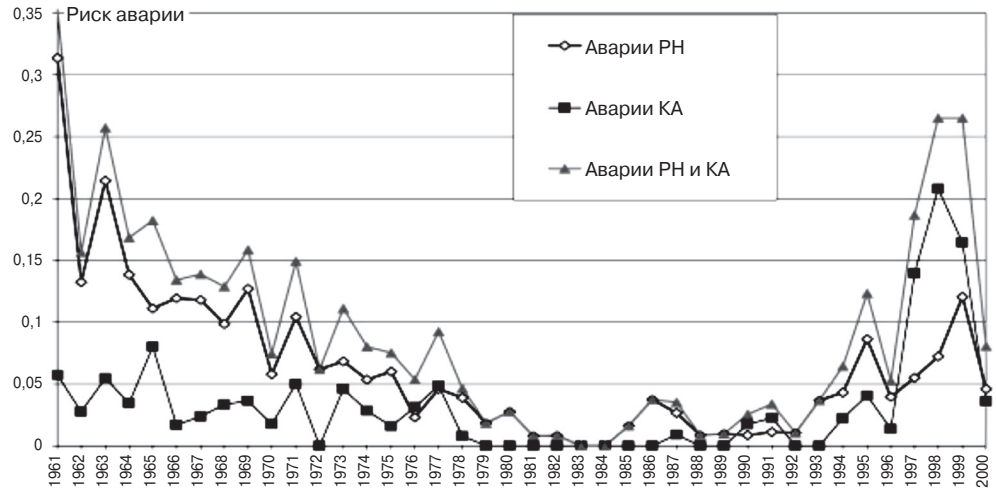


Рис. 2.10. Динамика изменения численных значений коэффициентов рисков аварий ракетоносителей и космических аппаратов

Из вышеприведенных данных [2, 6, 7] следует, что до середины 70-х гг. численные значения коэффициента риска аварий РН в 2 и более раз превосходил риск аварий КА. Затем значения этих рисков приблизительно выровнялись, а со второй половины 90-х гг. риски аварий КА превзошли риски аварий РН. Таким образом, на современном этапе развития РКТ наиболее «узким» местом выполнения возложенной на КА миссии является уже не его доставка на орбиту, а обеспечение безотказной работы КА в течение всего запланированного срока эксплуатации.

2.4. Анализ причин отказов изделий ракетно-космической техники

Учитывая специфику тематики настоящей книги, необходимо провести хотя бы качественный анализ тенденций изменения численных значений коэффициента рисков аварий из-за отказов различных составляющих РН и КА.

В табл. 2.2 представлена временная динамика изменения процентного соотношения количества отказов, конкретно приведших к авариям РН и КА за период длительностью 10 лет. Здесь отдельно выделен ряд причин отказов, общих для РН и КА. К сожалению, следует отметить, что для 60–80-х гг. из-за недостатка информации авторам [2] не удалось произвести дифференциацию типов отказов для КА.

Результаты анализа данных табл. 2.2 представлены на рис. 2.11–2.14, где обозначения причин отказов соответствуют табл. 2.2.

Для определения численного значения коэффициента риска аварии из-за отказа той или иной составляющей в ходе выполнения космического полета авторы [2] предлагают воспользоваться следующей формулой:

$$Risk_i = N_{\text{аварий i}}/(N_{\text{усп.п.}} + N_{\text{аварий РН}}). \qquad (2.7)$$

Таблица 2.2. Основные достоверно установленные причины отказов РКТ

Причины аварий	60-е гг.		70-е гг.		80-е гг.		90-е гг.	
	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%	Кол-во	%
Отказы и взрывы ступеней ракетоносителя (РН)	136	79	60	66	38	90	31	29
Отказы космических аппаратов (КА)	9	5	9	10	0	0	0	0
Отказы двигательных установок (ДУ)	6	3	5	5	1	2,5	10	10
Отказы радиоаппаратуры (РА)	2	1	2	2	1	2,5	7	7
Отказы разгонных блоков (РБ)	3	2	1	1	1	2,5	6	6
Отказы систем электропитания и кабельных сетей (СЭП)	2	1	1	1	0	0	9	9
Отказы систем управления (СУ)	16	9	14	15	1	2,5	24	23
Отказы аппаратных средств бортовых компьютеров (АС)	0	0	0	0	0	0	6	6
Отказы программных средств бортовых компьютеров (ПС)	0	0	0	0	0	0	10	10
ВСЕГО	174		92		42		103	

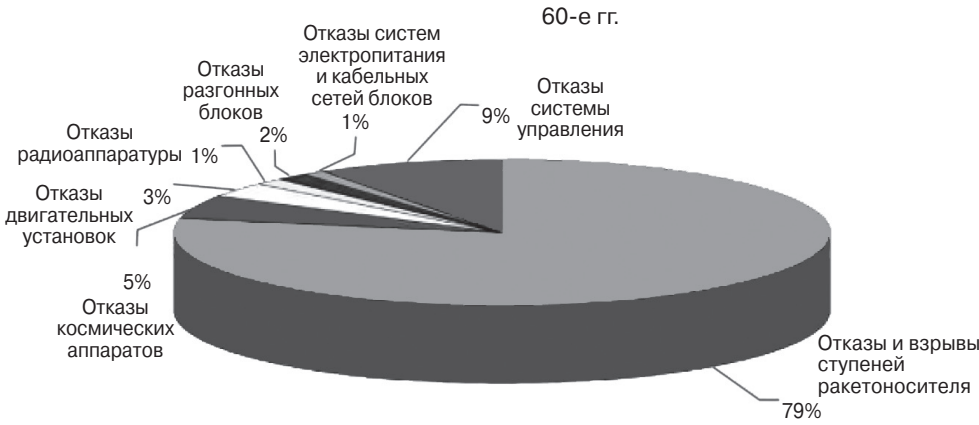


Рис. 2.11. Распределение причин отказов ракетно-космической техники в 60-е гг.

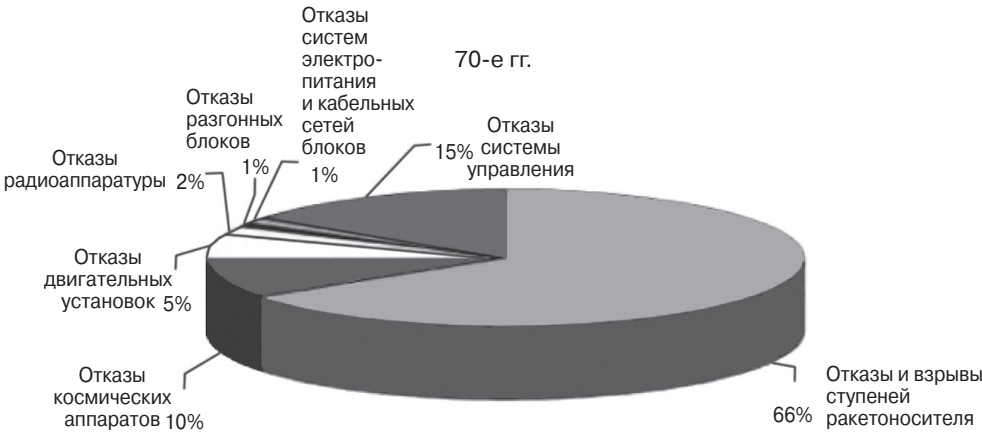


Рис. 2.12. Распределение причин отказов ракетно-космической техники в 70-е гг.

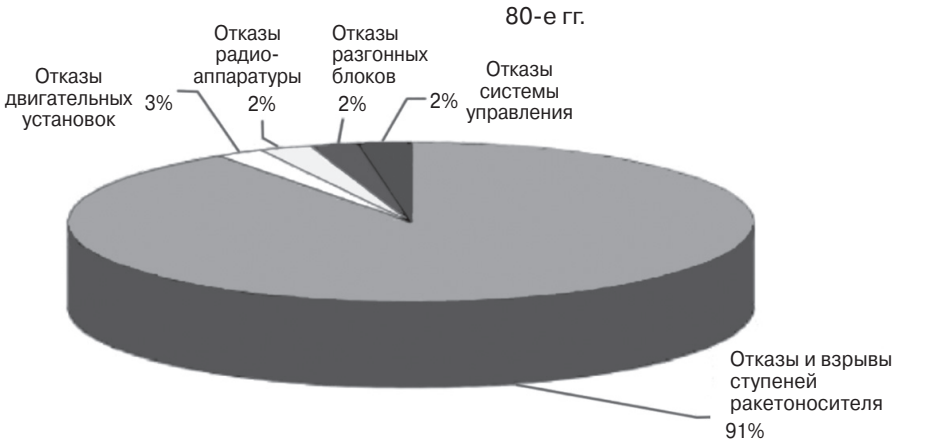


Рис. 2.13. Распределение причин отказов ракетно-космической техники в 80-е гг.

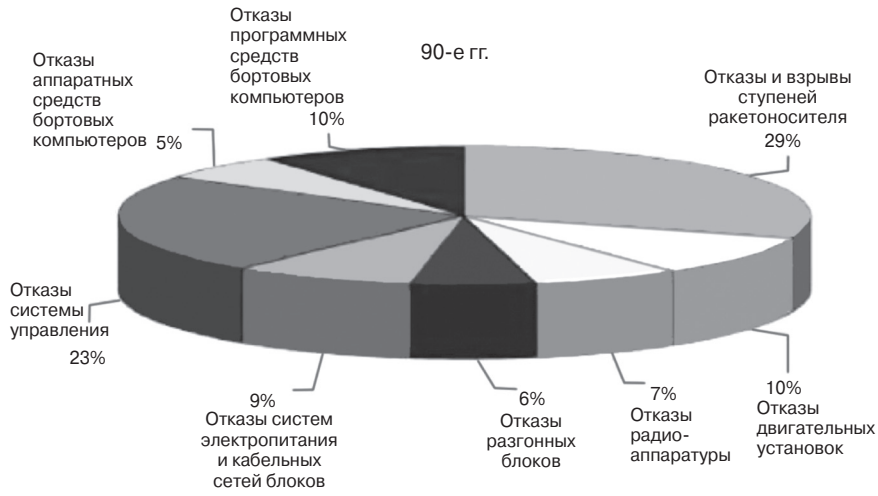


Рис. 2.14. Распределение причин отказов ракетно-космической техники в 90-е гг.

Таблица 2.3. Риски аварий из-за отказов составляющих РКТ на основе статистики за 90-е гг. (в пересчете на один пуск РН)

Причина аварии	**Кол-во отказов**	**Риск аварии**
Отказы и взрывы ступеней ракетоносителя (РН)	31	0,036
Отказы двигательных установок (ДУ)	10	0,012
Отказы радиоаппаратуры (РА)	7	0,008
Отказы разгонных блоков (РБ)	6	0,007
Отказы систем электропитания и кабельных сетей (СЭП)	9	0,01
Отказы систем управления (СУ)	24	0,028
Отказы аппаратных средств бортовых компьютеров (АС)	6	0,007
Отказы программных средств бортовых компьютеров (ПС)	10	0,012

Для определения риска аварии из-за отказа той или иной составляющей в ходе выполнения космического полета авторы [2] рекомендуют воспользоваться простой формулой:

$$Risk_{\text{i}} = N_{\text{аварий i}}/(N_{\text{усп.п.}} + N_{\text{аварий РН}}). \qquad (2.8)$$

Основные риски аварий из-за отказов различных составляющих компонентов изделий РКТ, отражающие современные тенденции, приведены в табл. 2.3. При этом учтено, что в 90-х гг., по официальным данным, было осуществлено 816 успешных пусков и произошло 44 аварии РН.

Конечно, приведенные в табл. 2.3 численные значения коэффициентов рисков могут быть уточнены, если учесть дифференциацию рисков для отказов конкретных компонент РН и КА, но в целом они характеризуют реальную картину.

Проведенный выше простейший анализ показывает, что наиболее подвержены аварийным отказам собственно ступени РН, второе далеко не почетное место занимают электронные системы управления. Однако современный этап характери-

зуется появлением новых рисков, которые обусловлены применением в бортовых системах управления компьютерной техники. Отказы программных средств (ПС) бортовых компьютеров вместе с отказами двигательных установок делят 3-4 место среди всех причин отказов.

В среднем из-за отказов ПС заканчивается аварией каждый 100-й пуск (в среднем – раз в год). Следует отметить, что аппаратные средства (АС) отказывают почти в два раза реже, чем ПС. В табл. 2.4 приведены данные об отказах АС и ПС бортовых компьютеров с 1991 по 2000 гг.

Один из очевидных выводов из вышеизложенного – для понимания механизмов и причин отказов РКТ необходимо проводить исследования в следующих направлениях:

1) набор, обработка и анализ статистики данных об отказах и авариях РКТ с проведением регрессионно-корреляционного анализа статистических данных, что позволяет разработать обоснованный прогноз будущих тенденций развития РКТ;
2) уточнение математической модели оценки рисков с учетом как составляющих РН и КА, так и конкретных последствий аварий;
3) проведение сопоставительного анализа причин аварий, в частности, при внедрении новых информационных и других технологий с иными критическими системами, такими как атомная энергетика, транспорт и др. [8, 9];
4) разработка новых методов и средств повышения надежности и безопасности СУ и бортовых компьютеров на основе использования специализированной ЭКБ КН [10–12].

2.5. Анализ тенденций изменения рисков аварий ракет-носителей за период с 2000 по 2009 г.

Как и в предыдущих параграфах, для анализа использовались различные открытые источники информации, в том числе публикации в периодических изданиях, сообщения информационных агентств, тематические Web-сайты и рубрики, прежде всего [13–21].

По каждому из событий ставилась задача определить причину события – компонент, блок и вид его отказа.

Вторая задача – анализ тенденций изменения рисков аварий вследствие отказов различных составляющих РН и КА, в том числе аппаратных и программных средств бортовых и наземных компьютерных систем.

Здесь не рассматриваются данные по отказам и авариям баллистических и крылатых ракет военного назначения.

Авторы основной используемой здесь работы [2] справедливо указывают, что ни один из доступных источников не давал систематизированную выборку об аварийных ситуациях, поскольку до сих пор нет полных и достоверных данных о всех катастрофах, были приняты дополнительные меры по обеспечению достоверности исходной информации. В частности, реализовывался принцип перекрестной верификации данных, когда осуществлялась выборочная сверка данных о событиях из разных источников.

При преобразовании вербальных данных в вектор (дата события, критичность события, РН/КА, причина события) наибольшие проблемы имели место при определении причины аварийной или иной нештатной ситуации. В этом случае применялся принцип множественного анализа, когда учитывались не только данные от разных источников, а и мнение экспертов. Следует подчеркнуть, что по статистике пусков и отказов РН информация достаточно упорядочена и существует несколько авторитетных диверсных источников для ее проверки, в то же время информация по отказам космических аппаратов является разрозненной. Представленные в статьях [2, 4, 7] данные по отказам и авариям КА были получены на основе анализа разнородных по форме источников информации.

Данные о количестве пусков ракетоносителей по странам-изготовителям за анализируемый период времени приведены в табл. 2.4. В ней учтены пуски, зарегистрированные Комиссией ООН по исследованию и использованию космического пространства (COSPAR) и космическим командованием США (NORAD).

Наибольшее количество пусков РН в этот период приходилось на долю России и США. Украина входит в пятерку лидеров после Европейского союза и Китая. Тем не менее, общее количество запусков РН за это десятилетие сократилось более чем на 25% по сравнению с 1990–1999 гг. (663 против 891 [3]). На 30% сократилось количество РН производства России, Украины и США, на 22% – Европейского союза. Вместе с тем следует отметить положительную динамику запусков РН для Японии (в 1,5 раз), Китая (в 1,7 раз) и особенно Индии (в 2,6 раз).

Пуски РН производства Бразилии, Ирана, Израиля, Северной и Южной Кореи из-за их незначительного вклада объединены вместе в табл. 2.4 в графе «Другие страны».

В качестве особенностей пусков РН производства Украины следует отметить, что Украина не имеет своих космодромов, поэтому вынуждена запускать свои ракетоносители с космодромов других стран.

Украина производит запуски своих ракетоносителей «Зенит-3SL» в рамках международного проекта «Морской старт» (32 запуска в течение 2000–2009 гг.), а также «Зенит-3SLB», «Днепр» и «Циклон-3» с космодромов Российской Федерации в рамках проектов «Наземный старт», «Космотрас» (23 запуска в течение 2000–2009 гг.).

Таблица 2.4. Запуски ракетоносителей в период 2000–2009 гг.

Год	Россия	США	ЕС	Китай	Украина	Япония	Индия	Другие страны	ВСЕГО
2000	32	28	12	5	7	1	0	0	85
2001	19	22	8	1	6	1	2	0	59
2002	25	17	12	5	1	3	1	1	65
2003	21	23	4	7	3	3	2	1	64
2004	18	16	3	8	7	0	1	1	54
2005	26	12	5	4	5	2	1	0	55
2006	23	18	5	6	7	6	1	0	66
2007	22	19	6	10	5	2	3	1	68
2008	24	16	6	11	8	1	3	0	69
2009	27	24	7	6	6	3	2	3	78
ВСЕГО	237	195	68	63	55	22	16	7	663

В частности, в 2009 г. был осуществлен успешный запуск РН «Циклон-3» с космодрома Плесецк. Данный РН эксплуатировался с 1969 г. Всего было проведено 122 запуска, из них 7 завершились нештатно. В [9] отмечается, что РН серии «Циклон» являются одними из высоконадежных (94,3% успешных пусков) и по этому показателю превосходят РН Ariane, «Дельта», «Протон».

Первый запуск РН «Циклон-4» четвертого поколения с бразильского космодрома в рамках совместного украино-бразильского проекта «Алкантара Циклон Спейс» был запланирован на 2012 г., но в силу политических аспектов так и не состоялся.

Кроме «Циклона-3» в течение 2000-х гг. была прекращена эксплуатация РН «Циклон-2» и Atlas II, за всю историю пусков которых не было зафиксировано ни одной аварии, а также Ariane-4. Введены в эксплуатацию новые РН: «Союз-ФГ», Atlas V, Delta IV, «Союз-2», «Протон-М».

Приведем известные данные по результатам анализа рисков отказа РН за период с 2000 по 2009 г.

Таблица 2.5. Запуски ракетоносителей в период 2000–2009 гг., закончившиеся аварией (АВ) или выводом спутников на нерасчетную орбиту (НРО)

Год	Вид отказа РН	Россия	США	Евро-союз	Китай	Украина	Япония	Индия	Другие страны	ВСЕГО
2000	АВ	1	0	0	0	2	1	0	0	4
	НРО	0	1	0	0	0	0	0	0	1
2001	АВ	1	1	0	0	0	0	0	0	2
	НРО	0	0	1*	0	0	0	1*	0	2
2002	АВ	1	0	1	1	0	1**	0	0	4
	НРО	1*	0	0	0	0	0	0	0	1
2003	АВ	0	1	0	1	0	1	0	1	4
	НРО	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	АВ	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	НРО	0	1*	0	0	2	0	0	0	3
2005	АВ	4	0	0	0	0	0	0	1	5
	НРО	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	АВ	1	3	0	0	1	0	1	0	6
	НРО	0	1*	0	0	0	0	0	0	1
2007	АВ	1	1	0	0	1	0	0	0	3
	НРО	0	1	0	0	0	0	1	0	2
2008	АВ	0	1	0	0	0	0	0	1	2
	НРО	1	0	0	0	0	0	0	0	1
2009	АВ	0	2	0	0	0	0	0	1	3
	НРО	1	0	0	1	0	0	0	1***	3
ВСЕГО	АВ	9	9	1	2	4	3	1	5	**34**
	НРО	3	4	1	1	2	0	2	1	**14**

Примечания.

* Вследствие отказа РН спутник был выведен на нерасчетную орбиту и не смог самостоятельно ее скорректировать. Эксплуатация спутника по назначению невозможна.

** При запуске японского РН H-IIA 2024 спутник DASH не смог отделиться от второй ступени, в то время как спутник MDS-1 был успешно доставлен на орбиту. Может быть классифицирован как частично успешный запуск.

*** Половина полезной нагрузки не была выведена на расчетную орбиту. В качестве причины неудачи указывают сбой при отделении головного обтекателя: одна из его створок осталась со ступенью, что привело к существенному недобору скорости.

В табл. 2.5 приведены сводные данные по отказам РН, группированные в соответствии со странами-разработчиками. Последствием отказов систем РН являются аварии (взрыв РН, падение, существенное отклонение от траектории и самоуничтожение), а также вывод КА на нерасчетную орбиту, что обычно расценивается как частичный отказ.

В последнем случае некоторые КА, выведенные на нерасчетную (более низкую) орбиту, имеют возможность самостоятельно ее скорректировать, используя ресурс собственной двигательной установки и запасов топлива.

Очевидно, что самостоятельное изменение орбиты приводит к значительному снижению сроков службы спутников. Например, 12 июля 2001 г. из-за преждевременного отключения двигателей второй ступени РН Ariane-5 два спутника Artemis и BSAT-2B были выведены на гораздо более низкую орбиту, чем планировалось (геостационарная орбита).

Навигационный спутник Artemis смог самостоятельно перейти на геостационарную орбиту, в то время как коммуникационный спутник BSAT-2B остался на средней околоземной орбите и не мог быть использован по назначению. Такой запуск РН скорее может быть классифицирован как неудачный, чем частично успешный. Кроме того, в 6 из 14 зафиксированных случаев вывода КА на нерасчетную орбиту (табл. 2.5) спутники не смогли (или не имели возможности) самостоятельно скорректировать свою орбиту. Как следствие – такие запуски РН были признаны неудачными.

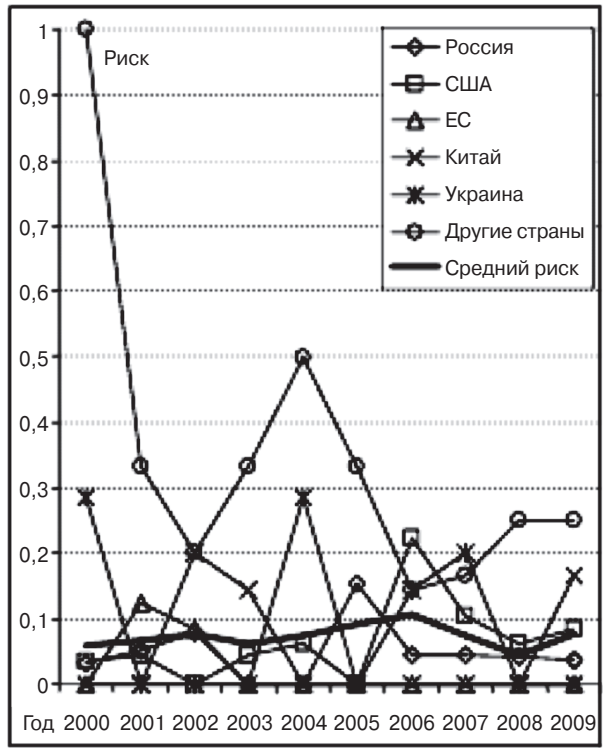


Рис. 2.15. Изменение рисков запусков РН в период 2000–2009 гг.

На рис. 2.15 представлено изменение рисков запусков ракетоносителей в 2000–2009 гг. (по сравнению с табл. 2.5 к категории «другие страны» дополнительно отнесены Япония и Индия). Значение риска (вероятности отказа) рассчитывалось как отношение числа неудачных пусков Nотк.РН к общему числу пусков Nпуск.РН по формуле:

$$Risk_{РН} = N_{отк.РН}/N_{пуск.РН}. \quad (2.9)$$

Значение суммарного риска запусков ракетоносителей в течение последних 10 лет колеблется в диапазоне 0,04...0,10 и в среднем составляет 0,072, из них риск аварии – 0,051, риск вывода на нерасчетную орбиту – 0,021. Наибольший риск был зафиксирован в 2006 г. (0,106), в течение которого произошло 7 отказов ракетоносителей из 66. Похоже, что данная тенденция приняла устойчивый характер и может сохраняться в ближайшие годы.

Следовательно, фирмам, работающим в ракетно-космической отрасли, придется смириться с потерями от 4 до 10 ракет на каждые 100 пусков.

Приведем результаты сравнения рисков отказа РН за 1990-е и 2000-е гг. [2]. Так, по сравнению с 1990–1999 гг. за анализируемые здесь 10 лет значение риска отказа ракетоносителей выросло более чем в полтора раза (табл. 2.6) при том, что общее количество запусков, как уже было отмечено, сократилось примерно на 25%.

Таблица 2.6. Сравнение рисков отказа ракетоносителей в периоды 1990–1999 и 2000–2009 гг.

Год	Кол-во пусков	Кол-во отказов	Риск	Год	Кол-во пусков	Кол-во отказов	Риск
1990	117	1	0,009	2000	85	5	0,059
1991	89	1	0,011	2001	59	4	0,068
1992	96	1	0,010	2002	65	5	0,077
1993	82	3	0,037	2003	64	4	0,063
1994	93	4	0,043	2004	54	4	0,074
1995	81	7	0,086	2005	55	5	0,091
1996	76	3	0,039	2006	66	7	0,106
1997	91	5	0,055	2007	68	5	0,074
1998	83	6	0,072	2008	69	3	0,043
1999	83	10	0,120	2009	78	6	0,077
ВСЕГО	891	41	0,046	ВСЕГО	663	48	0,072

Причина этой очевидно негативной тенденции, по мнению авторов [2], кроется в завершении эксплуатации высоконадежных, но недостаточно эффективных РН «Циклон-2» и Atlas II/III и переходе на использование новых усовершенствованных РН, элементы которых являются не до конца отработанными.

Отдельно следует рассмотреть результаты анализа надежности РН. Так, в табл. 2.7 представлены эксплуатационные характеристики в этот период времени наиболее часто используемых РН. РН «Циклон-2», «Циклон-3», «Днепр», «Рокот» и «Старт» являлись конверсионными РН на базе межконтинентальных баллистических ракет.

Таблица 2.7. Эксплуатационная надежность ракетоносителей

№	РН	Первый запуск	Последний запуск	Последний аварийный запуск	Кол-во запусков				Надежность, %
					всего	последних успешных	аварий-ных	частично успешных	
1	Циклон-2	06.08.1969.	25.06.2006	–	106	106	0	0	100 (100)
2	Atlas II (III)	07.12.1991	03.02.2005	–	70	70	0	0	100 (100)
3	Союз-ФГ	20.01.2001	07.10.2010	–	32	32	0	0	100 (100)
4	Atlas V	21.08.2002	21.09.2010	–	23	23	0	1	100 (95,65)
5	Delta IV	11.03.2003	28.05.2010	21.12.2004	13	9	0	1	100 (92, 31)
6	Союз-2	08.11.2004	16.10.2010	–	8	8	0	1	100 (87,50)
7	Delta II	14.02.1989	14.09.2010	17.01.1997	147	92	1	1	99,32 (98,64)
8	Протон -М	07.07.2001	14.10.2010	06.09.2007	47	30	1	3	97,87 (91,49)
9	Союз-У	18.05.1973	10.09.2010	15.10.2002	715	45	18	1	97,48 (97,34)
10	Ariane-4	22.01.1990	15.02.2003	01.12.1994	116	73	3	0	97,41 (97,41)
11	Ariane-5	04.06.1996	04.08.2010	11.12.2002	52	38	3	1	94,23 (92,31)
12	Циклон-3	24.06.1977	30.01.2009	27.12.2000	122	4	5	2	95,90 (94,26)
13	Космос-3М	15.05.1967	27.04.2010	27.10.2005.	425	10	20	8	95,29 (93,41)
14	Зенит-3SL(B)	28.03.1999	30.11.2009	31.01.2007	34	10	2	1	94,12 (91,18)
15	Днепр	21.04.1999	21.06.2010	26.07.2006	16	9	1	0	93,75 (93,75)
16	Протон-К	10.03.1967	28.02.2009	27.10.1999	310	44	26	9	91,61 (88,71)
17	Рокот	20.11.1990	08.09.2010	08.10.2005	17	6	2	0	88,24 (88,24)
18	Зенит-2М	13.03.1985	22.06.2009	09.09.1998	38	7	5	0	86,84 (86,84)
19	Старт	25.03.1993	25.04.2006	28.03.1995	7	5	1	0	85,71 (85,71)

Примечания.

Информация актуальна на момент написания статьи – октябрь 2010 г.

В скобках указано значение надежности без учета частично успешных запусков (вывод на нерасчетную орбиту, вывод части нагрузки).

Как следует из табл. 2.7, абсолютную надежность имели:
- РН, выведенные из эксплуатации – «Циклон-2» и Atlas II/III;
- РН «Союз-ФГ» – модернизированный РН «Союз-У» с новыми двигателями 1-й и 2-й ступени, отличающимися специальными форсуночными головками для лучшего смесеобразования, что позволило увеличить грузоподъемность до уровня достаточного для беспроблемного вывода трех космонавтов на орбиту.

Кроме показателя надежности ключевое значение для любых заказчиков имеет количество последних успешных запусков. По этому показателю среди эксплуатируемых РН лидировали американский РН «Delta II» и российский РН «Протон-К», последние аварии которых в этот период приходились на 1997 и 1999 гг. соответственно. Последними авариями РН «Протон-М» и «Зенит-3SL» являлись аварии, произошедшие в 2007 г.

2.6. Анализ тенденций изменения рисков отказов КА за период с 2000 по 2009 г.

Сводные данные по запускам и отказам КА приведены в табл. 2.8. Успешными считаются вывод КА на расчетную орбиту и эксплуатация в течение всего установленного срока службы.

Здесь основным видом отказов КА авторами [2] принята следующая классификация:
- аварии РН (АВ РН), включая отказы при отделении КА от РН;
- размещение КА на нерасчетной орбите (РНО РН);
- отказы развертывания на орбите (ОРО), включая нераскрытие солнечных батарей, невозможность стабилизации и неправильная ориентация;
- невозможность установления контакта с КА после его вывода на орбиту;
- эксплуатационные отказы бортового оборудования (ОБО) и механические неисправности и повреждения (МНП).

При выводе на нерасчетную орбиту некоторые КА смогли ее скорректировать самостоятельно. Однако при гарантийном сроке эксплуатации большинства коммуникационных спутников в 12–15 лет использование ресурсов и топлива собственной двигательной установки в среднем снижает время эксплуатации КА в 2-4 раза.

Из 1060 КА, запущенных за эти 10 лет, отказали 149 КА. Из них 59% – по причине аварий РН и вывода КА на нерасчетную орбиту, 12% – вследствие отказа КА сразу после вывода на орбиту и 29% – из-за фатальных отказов бортового оборудования и механических неисправностей в течение срока гарантийной эксплуатации.

Наибольшее количество КА, потерянных в анализируемый период из-за отказа РН, приходится на 2006 г., причем 18 из 23 КА приходится на аварию РН «Днепр», произошедшую 26 июля 2006 г.

Примечательно, что четвертая часть зафиксированных отказов бортового оборудования была парирована за счет резервирования, а также выполнения процедур обслуживания (например, модернизации программного обеспечения) по командам центра управления полетами.

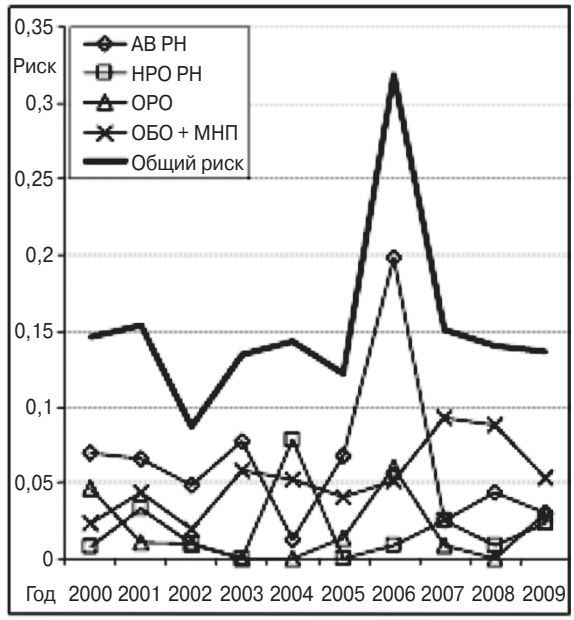


Рис. 2.16. Риски отказа КА

На рис. 2.16 представлен график изменения различных составляющих риска КА в течение 2000–2009 гг. с учетом данных из табл. 2.5 и 2.6, а также интегральный риск (без учета парированных отказов оборудования КА), рассчитанный по формуле:

$$Risk_{\text{КА}} = \frac{N_{\text{АВРН}} + N_{\text{НРЩРН(ФО+ПО)}}}{N_{\text{запускКА}}} + \frac{N_{\text{ОРО}} + N_{\text{ОБО(ФО+ЧО)}} + N_{\text{МНП(ФО+ЧО)}}}{N_{\text{запускКА}}}, \qquad (2.10)$$

где $N_{\text{АВРН}}$ – количество КА, потерянных из-за аварии РН; $N_{\text{НРО РН (ФО+ЧО)}}$ – количество КА, выведенных на нерасчетную орбиту по причине отказа РН; $N_{\text{ОРО}}$ – количество отказов КА при развертывании на орбите сразу после запуска; $N_{\text{ОБО(ФО+ЧО)}}$ – количество фатальных и частичных отказов бортового оборудования КА; $N_{\text{МНП(ФО+ЧО)}}$ – количество фатальных и частичных отказов механических неисправностей и повреждений КА; $N_{\text{запуск КА}}$ – общее количество КА, запущенных в 2000–2009 гг.

Как видно из проведенного анализа, риск запусков КА имеет значительные флуктуации по сравнению с ранее приведенным риском для РН. Среднее значение интегрального риска отказа КА составляет 0,15, что в два раза превышает риск отказа РН. Пик риска отказов КА приходится на 2006 г. и обусловлен аварией РН «Днепр» с 18 спутниками на борту. Кроме того, в последние годы наметилась тенденция к увеличению риска отказа бортового оборудования КА. В статистику отказов КА намеренно не были включены многочисленные отказы и поломки на международной космической станции (МКС). Также, в табл. 2.5 не включена информация об отказах, произошедших в течение 2000–2009 гг. для КА, запущенных до 2000 г.

Таблица 2.8. Статистика запусков и аварий космических аппаратов

Год	Кол-во запусков КА	Количество отказов по видам										Всего отказов
		АВ РН	НРО РН		ОРО	ОБО			МНП			
			ФО	ПО		ФО	ЧО	ПО	ФО	ЧО	ПО	
2000	130	9	1	0	2	0	0	1	0	0	0	15
2001	91	6	2	1	2	5	2	3	0	0	0	23
2002	103	5	1	0	1	2	2	0	0	3	1	15
2003	104	8	0	0	0	0	3	5	0	0	0	16
2004	77	1	3	3	0	0	0	1	0	0	0	8
2005	74	5	0	0	1	2	1	1	0	0	0	11
2006	116	23	1	0	7	5	0	3	0	0	0	43
2007	119	3	0	3	1	4	3	2	2	3	0	21
2008	114	5	0	1	0	2	1	0	0	1	1	11
2009	132	4	1	2	4	2	0	1	0	0	0	16
ВСЕГО	1060	69	9	10	18	22	12	17	2	7	2	179

Примечания.
В таблице использованы следующие обозначения: АВ РН – потери КА вследствие аварии РН; НРО РН – невывод КА на расчетную орбиту из-за отказа РН; ОРО – отказ развертывания на орбите и невозможность установления связи с КА непосредственно после вывода на орбиту; ОБО – отказ бортового оборудования; МНП – механических неисправностей и повреждения элементов конструкции КА; ФО – фатальный отказ; ЧО – частичный отказ; ПО – парированный отказ.

Сравнительный анализ статистики запусков и отказов КА (за исключением отказов, произошедших по вине РН) в течение 1990–1999 гг. [2] и за анализируемые десять лет (табл. 2.8) показывает, что общее количество КА, запущенных в 2000–2009 гг., увеличилось в 1,25 раз по сравнению с 1990–1999 гг.

С учетом одновременного уменьшения пусков РН в 2000–2009 гг. можно говорить об увеличении в этот период доли групповых выводов КА на орбиту (в среднем, на один запуск РН приходится 1,6 КА), а, следовательно, об увеличении цены отказа РН.

Таблица 2.9. Сравнение рисков отказа космических аппаратов в периоды 1990–1999 и 2000–2009 гг.

Год	Кол-во пусков	Кол-во отказов	Риск	Год	Кол-во пусков	Кол-во отказов	Риск
1990	116	2	0,017	2000	130	9	0,069
1991	88	2	0,023	2001	91	5	0,055
1992	95	0	0	2002	103	3	0,029
1993	79	0	0	2003	104	6	0,058
1994	89	2	0,022	2004	77	4	0,052
1995	74	3	0,041	2005	74	4	0,054
1996	73	1	0,014	2006	116	13	0,112
1997	86	12	0,14	2007	119	12	0,101
1998	77	16	0,208	2008	114	10	0,088
1999	73	12	0,164	2009	132	11	0,083
ВСЕГО	850	50	0,059	ВСЕГО	1060	77	0,073

Что касается риска отказов КА по вине бортового оборудования (учитывая и неуспешное развертывание КА на орбите после запуска), то он также увеличился в этот период по сравнению с 1990-ми гг. с 0,059 до 0,073.

Кроме того, необходимо отметить важный факт – 7% потерь спутников происходит во время или же непосредственно после доставки на орбиту, что составляет 40% (!) от общего числа отказов КА.

2.7. Анализ причин аварий РН и КА за период с 2000 по 2009 г.

Авторы фундаментальной работы [2] предложили разделить все множество отказов, приводящих к авариям или другим нештатным ситуациям, на специальные виды – отдельно для КА и РН.

Так, для ракетоносителей были установлены следующие подмножества отказов:

- 1-я ступень (1С);
- 2-я ступень (2С);
- 3-я ступень (3С);
- средства отделения КА (СО КА);
- разгонный блок (РБ);
- аппаратные средства компьютерной системы управления (АС);
- программные средства (ПС).

Для космических аппаратов исходя из типов систем, оборудования или компонент было получено 8 следующих подмножеств:

- радиоаппаратура (РА);
- программные средства (ПС);
- система электроснабжения (СЭС);
- механическая неисправность или повреждение конструкции КА(МНП);
- аппаратные средства (АС);
- гироскопичские устройства (ГС);
- двигательная установка КА (ДУ);
- ошибка обслуживающего персонала (ООП).

В табл. 2.10 и 2.11 систематизированы причины и последствия отказов РН и КА соответственно, зафиксированных в 2000–2009 гг. Следует отметить, что из рассмотрения была исключена катастрофа корабля многоразового использования Columbia 1 февраля 2003 г., причиной которой считается повреждение термозащиты.

Хотя в данной главе проведен более или менее системный анализ аварий РКТ только за первое десятилетие XXI века, но начало второго десятилетия показывает, что и это десятилетие, к сожалению, будет давать подобную информацию для анализа. К сожалению, сравнение аварийности РН и КА за последнее десятилетие прошлого и первое десятилетие нынешнего веков показывает, что суммарные риски аварий и отказов не только не уменьшились, а и недопустимо возросли.

Причем следует подчеркнуть, что возросли риски аварийности, вызванные отказами бортовых компьютерных систем. Отказы и сбои программных и аппаратных средств (20% и 6% соответственно) бортовых компьютеров занимают только второе место (после отказов радиоаппаратуры) среди причин отказов КА.

Таблица 2.10. Причины и последствия отказов ракетоносителей

Место отказа	Авария РН	Вывод КА на нерасчетную орбиту	Всего
1С	9	2	11
2С	7	4	11
3С	5	4	9
СО КА	5	1	6
ПС	5	1	6
РБ	1	2	3
АС	1	0	1
ВСЕГО	33	14	47

Таблица 2.11. Причины и последствия отказов космических аппаратов

Место отказа	Фатальный отказ	Частичный отказ	Парированный отказ/сбой	Всего
РА	20	11	0	31
ПС	3	2	16	21
СЭС	15	3	2	20
МНП	5	8	2	15
АС	3	0	3	6
ГС		2	3	5
ДУ	2	2	0	4
ООП	1	0	0	1
ВСЕГО	49	28	26	103

Кроме того, часть отказов радиоаппаратуры также может быть связана с отказом аппаратных средств и прежде всего – с вопросами выбора и применения ЭКБ.

С другой стороны, каждый седьмой отказ РН обусловлен проявлением дефекта программных средств, в то время как отказ аппаратных средств бортовых систем управления не является характерным для РН.

Среди причин отказов РН стран с развитой ракетно-космической индустрией (прежде всего России, США и Китая) следует выделить три основные группы: преждевременное отключение двигательных установок различных ступеней РН; проблемы отделения ступеней, ускорителей, разгонных блоков, обтекателей и выводимых платформ; попадание посторонних частиц в критические элементы двигательных установок и электротехнических механизмов.

На практике невозможно точно установить, но с большой степенью вероятности можно утверждать, что преждевременное отключение двигательных установок может быть связано в меньшей степени как с аномалиями в работе ДУ, но в большей степени с отказами и сбоями в работе их бортовых систем управления.

Отказы второй группы скорее обусловлены дефектами пиротехнических электромеханических устройств отделения элементов конструкции РН, а также могут быть вызваны отсутствием своевременных команд бортовых систем управления на срабатывание этих устройств или же, но с меньшей степенью вероятности, с дефектами кабельных соединений. Третья группа отказов указывает на возможные дефекты изготовления и сборки элементов РН, а также конструктивное не-

совершенство. В любом случае понимание первопричин таких событий будет способствовать снижению рисков аварий РН.

2.8. Анализ отказов компьютерных систем и программных средств

Как видно из рис. 2.17, 13% отказов РН в анализируемый период было обусловлено программными средствами различных систем управления, в то время как для КА этот показатель составляет уже 20% и еще 6% приходится на отказы чисто аппаратных (не программных) средств бортовых компьютеров (рис. 2.18).

Вместе с тем, только 6% фатальных отказов КА произошли из-за отказов ПС (также, как и АС), в то время как для РН они обусловили 15% аварий. Такое расхождение связано с тем, что при проявлении дефектов ПС бортовые компьютеры КА переходят в так называемый «безопасный режим». Это дает возможность специалистам Центра управления обнаружить дефект и устранить его путем обновления ПС по резервному каналу связи с КА. Очевидно, что для РН такая возможность отсутствует.

В среднем дефекты программных средств систем управления приводят к аварии (или выводу КА на нерасчетную орбиту) в каждом 110-м случае запуска РН, что практически соответствует расчетам, полученным ранее для периода с 1990 по 1999 г.

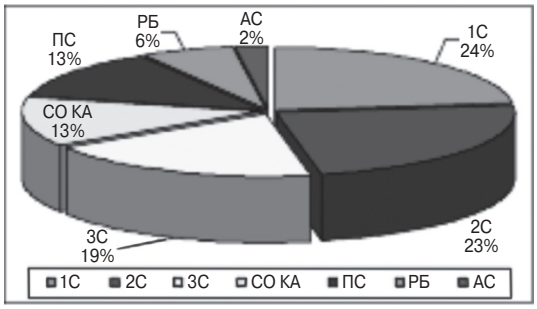


Рис. 2.17. Диаграмма причин отказов РН

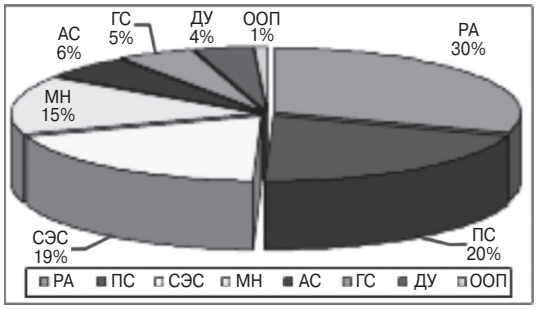


Рис. 2.18. Диаграмма причин отказов и сбоев в работе КА

Однако необходимо отметить, что в действительности этот показатель может быть существенно выше. Дело в том, что в качестве причины трети отказов ступеней РН и разгонных блоков указывается «преждевременное отключение двигательной установки». Такая формулировка причины может быть обусловлена как различными аномалиями в работе двигательной установки, так и ошибочными командами на преждевременное отключение, выданными бортовой системой управления, функциями которой является навигация, стабилизация, управление расходом топлива, отделением ступеней РН и полезной нагрузки.

Отдельный интерес для отечественных специалистов представляет авария РН «Зенит-3SL», произошедшая 12 марта 2000 г. В результате расследования причины катастрофы следственной комиссией было установлено, что авария произошла из-за логической ошибки в программном алгоритме наземной автоматизированной системы предстартовой подготовки [10]. Не была выдана обязательная команда на закрытие клапана пневмосистемы 2-й ступени. Потеря давления газа в системе, обеспечивающей работу автоматики рулевого двигателя второй ступени, превысила 60%, что привело к нерасчетному режиму работы двигателя и вызвало его остановку на 461-й секунде полета.

Разработчиками автоматизированной системы предстартовой подготовки являются специалисты ракетно-космического комплекса «Энергия» (Россия). Отмечается, что данный дефект был внесен после модернизации программного обеспечения. Кроме того, по информации ГКБ «Южное», это был уже второй (!) случай аварийного проявления данного дефекта в системе предстартовой подготовки. (Первый привел к аварии РН «Зенит-2», в рамках программы Globalstar 9 сентября 1998 г.).

Другими словами, аварии РН «Зенит-3SL» можно было бы избежать, если бы в результате расследования аварии РН «Зенит-2» была установлена и устранена истинная причина. В этом случае надежность РН «Зенит-3SL» могла бы составить 97%, что превысило бы показатели РН Ariane-5. Непосредственным следствием программного дефекта является снижение степени доверия к РН «Зенит-2/3SL» и репутации программы «Морской старт», потеря потенциальных клиентов и прибыли.

Однако программное обеспечение является не только источником отказов, но и гибким механизмом для парирования конструктивных недостатков и отказов других систем КА. Например, проблема низкого качества снимков, получаемых японским спутником космического зондирования земной поверхности Daichi (ALOS), из-за недостаточно устойчивой стабилизации спутника и высокого уровня шума была решена с помощью программной реализации функций коррекции и цифровой фильтрации на спутнике [22].

Другим показательным примером является история КА Hayabusa (Япония), запущенного для исследования астероида Итокава. После преждевременного расхода топлива маневровых реактивных двигателей (из-за перерасхода топлива при удерживании заданного направления движения КА после выхода из строя двух из трех гироскопов системы стабилизации) японским ученым удалось перепрограммировать систему управления для осуществления ориентации и стабилизации КА на основе создания реактивной тяги за счет использования запасов ксенона ионного маршевого двигателя. Таким образом, подводя итоги вышеизложенного, можно сформулировать некоторые важные выводы и рекомендации.

Наблюдаемое расширение функций и возможностей электронных бортовых систем, с одной стороны, повышает требования к их надежности, а с другой – приводит к увеличению числа дефектов и усложняет процесс их выявления, особенно в условиях внедрения операционной системы и многозадачности. Показательным примером является история внесения, проявления и исправления дефекта ПС бортовой системы управления марсохода Mars Pathfinder, связанного с проблемой инверсии приоритетов при реализации механизма блокировки доступа к информационной шине различных управляющих задач в ОС VxWorks, подробное описание которой представлено в [23].

Как показал анализ, данная проблема не была выявлена заранее из-за того, что к ее проявлению приводило редкое сочетание событий, которое не моделировалось при проведении наземного тестирования. Тем не менее, данный дефект проявился уже на следующий день после приземления Pathfinder на Марс, причем неоднократно повторялся. Вместе с тем разработчиками программных средств Mars Pathfinder были найдены и реализованы механизмы по восстановлению после отказов и сбоев из-за различных проблем, большинство из которых так и не произошло за время миссии.

Таким образом, при разработке систем управления РКТ важным является априорный анализ критичности возможных отказов и воздействующих факторов для более эффективной реализации механизмов восстановления, а также обеспечение соответствия профиля тестирования реальным условиям эксплуатации. В этой связи целесообразно применять математически обоснованные формальные методы проектирования и верификации аппаратных, программных средств и систем в целом, таких как Event-B и Model Checking в контексте требований, изложенных в стандартах ECSS.

Перспективность этого направления подтверждается также тем, что развернут специальный сайт NASA по этой проблематике, а начиная с 2009 г., NASA проводит ежегодные симпозиумы по применению формальных методов [24].

2.9. Анализ отказов бортовых систем на международной космической станции в 2000-е гг.

При анализе степени влияния бортовых систем управления на надежность ракетно-космической техники заслуживает внимания рассмотрение наиболее крупных инцидентов на международной космической станции в течение 2000–2009 гг.

Так, 21 февраля 2000 г. в американском сегменте МКС кратковременно вышел из строя главный из трех бортовых компьютеров, выполняющих командные и контрольные функции. Связь со станцией была восстановлена только путем перехода на резервный бортовой компьютер. По версии специалистов, причиной сбоя явился дефект программного обеспечения.

25 апреля 2001 г. одновременно отказали уже все три бортовых компьютера американского сегмента МКС и прервалась связь с центром управления полетом в Хьюстоне. Как выяснилось впоследствии, произошел отказ в устройстве хране-

ния информации, где были повреждены файлы на жестких дисках. (В настоящее время вместо жестких дисков применяются запоминающие устройства на твердотельных накопителях.)

4 февраля 2002 г. МКС на несколько часов потеряла управление из-за отказа бортовой электронной системы, транслирующей команды от российских датчиков, определяющих положение станции, к гироскопам американского производства. В результате на МКС отказали системы голосовой связи с Землей и системы ориентации в космическом пространстве.

Через три месяца (21 мая 2002 г.) на МКС на три часа полностью отключались системы жизнеобеспечения и почти все научные приборы. Причиной этого сбоя явилось проявление дефекта программы одного из бортовых компьютеров. 12 июня 2007 г. сбой одной из бортовых систем управления в российском сегменте оставил станцию без нормальной работы двигателей ориентации, не включалось оборудование для генерации кислорода, поглощения углекислого газа и других систем жизнеобеспечения. Более того, автоматическая перезагрузка центрального компьютера привела к ложной пожарной тревоге. Дальнейшее исследование причин неисправности показало, что первопричина заключалась в образовании конденсата на электрических контактах, что стало причиной короткого замыкания, которое в итоге привело к отправке команды отключения питания как основного, так и дублирующих компьютеров. Таким образом, даже многократное резервирование бортовых компьютеров в ряде случаев не позволяет избежать отказа, если имеются дефекты ПС или ЭКБ (ответственные за отказы аппаратурной части компьютера).

2.10. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования

Как известно, срок активного существования (САС) космических аппаратов (КА), входящих в состав современных космических систем и комплексов, составляет от 10 до 15 лет, что позволяет сократить количество запусков КА для развертывания и поддержания орбитальных группировок различного назначения.

Одним из основных показателей надежности любого КА является безотказность его функционирования.

Надежность любого изделия закладывается на этапах проектирования и изготовления, а проявляется затем в процессе испытаний и штатной эксплуатации в реальных условиях работы. Следовательно, вопросы обеспечения надежности должны предусматриваться на всех основных этапах жизненного цикла КА – проектирование, разработка рабочей документации, наземная отработка опытных образцов, летные испытания и штатная эксплуатация [25, 26].

Этапы проектирования и разработки. Проектирование аппаратуры космических систем начинается с формирования технических заданий (ТЗ) на разработку.

Вероятность безотказной работы (ВБР) бортовых систем в течение срока эксплуатации по целевому назначению должна соответствовать так называемому

«нормативному бюджету надежности» КА. В табл. 2.12 в качестве примера представлены типовые значения требуемых показателей надежности базовых элементов бортовых систем разрабатываемых КА для систем связи, телекоммуникаций и навигации связи со сроком активного существования 15 лет [26].

Следует подчеркнуть, что эти значения ВБР должны обеспечиваться конкретно на последний год активной эксплуатации (15-й или 25-й годы).

Базовый комплект аппаратуры таких КА должен проектироваться с необходимым уровнем резервирования, обеспечивающим требуемую ВБР, при этом любой единичный отказ элемента или соединительной цепи, а также несанкционированная выдача любой последовательности команд не должны приводить к отказу БА и КА.

Таблица 2.12. Вероятность безотказной работы базовых элементов бортовых систем разрабатываемых КА [26]

Элементы бортовой системы	**ВБР*, не менее**
Полезная нагрузка (ретранслятор)	0,91
Бортовой комплекс управления	0,958
Система ориентации и стабилизации	0,951
Система электропитания	0,962
Система коррекции	0,930
Система терморегулирования	0,992
Механические устройства солнечной батареи	0,9998
Механические устройства антенн	0,9999
Платформа в целом	**0,8**
КА в целом	**0,72**

* На конец САС 15,25 года.

Показатель отказа БА – это невыполнение хотя бы одной функции из приведенных в ТЗ при использовании всех резервных комплектов, блоков и цепей.

Обычно к долговечности КА предъявляются следующие требования: САС КА должен составлять не менее 15 лет, из них:

- испытания и приемка на орбите – 0,25 года (2160 ч);
- эксплуатация по целевому назначению (эксплуатационный САС) – 15 лет (131 490 ч).

Общие требования к долговечности (ресурсу) БА приводятся в ТЗ и включают в себя конкретные частные требования к ресурсу БА в дежурном или сеансном режиме функционирования с указанием конкретного ресурса работы (для дежурного режима запас – 10%) с учетом заданного минимального количества включений (для сеансного режима) при эксплуатации по целевому назначению в течение САС КА и проведения испытаний на заводе-изготовителе, при регламентных работах и на техническом комплексе.

БА должна соответствовать требуемым техническим и эксплуатационным характеристикам (сохранять их) в течение 18 лет с момента приемки и обеспечивать:

- срок сохраняемости (3,5 года), включающий производственный цикл изготовления КА (1,5 года) и хранение принятого КА (в течение 2 лет);

– ресурс на все виды испытаний оборудования в течение его срока сохраняемости – 4380 ч;
– САС в составе КА по целевому назначению – 15 лет.

Необходимые показатели надежности в условиях минимума затрат на создание аппаратуры обеспечивают:

– разработку и реализацию требований к качеству комплектующих электрорадиоизделий (ЭРИ);
– применение перспективных с точки зрения современной методологии анализа и гарантии надежности БА проектных решений.

Обеспечить качество применяемых партий ЭРИ возможно путем их отбора для предстоящего использования с помощью испытаний, проводимых в испытательных технических центрах (ИТЦ) в целях снижения интенсивности отказов за счет исключения изделий со скрытыми дефектами [27].

Для обеспечения надежности БА проводятся функциональный анализ, анализ (расчет) надежности, видов последствий и критичности отказов, анализ худшего случая, анализ электрических и тепловых нагрузок комплектующих и мер по снижению этих нагрузок, ресурса и сохраняемости; анализ безопасности [28].

По результатам исследований разрабатывается программа контроля критичных элементов.

На этапах проектирования возможно заложить, обосновать и оценить будущую надежность БА, поэтому на этих этапах особое внимание уделяется моделям подтверждения требуемой безотказности БА.

БА КА длительного функционирования относится к сложным системам, обладающим структурной избыточностью. Для таких систем можно использовать двоичную переменную для состояния БА [29]:

$$S(T_{\text{БА}}) = \begin{cases} 1 \text{ если аппаратура (система) сохраняет работоспособность в течение } T_{\text{БА}}; \\ 0 - \text{в противоположном случае,} \end{cases} \tag{2.11}$$

где $T_{\text{БА}}$ – срок службы бортовой аппаратуры.

Основной показатель надежности БА – безотказность в течение требуемого САС. При анализе вероятности безотказной работы конкретной БА рассматривают структурные схемы надежности (ССН), образованные из конечного набора последовательных и параллельных ССН определенного типа. Таким образом, характер БА с параллельными структурами определяется способом и схемой включения резерва.

Для схем с нагруженным резервом функция ВБР бортовой аппаратуры имеет вид

$$P(T_{\text{БА}};\Theta) = 1 - P\{\max_N(X^{(1)}, X^{(2)}, ..., X^{(N)}) < T_{\text{БА}};\Theta\}, \tag{2.12}$$

где N – количество параллельных элементов в бортовой аппаратуре; $X^{(j)}$ – случайная величина срока службы j-го элемента (цепи) бортовой аппаратуры (j = 1, 2, ..., N); $\max_N (X^{(1)}, X^{(2)}, ..., X^{(N)})$ – функция надежности, соответствующая максимальному

значению из N величин; θ – параметрический вектор (набор параметров, определяющий вид распределения времени безотказной работы).

Для БА, в которой применяется резервирование замещением, общая функция ВБР при абсолютной надежности работы переключателей и индикатора отказов принимает вид [26]:

$$P(T_{\text{БА}};\Theta) = P\left\{\sum_{j=1}^{N} X^{(j)} > T_{\text{БА}};\Theta\right\}. \tag{2.13}$$

Комплекс вариантов соединения элементов в ССН БА включает различные виды последовательного и параллельного соединения элементов (цепей) БА. Наибольшее распространение получили математические модели расчета надежности БА и ее электронных комплектующих (функциональных устройств, блоков, цепей), которые могут находиться в активном режиме или в пассивном (ненагруженном) состоянии. При этом применяется экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы.

Для расчета надежности $P(t)$ БА с такими комплектующими можно использовать следующие соотношения [26]:

– нерезервированный блок или последовательная цепь элементов (точка единичного отказа)

$$p(t) = e^{\lambda t}; \tag{2.14}$$

– резервированный по схеме m/n блок со всеми блоками в активном (нагруженном) режиме

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n-m} C_n^i \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^i \left(e^{-\lambda t}\right)^{n-i}; \tag{2.15}$$

– резервированный по схеме m/n блок с наличием блоков в ненагруженном режиме

$$P(t) = e^{-m\lambda t}\left[1 + \sum_{i=1}^{n-m} \frac{\left(1 - e^{-\lambda_{xp} t}\right)}{i!} \prod_{j=0}^{i-1}\left(j + m\frac{\lambda}{\lambda_{xp}}\right)\right], \tag{2.16}$$

где t – время работы блока; λ – интенсивность отказов в активном режиме; λ_{xp} – интенсивность отказов блока в режиме хранения ($x\lambda p$ =/λ10); n – количество одинаковых параллельных блоков; m – количество работающих блоков, определяющих работоспособность схемы, и тех, которые зарезервированы остальными $n - m$ блоками.

Применение высоконадежных ЭРИ позволяет использовать понижающие коэффициенты для базовых значений интенсивности отказов ЭРИ, комплектующих БА [29]. Один из подходов количественной оценки понижающего коэффициента $K_{\text{итц}}$, уточняющего значение эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_э$

ЭРИ при проведении предварительных испытаний перед установкой в БА, предложен в работах [31, 32].

Этапы наземной экспериментальной отработки. Наземная экспериментальная отработка (НЭО) БА и КА должна обеспечивать отработку и верификацию заданных в ТЗ требований к техническим характеристикам и надежности в условиях, близких к эксплуатационным. Методика отработки предполагает:

- ужесточенные режимы отработки и приемки;
- строгую последовательность при отработке (от простого к сложному) уровней элементов КА: оборудование (узлы, агрегаты, бортовая аппаратура) → бортовая система → КА (платформа и модуль полезной нагрузки), а также этапность отработки (автономные, комплексные, предварительные, межведомственные, летные испытания);
- ступенчатость норм отработки и испытаний. Под ступенчатостью норм обработки понимается следующее: чем выше уровень отработки, тем ниже квалификационные запасы для норм дестабилизирующих факторов, применяемых при отработке (температура, количество термоциклов, продолжительность испытаний, механические воздействия и др.). Таким образом, максимальным нормам и режимам отработки по воздействующим факторам подвергается оборудование КА.

В соответствии с комплексными программами экспериментальной отработки (КПЭО) на уровне автономной отработки БА проходит следующие виды испытаний:

- лабораторно-отработочные (ЛОИ);
- конструкторско-доводочные (КДИ);
- предварительные (ПрИ);
- испытания на специальные воздействия (при необходимости);
- ресурсные (при необходимости).

Требования к нормам испытаний. Тестируемый комплект БА КА разработки НПО ПМ с САС 10–15 лет подвергают отработочным и предварительным испытаниям на внешние воздействия:

- механические (режимы в соответствии с ТЗ);
- температурные (термовакуумные), в том числе циклические, в расширенном на ±10 °С относительно эксплуатационного диапазоне температур, количество термоциклов не менее 20, из них не менее 4 в вакууме;
- трехкратное воздействие холодного старта (при минимальной отрицательной температуре с запасом 10 °С);
- уменьшение давления для БА с напряжением 100 В и более, при этом холодный старт и спад давления могут совмещаться с температурными (термовакуумными) испытаниями.

В дальнейшем штатные комплекты БА в процессе изготовления и приемки подвергаются следующим видам испытаний [26]:

- электротермотренировке длительностью не менее 300 ч, включая 10 термоциклов в диапазоне температур, расширенном на ±10 °С;
- механическим воздействиям (режимы в соответствии с ТУ);

– температурным (термовакуумным) воздействиям в расширенном на ±5 °С температурном диапазоне;
– на спад давления для БА с напряжением 100 В и более (на этапе приемосдаточных испытаний для первого штатного комплекта БА, последующие штатные комплекты испытывают при необходимости исходя из условий доработок);
– однократным на холодный старт (при минимальной отрицательной температуре с запасом 5 °С);
– на подтверждение безотказной работы БА во включенном состоянии в течение последних 100 ч работы.

В целом наземная отработка БА представляет собой процесс с обратными связями на каждом уровне, направленными на обеспечение текущей эффективности отработки БА по результатам всех видов испытаний на всех уровнях отработки [33]. Структурная схема процесса разработки КА и его составных частей с учетом этапности отработки и применяемых моделей для нее приведена на рис. 2.19 [26]. Современные КА с заданными показателями качества, в том числе надежности, создают в сжатые, определенные контрактом сроки с минимальными финансовыми затратами, поэтому необходимо постоянно оптимизировать объемы наземной отработки.

В НПО ПМ реализуются перспективные подходы к оптимизации объемов отработки КА и БА [34, 35] с использованием таких направлений оптимизации, как:
– сокращение номенклатуры изготавливаемой материальной части аппаратуры для отработки БА и составных элементов за счет комплексирования различных видов испытаний на одной материальной части;
– снижение стоимости работ за счет замены физических отработочных моделей БА программными моделями и использования оборудования и программного обеспечения, разработанных в рамках различных проектов (межпроектная унификация);
– снижение стоимости и сроков разработки за счет сокращения этапов автономной отработки БА (например, этапа ЛОИ БА, специальных и ресурсных испытаний БА, если это подтверждено расчетами);
– совмещение части отработочных испытаний с контрольными испытаниями штатных образцов;
– оптимизация этапов разработки и производства (исключение малоинформативных видов испытаний на основе оценки особенностей конструктивного исполнения БА; совмещение видов испытаний, имеющих близкие характеристики результатов воздействия на БА или дающих при совмещении более высокую информативность результатов; исключение дублирующих испытаний – выявляющих одни и те же свойства БА при различных видах воздействия; замена испытаний аппаратуры в целом испытаниями ее составных частей, фрагментов или макетов; сокращение продолжительности испытаний (оптимизация времени воздействия), в том числе с применением ускоренных методов; эквивалентная замена одного вида испытаний другим; замена категорий испытаний: квалификационных, периодических, типовых – отбраковочными).

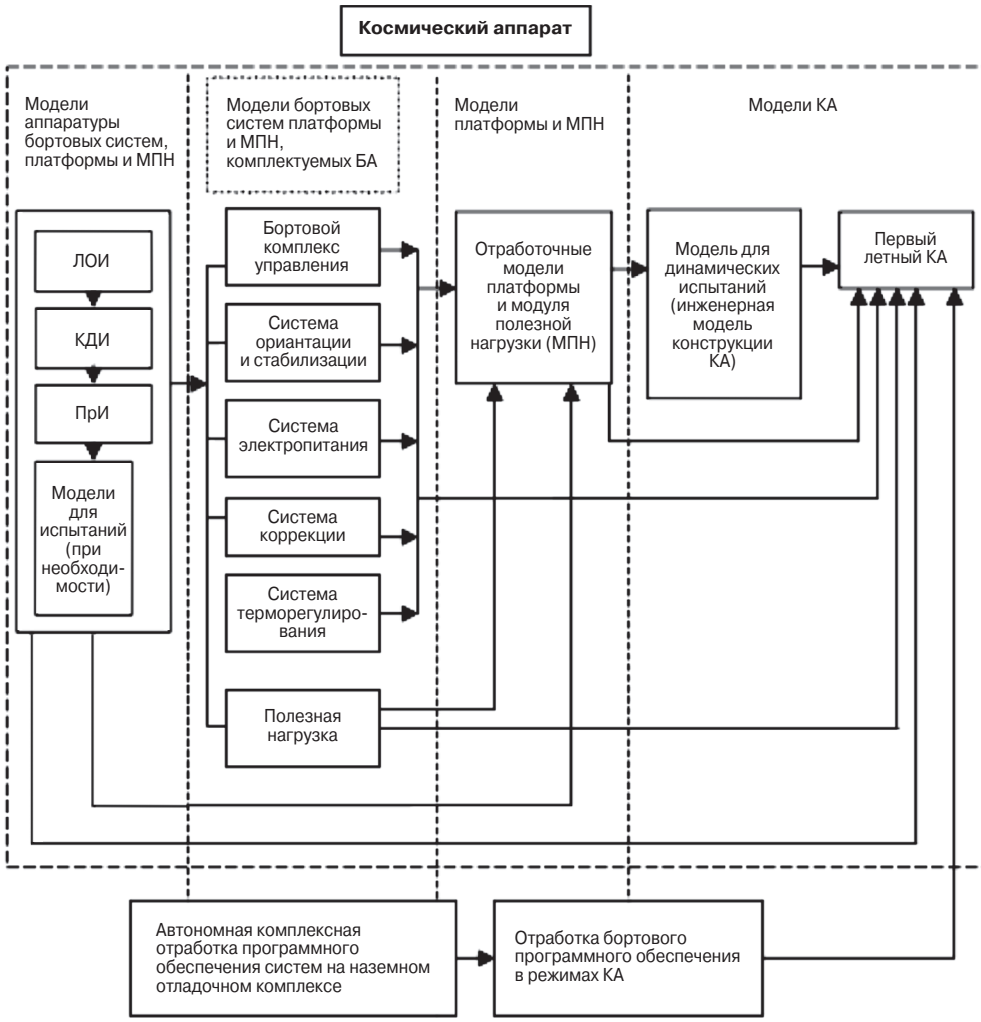


Рис. 2.19. Примерная структурная схема процесса разработки КА [26]

Критерий обоснованности любой оптимизации – сравнительная оценка исходных и оптимизированных показателей. В [36] предложен подход к количественной оценке эффективности оптимизации отработки БА как оценке и обеспечению текущей эффективности наземной отработки БА по результатам всех видов испытаний на всех уровнях отработки, основанной на сравнении ее с базовым или допустимым уровнем эффективности.

Надежность БА в процессе заводских испытаний и при эксплуатации характеризуется выявленными отказами, относящимися к различным признакам деления. Виды отказов БА подразделяются на конструктивные, производственные, эксплуатационные, отказы ЭРИ.

Показатель безотказности типа БА по любому виду отказов можно оценить по модели, отражающей структуру заводских испытаний БА, а также по количе-

ству отказов вследствие конкретной причины возникновения (кроме эксплуатационных) на этапах заводских испытаний.

Заводские испытания БА и их комплектующих включают:

– входной контроль и дополнительные испытания партий ЭРИ в ИТЦ;
– первое включение БА после изготовления и регулировку;
– электротермотренировку;
– предъявительские испытания;
– приемо-сдаточные испытания;
– ресурсные, типовые, периодические (при необходимости);
– испытания в составе бортовых систем;
– испытания в составе КА (расстыкованного и состыкованного).

Для определения безотказности по отказам ЭРИ в число испытаний дополнительно включают результаты входного контроля и дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ (отбраковочные, диагностический неразрушающий контроль, выборочный разрушающий физический анализ).

Общая функция надежности БА по результатам наземной отработки для случайных величин дискретного типа (т.е. количества отказов БА вследствие различных причин на различных этапах испытаний) имеет вид

$$P_{\text{БА}} = \prod_{i=1}^{r} F_i\left(K, M, N_0^*, n_{\text{итц}}^*, n_{\text{ij}}, p_{\text{ij}}, p_{\text{итц}}^*\right), \tag{2.17}$$

где F_{i} – функция безотказности по i-му виду причины отказа; K – количество изготовленных БА определенного типа; M – количество видов заводских испытаний БА; N_0^* – объемы исходных партий ЭРИ определенных типов, поступивших на входной контроль в ИТЦ (для отказов ЭРИ); $n^*_{\text{ИТЦ}}$ – количество дефектных и потенциально ненадежных ЭРИ конкретной партии, отбракованных в ИТЦ (для отказов ЭРИ); $p^*_{\text{ИТЦ}}$– эффективность испытаний партий ЭРИ в ИТЦ (для отказов ЭРИ); n_{ij} – количество отказов БА по i-му виду причины на j-м виде испытаний; p_{ji} – эффективность j-го вида испытаний по i-му виду отказа; r – количество видов причин отказов (конструктивные, производственные).

Методы определения общей надежности БА и доверительных интервалов для случая независимых испытаний и отказов БА по разным причинам возникновения предложены в работе [37].

Этапы летных испытаний и штатной эксплуатации. Общий процесс верификации требуемых характеристик БА и КА включает летные испытания и проверку БА в процессе приемки КА на орбите. При этом должны обеспечиваться успешность летных проверок на соответствие характеристик БА требованиям ТЗ и отсутствие конструктивных и производственных отказов и неисправностей, связанных с принципиальными конструкторскими ошибками и недостаточной проработанностью технологии изготовления и испытаний БА. Дополнительно учитываются:

– результаты функционирования БА на орбите (отказы, наработка, перерывы, значения определяющих параметров);
– расчетные и расчетно-экспериментальные оценки надежности БА и ее элементов, полученные на этапах проектирования и уточненные по результатам испытаний и эксплуатации;

– объемы отработочных испытаний (число образцов, наработка, отказы БА);
– виды и режимы отработочных испытаний БА и КА в целом;
– результаты нормальных и ускоренных ресурсных испытаний БА;
– результаты диагностического и прогнозирующего контроля ЭРИ, используемого в БА КА.

Для оценки и прогнозирования показателей надежности БА при летных испытаниях и штатной эксплуатации разработан программно-методический комплекс [38, 39], включающий систему анализируемых и прогнозируемых показателей надежности и технического состояния БА и КА, алгоритмы и методы анализа и прогнозирования их работоспособности при орбитальном полете с использованием параметрических, непараметрических и гибридных моделей обработки разнотипных статистических данных малого объема. Рассмотренный комплекс методов поэтапного обеспечения надежности БА на различных этапах жизненного цикла реализован при создании КА SESAT, «Экспресс-АМ», ГЛОНАСС-К, платформы «Экспресс-1000», на которых подтверждена возможность создания аппаратов со сроком активного существования 10–15 лет и показателями безотказности на уровне лучших отечественных и зарубежных образцов.

Литература к главе 2

1. Железняков А.Б. Взлетая, падала ракета. – СПб.: Система, 2003. – 220 с.
2. Харченко В.С., Скляр В.В., Тарасюк О.М. Анализ рисков аварий ракетно-космической техники: эволюция причин и тенденций // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – № 3 (3). – С. 135–149.
3. Hansen M. Report of the Defense ScienceBoard Task Force on Defense Software / M. Hansen, R.F. Nesbit. – Washington: Defense Science Board, 2000. – 59 p.
4. Тарасюк О.М., Харченко В.С., Скляр В.В. Безопасность аэрокосмической техники и надежность компьютерных систем // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 1 (9). – С. 66–80.
5. А.В. Горбенко, С.А. Засуха, В.И. Рубан, О.М. Тарасюк, В.С. Харченко. Безопасность ракетно-космической техники и надежность компьютерных систем: 2000–2009 гг. / ISSN 1727-7337. Авиационно-космическая техника и технологии. – 2011. – № 1 (78). – С. 9–20.
6. Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. – МО Украины, 1996. – 402 с.
7. Харченко В.С., Скляр В.В., Тарасюк О.М. Анализ рисков аварий для ракетно-космической техники: эволюция причин и тенденций // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Х.: НАКУ «ХАІ». – 2003. – Вип. 3. – С. 135–149.
8. Айзенберг Е.Я., Ястребенецкий М.А. Сопоставление принципов обеспечения безопасности систем управления ракетами-носителями и атомными электростанциями // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т. 8.– № 1.– С. 55–60.
9. Харченко В.С., Ястребенецкий М.А., Скляр В.В. Новые информационные технологии и проблема безопасности информационно-управляющих систем АЭС// Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – № 2. – С.18–29.
10. Харченко В.С. Выбор технологий проектирования и базовых архитектур для дефектоустойчивых управляющих и вычислительных систем реального времени // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3. – № 5–6. – С. 109–119.

11. Лабенский В.Б. Применение корреляционно-регрессионного анализа при планировании работ в ракетно-космической отрасли // Проблемы управления и информатики. – 2001. – № 4. – С. 101–110.
12. Згуровский М.З. и др. Информационный подход к анализу и управлению проектными рисками // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 4. – С. 148–156.
13. www.novosti-kosmonavtiki.ru
14. www.planet4589.org/space/jsr/jsr.html
15. astro.websib.ru/kosm/sprav/itog/i_200*.htm
16. www.cosmoworld.ru/spaceencyclopedia/
17. www.insur-info.ru/aerospace-insurance/
18. www.astronautix.com
19. news.cosmoport.com/200*/01/
20. 44 http://rocketpolk44.narod.ru/kosmos/kosm-av.htm
21. en.wikipedia.org/wiki/200*_in_spaceflight
22. Utilization of Data Acquired by «DAICHI» (Advanced Land Observing Satellite) for Maps [Электронный ресурс] / JAXA 2008-01-16. – Режим доступа: http://www.jaxa.jp/press/2008/01/20080116_sac_daichi_e.html.
23. Jones M.B. What Happened on Mars? [Электронный ресурс] / M.B. Jones// Microsoft Corporation.–Режим доступа: http://research.microsoft.com/en-us/um/people/mbj/mars_pathfinder/
24. The 1st NASA Formal Method Symposium [Электронный ресурс]/ NASA. – Режим доступа: http://ti.arc.nasa.gov/events/nfm09/
25. Авария из-за ошибки [Электронный ресурс] / Интерфакс. – Режим доступа: http://www.interfax.ru/ print.asp?sec=1446&id=169821.
26. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – Т. 51. – № 8. – 2008. – С. 5–12.
27. Урличич Ю.М., Данилин Н.С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. – М.: Макс ПРЕСС, 2003. – 204 с.
28. МУ 154-24-2001. Проведение анализов по обеспечению надежности оборудования, систем и космических аппаратов. – Железногорск: НПО ПМ, 2001. – 35 с.
29. Патраев В.Е. Модель надежности космического аппарата // САКС-2004. Тезисы доклада Междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск: СибГАУ, 2004.
30. Надежность ЭРИ: Справочник. – М.: Изд-во 22 ЦНИИ МО, 2002.
31. Федосов В.В., Патраев В.Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 10. – С. 50–55.
32. Федосов В.В., Патраев В.Е. Оценка влияния разрушающего физического анализа на характеристики безотказности изделий микроэлектроники, устанавливаемых в бортовую аппаратуру космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – № 1. – С. 37–40.
33. Система менеджмента качества. Этапность наземной экспериментальной отработки изделий предприятия. Виды отработочных и контрольных испытаний. Общие требования. – Железногорск: НПО ПМ, 2007. – 52 с.
34. РД В 319.02.25-2000. КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оптимизации испытаний на этапах разработки и производства.

35. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. Оптимизация объемов отработки космических аппаратов со сроком активного существования 10–15 лет // Двойные технологии. – 2004. – № 3. – С. 66–80.
36. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. Оценка эффективности оптимизации экспериментальной отработки космических аппаратов навигации и связи // Материалы Всеросс. науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию запуска первого КА «Глонасс». – Красноярск: СибГАУ, 2007. – С. 35–40.
37. Патраев В.Е., Федосов В.В. Оценка надежности бортовой аппаратуры по результатам дополнительных отбраковочных испытаний комплектующих электрорадиоизделий и заводских испытаний бортовой аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 8. – С. 46–49.
38. Максимов Ю.В., Патраев В.Е. и др. Технический отчет № 510-4951-02 по ОКР «Надежность КА». – Железногорск: НПО ПМ, 2002. – 163 с.
39. Патраев В.Е., Копелев В.Б. Отчет о НИР «Потеха». – Железногорск: НПО ПМ, 2003. – 237 с.

ГЛАВА 3

МИКРОЭЛЕКТРОННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

3.1. Классификация современных микропроцессоров

Поскольку ракетно-космическая промышленность относится к одному из приоритетных направлений развития науки и техники, она широко использует все достижения современной микроэлектроники. Это относится как к собственно электронной компонентной базе (ЭКБ), которая используется для построения всех бортовых и наземных систем управления, так и к тем устройствам КА, где достижения микроэлектроники раньше не применялись. Это различного рода датчики (сенсоры), гироскопы, фотоприемные устройства (ФПУ), тепловизоры, теле- и видеокамеры, визуализаторы ИК-излучений, приборы ночного видения и многое другое. В частности, в конце первой главы было детально рассмотрено одно из таких, ранее невозможных, приложений – сверхминиатюрный ракетный двигатель на основе MEMS-технологий для микро- и наноспутников и других малых КА.

На рис. 3.1 представлена упрощенная структура основных направлений ЭКБ, используемой в РКТ.

Здесь присутствует достаточно широкий спектр микроэлектронных изделий, основные их них – различные типы памяти, микропроцессоры, логические и интерфейсные микросхемы, микросхемы для источников питания и многое другое.

Но основным микроэлектронным компонентом, от которого зависят функциональные характеристики, производительность, потребляемая мощность проектируемого устройства, являются микропроцессоры (процессоры), особенности и технические характеристики которых необходимо рассмотреть более подробно.

Микропроцессор (МП) – это программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненное на одной или нескольких (комплекте) интегральных схемах с высокой степенью интеграции электронных элементов (БИС, СБИС) [1]. МП играет роль процессора в цифровых системах различного назначения. Это системы обработки информации (компьютеры), системы управления объектами и процессами, информационно-измерительные системы и другие виды систем, используемых в промышленности, специальной (военной) и бытовой технике, аппаратуре связи и многих других областях применения. Именно микропроцессоры определяют «интеллект» современных наземных и бортовых аппаратных средств РКТ.

Существует много подходов в вопросе классификации микропроцессоров по различным критериям и параметрам, но общепризнанными считаются три направления развития микропроцессоров (рис. 3.2).

Рис. 3.1. Структура основных направлений ЭКБ для ракетно-космической техники

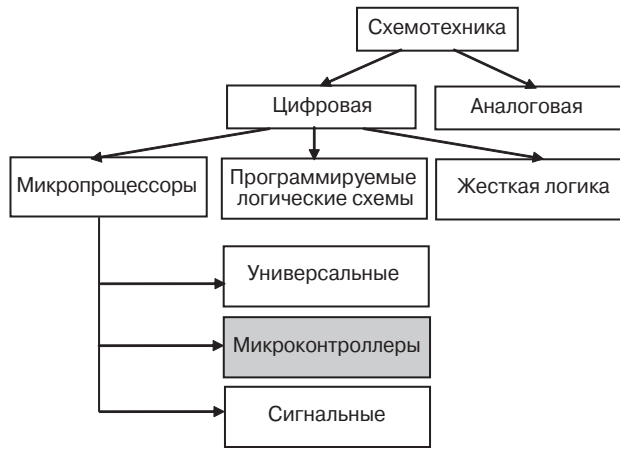


Рис. 3.2. Классификация микропроцессоров по областям применения [1]

В зависимости от используемой схемотехники различают два класса микропроцессоров – цифровые и аналоговые, из-за ограниченности объема книги рассмотрим ниже только цифровые МП.

Универсальные микропроцессоры (МП) используются для построения собственно вычислительных устройств**:** персональных ЭВМ, рабочих станций, вычислительных комплексов, бортовых систем управления параллельных суперЭВМ. В них используются самые передовые технологические, системотехнические, схемотехнические решения. Основной характеристикой этих микропроцессоров является наличие встроенных развитых устройств для эффективной реализации операций с плавающей запятой над 32- и 64-разрядными и более длинными операндами.

Микроконтроллеры (МК) являются наиболее массовым представителем изделий микропроцессорной техники. Они используются во всех встроенных системах управления, в том числе как в бытовых приборах, так и в специальной (военной и космической) технике. В МК, в отличие от универсальных микропроцессоров, максимальное внимание уделяется их габаритам, стоимости и потребляемой энергии. Интегрируя на одном кристалле, высокопроизводительный процессор, память и набор периферийных устройств, микроконтроллеры (раньше они назывались однокристальными микроЭВМ) позволяют с минимальными затратами реализовать широкую номенклатуру систем управления различными объектами и процессами. Использование микроконтроллеров в бортовых системах управления и обработки информации обеспечивает исключительно высокие показатели эффективности при столь низкой стоимости, что микроконтроллерам практически нет альтернативной элементной базы для построения качественных и дешевых систем. Во многих частных применениях бортовая система может состоять только из одного МК.

Сигнальные процессоры предназначены для обработки в реальном времени цифровых потоков, образованных путем оцифровывания полученных от датчиков аналоговых сигналов. Они используются для решения задач, которые традиционно решала аналоговая схемотехника. К сигнальным процессорам предъявляются специфические требования [2]. От них требуются максимальное быстродействие, малые габариты, легкая стыковка с аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, большая разрядность обрабатываемых данных и небольшой (минимальный) набор математических операций, обязательно включающий операцию умножения-накопления и аппаратную организацию циклов. В этих процессорах тоже важны такие параметры, как стоимость габариты и потребляемая мощность, но здесь приходится мириться с большими значениями этих характеристик по сравнению с микроконтроллерами.

Каждый из представителей микропроцессоров классифицируется также по такому параметру, как **архитектура**.

Термин «архитектура», согласно стандарту ISO 15704, означает описание, т.е. модель основной компоновки и взаимодействия частей системы. Под архитектурой микропроцессора понимается описание способа организации и взаимодействия частей (компонентов) процессора, обусловленный характеристиками этих компонент, принципами их проектирования, связи и развития. Архитектура включает описание логических (программных), функциональных и физических компонент организации МП в процессе обработки данных. Описание логических (программных) компонент охватывает набор команд, способы адресации, поддерживаемые типы ветвлений и переходы, способы обращения и именования реги-

стров микропроцессора. Описание функциональных и аппаратных компонент МП включает описание количества и разрядности компонент, способов связи между компонентами при обмене данными, командами и управляющими сигналами, описание способов передачи синхросигналов, временные диаграммы работы компонентов МП, описание компоновки, то есть физического размещения компонента на кристалле.

Другими словами, под архитектурой МП понимается прежде всего его представление с точки зрения программиста. В первом приближении архитектура МП – это набор его команд. От выбора архитектуры зависит производительность, а также время разработки и стоимость устройства.

В архитектуре современных микропроцессоров и микроконтроллеров разных компаний-изготовителей имеется много общего, что ведет к возможности унификации их архитектур, что особенно важно для РКТ, характеризирующейся крайне низкими объемами потребления ЭКБ по сравнению с другими отраслями. В настоящее время на мировом рынке сформировались архитектуры микроконтроллеров, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Основные архитектуры современных микроконтроллеров

Разрядность МК	Архитектура МК			
8-битные	MCS-51	AVR	CPU08	PIC
16-битные	C166	MAXQ	MSP-430	F2MC-16LX
32-битные	68000	AVR32	ARM	MIPS

ОАО «НИИЭТ» г. Воронеж	ОАО «ИНТЕГРАЛ» г. Минск	ПКК «Миландр» г. Зеленоград	НИИСИ РАН г. Москва
MCS-51: серия 1830 – 1830ВЕ31 1830ВЕ51 1830ВЕ32 серия 1882 – 1882ВЕ53 → 1882ВМ1Т разрабатывается (ОКР «Сложность-2»)	**MCS-51:** серия 1880 – 1880ВЕ31 1880ВЕ51 1880ВЕ81У → 1880ВЕ1У разрабатывается (ОКР «Двина 51АС») IN80C31/51, IN87C51	**PIC:** серия 1886 – 1886ВЕ1У 1886ВЕ2У 1886ВЕ5У **ARM Cortex-M3:** серия 1986 –1986ВЕ91Т 1986ВЕ92У 1986ВЕ93У 1986ВЕ9 4Т	**MIPS:** Ряд КОМДИВ-32: Аналог MIPS R3000 1В812 1890ВМ1Т 1890ВМ2Т 5890ВЕ1Т 1900ВМ2Т 1907ВМ1Т
Mega AVR (среднее): серия 1887 – 1887ВЕ4У → 1887ВЕ7Т 1887ВЕ8Т разрабатываются (ОКР «Сложность-5»)	**ClassicAVR (младшее):** IN90S2313 IN90S2323 } не производятся IN90S2333 серия 1881 → 1881ВГ4Т разрабатывается (ОКР «Двина-135»)	**ARM Cortex-M0:** серия 1986 –К1986ВЕ21 **ARM Cortex-A9:** Планируется к разработке	Ряд КОМДИВ-64: Аналог MIPS RM7000 1890ВМ 3Т 1890ВМ5Ф 1890ВМ6Я 1890ВМ7Я
C166: серия 1887 – 1887ВЕ3Т → 1887ВЕ6Т разрабатывается (ОКР «Обработка-7»)			
ARM Cortex-M4F: Разрабатывается 32-разрядный МК под задачи управления электроприводом			

На базе **лицензированного** ядра C166SV1.2 фирмы Infineon Technologies

На базе **лицензированных** ядер Cortex фирмы ARM

На базе **лицензированного** ядра фирмы MIPS Technology Inc.

ОАО «Ангстрем» г. Зеленоград

Аналог **MIPS-1**-серия Л1876ВМ1, Л1876ВМ2

В этой же таблице представлены с перечнем своих изделий класса МК все основные отечественные (российские и белорусские) фирмы, связанные с микроэлектроникой и использующие в своих разработках приведенные архитектуры микроконтроллеров.

Прежде чем более детально рассматривать характеристики и особенности отечественных МП и МК, целесообразно хотя бы кратко перечислить микропроцессоры иностранных изготовителей, которые использовались при проектировании бортовой РЭА для наиболее известных космических миссий.

3.2. Процессоры для электронных систем управления иностранными космическими аппаратами

3.2.1. Бортовые процессоры иностранных космических аппаратов

При создании любого космического аппарата используются сотни типономиналов различных микросхем в интегральном и гибридном исполнении, а также широкий спектр дискретных полупроводниковых приборов различной мощности и с различными частотами, вплоть до диапазона сверхвысоких частот (СВЧ).

Для разработчиков электронных систем управления КА прежде всего представляет интерес выбор типа центрального процессора, под работу которого затем проектируется вся логика управления, схемы накопления и обработки данных, различные интерфейсы и т.п.

Так, на одном из первых «интеллектуальных» американских КА Space Shuttle в 1981 году использовались одновременно два типа центральных процессоров: Intel 8086 и RCA 1802, причем последний использовали только для управления информационными экранами (в качестве контроллера дисплея).

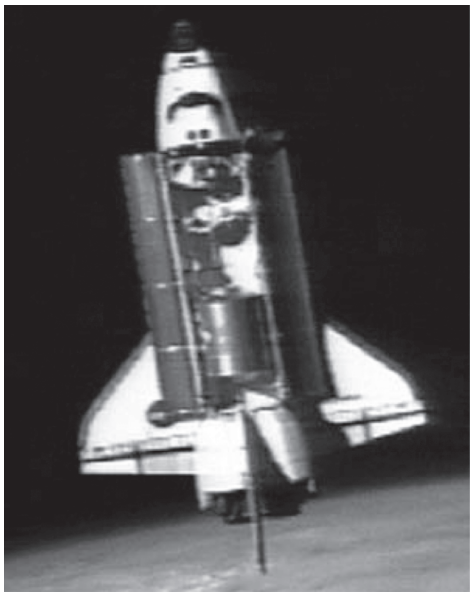


Рис. 3.3. Корабль Space Shuttle

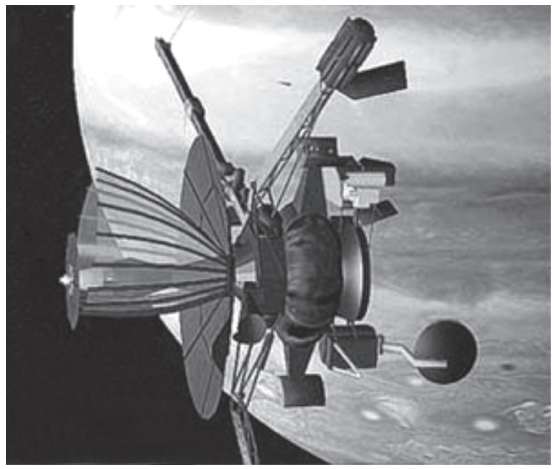


Рис. 3.4. Корабль Galileo

Через два года вместо процессора 8086 были использованы уже его более развитые модификации с увеличенной разрядностью обработки данных – 80386, 80386S. В новых бортовых системах управления использовались компьютеры АРА-101S с производительностью 1,2 MIPS, а также «древняя» память на ферритовых ячейках как самая устойчивая к воздействию космических излучений.

На КА Galileo (1989 г.) также использовалась эта «пара» – 80386 и RGA 1802.

В БСУ космического телескопа Hubble (Hubble Space Telescope) в 1990 г. использовали 8-разрядный процессор DF-224 (всего потребовалось 390 штук), которые из-за частых сбоев разработчики РЭА впоследствии заменили на Intel 80486 (они успешно доработали на борту до полного завершения миссии в 2010 г.).

Рис. 3.5. Hubble Space Telescope

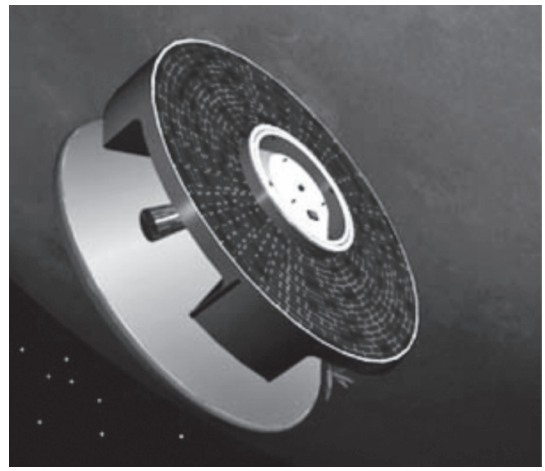


Рис. 3.6. Космический аппарат Pathfinder

Следует особо отметить, что все эти процессоры в то время не были специально разработаны для космических применений, но прошли циклы жесткого отбора и разнообразных технологических испытаний.

Наконец в 1996 г. для аппарата Pathfinder был уже использован специально разработанный для космических применений по контракту с IBM фирмой British Aerospace Electronics процессор BAE RAD 6000. Этот процессор подтвердил высокую надежность работы в бортовой аппаратуре КА и впоследствии широко использовался в других космических аппаратах.

В запущенном в этом же 1996 г. широко известном КА Sojourner был использован этот же тип процессора, а также еще в одном КА этой серии – новый для того времени процессор FAST (табл. 3.2).

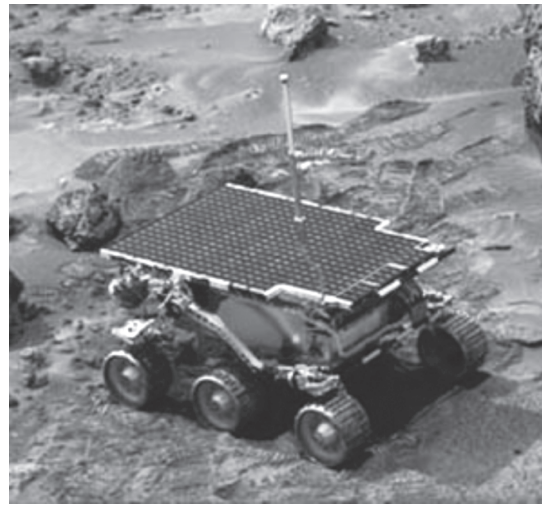


Рис. 3.7. Космический аппарат Sojourner (на Марсе)

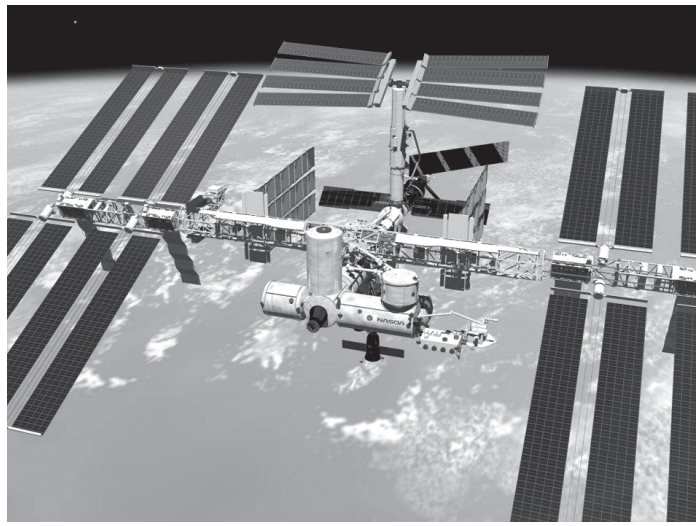


Рис. 3.8. Международная космическая станция

Рис. 3.9. Космический аппарат Spirit

С 1998 г. на международной космической станции (International Space Station) во всех основных электронных системах широко использовались модернизированные версии процессоров фирмы Intel:80386SX-20W и сопроцессор 80C387.

Начиная с 2004 г. в космических проектах Spirit и Oppurtunity уже достаточно широко используется доработанная до рабочей частоты 25МГц версия BAE RAD 6000.

В сводной табл. 3.2 представлены и другие типы микросхем центральных процессоров, используемых в менее известных КА и проектах.

Таблица 3.2. Используемые процессоры в зарубежных КА

Название проекта	**Тип процессора**
Cassini	1750A
Cluster (ESA)	1750A
MSTI-1,2	1750A
Rosetta (ESA)	1750A
EOS Terra	1750A (2)
EOS Aqua	1750A (4) & 8051 (2)
EOS Aura	1750A (4) & 8051 (2)
Clementine	1750A, 32 bit RISC
MSTI-3	1750A, R-3000
Pluto Express	32 bit RISC
Sampex	80386, 80387
SMEX	80386, 80387
SWAS	80386, 80387
TRACE	80386, 80387
WIRE	80386, 80387
FUSE	80386, 80387, 68000
Surrey MicroSat	80386EX (2)
UoSat-12	80386EX (3)
FAST	8085 (2)
HealthSat-II	80c186 (2), 80c188
PoSat-1	80c186, TMS320C25, TMS320C30
Galileo AACS	ATAC (bit slice) and 1802
SPOT-4	F9450
EO-1/WARP	Mongoose V
IceSat Glas	Mongoose V
MAP	Mongoose V, UTMC 69R000
CGRO	NSSC-1
Topex/Poseidon	NSSC-1
UARS	NSSC-1
EUVE	NSSC-1, 1750A
HST	NSSC-1/386, DF-224->486
Coriolis	RAD6000
Deep Space-1	RAD6000
Gravity Probe B	RAD6000
HESSI	RAD6000
MARS 98	RAD6000
SIRTF	RAD6000
SMEX-Lite	RAD6000
Swift	RAD6000
Triana	RAD6000
MightySat-II	TMS320C40 (4)

Рассмотрим более подробно основные технические характеристики микросхем процессоров, используемых в бортовых системах управления иностранными КА и производимых наиболее известными фирмами, сотрудничающими с NASA и Европейским космическим агентством.

3.2.2. Фирма Aitech Defense Systems

Среди последних разработок этой фирмы следует отметить одноплатный компьютер S950.

Особенностями этого прибора, выполненного в типоразмере 3U CompactPCI, является устойчивость к радиации и наличие энергосберегающих режимов работы [3]. Оптимизированный для применения в космической технике компьютер S950 в обычном режиме потребляет 13,5 Вт; в режиме пониженного потребления мощность уменьшается до 10 Вт, а в спящем режиме – не превышает 8 Вт. Тактовая частота микропроцессора PowerPC 750FX, используемого в S950, равна 733 МГц.

На плате установлено 128 МБ памяти SDRAM, организованной в схему с тройным побитным голосованием, и 1 МБ загрузочной флэш-памяти с двукратным резервированием. Кэш-память первого уровня объемом 32 КБ имеет проверку четности тегов и данных, а кэш-память второго уровня объемом 512 КБ снабжена контролем четности тегов и схемой коррекции ошибок (ECC) данных. Схема ECC и контроллер памяти реализованы силами программируемых вентильных матриц (FPGA), устойчивых к радиации. Под пользовательские нужды отведено 64 МБ флэш-памяти, два стандартных последовательных порта, четыре независимых 32-разрядных счетчика/таймера, аппаратный сторожевой таймер. Компьютер оборудован посадочным местом для 32-разрядной мезонинной платы (PMC) и 32-разрядным интерфейсом CompactPCI (33,3 МГц).

Поскольку S950 имеет надежную защиту от однократных сбоев (single event upset, SEU), он хорошо подходит для космических аппаратов, где на него могут быть возложены задачи навигации, управления и сбора данных.

Также среди крупнейших зарубежных разработчиков и поставщиков ЭКБ КН следует указать корпорацию Microsemi, объединившую в себе такие известные компании, как Actel (Microsemi SoC Product Group), White Electronic Designs (Microsemi Power and Microelectronics Group), Zarlink Incorporated, ASIC Advantage Inc., Arxan Defence Systems, Endwave, Spectrum Microwave, Maxim Integrated Products, Inc., Symmetricom, Inc. В последние годы эта компания становится глобальным лидером в области производства и комплексных поставок компонентов для бортовой электроники сложных систем специального назначения.

На сегодняшний день в ассортименте предлагаемой продукции есть как уже известные [4] ПЛИС высокой надежности, в том числе и с пониженным потреблением, так и микросхемы оперативной и энергонезависимой памяти, 32-разрядные процессоры семейства PowerPC, гибридные микросхемы специального назначения, а также широкий выбор радиационно-стойких электронных компонентов низкой интеграции: ключи, регуляторы, транзисторы и диоды, радиочастотные компоненты. Кроме этого Microsemi выпускает SATA flash накопители высокой надежности и FLASH NAND BGA микросхемы объемом до 32 Гб с поддержкой PATA интерфейсов.

Здесь следует выделить подразделение «систем-на кристалле» корпорации Microsemi (Microsemi SoC Products Group), которое было основано как корпорация Actel в 1985 году и на протяжении многих лет специализируется в области разработки и производства процессоров, программируемых логических интегральных схем для авиационного, космического и военного применения. Помимо радиационно-стойких высоконадежных микросхем подразделение поставляет многократно программируемые матрицы с высокими характеристиками по энергопотреблению и надежности, в том числе ПЛИС с аналоговыми модулями.

Как следует из сайта компании [4], более 4500 компаний по всему миру, и, в том числе, свыше 300 предприятий в России, активно используют продукцию этого подразделения.

Продукция Microsemi SoC Products Group сегодня применяется в технике специального назначения для космической аппаратуры, авиационного бортового оборудования и систем управления атомными электростанциями.

В частности, эта компания рекламирует следующие преимущества своих ПЛИС Microsemi SoC перед стандартными SRAM FPGAs:

- высокие параметры радиационной стойкости;
- встроенное тройное резервирование каждого логического элемента со схемой аппаратного мажоритирования;
- подтвержденные в сотнях реализованных НАСА проектов параметры надежности;
- готовность к работе по включению питания;
- низкое энергопотребление;
- полная защита конфигурации от копирования;
- упрощение и уменьшение размеров системного решения.

Компоненты Microsemi предназначены для применения на борту космических аппаратов различных классов: от микроспутников до космических станций. Несколько сотен космических миссий в настоящее время используют радиационно-стойкие ПЛИС Microsemi в самых различных узлах:

- астродатчики и гироскопы;
- бортовые вычислители;
- системы телеметрии;
- цифровые фильтры;
- цифровые приемопередатчики;
- контроллеры памяти и накопителей;
- узлы управления оконечных устройств;
- научная аппаратура полезной нагрузки.

Высокая радиационная стойкость и надежность позволяют использовать ПЛИС Microsemi в ответственных узлах управления ядерными энергетическими установками в условиях жесткого нейтронного облучения и высоких температур.

Действительно, появление ПЛИС с большим количеством логических элементов (до 4 миллионов) позволяет разрабатывать сложные «системы-на-кристалле», выполняющие большой объем задач вычисления и управления, заменяя массивную аппаратуру предыдущих поколений.

Активному внедрению ПЛИС в разработки НАСА способствует доступность значительного количества готовых модулей «IP ядер» позволяющих быстро реализовывать решения, оптимальные для конкретной задачи. Так, например, готовые решения для интерфейсов PCI, МКО, Ethernet, USB, SpaceWire и широкий выбор процессорных ядер (ARM, «51», «186», LEON и другие) позволяет создавать не только однокристалльные вычислительно-управляющие контроллеры для широкого спектра оконечных устройств и интеллектуальных сенсоров, но и различные вычислители и многое другое.

ПЛИС Microsemi можно найти практически в любом современном ракетоносителе гражданского и военного назначения, а также в подавляющем большинстве космических аппаратов.

С 1996 года ПЛИС Microsemi применяются в России в спутниках системы ГЛОНАСС, «Экспресс-АМ», «Коронас», «Луч-5», «Гонец-М», «Спектр-УФ», «Ресурс-П», «Метеор-М», «Электро-Л», «ГЕО-ИК-2», космических кораблях «Союз», «Прогресс» и многих других, а также в многочисленных проектах наземной аппаратуры высокой надежности.

3.2.3. BAE Systems

Компания BAE Systems занимается разработкой и производством изделий для военных и космических применений начиная с 1980-х гг. Собственный производственно-технологический центр, на котором аттестованы радиационно-стойкие субмикронные технологические процессы, расположен в шт. Виржиния, США. За десятилетний период компания разработала целый ряд микропроцессоров для космических применений, перечень основных из которых приведен в табл. 3.3. На данный момент уже более 500 бортовых компьютеров для различных космических аппаратов построены на базе микропроцессоров компании BAE Systems.

Наиболее совершенными характеристиками обладает уже сравнительно старый (разработан в 2001 г.) микропроцессор RAD750 с архитектурой PowerPC, который является радиационно-стойкой версией коммерческого микропроцессора PowerPC750F, длительное время выпускаемого компанией IBM. Микропроцессор полностью совместим с коммерческим аналогом как программно, так и по назначению выводов корпуса.

Таблица 3.3. Перечень основных микропроцессоров разработки компании BAE Systems

	GVSC 1750	**RAD6000**	**RAD750**
Архитектура	MIL-STD-1750A	RS\6000 POWER	PowerPC
Год разработки	1991	1996	2001
Технология	Радиационно-стойкий 1,0-мкм КМОП-процесс	Радиационно-стойкий 0,5-мкм КМОП-процесс	Радиационно-стойкий 0,25-мкм КМОП-процесс
Частота, МГц	20	33	166

Для того чтобы обеспечить устойчивость к воздействующим факторам космического пространства, исходный проект был переработан, при этом его функциональность оставлена без изменений. К основным изменениям можно отнести следующие:

– переработку электрической схемы и топологии ячеек памяти;
– переработку электрической схемы и топологии усилителей считывания, декодеров и других элементов, входящих в блок памяти, блока PLL, и др.;
– замену всех блоков с элементами динамической логики на функционально подобные блоки на основе полностью статической схемотехники;
– переработку всех триггеров и регистров на устойчивые к сбою аналоги;
– повсеместное внедрение схем обнаружения и коррекции ошибок.

Микропроцессор до 2007 г. производился по технологии 0,25 мкм КМОП и имел рабочую частоту до 166 МГц. Стойкость к накопленной дозе составляла не менее 200 крад. Гарантируется полное отсутствие тиристорного эффекта и значение порога к одиночным сбоям ЛПЭ не менее 45 МэВ·см^2/мг. Прогнозная частота сбоев на геостационарной орбите составляла на то время $1{,}6 \cdot 10^{-10}$/бит/день.

В 2008 г. компания представила улучшенную версию микропроцессора RAD750, изготовленную по радиационно-стойкой технологии 0,15 мкм КМОП. Частота микропроцессора была увеличена до 200 МГц, стойкость к накопленной дозе увеличена до 1 мрад, при этом также гарантируются отсутствие тиристорного эффекта и сравнимые с предыдущей 0,25-мкм версией микропроцессора показатели стойкости к одиночным сбоям. В 2010 г. была завершена стандартная аттестация данного микропроцессора на соответствие требованиям для космической аппаратуры.

3.2.4. Honeywell

Компания Honeywell выпускает широчайший набор радиационно-стойкой элементной базы. Базовой технологией является технология «кремний-на-изоляторе» с проектными нормами вплоть до 0,15 мкм, что позволяет полностью исключить эффекты тиристорной защелки и существенно уменьшить вероятность одиночных сбоев. В число производимых компанией микросхем входят достаточно старый 16-разрядный микропроцессор 16750A и более новый микропроцессор с архитектурой PowerPC, имеющий наименование HXRHPPC. Данный микропроцессор по функциональным характеристикам и назначению выводов корпуса идентичен коммерческому микропроцессору PowerPC603e компании Freescale.

Для того чтобы обеспечить устойчивость к воздействующим факторам космического пространства, исходный проект был переработан, но его функциональность осталась без изменений. В целом, как можно понять из открытых источников, перечень доработок примерно соответствует доработкам, выполненным компанией BAE Systems для повышения стойкости микропроцессора RAD750.

Микропроцессор HXRHPPC производится в основном по технологии 0,35 КНИ и имеет частоту до 80 МГц. Стойкость к полной накопленной дозе составляет более 300 крад, гарантируется полное отсутствие тиристорного эффекта. Прогнозная частота сбоев на геостационарной орбите составляет $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ чип/день [4].

3.2.5. Микропроцессоры с архитектурой SPARC

В 1990 г. Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA) начало разработку 32-разрядного микропроцессора для космических применений, которая завершилась в 1997 г. созданием процессора с архитектурой SPARC v7 под названи-

ем ERC32 [5]. В развитие этого проекта в 1998 г. ESA начало свою новую программу по разработке усовершенствованной версии микропроцессора, получившего название LEON. Его разработкой занималась шведская компания Gaisler Reseach [6]. Данный проект имел цель обеспечить все требования стойкости к воздействующим факторам космического пространства при следующих исходных ограничениях:

- использование коммерческого технологического процесса;
- полностью синтезируемый проект, отказ от заказных узлов для обеспечения «переносимости» на разные технологические процессы и другие фабрики;
- построение по принципам СНК на основе стандартного «внутрикристального» интерфейса с целью обеспечения возможности его быстрой модернизации и масштабируемости;
- программная совместимость с одной из распространенных процессорных архитектур.

За основу была выбрана известная архитектура SPARC V8, обеспечивавшая полную программную совместимость с ERC32. Кроме того, открытость архитектуры позволила избежать возможных юридических осложнений. В качестве стандартного «внутрикристального» интерфейса была выбрана шина AMBA.

В настоящее время развитием данного семейства микропроцессоров также занимаются еще две компании: Atmel, которая выпускает микропроцессоры на базе ядра LEON2FT (характеристики которого нами будут более детально рассмотрены в следующей главе), и не менее известная компания Aeroflex, выпускающая микропроцессоры на базе ядра LEON3FT.

3.2.6. Микропроцессоры компании Atmel

Компания Atmel достаточно давно выпускает микропроцессоры на базе ядра LEON2FT. Наиболее последняя разработка имеет номер AT697E.

В состав микропроцессора входит целочисленное ядро, совместимое со SPARC V8, арифметический сопроцессор, контроллеры статического и SDRAM ОЗУ, контроллер PCI, последовательные порты и другие периферийные устройства.

Особенность данного микропроцессора заключается в том, что помимо традиционных средств обнаружения и коррекции одиночных сбоев, защищающих регулярные структуры кэш-памяти и регистровых файлов, в нем применяется схема тройного резервирования триггеров со схемой голосования, что позволяет защитить триггеры нерегулярной управляющей логики от одиночных сбоев. Возможный сбой в любом из триггеров экранируется логикой голосования, что обеспечивает бессбойную работу всей схемы.

Микропроцессор AT697E производится по КМОП-технологии 0,18 мкм и имеет частоту до 100 МГц. Стойкость к полной накопленной дозе составляет более 60 крад. Гарантируется отсутствие тиристорного эффекта до уровня ЛПЭ не менее 70 МэВ·см^2/мг. Прогнозная частота сбоев на геостационарной орбите составляет $1 \cdot 10^{-5}$/чип/день.

В 2009 г. компания представила улучшенную версию микропроцессора под номером AT697F, в которой повышена стойкость к накопленной дозе до 300 крад, а также исправлены ошибки предыдущей версии.

3.2.7. Aeroflex

Микропроцессоры фирмы в настоящее время успешно функционируют в составе бортовых систем управления более ста действующих КА общего и специального назначения США, Европейского космического агентства, Японии и других стран (рис. 3.10).

Компания Aeroflex Colorado Springs развивает и продвигает семейство микропроцессоров на основе ядра LEON3FT, которое отличается от LEON2FT более глубоким конвейером (7 стадий вместо 5) и поддержкой многопроцессорности. Развитием этого направления компания начала заниматься после приобретения в середине 2008 г. основного разработчика данной серии — шведской компании Gaisler Research, которая после поглощения и получила название Aeroflex Gaisler.

В настоящий момент выпускается семейство микропроцессоров LEON3FT-RTAX на базе радиационно-стойких ПЛИС RTAX2000S от Actel.

В табл. 3.4 представлены характеристики 8 модификаций микропроцессора LEON3FT-RTAX, отличающихся друг от друга набором периферийных контроллеров.

Все модификации микропроцессора LEON3FT-RTAX имеют рабочую частоту до 25 МГц, стойкость к накопленной дозе до 300 крад; гарантируется отсутствие тиристорного эффекта до уровня ЛПЭ не менее 104 МэВ·см^2/мг и порог к одиночным сбоям ЛПЭ не менее 37 МэВ·см^2/мг.

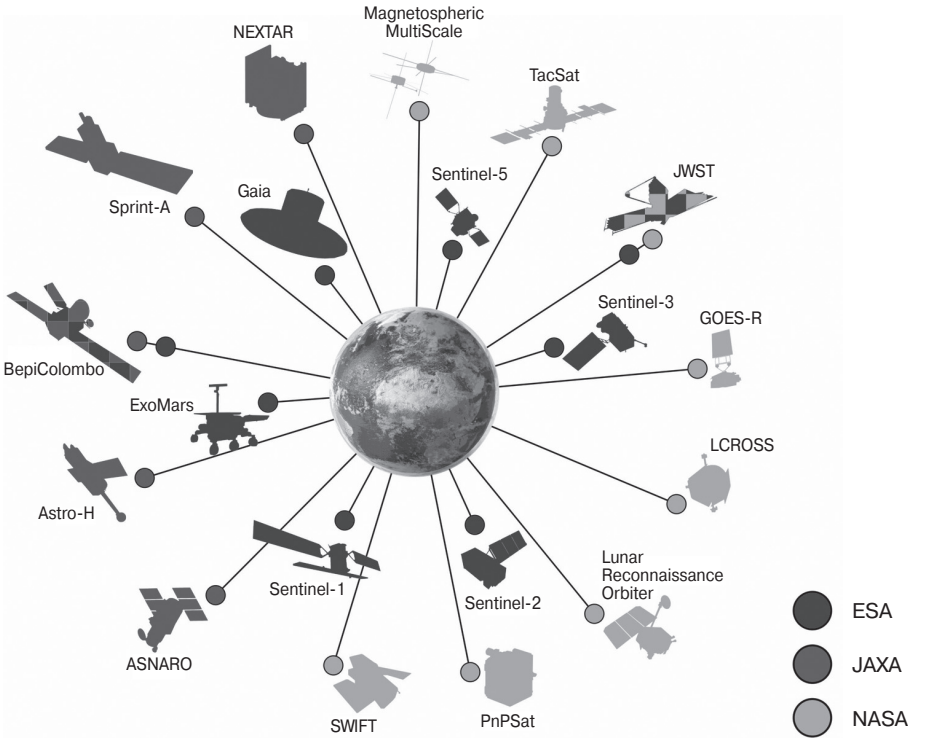


Рис. 3.10. Космические аппараты общего и специального назначения, в которых используются микропроцессоры на базе ядра Leon 2FT

Таблица 3.4. Функциональный состав модификаций микропроцессора LEON3FT-RTAX

Номер модификации	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Целочисленное ядро LEON3FT	+							
Блок умножения/деления					+			+
Блок управления питания	+							
Арифметический сопроцессор	+						+	
Встроенная память, Кбайт	4		4					
Контроллер 1553 RT	+							
Контроллер 1553 BC/RT/MT			+					
Контроллер SpaceWire, кол-во каналов		2		3	2		2	
Контроллер CAN 2.0B, кол-во каналов	1							
Контроллер PCI						+		
Контроллер Ethernet MAC								
Контроллер статического ОЗУ	+							
Контроллер SDRAM				+				
Корпус	CQFP352			CQFP624			CQFP352	

В мае 2009 г. компания анонсировала микропроцессор U699, выполненный не на ПЛИС, как LEON3FT-RTAX, а в виде заказной микросхемы. В состав микропроцессора входят целочисленное ядро, совместимое со SPARC V8, арифметический сопроцессор, контроллер PCI, четыре канала интерфейса SpaceWire, контроллеры статического и SDRAM ОЗУ, контроллер Ethernet MAC, контроллер CAN 2.0, последовательные порты и другие периферийные устройства.

Микропроцессор UT699 имеет рабочую частоту до 66 МГц. Стойкость к накопленной дозе составляет не менее 300 крад, гарантируется отсутствие тиристорного эффекта до уровня ЛПЭ не менее 108 МэВ·см^2/мг.

Более подробно это семейство процессоров будет рассмотрено в гл. 4.

3.3. Отечественные микропроцессоры и микроконтроллеры

Для построения современных бортовых систем управления военной, авиационной и космической техникой необходимы микроконтроллеры с мощным высокопроизводительным процессорным ядром с не менее мощными аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми узлами, расширенной (зачастую уникальной) периферией, усовершенствованными средствами внутрисистемного программирования–отладки и одновременно с минимальными характеристиками по габаритам и потребляемой энергии.

Рассмотрим состояние с производством отечественных МП и МК в России и Беларуси. Предварительно напомним, что микроэлектронные фирмы делятся на фирмы-разработчики и фирмы-изготовители:

– предприятия типа «фаундри» (кремниевые мастерские или кремниевые фабрики).

Отличительные особенности – отсутствие собственных разработчиков, ограниченный набор базовых технологий, большие объемы производства пластин,

высокостабильный техпроцесс, короткие сроки изготовления пластин, наличие доступных «дизайн-китов»;

– предприятия типа «фаблес» («без фабрики»).

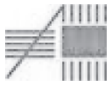
Отличительные особенности – отсутствие собственного производства пластин (приборов), высококвалифицированный персонал, современные программные и аппаратные средства (САПР), короткие сроки разработки, низкие цены;

– комбинированные предприятия.

Отличительные особенности – фирма имеет какое-то производство пластин ограниченного набора технологий и содержит свой дизайн-центр, взаимодействие внутри фирмы между дизайн-центром и «фабом» осуществляется так же, как в предыдущих двух типах. К данному типу можно отнести наш ОАО «Интеграл».

Ниже представлены основные результаты состояния с производством МП и МК на отечественных предприятиях, полученные путем анализа сайтов предприятий и публикаций в периодической печати.

3.3.1. ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград)



Компания занимает место одного из основных российских поставщиков радиационно-стойкой электронно-компонентной базы для предприятий военно-промышленного комплекса. Размещение выполненных по заказам потребителя проектов для серийного изготовления «Ангстрем» осуществляет на собственном производстве (1,0–0,6 мкм) или у зарубежных партнеров (0,5–0,13 мкм), т.е. является фирмой комбинированного типа (fabless + foundry). Основные технологические возможности предприятия приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Технологический уровень кристального производства ОАО »Ангстрем»

Тип пластин	**Диаметр 100 мм**	**Диаметр 150 мм**	**Диаметр 200 мм**
	кремний на сапфире, карбидокремниевые	**кремний на сапфире, кремний на изоляторе**	**кремниевые, кремний на изоляторе**
Проектные нормы, мкм	1,2	0,6–0,8	0,25–0,35
Кол-во слоев металла	2	2	4
Мощность, пл/год	48 тыс.	96 тыс.	48 тыс.
Технологии: – действующие	КНС	КМОП, EEPROM, КМОП РС, КНС, БиКМОП, ДМОП, IGBT, МРД.	
– развиваемые и/или создаваемые	Карбид кремния	МЭМС, ИК-видение, БиКДМОП	КМОП РС, КНИ, БиДКМОП, FRAM, СВЧ LD-MOS, Trench ДМОП, Trench IGBT

На 2014 год запланирован запуск производства пластин с проектными нормами 0,11–0,13 мкм (медная металлизация в 9 слоев, 14 тыс. пл./мес.) – бывшее оборудование фирмы AMD. На этом же оборудовании планируется организовать производство чипов с топологическими нормами 90 нм, о чем заключено соглашение о лицензировании технологии производства интегральных схем с корпорацией IBM.

Таблица 3.6. Микропроцессоры и микроконтроллеры производства ОАО «Ангстрем»

	Состав	Особенности, назначение
8-разрядный микроконтроллер с архитектурой «Тесей»	КР1878ВЕ1 *(собственная разработка)*	Система команд – 52 команды. Тактовая частота – 32 кГц– 8 МГц. Время выполнения команды – 2 такта
16-разрядный LSI-11/23-совместимый комплект	Н1836ВМ3 Н1836ВМ4	16-разрядный микропроцессор. Арифметический сопроцессор для Н1836ВМ3
16-разрядный LSI/2-совместимый микропроцессор	1806ВМ2 Н1806ВМ2	6-разрядный LSI-11/2-совместимый микропроцессор
32-разрядный VAX-11/750-совместимый микропроцессорный комплект	1839ВМ1Ф 1839ВМ2Ф 1839ВТ2Ф 1839ВВ1Ф Н1839РЕ1 Н1839ВЖ2	32-разрядный центральный процессор. Арифметический сопроцессор. Контроллер СтОЗУ для 1839ВМ1Ф. Адаптер магистралей 32-BUS и Q-BUS. ПЗУ 16К×32 для Л1839ВМ1. Мажоритарный элемент (два из трех)
32-разрядный RISC микропроцессорный комплект архитектуры MIPS-1. Нормы-1,2 мкм	Л1876ВМ1 Л1876ВМ2 Л1876ВГ1 Л1876ВГ2	32-разрядный RISC микропроцессор. Арифметический сопроцессор. Графический контроллер SVGA. Интерфейсный контроллер шины VME

Помимо лицензии на использование технологии «Ангстрем» получит от IBM правила проектирования, необходимые для организации контрактного производства чипов, и тем самым сможет еще больше расширить предлагаемые услуги foundry российским и зарубежным заказчикам в сегментах commercial и industral.

«Ангстрем» уже предлагает дизайн-центрам (предприятиям fabless) технологическую библиотеку для проектирования чипов (Process Design Kit, PDK) по технологии 0,13 мкм, основанную на платформе Virtuoso® IC 6.1.3 и системе моделирования Virtuoso Multi-Mode Simulation (MMSIM) компании Cadence Design Systems.

Все микроконтроллеры в табл. 3.6 являются сравнительно старыми (разработки 80–90-х годов). Следует отметить серию Л1876. Ее особенностью является то, что сделана по официально лицензированной в 90-х годах архитектуре ядра MIPS-1 фирмы MIPS Technology Inc. (MTI) со всей документацией для производства. Разработана в НИИСИ РАН и первоначально была адаптирована для изготовления на «Ангстреме» под их техпроцесс 1,2 мкм.

3.3.2. ОАО «НИИМЭ и Микрон» (г. Зеленоград)

«НИИМЭ и Микрон» – крупнейший производитель интегральных микросхем в России и СНГ.

До 2010 года «Микрон» работал на нормах 0,8 мкм на пластинах ∅ 150 мм (с 1997 г.) и более 1,0–1,5 мкм на пластинах ∅ 100 мм – на оборудовании, оставшемся с советских времен. При больших объемах и номенклатуре ЭКБ изделий класса микропроцессоров и микроконтроллеров практически не было (не считая 8-разрядного микропроцессорного комплекта серии 1802 по технологии ТТЛШ).

Но с 2010 г. введена в строй технологическая линейка для производства пластин ∅ 200 мм с нормами 0,18 мкм (КМОП+EEPROM, 4-6 металлов) – приобретена у компании ST Microelectronics. Освоена технология производства ИМС с топологическими нормами 90 нм (6-9 металлов). У фирмы ST Microelectronics была куплена не только лицензия на производство и продажу продукции по этим тех-

нологиям, но также правила проектирования, которые могут использоваться разработчиками «Микрона» или сторонними разработчиками fabless-компаний в режиме контрактного производства.

Продукция, которая выпускается и будет выпускаться «Микроном» по этим технологиям в режиме foundry, нацелена на самые широкие сегменты рынка, в том числе микропроцессоры и микроконтроллеры.

В классах commercial и industral это микроконтроллеры для смарт-карт, микроконтроллеры типа Electronic ID с высокой степенью защиты, включая паспортно-визовые документы (линейка микроконтроллеров MIK51xx) и др. Характеристики первого представителя этой линейки 8-разрядного микроконтроллера MIK5016XC2, изготавливаемого по нормам 0,18 мкм:

Память:

- EEPROM 72 Кбайт;
- ROM от 160 Кбайт до 256Кбайт;
- RAM 6 Кбайт.

Интерфейсы:

- контактный (ISO 7816) до 200 Кбит/с;
- бесконтактный (ISO 14443) до 848 Кбит/сек;
- поддержка протокола Mifare для транспортных приложений.

Криптозащита:

- криптографические сопроцессоры блочных шифров: ГОСТ 28147-89, DES, 3DES, AES;
- криптографический сопроцессор модулярной арифметики для вычисления и проверки ЭЦП по алгоритмам ГОСТ Р34.10-2001, ECDSA, RSA.

Средства инженерной защиты:

- криптографические сопроцессоры;
- аппаратные средства защиты от вскрытия;
- аппаратный контроль целостности EEPROM;
- программные средства защиты в ОС;
- поддержка транзакций на уровне ОС.

Производственные мощности и технологические возможности «Микрона» позволят ежегодно выпускать ~50 миллионов микроконтроллеров типа Electronic ID. В это число не входят бесконтактные билеты для общественного транспорта и другие виды чипов.

Для изделий класса military на базе этого оборудования имеются технологии:

- КНИ (радиационно-стойкие микросхемы памяти, микроконтроллеров, ЦАП/АЦП) с проектными нормами 0,25 мкм, 0,18 мкм (с 2012 г.);
- БиКМОП SiGe (для радиочастотных применений СВЧ и УВЧ до 10ГГц – навигационные системы GPS, GLONASS, радиолокационные системы с АФАР, синтезаторы, спутниковая связь) с проектными нормами 0,25 мкм (с 2011 г.), 0,18 мкм (с 2012 г.).

Так, на базе 0,18 мкм КМОП-техпроцесса HCMOS8D на «Микроне» **(**foundry**)** изготовлены опытные образцы и идет серийное освоение радиационно-стойкой микросхемы микропроцессора с каналами SpaceWire и гигабитным каналом GigaSpaceWire 1892ВМ12Т разработки ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (fabless). Микросхему 1892ВМ12Т пла-

нируется использовать как устойчивый к воздействию специальных факторов универсальный микропроцессор для бортовых применений различного назначения, в том числе как сетевой элемент распределенных систем управления и обработки данных в современных сетях с пакетной передачей информации, включая бортовую аппаратуру космических аппаратов, также – в качестве стойкого к СВВФ контроллера бортовых твердотельных накопителей информации гигабайтной емкости.

Перечислены основные технические характеристики микросхемы 1892ВМ12Т:

- архитектура – MIPS32-совместимый процессор с 32/64-разрядным акселератором плавающей точки;
- 32/64-разрядный порт внешней памяти: SRAM, SDRAM, FLASH, ROM;
- два порта SpaceWire (ECSS-E-50-12C) со скоростью передачи данных от 2 до 300 Мбит/с в диапазоне температур;
- два последовательных порта (на базе GigaSpaceWire, проект стандарта SpaceWire) с пропускной способностью не менее 1,25 Гбит/с в диапазоне температур с дополнительной дискретной сеткой частот передачи 5–125 Мбит/с;
- два порта UART;
- встроенное ОЗУ: 1 Мбит;
- два порта MFBSP (I2S/ SPI/ SHARC LPORT/ GPIO) с DMA;
- встроенный умножитель/делитель входной частоты;
- интервальный таймер, таймер реального времени, сторожевой таймер;
- порт JTAG, встроенные средства отладки программ (OnCD);
- рабочая частота: 120 МГц (при нормальных условиях) и 100 МГц (в диапазоне температур);
- температурный диапазон: от –60 до +85 °С;
- ожидаемые параметры стойкости: до 200 крад по накопленной дозе и к воздействиям ТЗЧ по эффекту отказов для порогового значения линейных потерь энергии (ЛПЭ) эффекта до 60 МэВ см^2/мг при максимальной температуре 65 °С;
- корпус: CQFP-240, планарный металло-керамический по ГОСТ 17467-88; размер корпуса с выводной рамкой: 75,6 × 75,6 × 3,4 мм; размер корпуса после формовки: 40,3 × 40,2 мм, размер керамического основания корпуса: 34,05 × 34,05 мм.

Другим примером реосвоения на «Микроне» на базе вышеприведенного 0,18 мкм КМОП-техпроцесса HCMOS8D микропроцессоров, ранее изготавливаемых на зарубежной фабрике TSMC, является микросхема К5512БП1Ф (разработчик – дизайн-центр КМ211, г. Зеленоград; заказчик – ОАО «НИИМА «Прогресс», г. Москва). К5512БП1Ф – полузаказная СБИС (с масочным ПЗУ) типа «система на кристалле» (СНК) со встроенным микропроцессорным ядром КВАРК. Предназначена для создания на ее основе специализированных СБИС для аппаратуры ответственного назначения (аппаратура связи, радиолокации, опознования; системы управления энергогенерирующими и энергопотребляющими объектами; системы управления функционированием и движением наземных и воздушных объектов).

Состав и основные технические характеристики микросхемы К5512БП1Ф:

- 32-разрядное процессорное ядро КВАРК с тактовой частотой до 150 МГц;
- сопроцессор модульной арифметики с разрядностью 1024 и тактовой частотой 50 МГц;

Таблица 3.7. Сравнительные характеристики ядра КВАРК для различных вариантов реализации

Реализация	Техпроцесс/ устройство	Площадь и количество вентилей	Примечание	Производительность
В ПЛИС	Xilinx Virtex 4	2000 slices	Без кэш-памяти и диспетчера памяти (MMU)	60 МГц
	Altera Cyclone IV	7150 LEs		
В кремнии	TSMC, Тайвань CLN90G, 90 нм	0,2 мм^2 (72 Kgates)		> 400 МГц
		2,2 мм^2 (780 Kgates)	С кэш-памятью и MMU 48 Кб (32 Кб +16 Кб)	
	ОАО «Микрон», HCMOS8D, 180 нм	Cell Area – 0,41 мм^2 (33,7 Kgates); Layout – 0,51 мм^2 (40 Kgates)	Без кэш-памяти и диспетчера памяти (MMU)	150 МГц

- четыре блока БМК по 300К вентилей (для аппаратной реализации специальных функций на «зашивках» БМК);
- масочное ПЗУ 128К×32;
- статическое ОЗУ 64К×32;
- интерфейсы SPI, I^{2}C, GPIO;
- корпус металло-керамический типа CPGA325;
- количество выводов – 226;
- напряжение питания 1,8/3,3 В;
- диапазон рабочих температур –40÷+125 °С;
- средняя потребляемая мощность не более 400 мВт.

Развитием микросхемы К5512БП1Ф для ОАО «НИИМА «Прогресс» является радиационно-стойкая СБИС «Алмаз-9», изготавливаемая по технологии КМОП КНИ с проектными нормами 0,24 мкм:

- троированное 32-разрядное процессорное ядро типа MIPS с поддержкой DMA (прямой доступ к памяти) и MMU (диспетчер памяти);
- троированный сопроцессор модульной арифметики;
- масочное ПЗУ 64К×32;
- статическое ОЗУ 32К×32;
- ФАПЧ на частоту до 150 МГц;
- три блока БМК по 100К вентилей каждый;
- количество выводов – 325;
- напряжение питания 3,3 В;
- средняя потребляемая мощность не более 500 мВт.

Также с «Микроном» по fabless-схеме сотрудничают ПКК «Миландр» и другие компании. Вообще вокруг нового производства «Микрона» активно концентрируются дизайн-центры самых различных уровней. По тематике микропроцессоров и микроконтроллеров это:

- ОАО НПЦ «Элвис», г. Зеленоград;
- НПП «Цифровые решения», г. Москва;
- ЗАО ПКК «Миландр», г. Зеленоград;
- ОАО «НИИЭТ», г. Воронеж;

- ОАО «НИИМА «Прогресс», г. Москва;
- ЗАО НТЦ «Модуль», г. Москва;
- ООО «Дизайн-центр КМ211», г. Зеленоград;
- ООО «Дизайн-центр «Союз», г. Зеленоград;
- Технологический центр МИЭТ, г. Зеленоград;
- ООО «СибИС», г. Новосибирск;
- ОАО «НИИ «Субмикрон», г. Зеленоград;
- ЧП «НТЛаб-системы», г. Минск.

Существуют планы создания в России на базе ОАО «НИИМЭ и Микрон» производства с проектными нормами 65–45 нм на пластинах ∅ 300 мм в Алабушево (1,5 км от основной территории «Микрона» в Зеленограде). Участок земли под этот проект зарезервирован, за него платится арендная плата, распоряжение правительства есть. Вопрос в источниках финансирования, и активные действия по этому проекту планируются после освоения и выхода на проектную мощность на «Микроне» производства по нормам 90 нм.

3.3.3. НИИСИ РАН (г. Москва)

Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН) занимается разработкой вычислительной техники для ответственных применений уже более 20 лет и владеет полным циклом процесса создания сложных систем, включая разработку ИМС, вычислительных модулей и системного программного обеспечения. Практические результаты внедрены в разработках архитектуры микропроцессоров, СБИС **(**fabless**),** создании микроэлектронного производства (foundry).

Деятельность по разработке ИМС началась в 1993–1994 гг. с закупки лицензии на микропроцессор R3000 и сопроцессор с плавающей запятой R3010 (ядро MIPS32 с возможностью архитектурного развития) у компании MIPS Technology Inc. Лицензионные проекты были переработаны и адаптированы для 1,2 мкм технологии ОАО «Ангстрем» (см. 3.1). Адаптация включала масштабирование топологии и характеризацию схемы. В настоящее время эти микросхемы (Л1876ВМ1 и Л1876ВМ2 для R3000 и R3010 соответственно) изготавливаются на ОАО «Ангстрем».

В дальнейшем НИИСИ РАН продолжил разработку микропроцессоров данной архитектуры MIPS (ряд «Комдив») для более совершенной технологии (0,5 мкм, КМОП КНИ, 3 металла в 2003 г.; 0,35 мкм, 4 металла в 2005 г.) на своей производственной линейке 1Х1 и по 0,18 мкм на зарубежных фабриках или на «Микроне». Разработали 64-разрядную версию архитектуры, добавили специализированные сопроцессоры и дополнительные команды и теперь производят собственные лицензионно чистые MIPS-подобные микропроцессоры. Исходный проект R3000/R3010 MIPS перерабатывался начиная с микроархитектурного уровня при сохранении полной программной совместимости. Так как логические схемы были разработаны в виде синтезируемой модели Verilog RTL с необходимыми тестами и модулями верификации, то они могут быть изготовлены на разных фабриках (на своей 1Х1 или зарубежных) с помощью различных технологических процессов, что обеспечивает независимость технологии и реальную возможность многократного использования проекта.

Таблица 3.8. Перечень основных микропроцессоров разработки НИИСИ РАН и их параметров

Тип ИМС	Основные параметры
1890ВМ1Т *Комдив32*	Однокристальный микропроцессор с архитектурой MIPS-I, 32-разрядный, 30–50 МГц, 3,3 В, –60÷+ 85 °С, КМОП, 0,5 мкм, 3 слоя металлизации, 1,5 млн транзисторов, 2003 г.
1890ВМ2Т *Комдив32*	Однокристальный микропроцессор с архитектурой MIPS-I, для обработки 32-разрядных чисел с резервированием на уровне блоков с самовосстановлением после сбоя, 80–100 МГц, 3,3 В, –60÷+90 °С, КМОП, 0,35 мкм, 4 слоя металлизации, 1,7 млн транзисторов, 2005 г.
1890ВМ3Т *Комдив64-СМП*	Однокристальный микропроцессор с архитектурой MIPS-64, 64-разрядный, 80–100 МГц, 3,3 В, –60÷+85 °С, КМОП, 0,18 мкм, 2005 г.
1890ВМ5Ф *Комдив64-СМП*	64-разрядный микропроцессор с MIPS-архитектурой, 280 МГц, 3,3 В, –60÷+85 °С, КМОП, 0,18 мкм, 2007 г.
1890ВМ7Я *Комдив64-РИО*	64-разрядный микропроцессор с каналами ускоренного ввода-вывода (RapidIO) и 128-разрядным сопроцессором, имеющим архитектуру SIMD, 270 МГц, 3,3 В, –60÷+85 °С, КМОП, 0,18 мкм, 2010 г.
1890ВМ6Я *Комдив64-РИО*	64-разрядный микропроцессор с MIPS-архитектурой и с интерфейсами RapidIO, 3,3 В, –60÷+85 °С, КМОП, 0,18 мкм, 2011 г.
5890ВЕ1Т *Комдив32-С*	32-разрядная СнК на основе RISC-микропроцессора с повышенными значениями параметров спецстойкости, 33 МГц, 3,3 В, –60÷+85 °С, КМОП-КНИ, 0,5 мкм, 240-выводной корпус типа QFP, 2007–2009 гг.
5890ВМ1Т *Комдив32-Р*	32-разрядный радиационно-стойкий RISC-микропроцессор для построения резервируемых отказоустойчивых вычислит. систем, 33 Мгц, 3,3 В, –60÷+125 °С, КМОП-КНИ, 0,5 мкм, 108-выводной корпус типа QFP, 2010 г. (ОКР «Квартал ОВС»)
1900ВМ2Т *Резерв-32*	32-разрядная СнК для построения резервируемых отказоустойчивых вычислительных систем, 66 МГц, 3,3 В, –60÷+125 °С, КМОП-КНИ, 0,35 мкм, 108-выводной корпус типа QFP, 2010–2012 гг.
1907ВМ1Т	32-разрядная СнК, интерфейс SpaceWire, 100 МГц, 3,3 В, КМОП-КНИ, 0,25 мкм, 240-выводной корпус типа QFP, 2012–2014 гг.

Что касается технологической линейки 1Х1, то она не предназначена для массового производства СБИС. Достигнутый технологический уровень – 0,5 мкм и 0,35 мкм. В планах – модернизация линейки под 0,25 мкм путем дозакупки/замены необходимого оборудования. Объемы производства – несколько пластин в день, т.е. фактически линейка является супер-мелкосерийной для изготовления малых опытных партий. Занимаются изготовлением продукции только класса military, коммерческие заказы не рассматриваются.

До ввода в строй нового производства на «Микроне» эта линия в течение многих лет являлась единственной в стране с уровнем 0,5–0,35 мкм. С учетом мелкосерийности производства запуски партий по изготовлению своих микропроцессоров (разработки НИИСИ РАН) и партнеров («ЭЛВИС», «Миландр», «НИИЭТ», НТЦ «Модуль» и др.) планировались за полгода и более. Теперь ситуация иная – партнеры переориентируются на «Микрон» (при этом зарубежные фабрики в работе также остаются).

3.3.4. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород)

«НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» – федеральный научно-производственный центр радиоэлектронного профиля в составе Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Имеются свой дизайн-центр по проектированию и небольшая технологическая линейка 1Х2 по производству радиационно-стойких БИС и СБИС по КМОП, КМОП-КНС и

КМОП-КНИ маршрутам для внутренних нужд. Изначально планировалось сделать линейку 1Х2 с проектными нормами 0,35 мкм, но пока этого нет.

Изготовление разработанных проектов класса микропроцессоров и микроконтроллеров осуществляют на отечественных и/или зарубежных фабриках Так, контроллер навигационных каналов 1339ВП1Т – на линейке 1Х1 в НИИСИ РАН, микропроцессорный комплект серии 1825 – на собственной технологической линейке 1Х2.

Таблица 3.9. Состав микропроцессорного комплекта серии 1825 и контроллер 1339ВП1Т

Параметры / Состав	Технология	Проектные нормы, мкм	Напряжение питания, В	Исполнение	Стойкость к СВВФ
1825ВР3Н2НИ 16-разрядный арифметический умножитель	КМОП КНС	3,0	От 4,5 до 7,5	Бескорпусные, на гибком носителе с ленточными выводами	Повышенная
1825ВС3Н2НИ 16-разрядная микропроцессорная секция		3,0			
1825ИР1Н2НИ Многофункциональный регистр		3,2			
1825ВБ1Н2НИ Перестраиваемый синхронизатор		3,6			
1825ВА3Н2НИ Магистральный приемо-передатчик	КМОП КНС	3,1	От 4,5 до 7,5	Бескорпусные, на гибком носителе с ленточными выводами	Повышенная
1825ВС3Н2НИ Логический элемент согласования		3,0			
1339ВП1Т Контроллер навигационных каналов (цифровой коррелятор)	КМОП КНИ	0,35	3,3 ± 10%	4245.240-6.01 ТАСФ.30117 6.004 ТУ	Повышенная $7И_6$ – 6Ус $7И_7$ – 6Ус

3.3.5. ЗАО «Светлана-Полупроводники» (г. Санкт-Петербург)

Выпускает маломощные, высокочастотные биполярные транзисторы, логические интегральные микросхемы, биполярные микросхемы интерфейсов, интегральные микросхемы аналоговых ключей и мультиплексоров; радиационно-стойкие микросхемы аналоговых ключей и мультиплексоров. Научно-производственная деятельность осуществляется по полному циклу: «исследование – разработка – производство – реализация продукции», т.е. является фирмой комбинированного типа (fabless + foundry).

В части МП и МК в настоящее время работы ведутся в следующих направлениях:

- разработка сложно-функциональных (СФ) блоков для создания «систем на кристалле»;
- разработка комплекта микросхем для цифровых сетей передачи данных;

- разработка адаптера цифровых каналов ввода/вывода информации **1875ВВ1Т** (аналог отсутствует, ток потребления $I_{\text{осс}} \le 50$ мА, тип корпуса 4229.132-3);
- разработка микроконтроллера – функционального аналога микросхемы 80С186ЕС;
- разработка 32-разрядного микроконтроллера 1875ВД2Т (функциональный аналог 80386EXTB25, ток потребления $I_{\text{осс}} \le 90$ мА, тип корпуса 4229.132-3).

Более детальной информации о состоянии дел и более подробных технических характеристиках по данным изделиям пока нет.

Маршрут проектирования опирается на современные средства САПР фирмы Cadence. Проектирование ведется с уровня RTL-описания до передачи информации на фабрику. Достигнутый уровень последних разработанных микросхем – по технологии КМОП с проектными нормами 0,35 мкм на фабрике НИИСИ РАН (не на собственной). При проектировании используется библиотека разработки НИИСИ РАН «LIB_NIISI_035». В настоящее время ведется работа по освоению проектирования на основе библиотеки с минимальными размерами элементов 0,18 мкм. Одной из задач ближайшего времени является расширение области деятельности с целью освоения проектирования микросхем, содержащих аналоговые устройства.

3.3.6. ОАО «НИИЭТ» (г. Воронеж)

«НИИ электронной техники» (fabless-компания) проводит разработку сложных изделий микроэлектроники по следующим основным направлениям:

- 8-разрядные микроконтроллеры серий 1830, 1882, 1887 со встроенной энергонезависимой памятью и развитой периферией архитектур MCS-51 и AVR RISC;
- 16-разрядные микроконтроллеры серий 1874, 1887 для встраиваемых систем управления, связи и обработки данных архитектур MCS-96 (в том числе модернизированной) и C166;
- 16- и 32-разрядные процессоры цифровой обработки сигналов (ПЦОС) с фиксированной и плавающей запятой для цифровых вычислительных и управляющих систем различного назначения (аналоги ряда ИС из семейства TMS320Cxx фирмы Texas Instruments);
- 32-разрядные микроконтроллеры на базе ядра ARM Cortex-M4F;
- мощные ВЧ и СВЧ полевые и биполярные транзисторы (всего свыше 50 типономиналов, ведутся разработки перспективных изделий на SiC и GaN) и комплексированные изделия (модули) на их основе для передающей аппаратуры различных средств связи, авионики, систем навигации, радиолокации и инструментальной посадки самолетов, для комплектования модулей АФАР различных РЛС и др.

В табл. 3.10–3.13 приведены основные параметры ЦПОС, микропроцессоров и микроконтроллеров ОАО «НИИЭТ», изготавливаемых или разрабатываемых в настоящее время. Есть ряд разработанных изделий, но не получивших в силу разных причин развития (их в таблицах нет).

Таблица 3.10. Микроконтроллеры ОАО «НИИЭТ»

Тип изделия	Основные параметры
1890ВМ1Т Н1830ВЕ31, Н1830ВЕ51	Однокристальный микропроцессор с архитектурой MIPS-I, 32-разрядный, 8-разрядный микроконтроллер, тактовая частота 12 МГц, ОЗУ 128×8, ПЗУ 4К×8 (только в Н1830ВЕ51), два 16-разрядных таймера, UART, потребляемая мощность 132 мВт, напряжение питания 5 В ± 10%
1882ВЕ53У	8-разрядный микроконтроллер, тактовая частота 24 МГц, ОЗУ 256×8, ПЗУ 12К×8, память данных EEPROM 2К×8, три 16-разрядных таймера, порты UART, SPI, сторожевой таймер (WDT), напряжение питания 5 В ± 10%
1887ВЕ4У *0,35 мкм*	8-разрядный RISC микроконтроллер, 8 МГц, ПЗУ 8К×8 Flash, ЭСППЗУ 1К×8, ОЗУ 512×8, UART, SPI, АЦП (8 каналов, 8/10 бит), WDT, аналоговый компаратор, калиброванный RC генератор, напряжение питания 5 В ± 10%
Л1874ВЕ36, 1874ВЕ36	16-разрядный микроконтроллер, тактовая частота 20 МГц, ОЗУ 232×8, ПЗУ 8К×8, два 16-разрядных таймера, АЦП, ШИМ, потребляемая мощность 300 мВт, напряжение питания 5 В ± 10%
1874ВЕ06Т, 1874ВЕ76Т	16-разрядный, 20 МГц, ОЗУ 488×8, ПЗУ 16К×8 типа OTP ROM (только в 1874ВЕ76Т) АЦП, 3 блока ШИМ, PTS, HSIO, UART, WDT
1874ВЕ16Т, 1874ВЕ86Т	16-разрядный типа Motor Control, тактовая частота 16 МГц, ОЗУ 488×8, ПЗУ 16К×8 типа OTP ROM (только в 1874ВЕ86Т), два 16-разрядных таймера, АЦП, ШИМ, EPA, PTS, 3-фазный генератор сигналов
1874ВЕ66Т	16-разрядный микроконтроллер, 8–16 МГц, память программ 16К×8 типа OTP ROM, АЦП (14 каналов, 8/10 бит, PTS, EPA, до 64 линий ввода/вывода, 3-фазный генератор формы сигнала (WFG), программируемый генератор частоты. Обеспечивает функции управления двигателями (Motor Control)
1887ВЕ3Т	16-разрядный, RISC, 40 МГц, ПЗУ 256 Кбайт Flash, ОЗУ 15 Кбайт, АЦП (16 каналов, 8/10 бит), два модуля CAPCOM, ШИМ, USART (2), SPI (2), I^2C, Twin CAN, WDT, OCDS, JTAG – интерфейс. *Спроектирован на базе **лицензированного** ядра C166SV1.2 Infineon Technologies*

Таблица 3.11. Радиационно-стойкие микроконтроллеры ОАО «НИИЭТ»

Тип изделия	Основные параметры
1830ВЕ32У *КМОП КНИ* *0,5 мкм*	8-разрядный микроконтроллер без ПЗУ, 12 МГц, ОЗУ 256×8, таймеры 3×16 бит, UART, 7 источников прерываний, программируемый массив счетчиков (5 каналов), длительность командного цикла 1000 нс, $U_п$ = 5В ± 5%. Характеристики по группам исполнения для СВВФ: 7.И1 – 6Ус, 7И6 – 2×6Ус, 7.И7 – 4×4Ус, 7.С1 – 6Ус, 7.С4 – 2×4Ус, 7.К1 – 2К, 7.К4 – 1К, 7.И12 – 0,3×3Р
1830ВЕ32АУ *КМОП КНИ* *0,5 мкм*	8-разрядный микроконтроллер без ПЗУ, 16 МГц, ОЗУ 256×8, таймеры 3×16 бит, UART, 7 источников прерываний, программируемый массив счетчиков (5 каналов), длительность командного цикла 750 нс, $U_п$ = 3,3 В ± 0,3%. Характеристики по группам исполнения для СВВФ: 7.И1 – 6Ус, 7И6 – 2×6Ус, 7.И7 – 4×4Ус, 7.С1 – 6Ус, 7.С4 – 2×4Ус, 7.К1 – 2К, 7.К4 – 1К, 7.И12 – 0,3×3Р
1874ВЕ05Т *КМОП КНИ* *0,5 мкм*	16-разрядный микроконтроллер без ПЗУ и АЦП, 20 МГц, ОЗУ 488×8, UART, WDT, HSIO, 3 канала ШИМ, PTS. Характеристики по группам исполнения для СВВФ: 7.И1 – 5Ус, 7И6 – 6Ус, 7.И7 – 4×4Ус, 7.С1 – 5Ус, 7.С4 – 2×4Ус, 7.К1 – 2К, 7.К4 – 1К

Таблица 3.12. Процессоры ЦОС ОАО «НИИЭТ»

Тип изделия	Основные параметры
Л1867ВМ2 1867ВМ2Т	16-разрядный с фиксированной запятой, 40 МГц, 10 MIPS, ОЗУ5 44×16, ПЗУ 4К×16, 32 порта ввода/вывода, таймер, последовательный порт. *Аналог – TMS320C25*
1867ВЦ2АТ	16-разрядный с фиксированной запятой, 57 МГц, 28,5 MIPS, ОЗУ 9К×16, ПЗУ 2К×16, последовательный порт TDM, таймер, JTAG-интерфейс. *Аналог – TMS320C50*
1867ВЦ5Т	16-разрядный, 20 МГц, 20 MIPS, Flash ПЗУ программ 16К×16, ОЗУ 544×16, сдвоенный 10-разрядный 16-канальный АЦП, ШИМ (12 каналов), порты SPI, SCI, контроллер ПДП, сторожевой таймер, JTAG-интерфейс. Обеспечивает функции управления электродвигателями
1867ВЦ6Ф 1867ВЦ6АФ	32-разрядный с плавающей запятой, 40 МГц, 40 MFLOPS, ПЗУ 4К×32, ОЗУ 2К×32, кэш ОЗУ 64×32, два последовательных порта, два 32-разрядных таймера, DMA, мультипроцессорный интерфейс, $U_{П}$ = 5В ± 10% (ВЦ6Ф), $U_{П}$ = 5В ± 5% (ВЦ6АФ). *Аналог – TMS320C30*
1867ВЦ4Т	16-разрядный процессор ЦОС с фиксированной запятой, производительность 40 MIPS, тактовая частота 40 МГц, ОЗУ 10К×16, ПЗУ программ 2К×16, коммуникационные порты HPI, BSP, TDM, JTAG-интерфейс, напряжение питания 5 В ± 10%. *Аналог – TMS320C542*

Таблица 3.13. Текущие разработки ОАО «НИИЭТ»

Тип изделия, шифр ОКР	Основные параметры
NIIET-MC01 (ARM Cortex-M4F)	32-разрядный микроконтроллер на базе ядра ARM Cortex-M4F с периферией. *Фабрика изготовления – TSMC (Тайвань).* *Технология – CE018G (КМОП, 0,18 мкм, Embedded Flash).* *Получены экспериментальные образцы.* Соисполнитель разработки – НПП «Цифровые решения» (г. Москва).
1882ВМ1Т (Сложность-2)	Мультиинтерфейсный 8-разрядный сопроцессор с низким энергопотреблением на базе архитектуры MCS-51 с встроенной аппаратной реализацией алгоритмов кодирования/декодирования информации. *ОКР сдана в ноябре 2013 г.*
1887ВЕ7Т, 1887ВЕ8Т (Сложность-5)	Серия 8-разрядных AVR RISC микроконтроллеров производительностью 16 MIPS с увеличенными объемами памяти программ и данных
Обработка-3	Разработка и освоение производства радиационно-стойкого цифрового сигнального процессора с фиксированной запятой по типу TMS320VC54
1874ВЕ7Т (Обработка-4)	Разработка и освоение производства спецстойкого микроконтроллера типа 1874ВЕ05Т с интерфейсом ГОСТ Р 52070-2003, АЦП и ШИМ. *ОКР сдана в ноябре 2013 г.*
1867ВМ7Т (Обработка-5)	Разработка и освоение производства радиационно-стойкого цифрового сигнального процессора с фиксированной запятой по типу 1867ВМ2 (TMS320C25). *ОКР сдана в ноябре 2013 г.*
Обработка-6	Разработка и освоение производства радиационно-стойкого 32-х разрядного цифрового сигнального процессора с плавающей запятой
1887ВЕ6Т (Обработка-7)	Разработка и освоение производства 16-разрядного быстродействующего RISC микроконтроллера с повышенной стойкостью к СВВФ на базе процессорного ядра C166

ОАО «НИИЭТ» и ОАО «ИНТЕГРАЛ» занимаются разработкой и изготовлением 8-разрядных микроконтроллеров архитектуры MCS-51. Сравнительные характеристики данных МК представлены в табл. 3.13.

Из табл. 3.13 видно, что в этом сегменте микроконтроллеров нет явно «лучшего» по всем параметрам. За счет наличия/отсутствия тех или иных периферийных блоков, интерфейсов, электрических и временных параметров каждый из МК может иметь свою нишу применения. Важнейшее значение при этом имеет наличие отладочных средств и устройств, предназначенных для отладки и программирования систем, разрабатываемых на базе микроконтроллеров.

Помимо микроконтроллеров архитектуры MCS-51 (серии 1830, 1882) ОАО «НИИЭТ» занимается микроконтроллерами и схемами для цифровой обработки сигналов архитектур MCS-96, AVR ATMega, C166, ARM Cortex-M4F (серии 1867, 1874, 1887), которые широко используются в устройствах.

3.3.7. ЗАО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград)

Одним из приоритетных направлений в разработках ПКК «Миландр» (fabless-компания, своего полупроводникового производства у фирмы нет) является создание серий микроконтроллерных БИС и процессорных БИС для цифровой обработки сигналов (ЦОС). За короткий промежуток времени (начало разработок – 2003 г.) спроектирован и освоен большой ряд микроконтроллеров различной разрядности (табл. 3.14).

Таблица 3.14. Микроконтроллеры и процессоры ЦОС разработки ПКК «Миландр»

Разрядность	Серия	Типономиналы ИМС	Примечание
8-разрядные микроконтроллеры	1886	1886ВЕ1У, 1886ВЕ2У, 1886ВЕ3У, 1886ВЕ4У, 1886ВЕ5У, 1886ВЕ6У, 1886ВЕ6У1, 1886ВЕ7У	ОКРы сданы в 2006–2011 гг., ведутся поставки
16-разрядные процессоры ЦОС	1967	1967ВЦ1Т. *Аналог – TMS320C546A*	ОКР сдана 30.11.2011 г., ведется поставка
32-разрядные микроконтроллеры	1986	1986ВЕ9х (ядро ARM Cortex-M3), 1986ВЕх авиа, 1986ВЕ2х (ядро ARM Cortex-M0)	ОКРы сданы в 2010–2013 гг., ведутся поставки
2-ядерные микроконтроллеры (RISC+DSP)	1901	1901ВЦ1Т	ОКР сдана 19.08.2011 г., ведется поставка
64-разрядные процессоры ЦОС	1967	1967ВЦ2Т, 1967ВЦ3Ф	Этап разработки, сдача – в 2016 г.

Технические характеристики изделий (даже краткие) не приведены здесь ввиду их большого объема (можно ознакомиться на сайте или в каталогах ПКК «Миландр»).

Изготовление разработанных изделий производится на зарубежных фабриках XFAB Semiconductor Foundries AG (Германия), TSMC (Тайвань), CSMC (Китай), H-NEC (Китай), а также на отечественной фабрике «Микрон».

Первые схемы серии 1886 с ядром PIC (1886ВЕ1 с ПЗУ масочного типа как аналог PIC17C756-331/L и 1886ВЕ2 с ЭСППЗУ Flash-типа как аналог PIC17C756A) разрабатывались путем описания работы БИС по информационным документам Datasheets фирмы Microchip на языке VHDL с последующим созданием своей RTL-модели и изготовлением своей топологии – решено было отказаться от практики

«сдирания» топологии аналога. Но описывая на языках VHDL или Verilog чужую разработку, невозможно воспроизвести полный функциональный аналог в принципе (а это важно для потребителя, особенно в рамках импортозамещения). Пришлось в спецификациях на 1886ВЕ1У(2У) подробно описывать отличия от PIC17C756A. Микроконтроллеры серии 1886 являются PIC-совместимыми (но не полностью !) с ядром PIC-17 с различной периферией.

Полное воспроизведение функционирования аналога возможно при условиях:

1) полное копирование конструкции аналога путем «сдирания» топологии с привязкой под свою технологию, при этом зачастую не понимая ряд используемых решений (зачем и почему) фирмы-разработчика;
2) наличие лицензии на воспроизводимое ядро микроконтроллера.

В дальнейших разработках ПКК «Миландр» пошла именно по второму пути**:** в 2008 г. у компании ARM (Advanced RISC Machines, Великобритания) была куплена лицензия на процессорное ядро ARM Cortex-M3. В настоящее время 32-разрядные микроконтроллеры, использующие процессорное ядро ARM2, приобрели широкую популярность во всем мире (как в свое время MCS-51 для 8-разрядных). Такие микроконтроллеры выпускаются многими известными производителями: Atmel, Samsung, Intel, Motorola, Cirrus Logic, Oki и др.

Лицензионные ядра поставляются компанией ARM заказчикам – разработчикам или производителям микросхем в следующей форме:

- поведенческое описание на синтезируемом подмножестве языков VHDL или Verilog (такие ядра являются синтезируемыми);
- электрическая схема процессорного ядра;
- топологическая макроячейка (описание топологии ядра для реализации в составе интегральной микросхемы).

Наличие исходного описания ядра на RTL-уровне обеспечивает полную гибкость его применения. В частности, нет жесткой привязки к конкретной технологии и, соответственно, фабрике-изготовителю. Используя ту или иную форму представления, производители создают различные модели микроконтроллеров, дополняя процессорное ядро набором необходимых периферийных устройств. При изготовлении своих моделей микроконтроллеров ПКК «Миландр» использует современную микроэлектронную технологию, обеспечивающую минимальные размеры 0,25, 0,18 или 0,13 мкм, и не привязан к конкретной фабрике.

В 2010 г. году компания «Миландр» купила ядро ARM Cortex-M0 – облегченную версию ядра Cortex-M3. На основе этого ядра сейчас разрабатываются микроконтроллеры серии 1986ВЕ2х для систем сбора и обработки информации от резистивных и емкостных датчиков со встроенным 24-разрядным дельта-сигма АЦП. Для перспективных микроконтроллеров (для аэрокосмических применений и пр.) прорабатывается вопрос о покупке более серьезного ядра ARM Cortex-A9. Тесное сотрудничество ПКК «Миландр» с компанией ARM позволяет приобретать у последней новые лицензии с существенными скидками.

3.3.8. ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (г. Зеленоград)

Исторически ОАО «ЭЛВИС» происходит из НПО «ЭЛАС» – известнейшего объединения в Министерстве электронной промышленности СССР. Это была единственная системная фирма во всем МЭПе. НПО «ЭЛАС» не только разрабатывало аппаратуру и системы, но и элементную базу для них. Продукция НПО «ЭЛАС» (в основном космические электронные системы) базировалась на самых передовых технологиях микроэлектроники. До конца 80-х годов собственное микроэлектронное производство «ЭЛАС» (завод «Компонент») не уступало ни «Ангстрему», ни «Микрону» по технологическому уровню. Первый КМОП микропроцессорный комплект в стране был создан именно в НПО «ЭЛАС» в 1974 г. Сегодня открытое акционерное общество научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы» (ОАО НПЦ «ЭЛВИС») является одним из ведущих fabless электронных центров проектирования СБИС в России.

Стратегией фирмы в рамках СБИС-проектов, ведущихся в ОАО НПЦ «ЭЛВИС», является создание на базе собственной платформы проектирования «Мультикор» концептуально новых отечественных импортозамещающих и экспортнопригодных микросхем типа «система на кристалле» (СНК). На базе данных микросхем возможно создание новых перспективных систем радиоэлектронной аппаратуры двойного назначения с принципиально новыми качественными свойствами и 10–15-летним циклом жизнеобеспечения, в том числе для телекоммуникационных и космических применений.

Микросхемы процессоров серии «Мультикор» – это однокристальные программируемые многопроцессорные СНК на базе IP-ядерной (IP-intellectual property) платформы «Мультикор». Процессоры данной серии сочетают в себе лучшие качества двух классов приборов: микроконтроллеров и процессоров цифровой обработки сигналов (ПЦОС), что позволяет решать в рамках ограниченных габаритов одновременно обе задачи**:** управления и высокоточной обработки информации, включая сигналы и изображения, т.е. их отличительная особенность – они многоядерные.

Физически в одной микросхеме содержатся одно CPU RISC-ядро с архитектурой MIPS32, выполняющее функции центрального процессора системы (CPU – Central Processing Unit), и одно или более ядер специализированного процессора-акселератора для цифровой обработки сигналов (DSP – Digital Signal Processing) с плавающей/фиксированной точкой ELcore-xx (ELcore = Elvees's core), основанного на гарвардской архитектуре. CPU-ядро является ведущим в конфигурации микросхемы и выполняет основную программу. Для CPU-ядра обеспечен доступ к ресурсам DSP-ядра, являющегося ведомым по отношению к CPU-ядру. CPU микросхемы поддерживает ядро ОС Linux 2.6.19 или ОС жесткого реального времени QNX 6.3 (Neutrino).

Микросхемы спроектированы специалистами ОАО НПЦ «ЭЛВИС» совместно с центром проектирования ОАО «Ангстрем» (топологическое проектирование и разработка блока PLL). Информация о ряде микросхем серии «Мультикор» представлена в табл. 3.15.

Таблица 3.15. Микросхемы серии «Мультикор» разработки ОАО НПЦ »ЭЛВИС»

Микросхема	**1892ВМ3Т (МС-12)**	**1892ВМ2Я (МС-24)**	**1892ВМ5Я (МС-0226)**	**1892ВМ10Я (NVCom-02T)**	**1892ВМ7Я (МС-0428)**
Год разработки	2004	2004	2006	2012	2012
Проектные нормы, мкм	0,25	0,25	0,25	0,13	0,13
Размер кристалла, мм × мм	10 × 10	10 × 10	12,3 × 12,6	8,8 × 9,5	11,7 × 11,9
Интеграция, млн транзисторов	~18	~18	~26	~50,2	~81
Корпус	PQFP240	HSBGA292	HSBGA416	HSBGA400	HSBGA765
Многопроцессорная MIMD-архитектура	2 процессора: RISCore32 + ELcore-14	2 процессора: RISCore32 + ELcore-24	3 процессора: RISCore32 + 2 × ELcore-26	3 процессора: RISCore32 (с FPU) + 2 × ELcore-30	5 процессоров: RISCore32 (с FPU) + 4 × ELcore-28
Рабочая частота, МГц	80	80	100	250	210
Пиковая производительность, MFLOPs, 32 бит	240	480	1 200	4 000	6 720

Примечания: самый сложный микроконтроллер ОАО «Интеграл» 1880ВЕ1У «Двина 51АС»:

- проектные нормы 0,5 мкм;
- размер кристалла 8,2 × 8,2 мм;
- интеграция 1 023 831 элемент;
- корпус Н18.64-1В;
- архитектура MCS-51 с интерфейсом мультиплексного канала (ИМК) связи по ГОСТ Р 52070-2003, работающим в режиме оконечного устройства (ОУ), и встроенным 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с 8-ми канальным коммутатором на входе;
- рабочая частота 24 МГц.

Микросхемы в зависимости от модели содержат от 2 до 8 Мбит внутренней памяти, периферийные SHARC-совместимые линки и последовательные порты, I2C, I2S, USB, Ethernet, PCI, UART, JTAG, а также гиперлинки типа SpaceWire и Serial RapidIO.

SHARC (Super Harvard ARchitecture Computer) – архитектура программно- и аппаратно-совместимых 32-разрядных ПЦОС фирмы Analog Device.

Макробиблиотеки и библиотеки ядер разрабатываются таким образом, что они совместимы с лучшими зарубежными электронными фабриками. Это допускает изготовление первых пилотных образцов ИМС за рубежом (НПЦ «ЭЛВИС» сотрудничает с фабрикой TSMC, Тайвань) с последующим изготовлением в России на «Микроне». При этом все проекты остаются закрытыми для зарубежного изготовителя.

Кроме уже изготовленных и освоенных базовых микросхем серии в стадии разработки находятся еще несколько ИМС:

1892ВМ12Т (МСТ-03Р) – радиационно-стойкая микросхема микропроцессора с каналами SpaceWire и гигабитным каналом GigaSpaceWire: изготавливается на базе 0,18 мкм КМОП-техпроцесса HCMOS8D на «Микроне», ее параметры и характеристики уже рассмотрены выше;

1892ВМ14Я (MCom-02) – микросхема многоядерного сигнального процессора (СНК):

– изготавливается по техпроцессу КМОП 40LP на фабрике TSMC (Тайвань);
– размер кристалла 8,0 × 8,0 мм;
– напряжение питания ядра 1,0÷1,2 В, настраиваемое напряжение питания периферии 1,8/2,5/3,3 В;
– максимальная рабочая частота – 1200(CPU) / 800(DSP) / 500 (VELCore) МГц для н.у.;
– многоядерная гетерогенная MIMD-архитектура (до восьми процессорных ядер и ядер акселераторов) на базе стандартных процессорных и специализированных ядер:
  • управляющее процессорное ядро – Dual Cortex-A9 (CPU 0-1) с FPU-акселератором и NEON SIMD-акселератором (ARM);
  • кластер на базе двух DSP-ядер нового поколения (8–64 бита) с возможностью управления ресурсами микросхемы и внешней памяти, совместимых с линейкой DELCore с плавающей (Single и Double) и фиксированной точкой;
  • встроенное ядро аппаратно-программного графического акселератора (MALI-300, ARM);
  • ядро многоканального ГЛОНАСС/GPS коррелятора;
– развитая система универсальных портов и последовательных интерфейсов;
– тип корпуса 784L HFCBGA, 19 × 19 мм, шаг по выводам 0,65 мм.

1892ВМ15Ф (МС-30SF6) – радиационно-стойкая микросхема сигнального процессора с шестью унифицированными последовательными портами SpaceFiber/GigaSpaceWire:

– изготавливается на базе 0,18 мкм КМОП-техпроцесса HCMOS8D на «Микроне»;
– технология проектирования: на базе радиационно-стойких (по типу Rad-Tolerant) библиотекМК180RT разработки ОАО НПЦ «ЭЛВИС» и IP-библиотек платформы «Мультикор»;
– CPU: MIPS32-совместимый процессор с 32/64 разрядным акселератором плавающей точки (FPU);
– два DSP-ядра (120 МГц), дополненные аппаратно-программными средствами ускорения процедур спектральной (Фурье) и фильтровой обработки в формате плавающей точки (160 МГц);
– аппаратный ускоритель для процедуры БПФ с производительностью 64 GFLOPs;
– 64-разрядный порт внешней памяти: SRAM, SDRAM, FLASH, ROM;
– два 32-разрядных порта памяти типа DDR, 200 МГц;
– два порта UART типа 16550A;
– встроенное ОЗУ объемом 128 Кбайт;
– встроенные умножители входной частоты;
– температурный диапазон: от –60 до +85 °С;
– ожидаемые параметры стойкости: до 200 крад по накопленной дозе и к воздействиям ТЗЧ по эффекту отказов для порогового значения линейных потерь энергии (ЛПЭ) эффекта до 60 МэВ см^2/мг при максимальной температуре 65 °С;
– корпус: металлокерамический CPGA-720.

«Мультикор» – это не только и не столько микросхемы. «Мультикор» – это современная модульная система инструментального программного обеспечения (ПО) (MultiCoreStudio – MCStudio) для ИМС, спроектированных на базе платформы, включая аппаратно-программные средства разработки, отладки и верификации программ: Си-компиляторы, ассемблерные средства программирования, программные симуляторы ядер и ИМС платформы, JTAG-отладчики, отладочные модули с FPGA – прототипами ядер проектируемых СНК и т.д.

3.3.9. ЗАО НТЦ «Модуль» (г. Москва)

Основными видами деятельности НТЦ «Модуль» являются три направления:

- проектирование полузаказных цифровых и аналого-цифровых интегральных схем (услуги микроэлектронного дизайна – fabless);
- разработка и изготовление встраиваемых и бортовых ЭВМ для ответственного применения (управляющие машины для космических аппаратов, бортовая аппаратура и авионика);
- разработка и изготовление аппаратно-программных комплексов распознавания изображений, обработка радиолокационных сигналов.

По первому направлению НТЦ «Модуль» известен своими разработками высокопроизводительных процессорных ядер NeuroMatrix® с архитектурой DSP/RISC (серия 1879ВМхх) и проектированию СБИС класса «системы на кристалле» (СНК), в том числе с многоканальными высокоточными быстродействующими АЦП и ЦАП с высокой степенью интеграции (до 15 млн вентилей). Изделия реализованы на базе полупроводниковых технологий ведущих мировых компаний, т.е. изготавливаются на зарубежных фабриках (Samsung и Fujitsu Microelectronics Europe GmbH, которые предоставляют «Модулю» свои производственные мощности для выпуска среднего объема партий процессоров).

Таблица 3.16. Процессоры НТЦ «Модуль» семейства NeuroMatrix

Тип изделия, год разработки, изготовитель	**Основные параметры**
1879ВМ1 (NM6403), ядро **NMC** 1998 г. *КМОП 0,5 мкм. Samsung*	Высокопроизводительный специализированный микропроцессор, сочетающий в себе черты двух современных архитектур: VLIW (Very Long Instruction Word) и SIMD (Single Instruction Multiple Data). Тактовая частота – 40 МГц; напряжение питания – от 3,0 до 3,6 В; потребляемая мощность – 1,3 Вт. Размер кристалла 9 × 9 мм. Интеграция 100 000 вентилей. Содержит 32-разрядное CPU RISC-ядро с пятиступенчатым конвейером и 64-разрядный векторный DSP-сопроцессор. Тип корпуса BGA256.
1879ВМ2 (NM6404), ядро **NMC2** 2006 г. *КМОП 0,25 мкм. Fujitsu*	Модификация 1879ВМ1 (второе поколение ЦПС), по системе команд полностью совместим с 1879ВМ1, оба идентичны по структурной организации и программным моделям отдельных узлов. Тактовая частота 80 МГц, напряжение питания процессора от 2,3 до 2,7 В и периферии от 3,0 до 3,6 В, потребляемая мощность ≤ 2 Вт. Содержит встроенное ОЗУ объемом 2 Мбит (в 1879ВМ1 отсутствует). Размер кристалла также 9 × 9 мм. Тип корпуса BGA576. Добавлен JTAG-порт, позволяющий существенно упростить процедуры тестирования аппаратных средств и отладки прикладного ПО

Таблица 3.16 (окончание)

Тип изделия, год разработки, изготовитель	**Основные параметры**
1879ВМ3 2007 г. *КМОП 0,25 мкм. Fujitsu*	Быстродействующий программируемый контроллер со встроенными аналого-цифровыми (АЦП) и цифро-аналоговыми (ЦАП) преобразователями без DSP-ядра NeuroMatrix. Предусмотрен интерфейс с процессорами 1879ВМ1 и 1879ВМ2. Разрядность команд – 128 бит. Тип корпуса BGA576. Напряжение питания 3,3 В и 2,5 В, потребляемая мощность 4,2 Вт. Содержит четыре 8-разрядных ЦАП (частота выборок 300 МГц), два 6-разрядных АЦП (частота выборок 600Мгц), тактовая частота цифрового интерфейса 150Мгц. Интеграция – 2.230.000 эквивалентных вентилей. Предназначен для предварительной обработки широкополосных аналоговых сигналов, формирования потока данных для вторичной обработки цифровым процессором сигналов (ЦПС), восстановления аналогового сигнала после вторичной обработки
1879ВМ4 (NM6405), ядро **NMC2** 2009 г. *КМОП 0,25 мкм. Fujitsu*	Дальнейшее развитие 1879ВМ1 и 1879ВМ2 (третье поколение ЦПС). Изготовлен по той же технологии, что и 1879ВМ2 (и с теми же электрическими и климатическими параметрами), но за счет более глубокого конвейера тактовая частота достигает 150 МГц. Сохраняя программную совместимость с предшественниками и их основные архитектурные особенности, процессор 1879ВМ4 имеет процессорное ядро усовершенствованной архитектуры, ряд отличий которой позволяет увеличить производительность при той же тактовой частоте. По структурной организации и программным моделям отдельных узлов 1879ВМ4 практически идентичен процессорам 1879ВМ1 и 1879ВМ2. Добавлены два программируемых канала ПДП типа «память-память» и два коммуникационных порта синхронного типа (СР0/СР1), что позволило увеличить скорость обмена до 75...150 Мбайт/с по каждому порту (вместо 20 Мбайт у 1892ВМ2). Тип корпуса BGA576
1879ВМ5Я (NM6406), ядро **NMC3** 2012 г. *КМОП 90 нм. Fujitsu*	Дальнейшее развитие процессоров семейства NeuroMatrix (четвертое поколение). В нем используется то же процессорное ядро, что и в 1879ВМ4, но работающее уже на частотах до 300 МГц. Кроме того, объем внутренней памяти увеличен в 2 раза (4 Мбит против 2 Мбит у 1879ВМ2 и 1879ВМ4). Напряжение питания – 1,2 В (ядро) и 3,3 В (буфера ввода/вывода), потребляемая мощность – не более 1,2 Вт. Тип корпуса PBGA416. Диапазон рабочих температур микросхем семейства (–55...+85) °С

Приведенные в табл. 3.16 ПЦОС семейства Neuro-Matrix серии 1879ВМхх являются представителями класса векторно-конвейерных DSP. Их отличает высокая производительность обработки больших потоков данных при относительно небольших аппаратных затратах и малом энергопотреблении. Благодаря аппаратной поддержке матрично-векторных операций и возможности увеличения производительности при обработке данных меньшей разрядности процессоры находят применение для решения широкого класса задач в таких областях, как видеообработка, распознавание образов, сигнальная обработка, радиолокация, телекоммуникация, навигация и др. А встроенные средства для построения многопроцессорных систем позволяют использовать их как базовые блоки для создания параллельных вычислительных систем.

Для выхода на массовые рынки – в сегменты спутниковой навигации, аппаратуры цифрового телевидения, мультимедийных устройств для приема и декодирования цифрового сигнала – НТЦ «Модуль» разработал микросхемы К1879ХК1Я, К1879ХБ1Я, 1879ВЯ1Я.

Таблица 3.17. Процессоры НТЦ «Модуль» для спутниковой навигации и цифрового телевидения

Тип изделия, год разработки, изготовитель	Основные параметры
К1879ХК1Я 2011 г. *КМОП 90 нм.* *Fujitsu*	Цифровой унифицированный программный приемник (ЦУПП) класса СнК. Обеспечивает прием аналоговых сигналов, преобразование их в цифровой код и программную цифровую обработку. СБИС предназначена для использования в качестве основы входного тракта цифрового приемника. *Разработана по заказу и совместно с КБ Навис.* Содержит в своем составе два ядра NMC3 – отвечают за обработку данных, получаемых от блока предобработки сигнала, который в свою очередь, соединен с АЦП (12 бит, 85 МГц), управлением занимается ядро ARM1176. Встроенное ОЗУ 16 Мбит. Частота системного синхросигнала 81,92 МГц. Напряжение питания внутренней цифровой схемы 1,2 ± 0,1 В. Напряжение питания внешних буферов 3,3 ± 0,3 В, 2,5 ± 0,2 В. Напряжение питания аналоговых узлов 1,2 В и 3,3 В. Потребляемая мощность (в зависимости от режима работы) 0,5–2,0 Вт. Площадь кристалла 72 мм^2. Тип корпуса BGA484. Диапазон рабочих температур –40…+70 °С
К1879ХБ1Я 2012 г. *КМОП 90 нм.* *Fujitsu*	Декодер цифрового телевизионного сигнала (ДЦТС) класса СнК. СБИС для цифровых телевизионных приставок стандартной и высокой четкости предназначена для приема и декодирования телевизионных сигналов спутникового, наземного и кабельного вещания, а также IP-телевидения с использованием новейших технологий компрессии аудио и видео. Содержит в своем составе ядра NMC3 (рабочая частота 324 МГц) – выполняет задачу декодирования аудио-сигнала, ARM1176JZF-S (рабочая частота 324 МГц) и специализированные устройства. Встроенное ОЗУ 8 Мбит. Частота системной шины 162 МГц. Потребляемая мощность ≤ 2 Вт. Напряжение питания ядра микросхемы 1,2 В. Напряжение питания интерфейсов DDR2 1,8 В. Напряжение питания периферийных устройств 3,3 В. Тип корпуса PBGA544. Размер кристалла 8 × 8 мм. Диапазон рабочих температур –40…+85 °С
1879ВЯ1Я 2013 г. *КМОП 90 нм.* *Fujitsu*	Цифровой унифицированный программный приемник (ЦУПП) класса СнК. По составу и параметрам идентичен К1879ХК1Я. Информации по отличиям между 1879ВЯ1Я и К1879ХК1Я нет

Работая в тесной кооперации с инженерами Fujitsu Microelectronics Europe GmbH (FME), НТЦ «Модуль» использует свою собственную методику битовых срезов для проектирования полузаказных СБИС. Современные методы управления сложными проектами и высокие технологии FME позволили разработать высокопроизводительные СБИС серии 1879. Топология кристалла разрабатывается в НТЦ «Модуль» совместно с инженерами FME, которые передают финальный нетлист и временную модель для окончательной верификации. Только после этой верификации в НТЦ «Модуль», подписывается разрешение на запуск производства образцов СБИС на фабрике FME. НТЦ «Модуль» дополнительно предлагает послепроизводственное сопровождение с целью интеграции СБИС на системном уровне заказчика.

3.3.10. ЗАО «МЦСТ» (г. Москва)

ЗАО «Московский Центр СПАРК-технологий» (ЗАО «МЦСТ») создано в 1992 г. на базе отделений Института точной механики и вычислительной техники имени С.А. Лебедева (ИТМ и ВТ) – лидера

отечественного электронного машиностроения. Наличие аббревиатуры SPARC в названии предприятия связано с тем фактом, что созданное ЗАО в качестве генерального партнера на тот момент рассматривало известную американскую фирму Sun Microsystems, продвигающую на мировом рынке вычислительные средства с архитектурой SPARC (Scalable Processor Architecture) и предоставляющую существенные льготы дружественным компаниям, работающим под ее брендом.

В настоящее время ЗАО «МЦСТ» – ведущий российский разработчик высокопроизводительных универсальных микропроцессоров семейства «Эльбрус» *(ELBRUS – от англ. ExpLicit Basic Resources Utilization Scheduling – «явное планирование использования основных ресурсов»)*, развивающий две линии проектирования:

1) SPARC-совместимые микропроцессоры;
2) микропроцессоры оригинальной архитектуры с так называемым широким командным словом с явным параллелизмом VLIW/EPIC *(VLIW – Very Long Instruction Word – широкая команда; EPIC – Explicitly parallel instruction computing – вычисления с явным параллелизмом команд)*.

Основная деятельность компании сосредоточена в следующих областях современных компьютерных технологий:

- исследование и разработка архитектуры микропроцессоров;
- проектирование микропроцессоров на глубокосубмикронных нормах;
- проектирование микропроцессорных наборов, систем памяти, контроллеров, включая разработку производственной документации для фабрик-изготовителей;
- проектирование компьютеров (отказоустойчивые, многопроцессорные вычислительные комплексы) на базе микропроцессоров собственной разработки в различных классах (сервер, рабочая станция, персональный компьютер) и вариантах исполнения (стационарный, перебазируемый, встроенный, ноутбук);
- проектирование компьютерных модулей и логических устройств.

Специалисты ЗАО «МЦСТ» в последние годы разработали уникальные универсальные отечественные высокопроизводительные микропроцессоры архитектурных платформ «МЦСТ-R» и «Эльбрус», на основе которых разработаны различные вычислительные комплексы («Эльбрус-90 микро», «Эльбрус-3М1», ВК систем ПВО С-300 и С-400).

Таблица 3.18. Технические характеристики первого поколения микропроцессоров ЗАО «МЦСТ»

Название МП	**МЦСТ-R100***	**1891ВМ1 (МЦСТ-R150)**	**1891ВМ2 (МЦСТ-R500)**	**1891ВМ3 (МЦСТ-R500S)**	**1891ВМ4Я (Эльбрус Е3М)**
Технология	0,5 мкм	0,35 мкм	0,13 мкм	0,13 мкм	0,13 мкм
Размер кристалла, мм × мм	13 × 13	10 × 10	5 × 5	9 × 9	12,6 × 15
Металлизация, количество слоев	Нет данных	4	8	8	8
Интеграция, млн транзисторов	~2,1	~2,8	~4,9	~45	~75,8
Число ядер	1	1	1	2	1

Таблица 3.18 (окончание)

Название МП	**МЦСТ-R100***	**1891ВМ1 (МЦСТ-R150)**	**1891ВМ2 (МЦСТ-R500)**	**1891ВМ3 (МЦСТ-R500S)**	**1891ВМ4Я (Эльбрус Э3М)**
Частота, МГц	80	150	500	500	300
Производительность MIPS/MFLOPs	62/22	140/63	520/200	1100/400	23100/4800
Напряжение питания, В	5	3,3	1,0/2,5	1,0/2,5/3,3	1,05/3,3
Потребляемая мощность, Вт	3	5	1	5	6
Корпус	304-pin PQFP	480-pin BGA	376-pin BGA	900-pin FCBGA	900-pin FCBGA
Год выпуска	1998	2001	2004	2007	2008
Фабрика-изготовитель	ATMEL ES2, Франция	Tower Semi, Израиль	TSMC, Тайвань	TSMC, Тайвань	TSMC, Тайвань

******Примечание:* МЦСТ-R100 прошел госприемку, однако серийное производство микропроцессоров МЦСТ-R100 не осуществлялось – был сделан редизайн на технологию 0,35 мкм, в ходе которого разработан МЦСТ-R150 (1891ВМ1). Т.е. МЦСЕ-R100 фактически послужил прототипом для серийного процессора МЦСТ-R150.

Таблица 3.19. Технические характеристики второго поколения микропроцессоров ЗАО «МЦСТ»

Название МП	**1891ВМ5Я (Эльбрус S)**	**1891ВМ6Я (МЦСТ-R1000)**	**1891ВМ7Я (Эльбрус 2С+)**
Технология (проект. нормы)	90 нм	90 нм	90 нм
Площадь кристалла, мм^2	142 мм^2	128 мм^2	259 мм^2
Металлизация, количество слоев	9	10	9
Интеграция, млн транзисторов	~218	~180	~368
Число ядер	1	4 (Sparc)	6 (2 CPU + 4 DSP)*
Частота, МГц	500	1000	500
Производительность, GFLOPs	64 бита – 4,0 32 бита – 8,0	64 бита – 2,0 32 бита – 4,0	64 бита – 8,0 32 бита – 16,0
Напряжение питания, В	1,1/1,8/2,5	1,1/1,8/2,5	1,1/1,8/2,5
Потребляемая мощность, Вт	13 Вт – типовая, 20 Вт – максимальная	20 Вт	~25 Вт
Корпус	1156-pin HFC BGA	1156-pin HFC BGA	1296-pin HFC BGA
Год выпуска	2010	2011	2012

***** *Примечание:* 1891ВМ7Я содержит 2 ядра CPU с архитектурой VLIW (развитие Эльбрус-2000 ЗАО «МЦСТ») и 4 ядра цифровых сигнальных процессоров (DSP) фирмы НПЦ «ЭЛВИС».

Микропроцессоры «МЦСТ-R500» и «МЦСТ-R500S» реализуют 32-разрядную версию архитектуры SPARC (v8), «МЦСТ-R1000» соответствует 64-разрядной версии SPARC v9. МП архитектуры «Эльбрус» оперируют с 32/64-разрядными данными.

С 2006 года в разработках ЗАО «МЦСТ» непосредственно участвует коллектив ОАО «Институт электронных управляющих машин имени И.С. Брука» (ОАО

«ИНЭУМ им. И.С. Брука»). Принято решение о стратегическом партнерстве в области научных исследований и разработки высокопроизводительных многопроцессорных программируемых микросхем и систем на их основе между компаниями ЗАО »МЦСТ» и ОАО НПЦ «ЭЛВИС» (результат сотрудничества – 1891ВМ7Я).

В активной фазе ведется работа над гомогенным 4-ядерным микропроцессором «Эльбрус 2S» (развитие 1891ВМ5Я, «Эльбрус S») на технологии 65 нм, который будет работать на частоте 1 ГГц. В части развития работ ЗАО «МЦСТ» над микропроцессорами предполагается их реализация на технологиях 45, 32, 22 нм и более высоких по мере их появления. При этом ставится задача предельно оптимизировать логическое и физическое проектирование, обеспечив достижение тактовых частот свыше 4 ГГц.

3.3.11. ОАО «НИИМА «Прогресс» (г. Москва)

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс» – ведущий дизайн-центр РФ (fabless) по разработке специализированной микроэлектронной элементной базы, межотраслевой центр проектирования СБИС типа «система на кристалле» (СНК), разработчик и производитель ГЛОНАСС/GPS навигационных приемников. ОАО «НИИМА «Прогресс» – головная организация по микроэлектронике в госкорпорации «Ростехнологии».

НИИМА «Прогресс», как межотраслевой центр проектирования СБИС типа СНК, осуществляет взаимодействие системных центров проектирования аппаратуры, центров разработки кристаллов, отечественных и зарубежных изготовителей СБИС. Так, при его участии как интегрирующего органа разработана полузаказная СБИС К5512БП1Ф со встроенным микропроцессорным ядром (разработчик ядра – дизайн-центр КМ211, изготовитель – ОАО «Микрон»), радиационно-стойкая СБИС «Алмаз-9», ведутся работы с НПЦ «ЭЛВИС» по созданию чипсета для цифрового телевидения.

НИИМА «Прогресс» разрабатывает отдельные сложнофункциональные (СФ) блоки (IP-блоки – по зарубежной терминологии), прототипы СНК и СФ-блоков на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и базовых матричных кристаллов (БМК) с участием ОАО «Микрон», ОАО «НИИЭТ», ОАО «Ангстрем». Методология создания СБИС СНК предполагает повторное использование готовых, ранее разработанных по определенным правилам, верифицированных и аттестованных СФ-блоков. Проектирование СФ-блоков в стиле повторного (многократного) использования» в 2-3 раза дороже проектирования для однократного использования. В то же время повторное использование СФ-блока в составе СБИС СНК в 10–100 раз дешевле его проектирования с нуля. НИИМА «Прогресс» поддерживает заводы-производители в части разработки библиотек стандартных элементов, памяти, а также в части адаптации систем автоматического проектирования (САПР) для разработки цифровых, аналоговых и смешанных микросхем.

Таким образом, не занимаясь напрямую в явном виде разработкой собственных микропроцессорных или микроконтроллерных БИС, НИИМА «Прогресс» участвует своими работами в их создании путем кооперации и взаимодействия с другими организациями разработчиков и изготовителей.

В разд. 3.3.1–3.3.10 были рассмотрены основные российские разработчики (fabless) и изготовители (foundry) микропроцессоров и микроконтроллеров. Помимо них в РФ развернута широкая сеть дизайн-центров (более 30), занимающихся профессиональной fabless-деятельностью в этой области. Не вдаваясь в подробности о роли дизайн-центров микроэлектроники в развитии отечественной электронной промышленности, рассмотрим кратко ряд из них, имеющих отношение к микропроцессорам и микроконтроллерам.

3.3.12. ООО «Дизайн-центр КМ211» (г. Зеленоград)

Входит в международную группу KM Core. Основные направления деятельности – разработка для заказчиков цифровой части микросхем (IP-блоков) с активным использованием собственных ядер. Микропроцессорные ядра и собственные IP-блоки, а также мощная программная поддержка микропроцессорных решений в сочетании с низкими административными издержками дают весомые преимущества по сравнению с зарубежными и российскими аналогами. В арсенале КМ211 три процессорных направления:

- RISC-ядро «КВАРК», 32 бита, Linux;
- Микроконтроллерная платформа «КРОЛИК» (8- 16- 32);
- Мультимедийная платформа «ГИДРА» (32-разрядные DSP-оптимизированные ядра).

32-разрядное процессорное ядро «КВАРК» реализовано в составе микросхемы К5512БП1Ф, изготавливается на «Микроне» на базе 0,18 мкм КМОП-техпроцесса HCMOS8D. Характеристики м/с К5512БП1Ф приведены выше (разд. 3.2, табл. 3.3).

Архитектура семейства «КРОЛИК» для микроконтроллерного применения представлена ядрами КМХ8 и КМХ32 разрядностью 8 и 32 бита соответственно и предназначена для создания малопотребляющих (обладающих минимальными размерами ядра), начального уровня производительности защищенных микросхем с повышенными требованиями к надежности. Семейство микропроцессоров «КРОЛИК» ориентировано на высокую эффективность Си-компилированного кода с повышенными требованиями к стоимости микросхемы и безопасности данных. Ядра спроектированы с учетом требований стабильности работы в условиях нестабильного питания, рассинхронизации тактового сигнала и иного рода воздействий. Архитектура и система команд хорошо приспособлены к особенностям языка Си, что дает высокую плотность кода при минимальных размерах ядра и низком энергопотреблении.

В табл. 3.20 представлены результаты синтеза ядер максимальной конфигурации адресных пространств с регистровым файлом.

Таблица 3.20. Характеристики ядер семейства «КРОЛИК», версия KMX

		KMX8	KMX32	Ед. измер.
Общие характеристики	Вычислительная эффективность, тест Dhrystone		2,1	DMIPS/МГц
	Вычислительная эффективность, тест Coremark		2,1	Coremark/МГц
	Разрядность операндов	8	32	бит
	Размер кода, генерируемого из Си исходников, в сравнении с ARM Thumb-2 (100%)		97	%
90 нм, оптимизация по площади	Площадь (коэффициент заполнения 70%)	0,026	0,09	мм^2
	Размер в условных вентилях (gatecount)	10	33	тыс. вентилей
	Потребление динамическое	12	28	мкВт/МГц
	Ток потребления в статическом режиме	1,25	2,8	мкА
90 нм, оптимизация по быстродействию	Рабочая частота, не менее	100	100	МГц
	Площадь (коэффициент заполнения 70%)	0,035	0,12	мм^2
	Размер в условных вентилях (gatecount)	13	36	тыс. вентилей
	Потребление динамическое		40	мкВт/МГц
	Ток потребления в статическом режиме		5	мкА
180 нм, оптимизация по площади	Площадь (коэффициент заполнения 70%)	0,178	0,53	мм^2
	Потребление динамическое		192	мкВт/МГц
	Ток потребления в статическом режиме		15	мкА
180 нм, оптимизация по быстродействию	Рабочая частота, не менее	50	50	МГц
	Площадь (коэффициент заполнения 70%)	0,266	0,94	мм^2
	Потребление динамическое		296	мкВт/МГц
	Ток потребления в статическом режиме		33	мкА
Altera Cyclone EP4CE115	Размер ядра (логических элементов)	3000	3500	LE

Примечание: по 90 нм использовался процесс TSMC 90LP; по 180 нм для KMX8 – «МИКРОН CMOSF8»; для KMX32 – «МИКРОН HCMOS8D».

Области применения семейства микропроцессоров «КРОЛИК»:

- микроконтроллеры общего назначения,
- встраиваемые системы,
- смарт-карты,
- банковские карты,
- SIM-карты,
- идентификация личности и паспортно-визовые документы,
- ультранизкопортребляющие микросхемы.

Платформа «ГИДРА» – собственная архитектура для обработки Video и Audio. Мультипроцессорная платформа включает в себя:

- KM211_KVARC микропроцессорное ядро или стороннее CPU в качестве управляющего процессора с операционной системой.
- Вычислительный блок HYDRA, включающий один или более:
  - потоковых процессоров для возможности real-time разбора или компрессии потока данных (BS_CPU);
  - DSP процессоров, FPU и fixed point, 4xSuperscalar, 4xSIMD, 4xVector (DC_CPU) установленных на отдельной высокоскоростной шине.

IP-блоки разработки KM211 приведены в табл. 3.21.

Таблица 3.21. Характеристики IP-блоков собственной разработки КМ211

Краткая характеристика IP-блока	Степень готовности
Арифметические сопроцессоры и ускорители	
16 × 16 умножитель – аккумулятор	В кремнии
Блок вычисления 32-разрядного CRC с произвольным образующим полиномом разрядностью до 32 бит	Готов
Блок вычисления 16-разрядного CRC с образующим полиномом $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$	В кремнии
Смарткарты и RFID	
Блок интерфейса ISO14443 тип A	В кремнии
Блок I/O ISO7816	В кремнии
Блок интерфейса ISO14443 тип A/B	В разработке
Контроллеры	
Контроллер Ethernet, подуровень MAC	В кремнии
1-Wire контроллер	Готов
AC97 Host контроллер	В кремнии
SATA2 контроллер	Готов
Контроллер TFT LCD	В кремнии
Интеллектуальный контроллер DMA	В кремнии
Контроллер резистивного сенсорного экрана TSCI	В кремнии
USB Device 2.0 Low Speed/Full Speed контроллер	В разработке
USB Host 2.0 Low Speed/Full Speed контроллер	В разработке
ONFI совместимый Flash контроллер (асинхронный вариант)	В разработке
Периферийные блоки	
Сторожевой таймер	В кремнии
Таймеры	В кремнии
Часы реального времени	В кремнии
Контроллер JTAG	В кремнии
ШИМ контроллер	В кремнии

3.3.13. ООО «НПП «Цифровые решения» (г. Москва)

Основано на базе лабораторий и выпускников МГТУ им. Баумана. Компания является дизайн-центром по проектированию цифровых СБИС с последующим изготовлением на отечественных и зарубежных кремниевых фабриках. Выполняет разработку 3-4 СБИС в год, в том числе типа «система на кристалле» (СНК).

Среди выполненных проектов ООО «НПП «Цифровые решения» – разработка СБИС 32-разрядного микроконтроллера на базе ядра ARM Cortex-M4F, специализированного под задачи управления асинхронными электродвигателями и электропривода в целом. Заказчиком данной работы является ОАО «НИИЭТ» (табл. 3.12). В состав микроконтроллера вошел широкий набор как аналоговой, так и цифровой периферии, для производства СБИС была выбрана фабрика TSMC (Тайвань). Используемая технология CE018G (КМОП, 0,18 мкм, Embedded Flash). В разработке использовались СФ-блоки (IP-блоки) ОАО «НИИЭТ», ООО «НПП «Цифровые решения» и других зарубежных компаний. В результате работы было

налажено сотрудничество со следующими производителями аналоговых и цифровых IP-блоков: ARM; TSMC; S3 Group; Avnet ASIC Israel; Arasan.

ООО «НПП «Цифровые решения» выполнило проектирование топологии первого отечественного мультиклеточного процессора серии MultiClet P1 «МСр0411100101». Заказчиком работы является ОАО »Мультиклет» (см. ниже). Исходными данными для разработки топологии являлась схема электрическая (verilog netlist), переданная заказчиком. Топология мультиклеточного процессора разработана для кремниевой фабрики SilTerra (Малайзия), технологический процесс: CL180G (КМОП 0,18 мкм).

При проектировании СБИС с целью сокращения срока разработки и снижения рисков получения неработоспособной микросхемы целесообразней приобретать некоторые IP-блоки в готовом виде. ООО »НПП «Цифровые решения» имеет практику использовать готовые IP-блоки как иностранных поставщиков, так и собственной разработки.

3.3.14. ОАО «Мультиклет» (г. Екатеринбург)

MULTICLET® ОАО »Мультиклет» – российская fabless-компания, занимающаяся разработкой высокопроизводительных и отказоустойчивых процессорных ядер и процессоров с низким энергопотреблением, спроектированных на базе мультиклеточной архитектуры, а также устройств на их основе. С апреля 2011 г. – резидент космического кластера фонда «Сколково».

Мультиклеточная архитектура – это начинающее сейчас развиваться направление в вычислительных системах, представляющее новое решение математической проблемы распараллеливания. «Мультиклет» построен по так называемой постфоннейманской архитектуре, в которой поток команд одновременно выполняется на нескольких вычислительных устройствах (клетках), и основной вопрос состоит в том, как распределять команды по клеткам.

На данный момент разработаны две модели 4-клеточных процессорных ядер:

1) МСр0411100101 – ориентировано на достижение максимальной производительности;
2) МСс0402100000 – ориентировано на предельно низкое энергопотребление.

Первое из них (МСр0411100101) уже изготовлено на кремниевой фабрике SilTerra (Малайзия) по технологическому процессу CL180G (КМОП 0,18 мкм), сборка – в 240-выводные металлокерамические корпуса CQFP-240 (4245.240-6) в ОАО «Воронежский Завод Полупроводниковых Приборов – Сборка» («ВЗПП-С»).

Основные технические параметры ИМС мультиклеточного процессора:

- ядро: МСр0411100101, российское;
- кол-во ядер: 1 (4 клетки);
- техпроцесс: 0,18 мкм, КМОП;
- разрядность: 32/64 бит;
- тактовая частота: 100 МГц;
- производительность: 2,4 GFLOPs;
- память данных: 128 Кб (4×4K×64);
- память программ: 128 Кб (4×4K×64);

- напряжение питания: 1,8 В (ядро) и 3,3 В (периферия);
- потребляемая мощность: 1,08 Вт (максимальная);
- плавающая запятая: есть;
- корпус: металлокерамический CQFP-240 (4245.240-6);
- температурный диапазон: –60...+90 °С (приемка «5»).

Срок окончания освоения – 2014 год.

Основными потребителями МСр0411100101 являются компании, разрабатывающие и производящие навигационное оборудование. Это «Концерн «Гранит», НИИ КП, НПЦ «НПО «Марс», НПК «Авионика», «Дальприбор». Вместе с тем этот продукт может иметь и общепромышленное применение.

В ближайших и перспективных планах ОАО «Мультиклет»:

- создание на FPGA 16-клеточного процессора с топологической нормой 45 нм, быстродействием 18 Gflops и сверхнизким энергопотреблением для обработки аудиовидеосигналов;
- разработка 64-клеточного процессора по технологии 22 нм с производительностью 384 GFLOPs для создания настольного суперкомпьютера;
- расширение номенклатуры процессоров, адаптированных в первую очередь для массовых задач, а также разработки СНК с использованием мультиклеточных ядер.

3.3.15. НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог)

Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета (НИИ МВС ЮФУ) создан почти 40 лет назад как базовый институт Минвуза СССР при Таганрогском радиотехническом институте в области разработки и создания перспективных средств вычислительной техники. В стенах института велись и ведутся фундаментальные и прикладные исследования по многим направлениям, флагманское из которых – высокопроизводительные многопроцессорные вычислительные системы с программируемой реконфигурируемой архитектурой.

К сведению, в 80-х годах в составе микропроцессорного комплекта серии 1815 (разработка и производство «ИНТЕГРАЛа») именно в сотрудничестве с НИИ МВС был разработан микропроцессор 1815ВФ3 для быстрого преобразования Фурье (ОКР «Девиз-3»). В 1989 году по заказу ЦКБ «Алмаз» был разработан и изготовлен в нескольких экземплярах проблемно-ориентированный вычислительный комплекс (ПВК-460) «Трасса», который представлял собой параллельную вычислительную систему с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой. ПВК-460 «Трасса» включал 512 микропроцессоров 1815ВФ3 с программируемой структурой и аппаратной реализацией макроопераций. В 1991 году по заказу НПО «Антей» была разработана и изготовлена в двух экземплярах с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой проблемно-ориентированный вычислительный комплекс (ПВК-1600) «Модуль-8». ПВК-1600 «Модуль-8» содержит 2048 параллельно работающих микропроцессоров 1815ВФ3 с программируемой структурой, 1486 микрокоммутаторов 1029КП2 и 1024 микросхемы регис-

тровой памяти 1517ИР1 и 1517ИР2, разработанных в НИИ МВС и серийно выпускаемых предприятиями союзного МЭП (1815ВФ3, как отмечалось выше, выпускал «Интеграл»).

Но были и отрицательные результаты. Разработанный совместно с НИИ МВС однокристальный арифметический сопроцессор с плавающей запятой (ОКР «Девиз-2») так и не был запущен в серию.

Современная элементная база (высокопроизводительные ПЛИС с частотами в сотни Мгц) позволяет реализовать концепцию построения параллельных универсальных высокопроизводительных вычислительных систем с программируемой архитектурой и структурно-процедурной организацией вычислений. При этом для разработок НИИ МВС актуальным становится перевод проектов в заказные специализированные процессорные СБИС (Application-Specific Integrated Circuit – ASIC).

3.3.16. НПК «Технологический центр» и ОАО «Завод-ПРОТОН-МИЭТ» (г. Зеленоград)

НПК «Технологический центр» МИЭТ представляет собой классический образец университетского исследовательского центра, обладающего технологической линией, позволяющей проводить исследования и разрабатывать изделия в области микро- и наноэлектроники, микро- и наносистемной техники, микро- и наноэлектронной аппаратуры.

Технологические возможности центра – изготовление пластин по технологиям КМОП БИС (1,2 мкм), биполярных БИС (1,5 мкм), тензорезистивных микродатчиков (3 мкм) для серийного производства и ОКР, технологии КМОП, Бип, КБиМОП (1,0 мкм) для исследований. Производственные мощности – до 2000 пластин диаметром 100 мм в месяц.

На сегодняшний день технологические возможности не позволяют МИЭТу производить микросхемы класса микропроцессоров и микроконтроллеров.

Также следует привести основные характеристики из ряда белорусских частных компаний, работающих в этой сфере.

3.3.17. ЧП «НТЛаб-системы» (г. Минск)

Частное предприятие (ЧП) «НТЛаб-системы» входит в группу компаний «НТЛаб», основанную в 1989 году, является резидентом Парка высоких технологий (ПВТ). Основной специализацией компании являются разработки в области микроэлектроники: встраиваемое программное обеспечение для микросхем, электронных блоков и систем; программные модели микроэлектронных узлов СФ-блоков; программные средства автоматизации процесса проектирования СБИС – компиляторы памяти; компиляторы и отладчики для микропроцессоров и микроконтроллеров.

Высокий научно-технический потенциал компании подтверждается участием в проектах по разработке элементной базы для российских систем навигации типа GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Beidou, участием в российско-белорусской программе «Траектория» (микросхемы для российских систем РЛС); является разработ-

чиком микросхем для системы приема цифрового телевещания стандарта DVB-T/H/SH, российского биотехнического паспорта, социальной и медицинской пластиковых карт и т.д. Российские компании (в том числе ОАО «Ангстрем» и ОАО »Микрон») активно используют ЧП «НТЛаб-системы» для выхода на рынки высокотехнологической продукции.

Компания «НТЛаб» работает со многими крупными кремниевыми фабриками по всему миру, проектируя изделия по 0,35, 0,18, 0,13, 0,09 мкм.

3.3.18. Научно-технический центр «ДЭЛС» (г. Минск)

Научно-технический центр «ДЭЛС» создан в 1992 году на базе МВИЗРУ ПВО и осуществляет свою деятельность в области микро- и радиоэлектроники. Основным направлением развития организации является разработка сравнительно несложных в функциональном отношении специализированных СБИС с приемкой заказчика для радиоэлектронной аппаратуры специального назначения по заказам предприятий и организаций оборонно-промышленного комплекса. Это различного рода формирователи (временных интервалов с программируемыми параметрами, восьмиканальный буферный формирователь с цифровой фильтрацией импульсных помех, восьмиканальный буферный формирователь с тремя состояниями на выходе, шинный формирователь с тремя состояниями на выходе) и другие схемы. Изготовление разработанных СБИС – в основном в ОАО «Интеграл» (г. Минск).

Проектирование микросхем осуществляется с использованием методологии сквозного проектирования на основе языков описания аппаратных ресурсов (HDL). Такая методология позволила создать иерархическую библиотеку синтезируемых HDL-описаний (IP-блоков) цифровых устройств, которые могут быть использованы в качестве библиотечных макроэлементов при разработке новых микросхем, в том числе типа СНК.

3.4. Инструментальные средства разработки и отладки для МП и МК

По определению «микропроцессор – это программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации».

Первые программы для первых микропроцессоров и микроконтроллеров писались в машинных кодах на языке ассемблера. Недостатки ассемблера – высокая трудоемкость написания программ и длительное время овладения навыками программирования на этих языках. Набор или система команд для одного ядра может существенно отличаться от другого набора. Например, система команд семейства MCS-51 очень сильно отличается от системы команд AVR, хотя функционально они решают одинаковые задачи.

Сегодня большая часть исходного кода пишется на языках высокого уровня «Паскаль», C/C++ и др. Специальные программы-компиляторы преобразуют описания с языков высокого уровня в машинный код конкретного МП или МК. Разработчик аппаратуры должен обеспечить быстрое проектирование заказной сис-

темы управления с использованием МП и МК. Это определяет необходимость использования развитых инструментальных средств разработки и отладки и, прежде всего, систем программирования.

К числу основных инструментальных средств отладки относятся:

- внутрисхемные эмуляторы;
- программные симуляторы;
- платы развития;
- мониторы отладки;
- эмуляторы ПЗУ.

Данный список не исчерпывает всех типов существующих инструментальных средств отладки. Кроме указанных существуют и комбинированные устройства и наборы, которые позволяют компенсировать недостатки основных средств, взятых порознь.

Любое из перечисленных инструментальных средств состоит из нескольких взаимодействующих (программных либо аппаратных) функциональных модулей. Каждый из них обеспечивает определенный круг сервисных услуг при разработке и отладке программ. Некоторые из модулей специфичны для того или иного типа инструментальных средств разработки, другие используются практически во всех вариантах систем разработки программ для микропроцессоров и микроконтроллеров.

Как минимум система разработки содержит следующие функциональные блоки:

- отладчик;
- узел эмуляции микроконтроллера;
- эмуляционная память;
- подсистема точек останова.

Более продвинутые модели могут содержать дополнительно:

- процессор точек останова;
- трассировщик;
- профилировщик (анализатор эффективности программного кода);
- таймер реального времени;
- программно-аппаратные средства, обеспечивающие возможность чтения и модификации ресурсов эмулируемого процессора «на лету», т.е. в процессе выполнения программы пользователя в реальном времени;
- программно-аппаратные средства, обеспечивающие синхронное управление, необходимое для эмуляции в мультипроцессорных системах;
- интегрированную среду разработки.

Внутрисхемный эмулятор – программно-аппаратное средство, способное замещать собой эмулируемый (моделируемый) процессор в реальной схеме. Стыковка внутрисхемного эмулятора с отлаживаемой системой производится при помощи кабеля со специальной эмуляционной головкой, которая вставляется вместо МК в отлаживаемую систему. Если МК нельзя удалить из отлаживаемой системы, то использование эмулятора возможно, только если этот микроконтроллер имеет отладочный режим, при котором все его выводы находятся в третьем состоянии. В этом случае для подключения эмулятора используют специ-

альный адаптер, который подключается непосредственно к выводам эмулируемого МК.

Симулятор – программное средство, способное имитировать работу микроконтроллера и его памяти. Как правило, симулятор содержит в своем составе отладчик, модель процессорного ядра и памяти. Более продвинутые симуляторы содержат в своем составе модели встроенных периферийных устройств, таких как таймеры, порты, АЦП, системы прерываний.

Платы развития – обычно это печатная плата с установленным на ней МК и всей необходимой ему стандартной периферией. На этой плате также устанавливают схемы связи с внешним компьютером. Там же имеется свободное поле для монтажа прикладных схем пользователя. Иногда предусмотрена уже готовая разводка для установки дополнительных устройств, рекомендуемых фирмой. Например, ПЗУ, ОЗУ, ЖКИ-дисплей, клавиатура, АЦП и др.

Эмулятор ПЗУ – программно-аппаратное средство, позволяющее замещать ПЗУ на отлаживаемой плате и подставляющее вместо него ОЗУ, в которое может быть загружена программа с компьютера через один из стандартных каналов связи. Это устройство позволяет пользователю избежать многократных циклов перепрограммирования ПЗУ. Это устройство сравнимо по сложности и по стоимости с платами развития и имеет одно большое достоинство: универсальность. Эмулятор ПЗУ может работать с любыми типами МК.

Все серьезные фирмы-разработчики (fabless) и изготовители (foundry) ИМС микропроцессоров и микроконтроллеров предлагают не только собственно микросхемы МП и МК, но и программно-аппаратные средства отладки к ним. Сегодня на рынке требуется не просто набор микросхем, а полное решение, включающее и рекомендации по применению, и инструментальные средства (хотя бы как минимум – демонстрационные платы).

Это не значит, что сами полупроводниковые фирмы полностью занимаются этими вопросами. Существуют много больших и малых фирм, специализирующихся на разработке, изготовлении и поставке инструментальных средств для микропроцессорных и микроконтроллерных семейств. Например, в России из наиболее известных фирм – «Фитон». Но для работы с ними у себя в этом направлении должны быть вовсе не многочисленные специальные подразделения по применению с грамотными высококвалифицированными специалистами в своем составе – программисты, системотехники, конструкторы, механики (не путать с «чистыми» схемотехниками или программистами топологии ИМС).

Если ваш микропроцессор или микроконтроллер является полным функциональным аналогом зарубежного по всем параметрам плюс широко известной архитектуры, для которой наработано развитое матобеспечение и огромное множество прикладных программ, то вопрос о необходимости предоставления своих отладочных средств обычно не стоит. В таких случаях потребителям рекомендуются уже существующие инструментальные продукты, в том числе зарубежные. Потребители и не спрашивают, так как сами хорошо знают, например, о среде разработки Keil uVision, внутрисхемном эмуляторе PICE-52 или пакете программно-аппартных средств CodeMaster-52.

Если же ваш микропроцессор или микроконтроллер хоть немного отличается от аналога, значит для него нет готовых программно-аппаратных средств. Надо самим делать свои или заказывать их изготовление сторонним исполнителям. В рабочем порядке с разработчиками микросхем обычно происходит уточнение режимов работы МК для каждого конкретного случая (потребителя) с расширением и совершенствованием руководства по эксплуатации МК по результатам их замечаний. С другой стороны, не может разработчик микросхемы МП или МК без опыта в создании модулей и конечных устройств разработать полную документацию с рекомендациями по эксплуатации на системном уровне для сложных изделий такого класса.

В советские времена в 80-х годах при каждом предприятии МЭП, выпускающем МП и МК, были созданы консультационно-технические центры (КТЦ) по применению микропроцессоров и микроконтроллеров с целью широкого внедрения последних в народное хозяйство. Головной КТЦ – на базе ЦНИИ «Циклон», головном институте МЭП по применению изделий электронной техники.

В современных условиях каждая фирма решает эти проблемы по-своему.

Так, в ЗАО «ПКК Миландр» технической поддержкой выпускаемых микросхем занимается специальный отдел разработки электронных модулей. В его составе – высококвалифицированные специалисты по созданию электронных узлов, устройств и модулей различного назначения. Направления деятельности отдела:

- осуществление технической поддержки микросхем, выпускаемых ЗАО «Миландр»;
- разработка программного обеспечения и аппаратных средств, необходимых для проведения разработок и отладки проектов с применением данных микросхем;
- обеспечение разработчиков аппаратуры рекомендациями и справочной документацией;
- помощь в решении проблем, возникающих при применении микросхем;
- проведение консультаций и семинаров;
- разработка демонстрационных прототипов изделий;
- оказание помощи в ведении проектов, совместные проекты и сотрудничество с предприятиями-потребителями продукции.

В настоящее время для потребителя решающим критерием выбора того или иного микроконтроллера для использования в аппаратуре является зачастую не сам контроллер и его технические характеристики, а наличие/отсутствие отладочной платы, среды разработки и программного обеспечения, которое сможет на нем работать. Поэтому разработчик МП обычно для завоевания рынка передает потенциальным потребителям своих микроконтроллеров программно-аппаратные средства отладки, причем во многих случаях безвозмездно, а также сотрудничает с вузами по включению в учебные программы курсов и проведению лабораторных практикумов по микроконтроллерам архитектуры Cortex-M (с передачей вузам соответствующих отладочных комплексов), чтобы по окончании учебы будущий специалист был готов решать профессиональные задачи.

3.5. Тенденции развития современных микроконтроллеров

3.5.1. Переход потребителей на 32-битные микроконтроллеры

Сегодня большинство применяемых МК основано на 8-разрядной архитектуре процессоров. Доступны также 16-разрядные МК, но их доля на рынке остается небольшой по сравнению с 8-разрядными МК. В последние годы наблюдается активный переход разработчиков встраиваемых систем на использование 32-разрядной архитектуры микроконтроллеров. Самой важной причиной движения в сторону 32-разрядных МК является усложнение встраиваемых устройств под влиянием требований рынка. Так как встраиваемые продукты становятся все более функционально насыщенными, 8- и 16-разрядные МК не позволяют обеспечить требуемую **производительность**. Даже если 8- и 16-разрядные МК отвечают требованиям сегодняшних проектов, возможности дальнейшей модернизации таких устройств и повторного использования программного кода в будущих разработках уменьшаются. Пользователи переходят сразу на 32-разрядные МК, а не на 16-разрядные, так как как разница в цене невелика, а возможностей для выбора периферии, **инструментов разработки**, а также поставщиков чипов больше.

Еще одной причиной является то, что переход на 32-разрядные МК обеспечивает не только более чем десятикратное превосходство в **производительности**, но также позволяет снизить **энергопотребление**, уменьшить **размер программы**, ускорить разработку **программного обеспечения** и многократно его использовать.

Из 8-разрядных архитектур (PIC, AVR, MCS-51 наиболее широко используемая – MCS-51. Эта архитектура является популярной, так как ее предлагает много поставщиков, она проста в использовании, имеется множество доступных программных средств разработки.

Однако сегодня архитектура MCS-51 достигла предела своих возможностей. Не только работа с многоразрядными данными (16- или 32-битными) стала слишком медленной из-за побайтного способа их обработки, но также возник ряд физических ограничений, которые осложняют жизнь пользователям этой архитектуры. Например, размер программы ограничен 64 Кбайт. Можно достичь большей памяти программ с помощью страничной организации команд или хранения их вне кристалла (1880ВЕ1У, «Двина 51АС» работает только с внешней программной памятью), но разбиение памяти на страницы имеет много недостатков:

- растут непроизводительные затраты в том, что касается размера программного кода и времени выполнения команд;
- бесполезно расходуется память, так как банки памяти используются не полностью;
- необходим специальный код надстройки для доступа данных из других программ, и этот код использует пространство стековой памяти, которая весьма ограничена;
- нет стандартизированного переключения банков памяти, что может вызывать проблемы с компиляторами, отладчиками, а также делает сложным переход на другие продукты;

- если разбиение памяти на страницы выполняется извне, это уменьшает число доступных портов ввода/вывода, а также увеличивает стоимость системы и, кроме того, снижает надежность из-за дополнительных соединений на печатной плате.

Архитектура MCS-51 разработана для работы с 16-битными адресами (используются 16-битные счетчики программ, 16-битные указатели данных, а набор команд разработан для поддержки адресного пространства 64 Кбайт). Если требуется память более 64 Кбайт, то необходимы аппаратные и командные издержки для генерации дополнительных адресных бит.

Другим важным ограничением является пространство внутренней памяти. Стек может находиться только во внутренней памяти, которая ограничена размером 256 байт. Первые 32 байта используются для рабочих регистров (4 банка регистров с R0 по R7), и некоторая часть внутренней памяти может быть использована для переменных данных (например, при использовании памяти с побитовой адресацией для булевых данных она может находиться во внутренней RAM). В результате максимальный размер стековой памяти ограничивается. Существуют также ограничения на максимальное число регистров для выполнения специальных функций (SFR), а также количество указателей данных. МК содержат указатели множественных данных (DPTR), но модель программирования для использования DPTR не стандартизована, что усложняет портирование кода приложения на различные кристаллы MCS-51.

Работа процессора MCS-51 в значительной степени основана на использовании аккумулятора (ACC) и указателя данных (DPTR) для передачи и обработки данных. В результате появляется необходимость в использовании команд перемещения данных в/из ACC и DPTR, что приводит к увеличению размера кода и количества тактов исполнения команд.

Интерфейс памяти также ограничивает производительность 8- и 16-разрядных процессоров. Например, многие команды процессора MCS-51 имеют длину несколько байт. Так как интерфейс памяти программ является 8-разрядным, то для выборки таких команд нужно выполнить несколько циклов считывания.

Что касается показателей мирового рынка микроконтроллеров, то они следующие:

- исторически 8-битный сегмент МК доминировал по объему продаж, но 32-битный сегмент стал лидирующим, начиная с 2010 г. Разница между продажами 4-/8- и 32-битных МК составляла 235 млн долл. в 2010 г., но с того времени отрыв значительно увеличился. В 2013г. сегмент 32-битных МК достиг 6,9 млрд долл., что на 57% больше сегмента 4-/8-битных устройств;
- по объемам поставок, 16-битные МК стали наибольшим сегментом в 2011 г., впервые опередив 8-битные устройства. Поставки 16-битных МК возросли на 11% в 2012г., после 23%-го увеличения в 2011 г., частично благодаря автомобильным применениям;
- в 2013 г. поставки 16-битных МК возросли на 9% до 7,9 млрд шт., поставки 4-/8-битных МК возросли на 6% до 6,7 млрд шт., а поставки 32-битных МК – на 20% до 4,5 млрд шт.

3.5.2. Лицензионные архитектуры MIPS32 и Cortex-M

Особенностью рынка микроконтроллеров является огромное разнообразие применений, поэтому востребованными являются десятки архитектур. До определенного момента лидерство на рынке 32-разрядных МК сохраняли архитектуры тройки лидеров – Renesas (SuperH), NEC (V850x) и Freescale (68000). Но сегодня в мире доминируют архитектуры MIPS32 (разработчик – компании MIPS Technologies Inc.) и Cortex-M (разработчик – компания ARM), особенно последняя (охватывает 75% рынка). MIPS и ARM продали и продают лицензии на свои архитектуры, которые представлены сегодня на рынке в вариациях от разных производителей. Они объединяют вокруг себя около трех десятков производителей, предлагающих рынку номенклатуру из более чем двух сотен микроконтроллеров.

Архитектуры MIPS используют такие компании как AMD, Broadcom, Infeneon, Realtek, Sharp, Sony, Toshiba, Microchip. Клиентами ARM на архитектуры Cortex-M являются такие известные компании, как Atmel, Cirrus Logic, Fujitsu, Intel, Freescale (Motorola), National Semiconductor, NXP (Philips), ST Microelectronics, Texas Instruments. Также их используют российские компании (см. выше).

Для потребителя унифицированная архитектура процессорного ядра позволяет если не снизить, то хотя бы замедлить рост расходов на приобретение инструментария разработчика, стандартных библиотек и драйверов и создание программного обеспечения. По разным оценкам, на долю работ по созданию программного обеспечения в проектах систем, где используются микропроцессоры и микроконтроллеры, приходится от 60 до 80% всех расходов.

В 32-битном сегменте МК разработчики редко работают с ассемблером, в основном используют языки высокого уровня. Поэтому если вдруг понадобится переход с одного производителя на другой (срыв поставок, отсутствие нужных библиотек, новые функциональные требования, увеличения цен и т.д.), то часть программного кода, связанная с ядром, даже не потребует изменения. Необходима будет только работа на уровне драйверов периферии. В итоге получается, что если писать программный код с четким делением между ядром и периферией, то можно обеспечить условия для очень быстрого перехода с одного производителя на другой.

Таким образом, де-факто архитектуры MIPS32 и Cortex-M стали мировыми стандартами. Для изготовителя выгоднее приобрести лицензию на производство МП и МК уже раскрученной архитектуры, чем МП и МК новой архитектуры с новой системой команд (у нее на рынке практически нет шансов) или воспроизводить аналог путем копирования топологии (сложность современных микросхем по проектным нормам, количеству слоев металлизации, многоядерности, технологическим «ноу-хау» такова, что он не поддается прямому восстановлению). Что касается нового программного обеспечения, то современный транслятор с языка программирования – это миллионы строк программы, это огромные затраты высококвалифицированного труда.

Не вдаваясь в технические особенности, кратко сравним архитектуры ARM и Cortex-M: оба ядра MIPS32 и ARM Cortex-M имеют 32-разрядную шину данных и сокращенный набор команд RISC. На этом их сходство кончается. MIPS ориентирована на области применения с высокой производительностью, Cortex-M – на мобильные аппараты начального уровня с упором на управление.

3.5.3. Особенности проектирования и организации производства микросхем для космического применения

Так называемая «космическая микроэлектроника» предназначена для обеспечения высоконадежной электронной компонентной базой (микросхемами, дискретными полупроводниковыми приборами, датчиками, гироскопами, системами на кристалле – СНК и системами в корпусе – СВК) радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники.

В отличие от так называемой коммерческой или индустриальной (иначе – промышленной или двойного назначения), ЭКБ космического назначения (ЭКБ КН) обладает целым рядом принципиальных особенностей [5–18], которые следует рассмотреть более подробно. Прежде всего это:

1) высокие требования к надежным характеристикам (безотказность, длительные сроки эксплуатации, ресурс работоспособности и др.). В частности, для активных компонентов ЭКБ величина безотказности л должна быть не менее 10^{-9}–10^{-10}, а для пассивных компонентов и вовсе 10^{-11}–10^{-12};
2) исключительно низкие объемы потребления и соответственно – объемы производства, которые никак нельзя отнести к серийному производству, а более всего – относятся к мелкосерийному или даже единичному (оригинальному, разовому) производству.

Зачастую требуемое количество микросхем или дискретных полупроводниковых приборов для конкретного космического проекта не превышает всего 10–30 штук (и это с учетом так называемого ЗИПа – запасного комитета ЭКБ для регламентных проверок и текущего ремонта).

Обычно максимальное количество изделий космической микроэлектроники для крупного национального космического проекта не превышает 10–50 тысяч штук – и это на протяжении всего жизненного цикла разрабатываемого космического изделия, который, как известно, недолог – от 5-ти до максимум 15-ти лет:

3) исключительно широкая и разнообразная номенклатура ЭКБ, обусловленная разнообразием задач, решаемых соответствующей РЭА КН. По данным открытых источников (периодическая печать, отчеты NASA и других национальных космических ведомств, в том числе – ESCJES – координационного центра Европейского космического агентства по применению электронных компонентов для космических программ), функциональнополные ряды номенклатуры только интегральных микросхем составляют от 1000 (для конкретных «простых» космических проектов типа «Челнок») до 10 000 (для крупных научно-космических программ типа лунных или марсианских экспедиций, различных «Скайлэбов» и «Мессенджеров»);
4) высокая стойкость к воздействию различного рода многообразных излучений – как открытого космического пространства, в условиях которого должны работать космические обитаемые и необитаемые объекты, так и в условиях воздействия остаточной радиации от находящихся иногда на борту космических объектов (в нарушение соответствующих международных конвенций) портативных ядерных реакторов автономных энергетических установок.

По официальным данным, эти изделия должны выдерживать величину положительной дозы радиации не менее 50 крад, а для специальных КЛА (военных спутников связи, навигации, радиоразведки и др.) – обеспечивать работоспособность в течение заданного времени (от 20 мин. до 20 ч) даже в условиях применения ядерного взрыва, который теоретически, в соответствии с военными доктринами ряда государств – членов НАТО, может быть применен потенциальным противником (или террористами) для вывода из строя космического объекта.

Следует особо подчеркнуть, что кроме устойчивости к обычным для «наземной» аппаратуры радиоактивным воздействиям к изделиям космической микроэлектроники предъявляется целый ряд дополнительных специфических требований по обеспечению их устойчивости к другим специфическим, экзотическим видам дестабилизирующих факторов, которые имеют место быть только в условиях открытого космоса и практически не встречаются на планете Земля:

5) расширенный диапазон работы и температур хранения («спящего» режима). Обычно к ЭКБ КН предъявляются требования обеспечения работоспособности в диапазоне от низких температур (от –70 до –60 °С) до высоких (от +125 до +150 °С), а для отдельных типов КА и сфер применения микроэлектронные изделия должны вообще работать в условиях открытого космоса (обычно это относится к приборам так называемой «вакуумной» электроники);
6) необходимость гарантированного обеспечения длительных (от 15 лет – и более) сроков безотказной работы в условиях воздействия факторов космического пространства – как ионизирующих и электромагнитных воздействий, перепадов температур окружающей среды, так и в условиях экстремальных периодических и однократных перегрузок (ускорений), механических ударов, воздействия последствий невесомости, влаги, «космической плесени» и многих других экстремальных факторов, которые не всегда встречаются даже в военных применениях аналогичной по функциональному назначению и номенклатуре ЭКБ.

Как следует из вышеперечисленных основных особенностей ЭКБ КН, тенденции и особенности развития космической микроэлектроники существенно отличаются от так называемого «магистрального пути» (ROUDMAP) развития не только общегражданской (индустриальной) микроэлектроники, но и по ряду важнейших параметров и существенно превышают требования, предъявляемые к так называемым «военным» (military) микроэлектронным изделиям.

Как известно, тенденция постоянного уменьшения величины проектных норм БИС в бытовой и промышленной электронике прежде всего связана с возможностью снимать как можно большее количество годных кристаллов с одной полупроводниковой пластины, стоимость которой уже достигает от 500 до 2000 долл. США. Это связано с так называемыми «следствиями закона Мура», согласно которому уменьшение площади кристалла микросхемы в два раза обеспечивает увеличение как минимум в четыре раза съема годных кристаллов с пластины того же диаметра.

Для изделий космической электроники характерно мелкосерийное производство со всеми вытекающими последствиями.

3.6. Особенности использования фаблесс-модели при проектировании микроэлектронных изделий для космических применений

В данном разделе попытаемся в достаточно популярной форме изложить основные принципы организации, механизмов реализации, а также технические, методологические, экономические и иные особенности и проблемы этого действительно современного и стремительно развивающегося микроэлектронного бизнеса. Понимание сущности этих проблем необходимо руководителям и техническим специалистам собственно микроэлектронных предприятий, имеющих дело с проектированием и (или) производством микроэлектронных изделий космического направления, но в не меньшей степени – заказчикам таких микроэлектронных изделий, которые или уже начали работу, или только собираются работать по этой развивающейся модели бизнеса с отечественными или зарубежными микроэлектронными дизайн-центрами.

3.6.1. Предпосылки возникновения и развития фаблесс-модели бизнеса

Фаблесс-модель как направление микроэлектронного бизнеса изделий индустриального применения (ИП) получила активный импульс к развитию ввиду взрывного роста стоимости создания полупроводниковых фабрик. Сегодня, чтобы построить не самую крутую полупроводниковую фабрику, нужно вложить от 2 до 4 млрд долл., не считая издержек на ее эксплуатацию, которые составят от 2-х до 4-х млн ежемесячно. Таким образом, чтобы обеспечить минимальную рентабельность проекта строительства своей фабрики, годовая прибыль инвестора должна составить порядка 200–400 млн долл., что возможно только при объеме продаж свыше 2 млрд долл. в год. В этой связи возникает существенный вопрос: что изготавливать, кому и где продавать изделия на эти 2 млрд долл.?

На рис. 3.11 представлена динамика изменения стоимости строительства типового полупроводникового завода за четверть века (с 1983 г. по докризисный 2007 г.) с привязкой к диаметрам производимых пластин и значениям минимальных проектных норм [1].

Как следует из рис. 3.11, если в 1983 г. для организации производства микросхем с проектными нормами 1,2 мкм на пластинах диаметром 100 мм можно было выложить всего-навсего 200 млн долл., то уже в 2001 г. для желающих заняться микроэлектронным бизнесом наступили черные времена – за фабрику 200 мм пластин с нормами 0,25 мкм надо было выложить не менее 3 млрд «зеленых».

Именно по этой причине многие микроэлектронные компании, годами занимающиеся полным циклом проектирования и производства микросхем (IDM – типа по общепринятой классификации), в 2008–2010 гг. стали отказываться от дальнейшей модернизации собственного производства в связи с резким удорожанием стоимости приобретения новых технологий и строительства заводов и стали активно пользоваться услугами так называемых «кремниевых фабрик» (foundries) (TMCS, UMC и др.). Одновременно с этим появились многочисленные fabless-компании, занимающиеся только проектированием микросхем с

последующим размещением заказов на их изготовление на этих специализированных производствах – фабах.

В целом процесс разделения труда в мировой микроэлектронике пошел еще дальше – кроме silicon foundries (кремниевые мастерские) и fabless (фаблесс дизайн-центры) появились специализированные assembly facilities (сборочные производства), а также test foundries (контрактные тестировщики). Использование такого разделения функций при создании новых микроэлектронных изделий действительно позволяет существенно экономить финансовые средства и сокращает время выхода на рынок с конкурентоспособной продукцией.

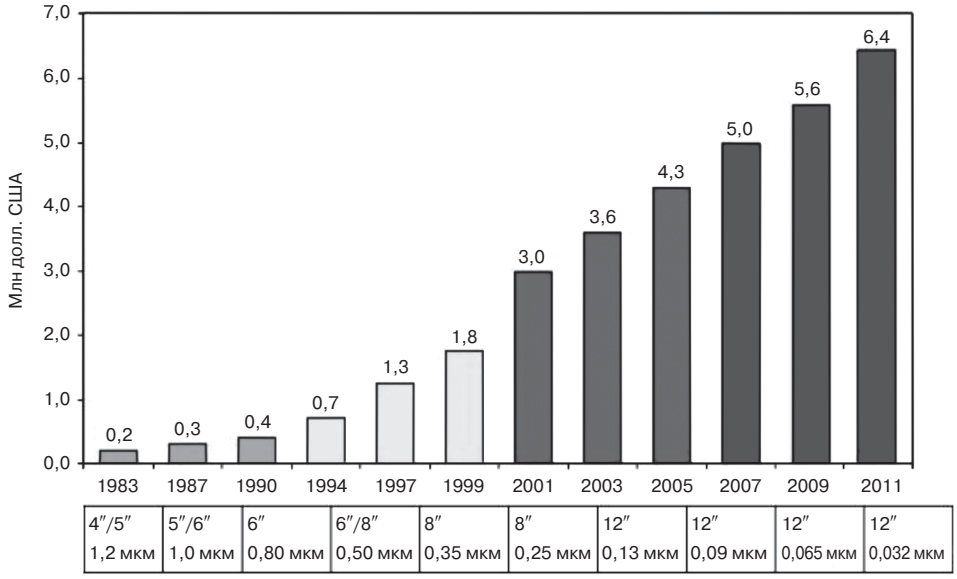


Рис. 3.11. Увеличение стоимости полупроводниковых производств в связи с переходом на более жесткие минимальные проектные нормы и увеличением диаметра обрабатываемых пластин

3.6.2. Структура и особенности фаблесс-бизнеса

В структуре фаблесс-бизнеса можно выделить два разных направления [19, 20] (рис. 3.12): приборное – ориентированное на создание законченных микроэлектронных изделий и направление виртуальных компонентов – ориентированное на создание базовых библиотек и IP-блоков. Конечно, в фаблесс-бизнесе оба эти направления тесно взаимосвязаны, но для понимания особенностей организации бизнеса лучше рассматривать их отдельно.

Основные особенности работы предприятия по второму направлению фаблесс-бизнеса – виртуальных компонентов достаточно квалифицировано и подробно рассмотрено в статье Тимура Палташева, Артема Игликова и Михаила Алексеева «Развитие индустрии полупроводниковых виртуальных компонентов» // Компоненты и технологии. – № 5. – 2012. – С. 172, поэтому мы уделим больше внимания приборному направлению.

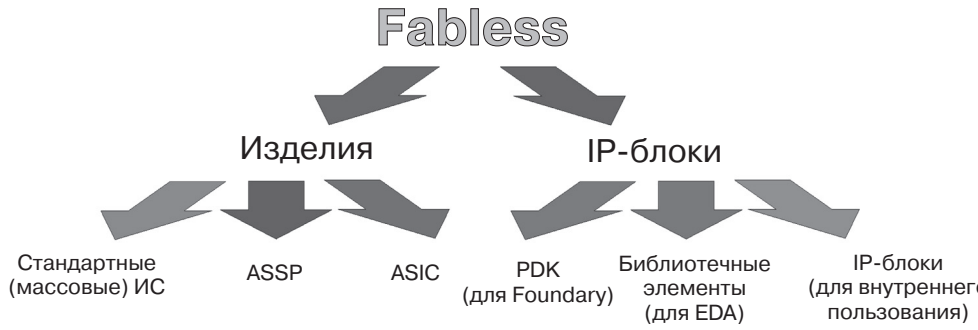


Рис. 3.12. Направления фаблесс-бизнеса

Формально в приборном направлении фаблесс-модели в зависимости от конкретного типа микроэлектронного продукта можно выделить три самостоятельных подраздела:

1) фаблесс-дизайн заказных изделий (ASIC);

2) фаблесс-дизайн специализированных изделий (ASSP);

3) фаблесс-дизайн стандартных изделий.

В любом случае определяющим фактором для выбора конкретного направления фаблесс-бизнеса является конечная (рыночная) цена изделия. Нами в работе [19] предложен ряд простых формул для оценочного расчета величины предельной цены изделия (P) для трех вышеназванных основных типов бизнес-моделей:

а) для foundry: $$P_{FB} = W_F(x) + \frac{D + \Delta_D}{Q};$$

б) для IDM: $$P_{IDM} = W_F(x) + \frac{D(x)}{Q};$$

в) для fabless: $$P_{FL} = W_F + \Delta_F + \frac{D(x)}{Q} + L(Q).$$

Здесь приняты следующие обозначения:

W_F – себестоимость производства изделий;

D – стоимость проектирования изделия;

Δ_F – прибыль стороннего производства (фаундри);

Δ_D – прибыль стороннего дизайн-центра;

Q – объем продаж;

L – логистические издержки;

(x) – управляемость (возможность контролировать издержки).

Из анализа этих упрощенных выражений видно, что при прочих равных условиях по фаблесс-модели заработать на стандартных (массовых) изделиях

практически невозможно – стоимость изготовления по фаундри равна или выше среднерыночных цен. Единственная очевидная ниша для фаблесс-бизнеса – это заказное/специализированное проектирование (когда аналог-заменитель отсутствует). При этом конечный заказчик (покупатель) понимает и соглашается, что в эту цену, помимо себестоимости производства изделия, входит также доплата разработчику за уникальность изделия (параметр D – стоимость проектирования).

Рассмотрим более подробно основные предпосылки и составляющие компоненты этого вида бизнеса и дадим их краткие характеристики.

3.6.3. Особенности выбора заказчика по фаблесс-проекту

Ключевой момент фаблесс-бизнеса – нахождение заказчика (потребителя) и организация с ним самой тесной кооперации. При этом, как показывает опыт, необходимым условием является следующее – фаблесс дизайн-центр на первой стадии развития бизнеса должен продолжительное время (несколько лет) сотрудничать с заказчиком. Это необходимо как для более детальной интеграции в научно-производственную политику заказчика (освоить сквозное проектирование) с уяснением используемых им (заказчиком) подходов и технических решений, так и для достижения определенного уровня доверия и взаимопонимания между заказчиком и дизайн-центром. Этот фактор имеет исключительно важное значение для изделий космического назначения в силу специфических требований, к ним предъявляемым. Понятно, что для получения действительно прорывных технических решений, как правило, требуется выполнить целый ряд «тяжелых» подготовительных НИОКР без гарантий коммерческого успеха (чаще всего за счет собственных финансовых средств фаблесс-центра).

На рис. 3.13 представлены обобщенные модели взаимодействия дизайн-центра с заказчиком для случаев проектирования заказных (ASIC) (рис. 3.13*а*) и специализированных (ASSP) (рис. 3.13*б*) микросхем.

Основное отличие между ними заключается в том, что для ASSP обычно заказчиков несколько и поэтому основным инициатором выступает сама фаблесс-компания, тогда как в случае с ASIC начальный импульс проекту придает заказчик, осознав и технически грамотно сформулировав свои потребности.

В любом случае заказчик – фирма, заинтересованная в уменьшении своих издержек и/или достижения превосходства своих изделий над конкурентными по потребительским характеристикам.

Исходя из соображений окупаемости для финансирования проекта (НИОКР) заказчиком обычно выделяется порядка 5–10% от годового объема продаж, т.е. заказчик должен быть очень «солидной» фирмой.

Однако наличие заказчика (заказчиков) является необходимым (обязательным), но не достаточным (как говорят математики) условием успеха фаблесс-проекта.

Рассмотрим *технические аспекты* организации фаблесс-бизнеса на основе обобщения собственного (ОАО «ИНТЕГРАЛ»), а также мирового опыта.

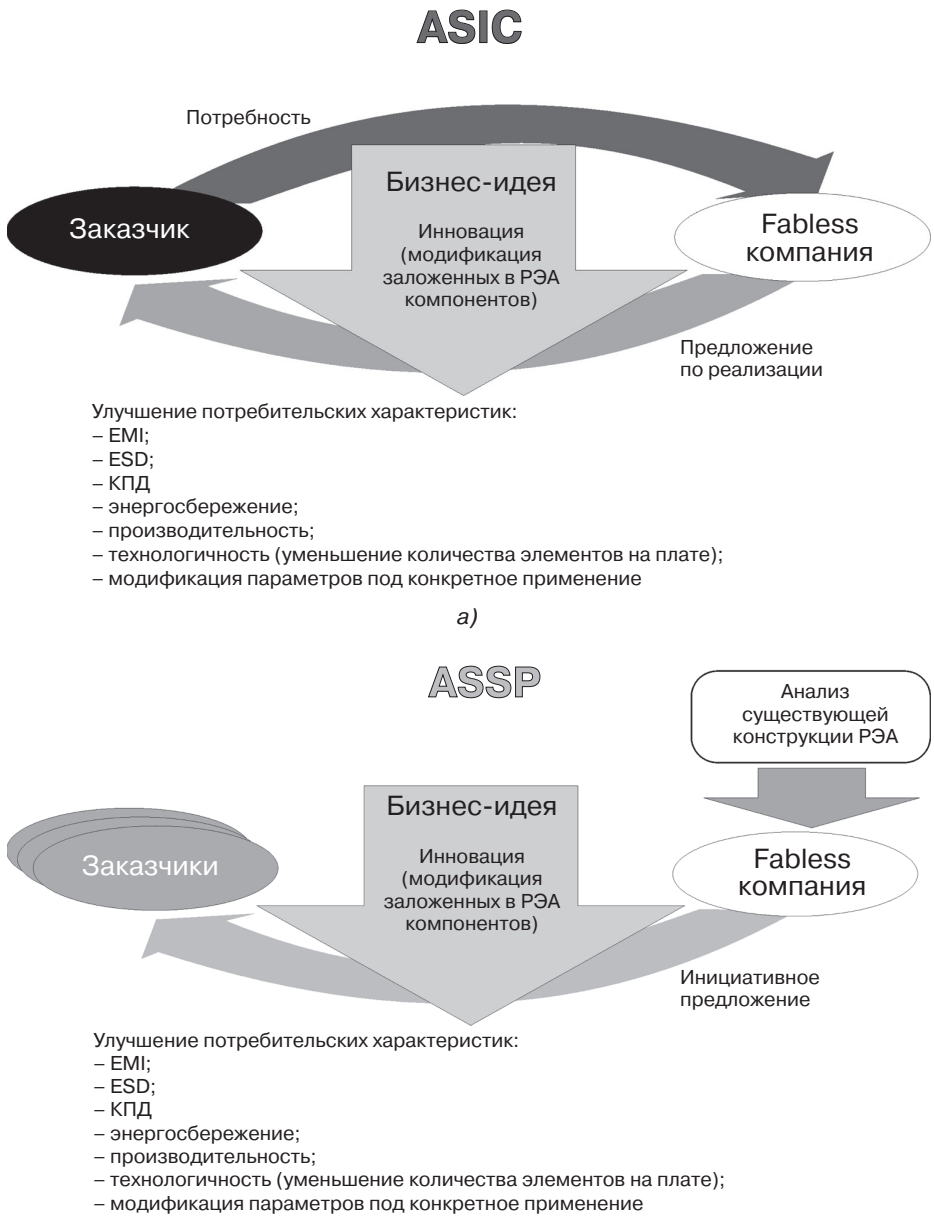


Рис. 3.13. Модели взаимодействия дизайн-центра с заказчиком [19]

3.6.4. Технические предпосылки и условия реализации типового фаблесс-проекта. Программное обеспечение и библиотеки проектирования

Обязательное условие для работы по этой модели – это наличие у фирмы набора лицензионных программных средств, полностью совместимых с требованиями

(регламентами) контрактных производителей микросхем (Foundries) и поддерживающих их библиотеки PDK (Process Design Kit). Такие средства производят признанные лидеры – Mentor, Cadence, Synopsys и т.д. Покупка лицензии и поддержка обычно оцениваются в сумму от 500 тыс. долл. до 1,5 млн долл. (зависит от комплектности и функциональности ПО). Что касается библиотек проектирования, то здесь подход двоякий: для части технологических процессов, не являющихся ноу-хау, PDK распространяются на бесплатной основе; вторая часть, содержащая процессы «с изюминкой», и особенно для случаев проектирования изделий класса military и aerospace, если и предоставляется, то уже только за деньги или в строгой увязке с объемами будущего фаундри-заказа. К сожалению, первая группа PDK, в силу своей распространенности, в основном ориентирована на создание типовых (массовых) изделий и малопригодна для фаблесс-бизнеса. Вторую же группу PDK фаундри предприятия рассматривают как свое IP и, как подсказывает наш опыт, крайне неохотно предоставляют дизайн-центрам, ассоциированным (связанным) с другими полупроводниковыми производствами (как правило, также за деньги).

3.6.5. Выбор технологического процесса изготовления изделия

На начальной фазе реализации проекта следует убедиться, что разработка действительно может быть реализована выбранным вами контрактным производителем с использованием его стандартного техпроцесса. Однако надо при этом понимать, что она не будет слишком прибыльной – при таком техпроцессе это должна быть цифровая либо довольно медленная аналого-цифровая микросхема, и здесь надо иметь в виду, что если ваша идея действительно чего-то стоит, она будет мгновенно растиражирована конкурентами.

Если же вы решите воспользоваться сложными техпроцессами, например, для радиочастотных схем (RFCMOS или RFBiCMOS), где конкуренция поменьше, то следует быть готовым к тому, что модели стандартных ячеек и элементов, предоставляемые производителем, могут оказаться недостаточно точными для того, чтобы обеспечить требуемое качество продукции с первого же раза, и потребуются дополнительные одна-две итерации для каждой новой разработки. А это стоит денег, и причем больших.

3.6.6. Необходимость наличия собственной аналитической базы

Наш опыт показывает, что нельзя полностью доверять моделям производителя, в большинстве случаев требуется использовать собственные аналитические и измерительные приборы для оптимизации выполнения разработки под выбранный техпроцесс. В частности, специалисты в области извлечения структурно-технологических параметров (в том числе и радиочастотных) должны иметь и уметь обращаться с современным ПО и «железом» типа IC-CAP от Agilent, однако в любом случае требуется дополнительное обучение сотрудников аналитических подразделений.

Необходимо также учитывать так называемый фактор «оптимизации под изготовителя». Например, когда разработка успешно завершена, сгенерирован и

передан на кремниевую фабрику (фаундри) GDSII-файл для радиочастотных и аналого-цифровых схем (как, впрочем, и для сложных цифровых), обычно в ответ от производителя выдается длинный список нарушений технологических ограничений (Design Rule Violations), которые нужно исправить. Это исправление занимает дополнительное время, хотя и не требует дополнительных расходов, так как выполняется обычно силами изначально задействованных в проекте специалистов по размещению и трассировке. Чтобы не получить от заказчика санкции за срыв ранее согласованных сроков при планировании, обязательно рекомендуем предусмотреть эту ситуацию и передавать GDSII-файл на фаб задолго до планируемого срока запуска «шаттла».

3.6.7. Изготовление опытных образцов

Для производства опытных образцов фаундри-заказа, как правило, используется так называемый «шаттл» (MPW), когда оплата стоимости производства изделия распределена между несколькими клиентами кремниевой фабрики, использующими этот же техпроцесс.

Получаемое небольшое в итоге количество изготовленных образцов позволяет вам убедиться в правильности использованных конструктивно-схемотических решений, но этого количества кристаллов совершенно недостаточно для проведения необходимых и установленных стандартами качества испытаний в полном объеме и оценки конструкции (чтобы подтвердить, что разработка готова к массовому производству). Один «шаттл» стоит от 20 до 50 тыс. долл. (при 90 нм или 130 нм техпроцессе). Если же полученные опытные образцы вообще не работают, следующего «шаттла», придется вам подождать несколько месяцев, пока не наберут клиентов на новый «шаттл». При этом надо иметь в виду возможные проблемы с фотошаблонами.

Если микросхемы работают, заказчик их испытал и дал свое заключение (что на практике редкость), производится заказ комплекта фотошаблонов (МПО). Стоимость такого комплекта для одной микросхемы варьируется от 55 тыс. долл. при 0,25 мкм техпроцессе до 300 тыс. долл. при 0,13 мкм техпроцессе и до 1 млн долл. при 65 нм. А если, как это обычно и случается, разработка нуждается в переработке, то платить вам придется снова. Обычная схема финансирования здесь: заказчик платит деньги фаблесс-фирме, а та рассчитывается с фаундри. Обращаем внимание, что здесь необходимо иметь фактор доверия, поскольку «деньги утром, а стулья вечером». Иногда, если авансирование не предусмотрено, это приходится делать из собственных средств фаблесс-фирмы (в лучшем случае за счет оплаты предыдущего этапа).

В этом бизнесе также необходимо учитывать особенности взаимоотношения дизайн-центра с фаундри при размещении заказа. Если размещается крупный заказ, например, под 30% мощностей фабрики, конечно заказчик получит статус VIP и наилучшие цены (Δ_F в формуле (3) будет минимальным). Если же нет, то все будет наоборот. Если вы не заказываете, скажем, пару сотен пластин ежемесячно, то для фабрики вы невыгодный клиент, из чего проистекает следующий факт: до тех пор, пока вы не станете проверенным и крупным клиентом, ваши микросхе-

мы будут производить по остаточному принципу и завышенным ценам. И если, например, AMD захочет заказать у TSMC дополнительно 500–1000 пластин в месяц, TSMC легко задвинет заказы мелких клиентов (и никуда последние не денутся). Если разработка простая и нечувствительная к технологическим разбросам (цифровая схема), можно поискать альтернативу (что, впрочем, также чревато срывом сроков), но если это сложный аналого-цифровой ВЧ прибор, он просто нигде больше не заработает, так как в конструкцию заложены PDK конкретного производителя, а разработка оптимизирована под конкретный техпроцесс.

Особое внимание разработчик должен уделить проблеме тестирования спроектированного изделия. Предположим, пластины с вашим изделием изготовлены, теперь надо их протестировать. Это можно сделать либо у себя, либо снаружи – у контрактного тестировщика (Test Foundry), так как фабрика, производящая пластины, обычно этим не занимается. В любом случае разработчику надо написать соответствующую тестовую программу, но при измерении у любого контрактного тестировщика требуется наличие своего высококвалифицированного специалиста, который хорошо знаком с его (Test Foundry) тестовым оборудованием (которое, разумеется, у всех совершенно разное). Также придется пластины порезать, а полученные кристаллы собрать в корпуса. В зависимости от количества выводов это обойдется вам от 20 центов до 5 долларов за одну микросхему. В большинстве случаев контрактный сборщик заодно занимается и тестированием, но тестирование сложнофункциональных ВЧ и цифро-аналоговых схем очень непростой процесс, и выход годных может запросто уменьшится на 30% просто из-за ошибок тестирующего персонала (например, тестовые зонды были неправильно настроены). Причем зачастую внешний тестировщик, не зная изделия так же хорошо, как сам разработчик, даже не понимает природы проблем.

Для избежания подобных ситуаций обычно на эффективно работающих фаблесс-фирмах выделяется конкретная группа специалистов, которые плотно работают со специалистами тестировщика (обязательное требование к таким специалистам – знание как минимум одного иностранного языка).

3.6.8. Финансовая парадигма фаблесс-проекта

Итак, получена жизнеспособная конструкция, требуется запустить серийную партию как минимум 200 пластин в месяц, а на каждой пластине обычно от 1000 до 20 000 чипов в зависимости от их площади (а чем больше площадь, тем дороже сборка). Нужно оплатить фотошаблоны, изготовление пластин, сборку и тестирование кристаллов, логистику, и это при том, что продажи еще даже не начинались! При этом вам надо платить хорошую зарплату всему задействованному в проекте персоналу в соответствии с уровнем его квалификации. В идеале для фаблесс-компаний это финансируется из денег заказчика, но такие большие деньги заказчик дает только проверенной фирме, с которой он уже успешно реализовал ряд проектов, в репутации, технической компетентности, финансовой устойчивости которой он уверен. И самое главное – ваш заказчик должен быть в состоянии позволить себе финансирование фаблесс-проекта без ущерба для своего основного бизнеса. Такое возможно только в том случае, если заказчик – крупная

компания с большими оборотами (или исполнитель государственного заказа). В практической деятельности все эти финансовые разрывы фаблесс-фирме обычно приходится закрывать из собственных средств. В этой парадигме и заключается ответ на очевидный вопрос, почему многие фирмы, которые и по уровню квалификации разработчиков, и по уровню оснащения программными и аппаратными средствами, аналитическим оборудованием и пр. могли бы заниматься, но не занимаются этим самым модным фаблесс-бизнесом.

В случае успешной реализации проекта возможны и другие проблемы. Например, прошло 2 года с момента получения первых годных образцов. Изделия хорошо продаются, но 5–10% ваших микросхем по разным причинам бракуются на входном контроле. (ситуация совсем не редкая – взять хотя бы всем известные недавние и еще не разрешенные до конца проблемы AMD с Global Foundries по APU (accelerated processing units) с проектными нормами 32 и 28 нм[3] или Ramtron с Intel) [21].

Имеющиеся на вашем предприятии «домашние» эксперты по анализу отказов и самая современная и оборудованная лаборатория для реверс-инжиниринга с электронными микроскопами, установками для химического и плазменного травления в результате напряженной работы находят причину в изъянах используемого на фабе техпроцесса. Нужно сообщить этой фабрике, что в их техпроцессе проблема, которая стоит вам денег, а вашим покупателям – нервов. Но так как вы «мелкая сошка» на этой большой фабрике, вас сочувственно выслушают и скажут, что, к сожалению, ошибки в ваших микросхемах – либо вина ваших разработчиков, либо сборщиков, потому что ни у одного из других заказчиков нет никаких проблем с этим техпроцессом. К сожалению, это не абстрактные измышления, а реальные факты из практики. У фаундри с ее валом нет ни желания, ни возможности реагировать даже на обоснованные замечания по вопросам технологии от мелкого клиента.

3.6.9. Общие рекомендации по организации работы в режиме фаблесс

Из всего вышеизложенного можно сделать некоторые общие выводы. Прежде всего фаблесс-бизнес – это в первую очередь достаточно сложный бизнес на проектировании.

Основной нишей для фаблесс-бизнеса является разработка и поставка заказных (ASIC) и специализированных(ASSP) изделий, содержащих в цене плату за уникальность.

Заказчик-потребитель – ключевая фигура фаблесс-бизнеса, и его наличие обязательное условие начала фаблесс-проекта. Именно он в конечном счете оплачивает стоимость проектирования (уникальность) изделия и издержки по его производству.

Это возможно только в том случае, если создаваемое изделие соответствует его потребностям (обеспечивает ему технические, ценовые или другие преимущества), т.е. технические характеристики изделия должны быть согласованы с заказчиком на начальном этапе.

Работа с кремниевыми мастерскими из дальнего зарубежья накладывает жесткие ограничения на САПР (лицензия и поддержка).

Существует четкая взаимосвязь – чем стандартнее технологический процесс у поставщика услуг фаундри, тем меньше уникальность разработки и соответственно – прибыль фаблесс-компании. С другой стороны, специфические технологические процессы у кремниевых мастерских имеют, как правило, «сырые» PDK, что несет опасность дополнительных издержек.

MPW подход позволяет сократить издержки на изготовление опытных образцов, однако плата за это – жесткая привязка к графику запуска MPW у конкретной кремниевой мастерской при невысокой частоте запусков.

Взаимоотношения с фаундри очень непростой процесс, но объемы и периодичность заказов оказывают на него положительное влияние

Применение внешнего контрактного тестировщика позволяет снизить издержки на эту операцию, но несет определенные риски.

Реализация фаблесс-проекта требует наличия у дизайн-центра значительных оборотных средств собственных либо привлеченных (заказчик/банковский кредит).

3.7. Особенности выбора иностранной ЭКБ для проектирования отечественных КА

3.7.1. Основные предпосылки необходимости использования иностранной ЭКБ

Применение электронных компонентов иностранного производства в разработках отечественных радиоэлектронных средств после развала СССР приобрело характер устойчивой нарастающей тенденции [22–28]. Доля электронной компонентной базы иностранного производства в общем объеме используемых элементов неуклонно возрастает. Не обошел эти тенденции и процесс создания РЭА для стратегически значимых объектов, включая ракетно-космическую технику, где требуется повышенный уровень качества используемых электронных компонентов.

Во времена СССР электронная промышленность, несмотря на существенное отставание от мирового уровня развития, благодаря значительной государственной поддержке в основном обеспечивала отечественной элементной базой потребности радиоэлектронной отрасли, включая потребности советского ВПК (рис. 3.14).

Так, все электронные блоки ракетоносителей и космических аппаратов проектировались только на отечественных ЭКБ.

Разгонные блоки и ускорители российских «Фриата», «Бриза-М», «Бриза-КМ» (Д, ДМ), «Везувия» и других уже использовали от 10 до 20% импортной ЭКБ. Начиная с 2000–2005 гг. для проектирования новых космических объектов и систем (за исключением ракетоносителей) удельный вес импортной ЭКБ увеличился до 50–80%. На момент написания этой книги в РФ отсутствует номенклатура ЭКБ, необходимая для проектирования ретрансляторов, бортовых преобразователей, аппаратуры КИС, навигации и пр.

Ракетоносители

0%

Все только на отечественной ЭКБ

Разгонные блоки и ускорители

От 10 до 20%

«Фрегат», «Бриз-М», «Бриз-КМ», Д, ДМ, «Везувий», «КВРБ»

Новые космические объекты и системы

От 50 до 80%

Ретрансляторы, аппаратура КИС, преобразователи на борту

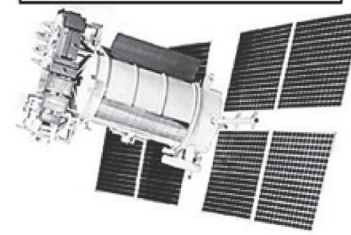


Рис. 3.14. Динамика изменения удельного веса импортной ЭКБ в ракетно-космической технике

Следует отметить, что, к сожалению, эта тенденция будет доминировать и в ближайший обозримый период развития, что обусловлено следующими факторами. Во-первых, номенклатура планируемой к применению в перспективных системах РКТ и СВ и ВТ ЭКБ уже превышает десятки тысяч типономиналов. Если даже соответствующие службы Минобороны, ВПК и «Роскосмоса» организуют и реализуют трудоемкий процесс унификации и минимизации этого перечня, его можно будет свести в ближайшей перспективе к величине 5–7 тыс. Но даже эту цифру отечественная электронная промышленность в сжатые сроки не сможет обеспечить в силу целого ряда объективных причин.

Во-вторых, с развитием Интернета разработчики электронных блоков и систем получили доступ к обширной базе данных по ЭКБ различного назначения, включая КН. Уровень представления и качество этой базы данных позволяют не только легко выбрать нужный тип микросхемы, но и достаточно быстро спроектировать необходимое разработчику электронное устройство с использованием конкретных примеров применения схемотехнических особенностей детализированных руководств по применению этой ЭКБ.

К сожалению, аналогичные отечественные информационные базы данных по ЭКБ пока значительно уступают в этом смысле по качеству представления и объему технической документации, а иногда и содержат неточности и ошибки, не способствующие решению главной задачи разработчика – быстро и качественно спроектировать требуемое электронное устройство (блок, систему).

Поэтому в настоящий момент и в ближайшем обозримом будущем не представляется возможным полностью отказаться от использования импортной ЭКБ при проектировании и производстве не только РЭА общегражданского применения, но и в космической и атомной промышленности, за исключением ряда направлений, особо чувствительных с точки зрения обеспечения военной и технологической безопасности государства.

В любом случае необходимо создавать современную отечественную инфраструктуру, позволяющую обеспечить минимальные потребности этих чувствительных сфер современной ЭКБ – это касается как микроэлектронных технологий (здесь уже много сделано), так и технологий проектирования. Именно с этой целью в данной книге представлены материалы по новым конструкторско-технологическим и схемотехническим решениям, методам проектирования, методам испытаний субмикронной ЭКБ, которые могут быть использованы отечественными специалистами при решении этой проблемы, имеющей важное значение для обеспечения поступательного развития ракетно-космической отрасли.

В процессе создания РЭА применительно к ЭКБ ИП можно выделить несколько этапов, существенно влияющих на уровень качества и эффективность использования электронных компонентов [23]: выбор номенклатуры электронных компонентов, их закупка и организация процессов процедур сертификационных испытаний, а также их реализация в составе конкретного радиоэлектронного устройства.

Наиболее полно особенности реализации этих этапов выбора ЭКБ изложены в работе [23], основные положения которой рассмотрены ниже.

3.7.2. Особенности этапа выбора номенклатуры ЭКБ иностранного производства

Этап выбора номенклатуры ЭКБ разработчиками РЭА начинается с формирования технического задания по системотехническим и схемотехническим решениям как аппаратуры в целом, так и на входящую в состав аппаратуру ЭКБ и заканчивается решением заказчика о возможности применения в РЭА выбранной номенклатуры ЭКБ ИП. Этим же решением утверждается модель внешних воздействующих факторов, на соответствие которой будут проведены сертификационные испытания иностранных компонентов. Успешность процесса выбора электронных компонентов иностранного производства определяют следующие факторы [23]:

- корректность формирования исполнителями требуемого уровня качества (исполнения) электронных компонентов, который необходим для заказчика удовлетворения заданных в ТТЗ на ОКР по созданию РЭА тактико-технических требований на образец, а также и модели внешних воздействующих факторов среды, в условиях которой предстоит функционировать электронным компонентам;
- детальное знание исполнителями особенностей сегмента мирового рынка электронных компонентов, которые ему необходимы;
- умение исполнителей работать с информацией об иностранных компонентах. Здесь важен факт получения наиболее свежей и достоверной (не рекламной) информации из первоисточников.

Здесь следует особо отметить, что отсутствие четких формулировок по понятию «вид исполнения электронного компонента» часто приводит к существенным ошибкам при начальном определении качества ЭКБ ИП. Наиболее часто встречающейся такой ошибкой при определении вида исполнения ЭКБ ИП является подмена понятия «условия применения» на частный параметр, например,

«диапазон рабочих температур». Таким образом, часто наименование, присвоенное фирмой-изготовителем ЭКБ ИП рабочему температурному диапазону, переносится без учета остальных показателей модели внешних воздействующих факторов (под которые спроектировано и изготовлено изделие) на конкретный вид исполнения электронных компонентов, т.е. на их уровень качества в целом.

Под видом исполнения понимается общественно признанный тип условий применения, под которые спроектирован и изготовлен конкретный типономинал ЭКБ (с учетом объема контроля и испытаний в процессе производства).

Виды категории исполнения элементов иностранного производства бывают следующие.

Space – продукция (в части продукции для космических приложений) соответствует спецификациям и стандартам государственных структур, занимающихся квалификацией уровней качества продукции и ее производителей. В настоящий момент таких международно признанных государственных структур всего четыре: три из них функционируют в рамках различных космических агентств и одна – в рамках Минобороны США. Квалификационный уровень фирм-изготовителей (технологических процессов, уровня качества ЭКБ) можно выяснить из документов этих структур.

Military – продукция (в части продукции для военных приложений) соответствует спецификациям и стандартам государственных структур, занимающихся квалификацией уровней качества продукции и ее производителей. В настоящий момент военный уровень исполнения определяет только одна государственная структура, функционирующая в рамках Минобороны США.

Industrial – продукция соответствует стандартам международных профессиональных ассоциаций (объединений) промышленности. Качество продукции подтверждается сертификатами соответствия, выданными фирме-производителю этими профессиональными ассоциациями промышленности.

Commercial – продукция соответствует спецификациям фирмы-производителя, которые разработаны исходя из маркетинговой концепции продвижения ЭКБ на рынок; при этом гарантом качества данной продукции является только внутренняя система менеджмента качества предприятия.

Процесс выбора электронных компонентов является многофакторной оптимизационной задачей. Номенклатура факторов, влияющих на выбор, и их вес при принятии решения имеют существенную зависимость от конкретных условий разрабатываемого проекта. Однако можно выделить общие группы факторов, которые почти всегда присутствуют при выборе электронных компонентов [19, 23]. К ним относятся прежде всего – параметры конкретного сегмента рынка ЭКБ, перспектива серийного производства проектируемой РЭА; технико-экономические показатели, требуемые для разработки образца ОКР. Рассмотрим более подробно каждую из этих групп.

Параметры сегмента рынка элементов с требуемыми функциональными возможностями

Здесь следует рассматривать две группы факторов: функциональные возможности разрабатываемой РЭА и информацию о рекомендуемой фирме-производителе ЭКБ.

1) Функциональные возможности продукта включают в себя следующие компоненты:
   - технические характеристики, связанные с функциональным назначением следующих электронных компонентов;
   - модель внешних воздействующих факторов, для которой данный вид ЭКБ разрабатывался и производится;
   - действующие ограничения на области приложения, в которых он может использоваться.

По техническим характеристикам продукта и модели внешних воздействующих факторов, для функционирования в которых он предназначен, целесообразен выбор продукции, которая, как говорят маркетологи, имеет какое-либо общественное признание (государственных квалификационных центров, ассоциаций промышленности и т.д.).

2) Информация о фирме-производителе должна включать следующие данные:
   - используемая в производстве система качества;
   - освоенные технологии, как действующие, так и планируемые к постановке в среднесрочной перспективе;
   - представляемая фирмой документация на этапах выбора и поставки элементов;
   - гарантийные обязательства поставщика.

В части менеджмента качества предприятия и освоенных технологий, обеспечивающих выпуск требуемой продукции, целесообразен выбор фирмы-изготовителя, которая, как говорят маркетологи, имеет какое-либо общественное признание. Немаловажное значение для эффективного использования электронных компонентов имеет и представляемая фирмой дополнительная документация, в том числе и по результатам выполненных документально подтвержденных проверок и испытаний в процессе производства интересуемой продукции.

3) Ценовые параметры продукта (важно для расчета общей стоимости проекта и, в частности, опытного образца РЭА.

Перспективы производства серии РЭА

Здесь важным параметром является заявленный производителем период производства выбранного вами элемента, а также конкретные рекомендации фирмы-производителя по возможной замене или модернизации компонента.

Не менее важным для разработчика является информация о наличии ограничений со стороны государства на распространение компонента.

Технико-экономические показатели ОКР (формируются разработчиком РЭА)

Наибольший вклад в данную группу параметров вносит следующее [23]:

- планирование работ по обеспечению оптимизации перечня ЭКБ ИП в рамках ОКР (проекта в целом);
- обеспечение возможности внесения изменений (маневра) в рамках цена/качество в отношении номенклатуры выбранной ЭКБ ИП на последующих этапах ОКР.

При выборе электронных компонентов большое значение имеют практические навыки исполнителей проекта при работе с первоисточниками информации

об ЭКБ ИП. Важно понимать, что существует четыре основные группы таких первоисточников информации, связанных с электронными компонентами иностранного производства:

- государственные (межгосударственные) центры квалификации производителей, технологий и продукции;
- профессиональные ассоциации промышленности, производящей (использующей) электронные компоненты;
- фирмы-производители ЭКБ;
- различные профессиональные ассоциации дистрибьюторов электронных компонентов.

На этом этапе выбора электронных компонентов для разрабатываемого проекта наиболее информативны первые три группы (информация от ассоциаций дистрибьюторов чаще используется на последующих этапах работы с иностранными электронными компонентами). Каждая из этих групп может обеспечить дополнительной информацией об определенных частных аспектах, присущих только этому конкретному элементу и его производителю, которые могут быть использованы на последующих этапах – переговорах о поставках и гарантиях и т.п.

3.7.3. Особенности проведения сертификационных испытаний ЭКБ ИП

По уровню значимости наивысший приоритет для заказчика имеет информация о квалифицированных электронных компонентах от государственных (межгосударственных) квалификационных центров, особенно когда речь идет о высокотехнологической электронной компонентной базе, в первую очередь для военных и космических приложений. В настоящее время в процессе оценки уровней качества ЭКБ наиболее существенную роль играют следующие авторитетные организации:

- Центр военных поставок в Коламбусе Министерства обороны США – Defense Supply Center Columbus (DSCC);
- Центр космических полетов им. Р.Х. Годдарда в составе Национального комитета по астронавтике и исследованию космического пространства США – Goddard Space Flight Center (GSFC);
- Совет по координации космических компонентов Европейского управления космических исследований – European Space Components Coordination (ESCC);
- Японское агентство аэрокосмических исследований – Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

Центр военных поставок в Коламбусе, входящий в состав Управления материально-технического снабжения МО США – Defense Logistics Agency (DLA); с его нынешними функциями был образован в 1996 г., поддерживает базу данных по нормативно-технической документации и занимается вопросами качества только применительно к военным поставкам. В настоящий момент Центром поддерживаются разработка, согласование и корректировка нормативно-технической документации на следующих уровнях [23–29]:

- справочники и руководства (Handbooks) по изделиям, предназначенным для военных и космических приложений;
- федеральные/военные стандарты (Federal/Military Standards);
- все виды действующих спецификаций – от федеральных до детальных – на отдельные виды продукции, заявленные в интересах военных поставок (Federal/Military/Detail/Perfomance Specifications);
- стандартные чертежи микросхем (Standard Microcircuit Drawings) и документация производителей (Vendor Item Drawings).

Вопросы оценки уровня качества электронной компонентной базы решаются в рамках следующих международных программ:

- оценка уровня качества технологий производства с формированием базы данных по квалифицированным производителям (Qualified Manufacturers List, QML). Работы выполняются применительно к производителям (технологиям производства) полупроводниковых приборов (FSC-5961) и микросхем (FSC-5962) всех видов (интегральных и гибридных);
- оценка уровня качества выпускаемой продукции с формированием базы данных по квалифицированной продукции (Qualified Parts List, QPL). В рамках только группы изделий «Электрические/электронные компоненты оборудования» Центром поддерживаются перечни квалифицированной продукции по 17 классам, в том числе резисторов (Resistors, FSC-5905), конденсаторов (Сарасйопз, FSC-5910), реле, соленоидов (Relays, Solenoids, FSC-5945), катушек, трансформаторов (Coils, Transformers, FSC-5950) и т.д. Весь объем базы данных составляет более 200 перечней квалифицированной продукции;
- оценка уровня качества услуг, предоставляемых дистрибьюторами, с формированием базы данных квалифицированных поставщиков (Qualified Suppliers List of Distributors, QSLD). Работы выполняются в основном применительно к дистрибьюторам т.е. вторым поставщикам полупроводниковых приборов (FSC-5961) и микросхем (FSC-5962). Необходимо отметить, что определенное внимание уделяется и дистрибьюторам по другим классам продукции, что находит отражение в выпускаемых перечнях квалифицированной продукции.

GSFC, входящий в состав Национального комитета по астронавтике и исследованию космического пространства США, является головным по программе электронных компонентов и упаковок.

Центр поддерживает базу данных по нормативно-технической документации и занимается вопросами качества применительно к электронным компонентам для космических приложений. Свою работу Центр координирует с ESCC, Канадским управлением космических исследований, JAXA, Министерством обороны США и другими организациями, курирующими вопросы развития электронных компонентов. В настоящий момент Центром поддерживаются разработка, согласование и корректировка нормативно-технической документации на следующих уровнях: справочники и руководства по изделиям, предназначенным для космических приложений; стандарты NASA; спецификации на отдельные виды продукции, заявленные в интересах космических приложений.

Центром выпускается также каталог перечней по квалифицированной продукции. В этот каталог входит только продукция, выпускаемая по спецификациям Центра.

Центром поддерживается сайт NASA с перечнями выбранных компонентов.

ESCC действует в составе Европейского управления космических исследований. Совет обеспечивает координацию в области электронных элементов организаций и фирм, задействованных в изучении космоса, в том числе в национальных космических агентствах Великобритании, Германии, Италии, Ирландии и Франции. В своей работе Совет опирается на документы по стандартизации, которые в Европейском управлении космических исследований разрабатывает специализированная структура – Европейский совет по сотрудничеству для космической стандартизации.

Европейский совет по координации космических компонентов поддерживает базу данных по нормативно-технической документации и занимается вопросами качества применительно к электронным компонентам для космических приложений.

Советом поддерживаются разработка, согласование и корректировка нормативно-технической документации на следующих уровнях:

- справочники и руководства по изделиям, предназначенным для космических приложений;
- стандарты ESCC;
- спецификации ESC C на отдельные виды продукции, заявленные в интересах космических приложений.

Советом также выпускаются следующие документы: ESCC REP001 – список изданных Советом документов и спецификаций. (В настоящее время действует издание № 9 этого списка от декабря 2011 г.):

- ESCC REP002 – список отмененных Советом документов и спецификаций. (В настоящее время действует издание № 7 этого списка от декабря 2011 г.);
- ESCC REP005 – перечень Совета по квалифицированной продукции. В настоящее время действует издание этого списка от 15 декабря 2011 г. В соответствии с этим изданием квалифицированная продукция для космических приложений выпускается в рамках 11 классов;
- ESCC REP006 – перечень Совета по квалифицированным производителям;
- EPPL – Европейский список предпочтительных деталей.

Японское агентство аэрокосмических исследований поддерживает разработку, согласование и корректировку нормативно-технической документации на следующих уровнях:

- спецификации квалификационных тестов на отдельные виды электронных компонентов, предназначенных для космических приложений;
- листы данных по применению на отдельные виды электронных компонентов, предназначенных для космических приложений.

Агентством также поддерживаются следующие базы данных по оценке уровней качества электронных компонентов:

- оценка уровня качества технологий производства с формированием базы данных по квалифицированным производителям;

- оценка уровня качества выпускаемой продукции с формированием базы данных по квалифицированной продукции;
- перечни спецификации квалификационных тестов на отдельные виды электронных компонентов, предназначенных для космических приложений.

В документах, отрабатываемых Агентством, хорошо просматривается согласованность нормативной и технической документации, принятой в США Центром космических полетов имени Р.Х. Годдарда и Центром военных поставок в Коламбусе.

Все перечисленные государственные организации (DSCC, GSFC, ESCC и JAXA) вопросы, связанные с качеством электронных компонентов, методологически и организационно решают примерно одинаково. Это относится также к организации процесса контроля уровня качества ЭКБ. Различия появляются практически только у Европейского управления космических исследований, что касается отдельных моментов, связанных с уровнями качества ЭКБ, которые присваиваются, и наличия постоянных инспекторов ESCC на всех предприятиях, сертифицированных по программам QML и QPL.

Второй группой первоисточников, связанных с электронными компонентами индустриального уровня исполнения, являются профессиональные ассоциации промышленности, производящей (использующей) электронные компоненты. К наиболее значимым и часто встречаемым относятся три ниже перечисленные организации.

Международная электротехническая комиссия – некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий. Некоторые из стандартов МЭК разрабатываются совместно с Международной организацией по стандартизации (ISO). МЭК способствует развитию и распространению стандартов, поддерживает базу данных по стандартам, связанным с испытаниями электронных компонентов (стандарты серии IEC 60068) и общих и групповых спецификаций по всем классам электронных компонентов (детальные спецификации на элементы разрабатываются на фирмах-изготовителях исходя из требований стандартов МЭК).

Комитет инженеров, специализирующихся в области электронных устройств (Joint Electron Devic Engenering Connell, JEDEC), – комитет инженерной стандартизации полупроводниковой продукции Electronic Industries Alliance, промышленной ассоциации, представляющей все отрасли электронной индустрии.

JEDEC основан в 1958 г. с целью разработки стандартов для полупроводниковых приборов. Комитет JEDEC, известный благодаря координации в разработке стандартов компьютерной памяти, обладает авторитетом и солидным влиянием на промышленное производство. В работе комитета принимают участие ведущие мировые производители и разработчики электронных компонентов. Наиболее известны стандарт по квалификационным испытаниям микросхем (JESD47) и стандарты с методиками испытаний (серии JESD22).

Комитет автомобильной электроники является разработчиком стандартов по электронным компонентам, используемым в автомобильной промышленности. Наиболее известны стандарты по микросхемам (AEC-Q100), полупроводниковым приборам (AEC Q101) и пассивным элементам (AEC-Q200). Группы первоисточ-

ников информации, к которым относятся фирмы-производители, обладают большим разнообразием и полнотой представляемой информации.

3.7.4. Особенности реализации этапа анализа отдельных перечней ЭКБ ИП

Все рассмотренные вопросы и глубина их проработки исполнителями в процессе выбора элементов имеют свое отражение в перечнях типономиналов, разрешенных для применения. В России головной организацией испытательным центром РНИИ «Электронстандарт» периодически проводятся работы по экспресс-анализу перечней типономиналов ЭКБ ИП. Для анализа используются перечни типономиналов электронных компонентов иностранного производства, разрешенные для применения и поступившие для проведения сертификационных испытаний. Основными направлениями анализа сформированных перечней ЭКБ ИП являются следующие [25]:

- наличие повторов типономиналов в перечне ЭКБ ИП от одного заказчика;
- период (фаза) производства выбранных электронных компонентов;
- уровень качества выбранных электронных компонентов;
- возможность повышения уровня качества элементов в рамках продукции выбранной фирмы-производителя;
- возможность унификации электронных компонентов с частичной сменой выбранных фирм-производителей.

На рис. 3.15 представлены результаты анализа повторяемости типономиналов электронных компонентов для пяти поставочных классов элементов в перечнях. Как видно, повторяемость элементов составляет от 6 до 26%. Появление повторяющихся типономиналов в перечне ЭКБ говорит о том, что заявки заказчиков ЭКБ не прошли обработку у головного исполнителя. Важно понимать, что в дальнейшем повторы типономиналов ЭКБ создают предпосылки поставки элементов технологически неоднородными партиями (снижение надежности) и увеличения объемов сертификационных испытаний.

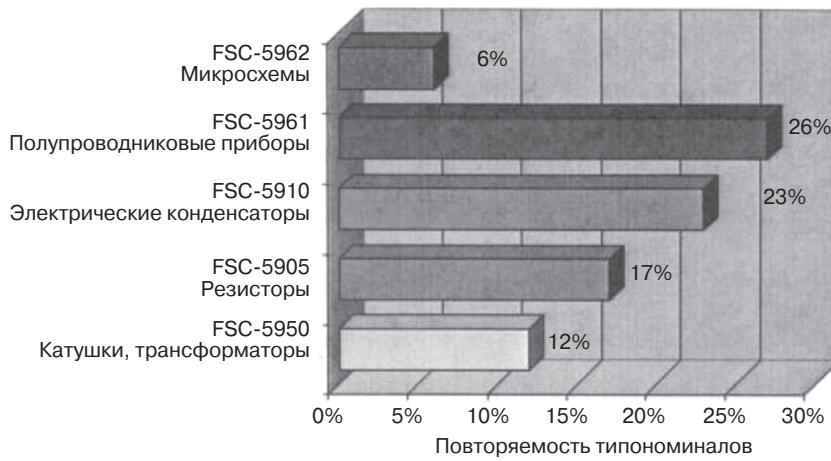


Рис. 3.15. Состав перечня ЭКБ ИП по повторяемости элементов

Период (фаза) производства выбранных электронных компонентов определяется по информации фирм-производителей, размещаемых на сайтах в сети Интернет. В рамках анализа информации фирм-производителей ЭКБ необходимо обратить внимание на следующие вопросы.

1) Наличие выбранных типономиналов ЭКБ в текущем производстве. В процессе анализа его результаты могут быть сведены к одной из четырех итоговых ситуаций, дающих заказчику возможность последующего принятия дальнейшего решения:
   - данный типономинал ЭКБ находится в активной стадии производства;
   - в стадии производства находится ЭКБ в одной из серии с выбранным типономиналом, но другой модификации;
   - данный типономинал ЭКБ снят с производства; информация по данному типономиналу ЭКБ на сайте фирмы-производителя отсутствует.

Наиболее вероятны следующие причины отсутствия информации о продукте на сайте фирмы-производителя:

- продукт заказной (разовое производство), и отсутствует его серийное производство;
- продукт давно снят с производства, и фирма не поддерживает на сайте информационные материалы на него;
- продукт является контрафактом.

2) Наличие конкретных ограничений и рекомендаций фирмы-изготовителя по применению предварительно выбранных типономиналов ЭКБ. В основном к ограничениям относятся два вида предупреждений фирмы:
   - данный типономинал ЭКБ не рекомендуется для нового проектирования – чаще всего это говорит о скором снятии с производства этих элементов;
   - идут последние продажи данного типономинала ЭКБ – в. данной ситуации для элементов, которые снимаются с производства, чаще всего указываются дата окончания приема заказов на изготовление ЭКБ и конечная дата их предполагаемой отгрузки.

К рекомендации фирм-производителей в первую очередь следует отнести ограничения по использованию конкретных элементов в ответственных приложениях (по условиям применения, связанным с внешними воздействующими факторами и с безопасностью жизнедеятельности человека и т.д.). Также рассматривались рекомендации фирм-производителей по замене типономинала ЭКБ в случае его снятия с производства или ввода ограничения на использование при новом проектировании.

Результаты анализа информации фирм-производителей по микросхемам и полупроводниковым приборам представлены на рис. 3.15. Как видно, доля элементов, находящихся в активном производстве, составляет 60–73% в зависимости от класса элементов. Большая доля типономиналов электронных компонентов, снятых с производства, а также не рекомендованных для нового проектирования, информация по которым отсутствует на сайте фирмы-производителя, является в дальнейшем источником проблем при закупках элементов и возникновения финансовых проблем (потерь) на контрафактной продукции.

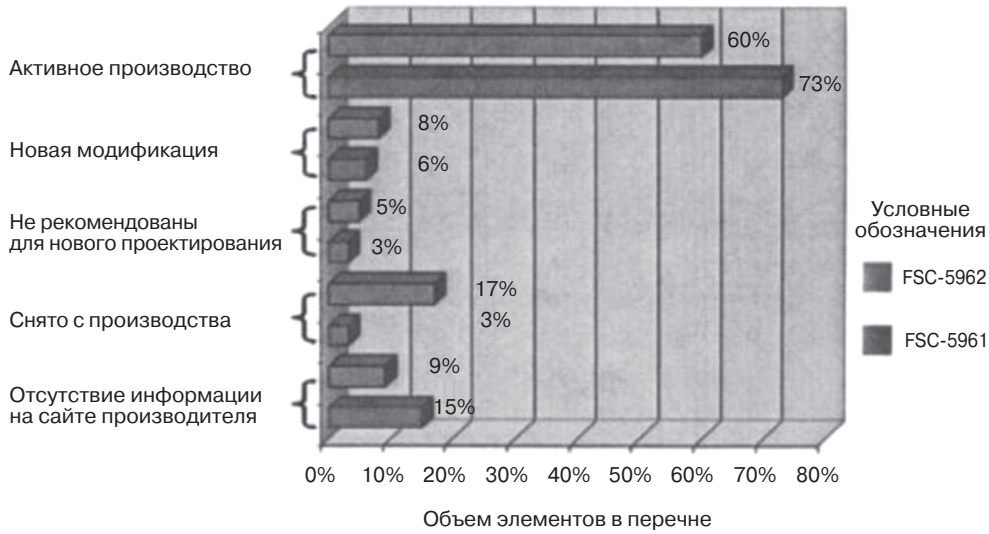


Рис. 3.16. Состав перечня ЭКБ ИП по этапу жизненного цикла элементов

Результаты анализа уровня качества выбранных элементов на примере микросхем (FSC-5962) и полупроводниковых приборов (FSC-5961) представлены на рис. 3.16. Как видно, здесь самую представительную группу составляет коммерческая продукция – более 80%. На основании выполненных работ можно прогнозировать, что по данной группе в дальнейшем могут возникнуть проблемы с получением достоверной нормативно-технической документации по этим элементам, а также возможны проблемы с их жизненным циклом (особенно при изготовлении серии), проблемы с контрафактными изделиями.

Мала доля электронных компонентов индустриального вида исполнения – всего 5–8% элементов, изготовленных по технической документации, соответствующей стандартам профессиональных ассоциаций промышленности.

Квалифицированная элементная база для военных и космических приложений составляет 10-11%, при этом доля элементов в радиационно стойком исполнении не более 0,5% от общего количества элементов.

Результаты анализа возможности повышения уровня качества компонентов с уровня исполнения коммерческого и индустриального до уровня элементов для военных приложений в рамках выбранного производителя показаны на рис. 3.17. Из рисунка видно, что данной возможностью обладают не только 8-9% активных элементов и 32–35% пассивных компонентов. Основными причинами такой малой возможности повышения уровня качества являются следующие:

- выбор фирмы-производителя, не охваченной программами квалификации (технологии, продукции) одного из государственных (межгосударственных) центров квалификации;
- выбор серии типономиналов, не имеющих модели более высокого уровня качества.

Возможность унификации электронных компонентов с частичной сменой выбранных фирм-производителей можно оценить на выборке резисторов FSC-5905,

входивших в перечень по одному из проектов. В рамках работы по оптимизации перечня был синтезирован перечень резисторов на базе продукции единого производителя. Таким образом, продукция пяти фирм-производителей (EVER OHMS Technology Co., Ltd., Uniroyal Electronics Industry Co., Ltd., Vishay Intertechnology, Inc., YAGEO Corporation, Phycomp) была приведена к продукции единого изготовителя Vishay Intertechnology, Inc., который выполняет работы по программе QPL.

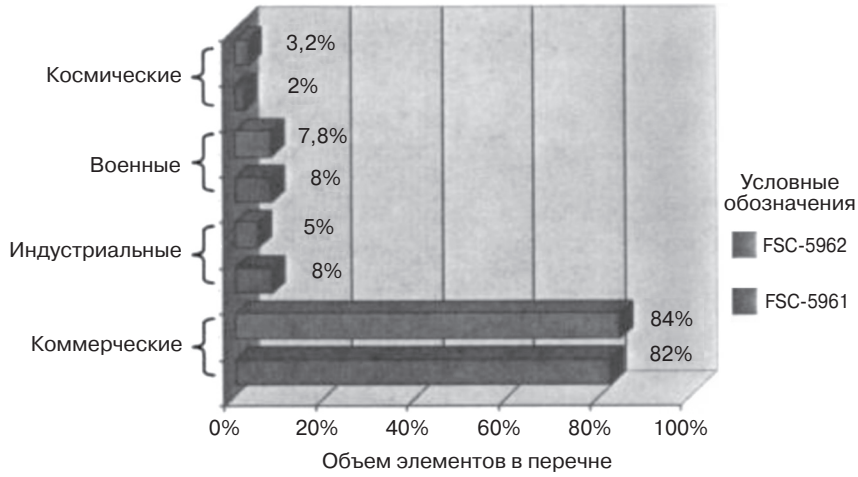


Рис. 3.17. Состав перечня ЭКБ ИП по виду исполнения элементов

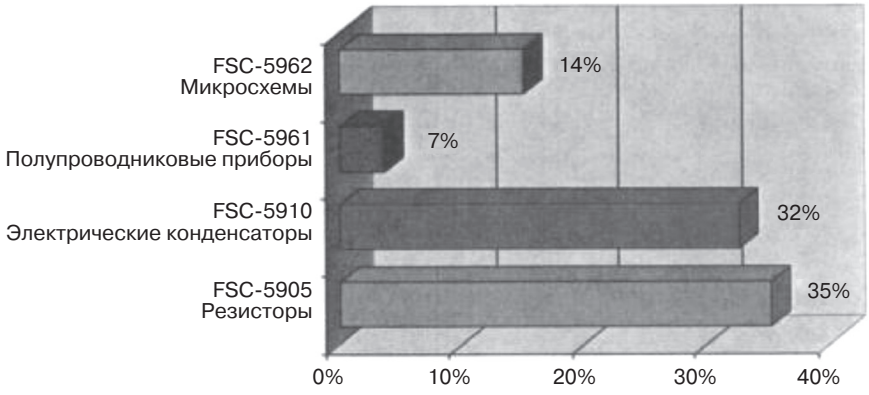


Рис. 3.18. Возможность повышения уровня качества элементов в рамках выбранных фирм-производителей

Основными результатами этой работы явились следующие:

- сокращение общего количества типономиналов резисторов на 27% за счет исключения заказа резисторов одного размера и номинала у различных производителей (данное сокращение количества типономиналов ведет к увеличению объема партии резисторов одного типономинала);

- создание однородной по качественным характеристикам группы резисторов одного типономинала, причем объединение происходило без потери качества изделий. Как показатели качества использовались допуски номиналов и температурные коэффициенты сопротивления; при объединении в группу эти значения выбирались по максимальному значению в объединяемой группе;
- возможность повышения уровня качества по всей номенклатуре резисторов до военных и космических условий применения. Таким образом, все типономиналы резисторов из перечня единого производителя имеют возможность замены на элементы более высокого уровня качества.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сформулировать следующие основные выводы:

1) этап выбора является определяющим в формировании качественного уровня применяемых электронных компонентов иностранного производства. Эффективность работ на этапе выбора ЭКБ ИП зависит от глубины проработки вопросов как разработчиками отдельных РЭА, так и специалистами группы главного конструктора проекта в целом;
2) анализ отдельных перечней разрешенных для применения типономиналов ЭКБ ИП показал следующее:
   - в составе ЭКБ ИП, предназначенной для использования в аппаратуре стратегически значимых объектов, недопустимо большой объем составляют элементы коммерческого уровня качества;
   - перечни содержат электронные элементы с ограничениями фирмы-производителя по использованию как в новых разработках, так и в ответственных приложениях.

3.8. Особенности отечественной элементной базы для систем электроэнергетического обеспечения космических летательных аппаратов

Технический уровень развития промышленности, в том числе военной и космической техники, в значительной степени зависит от эффективности используемого электроэнергетического обеспечения. Современная электроэнергетика вообще и системы электропитания (СЭП) в частности представляют собой сложные взаимосвязанные системы электроэнергетического обеспечения – предприятий и организаций различных отраслей промышленности, армии и флота. СЭП охватывает широкий спектр устройств генерирования, преобразования, передачи, распределения, коммутации электроэнергии.

Последние 15 лет состояние мирового рынка источников вторичного электропитания (ИВЭП) – основной составляющей части СЭП – характеризуется устойчивыми высокими темпами ежегодного роста (12–15%). Объем рынка AC/DC-, DC/DC-, и DC/AC-преобразователей только в США в 2010 г. составил более 15 млрд долл., из которых 5 млрд долл. приходилось на рынок D C/D C-преобразователей.

По мере роста рынка ИВЭП обостряется и конкурентная борьба, что, в свою очередь, приводит к совершенствованию продукцию и возможно только при ис-

пользовании перспективных принципов построения СЭП, высокоэффективных научных решений, новых электронных компонентов, технологических процессов и автоматизации производства.

Современный этап мирового развития космической техники, систем вооружения и военной техники (ВВТ) характеризуется существенным возрастанием их энерговооруженности. Так, проблема электроснабжения ВВТ стала одним из важнейших звеньев в новых концептуальных подходах к развитию средств вооруженной борьбы.

Основными отличительными особенностями современных ИВЭП являются:

- однотипность выполняемых функциональных задач во всех видах радиоэлектронных средств (преобразование электрической энергии, стабилизация выходных напряжений, защита аппаратуры от электрических перегрузок, помехоподавление, гальваническая развязка входных и выходных цепей и т.д.);
- широкое применение типовых (унифицированных) схемотехнических решений, а также унифицированной элементной базы при создании требуемой номенклатуры этих изделий;
- возможность модульного построения и унификации габаритно-установочных размеров ИВЭП, что позволяет упростить расчеты их взаимозаменяемости в процессе эксплуатации.

В отечественной промышленности СССР ИВЭП создавались в основном на предприятиях для удовлетворения собственных потребностей. Эти разработки, как правило, были не унифицированы, дорогостоящие и пригодны только для узкоцелевого применения в конкретных областях РЭС вооружения. Специализированное производство ИЭП военного назначения, в отличие от ведущих зарубежных стран, в отечественной промышленности в то время отсутствовало.

Первичные СЭП разрабатываемых образцов космических аппаратов и комплексов вооружения вплоть до 2000-х годов продолжали строиться по традиционным принципам, соответствующим уровню разработок начала 80-х годов. При этом на фоне прогрессирующего развития радиоэлектронных средств зарубежных изготовителей облик и технический уровень отечественных электроэнергетических систем практически не изменяются и не пересматриваются, как правило, более 15–20 лет.

При этом технический уровень отечественных изделий специальной электроэнергетики по значительному ряду технических параметров уступает уровню лучших западных аналогов: по удельной выходной мощности ИВЭ в 2-3 раза; по количеству срабатываний коммутационной аппаратуры – более чем в 10 раз.

Технический уровень существующих ИВЭП в то время на порядок уступал современным зарубежным аналогам и уже не удовлетворял требованиям заказчиков «Роскосмоса» и Министерства обороны по качеству энергии, надежности, конструктивному исполнению, значениям выходных электрических параметров, энергопотреблению и коэффициенту полезного действия. Вместе с тем, наиболее чувствительными к качеству и надежности функционирования ИВЭП являются широко используемые современные компьютеризированные РЭС вооружения, системы управления, наведения, радионавигации, радиолокации и т.д., требующие высокостабильного и бесперебойного электроснабжения.

Поэтому главным конструкторам космических систем и систем ВВТ было разрешено в специальном порядке приобретать и использовать импортные комплектующие и блоки.

В настоящее время на долю СЭП в отечественных образцах вооружения и специальной техники приходится 30–40% от их массы и объема. Во многом это определяет и тот факт, что до 50% всех неисправностей и отказов космической и военной техники происходит как раз по вине средств вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры.

Поэтому решение вопросов снижения массогабаритных показателей источников вторичного электропитания (ИВЭП) и их надежности является актуальнейшей задачей для развития военной и в особенности аэрокосмической техники.

Одним из основных направлений повышения качества систем электропитания, разработки высокоэкономичных надежных источников электропитания является их межвидовая унификация и модульный принцип построения, основные положения которых были сформулированы еще в 80-х годах прошлого века ведущими специалистами Министерства обороны (МО), Министерства электронной промышленности (МЭП), Минрадиопрома (МРП) и других отраслей промышленности СССР.

Сегодня эти принципы являются определяющими для предприятий, выпускающих унифицированные модули источников вторичного электропитания специального назначения.

Необходимо отметить имевшееся серьезное отставание в этой области от зарубежных образцов ИВЭП, так как значимые работы в этом направлении были начаты только в конце 90-х годов, тогда как за рубежом внедрение модульных принципов конструкции радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) привело к тому, что в 1970-х годах прошлого века источники электропитания стали фактически новым классом комплектующих изделий.

Характерным примером такого отставания явилось опубликованное за рубежом в 1997 году заключение американских военных авиационных специалистов о техническом уровне перехватчика МиГ-25П, угнанного старшим лейтенантом Виктором Беленко в 1976 г. в Японию, с одной стороны, восхищенных высочайшим уровнем конструктивного исполнения системы «двигатель-корпус», и, с другой – сравнивших электронную начинку МиГ-25П и Fantom-4 с граммофоном и транзисторным приемником.

Для ликвидации отставания отечественных систем электропитания радиоэлектронных устройств космического и специального назначения основными проблемами, требующими незамедлительного решения в рамках формирования перспективных отечественных программ развития ЭКБ двойного и специального назначения, являются следующие:

1) задача разработки, промышленного освоения и организации стабильных поставок космическому и оборонному отечественным комплексам широкой гаммы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем для разработки современных ИВЭП, способных работать как на суше, так и в глубоком космосе в режиме постоянного и импульсного радиационного воздействия;

2) исследование надежности всей номенклатуры электронной компонентной базы для средств электропитания РЭА космического и военного назначения при реальных условиях эксплуатации;
3) для современных источников вторичного электропитания в качестве ключевых элементов необходимо использовать высоковольтные полупроводниковые транзисторы с рабочим напряжением 600–1200 В для AC-DC ИВЭП, мощные быстродействующие полупроводниковые транзисторы с рабочим напряжением 60–200 В для DC-DC ИВЭП, быстрые диоды и транзисторы для высокочастотных выпрямителей, контроллеры управления работой мощных ключевых элементов блоков питания, источники опорного напряжения 1,25 В; 2,5 В с точностью не хуже ±1% для обеспечения стабильной работы ИВЭП.

Для этого, в частности, необходимо разработать и освоить в серийном производстве новые мощные компактные интегральные микросхемы регуляторов напряжения компенсационного типа с низким падением на регулирующем транзисторе и широким диапазоном выходных напряжений, прецизионные источники опорного напряжения в широком диапазоне рабочих температур, мощные полевые n- и p-канальные MOSFET и биполярные IGBT транзисторы, интегральные микросхемы контроллера управления питанием – ШИМ-регуляторы, быстродействующие диоды Шоттки.

Успешное решение этой задачи может позволить конструкторам ИВЭП обеспечить снижение электрических потерь в них в несколько раз, увеличение надежности, повышение частоты преобразователей, а, следовательно, снижение массы и габаритов ИВЭП при получении выигрыша в стоимости и эффективности одновременно.

Среди основных потребителей элементной базы для производства ИВЭП можно упомянуть кроме дистрибъютеров и вторых поставщиков – российские фирмы – непосредственных производителей ИВЭП – ЗАО «ММП-Ирбис», «Александер Электрик», «Континент» и др. Эти предприятия первыми поняли преимущества и возможности рынка унифицированных модулей ИВЭП еще в условиях разрушающейся промышленности 90-х годов, когда на большинстве предприятий закрывались подразделения, занимавшиеся ИВЭП и источниками питания в целом. К числу предприятий, выпускающих унифицированные ИВЭП, также относится и ОАО «НПП «ЭлТом», выбравшее в конце 90-х годов разработку и производство ИВЭП в модульном исполнении как основу своего дальнейшего развития. В отличие от других предприятий, «ЭлТом» сконцентрировался исключительно на ИВЭП для аппаратуры специального назначения и только позже путем «ЭлТома» пошли еще несколько отечественных предприятий, таких как ЗАО «ГК Электронинвест», ОАО «СКТБ РТ», ЗАО «ГК Электронинвест», ЗАО «Александер-Электрик», ЗАО «ММП-Ирбис» и др.

Необходимо отметить, что ОАО «ЭлТом» первым среди предприятий России с помощью элементной базы минского завода «Транзистор» разработал ИВЭП и прошел сертификацию в МО России полностью на отечественной элементной базе, обеспечив соответствующие требованиям стандартов МО уровень качества, став головным разработчиком и производителем «военных» ИВЭП.

Благодаря этому факту ОАО «НПП «ЭлТом» совместно с «Заводом «Транзистор» удалось разрушить ранее существовавшую в МО России позицию о принципиальной невозможности изготовления современных ИВЭП специального назначения на отечественной элементной базе и ориентацию исключительно на применение полупроводниковой элементной базы производства дальнего зарубежья.

3.9. Стойкость бортовой РЭА к воздействию ионизирующих излучений

Особенности требований к ЭКБ РКТ

В последние два-три года вопросам обеспечения качества и надежности аппаратуры ракетно-космической техники уделяется колоссальное внимание. Это и совещания с участием первых лиц государства, и соответствующие решения федеральных агентств и ведомств. Появились и публикации в отраслевых изданиях [30, 31], посвященные данной проблематике.

Как уже было отмечено выше, к основным особенностям электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой в условиях космического пространства, относятся [13]:

- широкая функциональная номенклатура (по данным ESCIES – порядка 1500 наименований);
- крайне малая серийность (от 10–15 шт. (!) до 100 тыс. шт. на протяжении всего жизненного цикла изделия;
- высокие требования к надежности (безотказность, ресурс, сохраняемость): $\lambda = 10^{-9}$–10^{-10} для активных элементов и $\lambda = 10^{-11}$–10^{-12} для пассивных при малосерийном производстве ЭКБ;
- стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (по данным escies.org – не менее 50 крад), других специфических дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФ КП);
- расширенный температурный диапазон (от –60 до 125 °С);
- необходимость обеспечения длительных сроков безотказной работы (15 лет и более).

Уже это краткое перечисление особенностей ЭКБ для РКТ говорит о том, что развитие космической микроэлектроники идет путем, отличным от магистрального пути развития электроники общепромышленной, определяемой ITRS [32–34]. Прежде всего это касается крайне низких потребных объемов выпуска.

Что касается испытаний, то их стоимость определяется комплексами стандартов и дополнительными требованиями заказчиков. В существующих стандартах большинство методик испытаний ЭКБ на радиационную стойкость соответствуют воздействиям, присущим ядерному взрыву. Но космическое пространство обладает иной спецификой. Это относительно низкие по интенсивности электронное и протонное излучения от естественных радиационных поясов Земли, воздействующие на космический аппарат в течение длительного времени, а также тяжелые заряженные частицы космического пространства и высокоэнергетические протоны.

В настоящее время принята достаточно полная международная классификация эффектов, вызываемыми ДФ КП, имеющими не только радиационный характер.

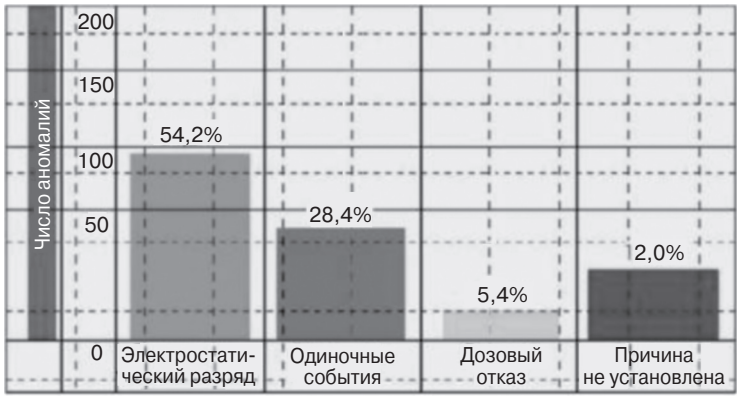


Рис. 3.19. Распределение числа аномалий в функционировании в зависимости от причины аномалии

Приведем лишь небольшую статистику (рис. 3.19) по влиянию различных дестабилизирующих факторов на аппаратуру РКТ. Однако до сих пор больным вопросом остается отсутствие положения об ЭКБ космической категории качества (аналог категории Space), учитывающего принципиальные особенности функционирования в условиях воздействия ДФ КП [35].

За рубежом вопросам разработки и поддержания актуальности нормативной документации уделяется большое внимание. В частности, существует обширная система стандартов и спецификаций Министерства обороны США, описывающая как требования, так и методики разработки и производства ЭКБ космической категории качества.

Приведем только основные из них (рис. 3.20).

Основные стандарты МО США в области ЭКБ категории space:
MIL-STD-883. Test methods standard. Microcircuits
MIL-STD-750. Test method standard. Semiconductor devices
MIGSTD-15478. Electronic parts, materials, and processes for space and launch vehicles
DOD-E-8983. Electronic Equipment, Aerospace, Extended Space Environment, General Specification
MH-PRF-19500 – Semiconductor Devices, General Specification For
MIL-PRF-38534 – Hybrid Microcircuits, General Specification For
MIL-PRF-38535 – Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification For
QML-38535. Qualified Manufacturers List
MIL-STD-1523. Age Controls of Age Sensitive Elastomeric Materials for Aerospace Applications
MIL-STD-1580. Destructive Physical Analysis for Space Quality Parts
MIL-STD-1540. Test Requirements for Launch & Space vehicles
MIL-HDBK-217. Reliability Prediction of Electronic Equipment
MIL-HDBK-263. Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies
MIL-HDBK-343. Design, Construction, and Test Requirements for One-of-a-Kind Spacecraft

Рис. 3.20. Стандарты и спецификации Министерства обороны США

Большинство из них находится в свободном доступе в Интернете на официальных сайтах учреждений МО США и его контрагентов (например, snebulos.mit.edu/projects/reference, assist.daps.dla.mil/quicksearch, www.dscccols.com и др.). Разработкой соответствующей нормативной документации также занимается и Европейское космическое агентство (ЕКА) в лице ESCIES (www.escies.org). Есть соответствующие службы и в структуре НАСА (nepp.nasa.gov). Безусловно, обязательной является сертификация разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества в соответствии со стандартом ISO 9001:2008.

На рис. 3.21 на примере компании Aeroflex Colorado Springs (www.aeroflex.com) показана схема сертификации разработчика и производителя ЭКБ космического уровня качества. Как можно заметить, контрольные процедуры и сертификация предусмотрены на всех этапах жизненного цикла изделия.Также отметим, что у ЭКБ космического применения, как правило, очень длительный жизненный цикл, для относительно серийных компонентов служебной аппаратуры (контрольно-измерительные системы, системы управления электропитанием, телеметрия и т.п.) период выпуска прибора может превышать 20 лет. Учитывая и длительные сроки разработки, определяемые в первую очередь огромным объемом испытаний аппаратуры, наземной отработкой, летными испытаниями, можно говорить о том, что ключевые компоненты должны находиться в производстве достаточно долго, что противоречит современному состоянию микроэлектроники, где сменяемость типов микроконтроллеров и ПЛИС происходит каждые 2-3 года, а то и чаще. Налицо противоречие между требованиями к жизненному циклу аппаратуры и реальной сменяемостью поколений ЭКБ.

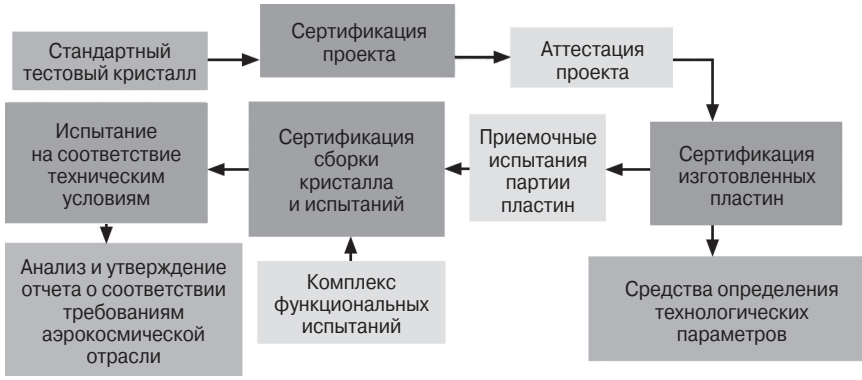


Рис. 3.21. Схема сертификации разработки и производства ЭКБ космического применения (на примере компании Aeroflex Colorado Springs)

Поэтому, несмотря на наметившуюся тенденцию активного применения ЭКБ класса industrial в аппаратуре РКТ, этому препятствует ряд факторов. Помимо недостаточных гарантируемых изготовителем показателей сохраняемости, надежности и радиационной стойкости очень велики затраты на сертификацию такой ЭКБ и дополнительные испытания, по стоимости соизмеримые с разработкой и изготовлением специализированной ЭКБ.

Из-за крайне ограниченного во времени жизненного цикла ЭКБ категории industrial необходимы весьма затратные работы либо по перевыпуску конструкторской и технологической документации и проведению дополнительных дорогостоящих испытаний аппаратуры, либо выпуску изделий-аналогов.

Таким образом, ключевая задача при создании ЭКБ для РКТ – обеспечение приемлемой стоимости малосерийного производства при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного жизненного цикла, надежности, стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости. Рассмотрим пути решения обозначенных проблем в существующих условиях.

Современные подходы к повышению надежности специализированной ЭКБ, стойкой к ДФ КП, можно разделить на четыре большие группы (рис. 3.22). К технологическим методам относятся использование специализированных технологических процессов изготовления СБИС и специализированных материалов – технология «кремний на сапфире» (КНС), «кремний на изоляторе» (КНИ), специализированных операций легирования и т.п. Все эти способы чрезвычайно дорогостоящи, и поэтому их используют лишь немногие производства. В частности, ведущими производителями подобных структур являются такие компании США, как Honeywell, Peregrine semiconductors и ряд других. К конструктивным способам повышения стойкости следует отнести использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т.п.

Рис. 3.22. Подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства

К схемотехническим методам повышения радиационной стойкости, в том числе – стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), относятся применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилей, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «усиленных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов и ряд других приемов (рис. 3.22).

Большинство схемотехнических методов можно разделить на две группы – методы контроля и коррекции ошибок и методы резервирования. К первой группе относятся методы избыточного кодирования, такие как контроль по четности или кодам Хэмминга, мажорирование и ряд других. Все они предполагают постоянную работу избыточной аппаратуры вместе с основной для обнаружения и, по возможности, исправления ошибок. Ко второй группе относятся методы, основанные на контроле работоспособности и автоматической замене неисправных блоков резервными.

Основное достоинство схемотехнических методов повышения радиационной стойкости – возможность их реализации на фабриках со стандартной, предназначенной для массовой продукции технологией. Такой подход получил международное название Rad hard by design [10–12]. Так, французская компания MHS обеспечивает таким путем гарантированную стойкость порядка 100 крад для микросхем на объемном кремнии. Аналогично работает компания Aeroflex, используя обычные технологические линейки ведущих производителей.

Применительно к России подобный подход позволяет использовать как уже существующие мощности зарубежных фабрик, так и вводимые мощности ОАО «НИИМЭ и Микрон» и ОАО «Ангстрем». Метод Rad hard by design обеспечивает повышение стойкости, сопоставимое с применением специальной технологии, но при существенно (в 5-7 раз) меньшей стоимости.

В частности, методология Rad hard by design была апробирована в ОАО «Российские космические системы» и НПП «Цифровые решения» в ходе выполнения НИР и ОКР по созданию надежных СФ-блоков и СБИС [23]. В ОАО «Российские космические системы» был разработан СФ-блок контроллера памяти с использованием защитных кодов Рида–Соломона. Этот код обладает оптимальным кодовым расстоянием, т.е. при заданной длине контрольной суммы данный код исправляет максимально возможное число ошибок. Коды Рида–Соломона удобны при работе с памятью. Так как в флеш-памяти доступ организован постранично, целесообразно кодировать страницу целиком, при этом контрольная сумма будет располагаться в ее конце.

Другой подход, позволяющий повысить стойкость к одиночным событиям и проконтролировать работоспособность СБИС, – проектирование СБИС на принципах самосинхронности [36]. В результате работ, проведенных в НПП «Цифровые решения», получены схемные и топологические реализации самосинхронных СФ-блоков процессорных и периферийных узлов. При самосинхронном подходе каждый комбинационный блок после завершения переходных процессов должен вырабатывать сигнал готовности, по которому осуществляется синхронизация предыдущих блоков, тем самым обеспечивая логическое упорядочивание событий.

Самосинхронный подход к проектированию имеет следующие преимущества:
– максимально возможное быстродействие, определяемое только технологическими параметрами, условиями эксплуатации и типом обрабатываемой информации;
– наиболее широкий диапазон температур эксплуатации и уровней питающего напряжения;
– наилучшая энергетическая эффективность, поскольку отсутствуют энергетически затратные цепи передачи тактовых сигналов, а также используется автоматический перевод в энергосберегающий режим части схемы, на вход которой не поступают данные;
– не требуются дополнительные ресурсы на распределение высокоскоростных тактовых сигналов по схеме с высокими требованиями к фазовым сдвигам, поскольку синхронизация отдельных блоков локальна;
– колебания внешних условий и параметров технологического процесса приводят только к изменению быстродействия и не вызывают сбоев (при условии сохранения переключательной способности элементов), поэтому самосинхронные схемы устойчивы.

Промежуточное положение между технологическими и конструктивными подходами занимают методы, основанные на незначительной модификации существующей технологии, сочетающие конструкторские и технологические решения. К ним относят и повышение стойкости БИС на основе базовых матричных кристаллов.

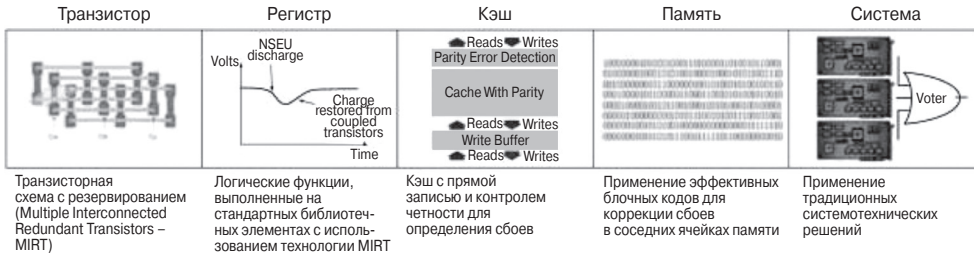


Рис. 3.23. Приемы повышения отказоустойчивости компонентов цифровых систем

Как известно [37–39], наибольшее влияние на КМОП-схемы оказывают поверхностные эффекты на границе кремний-диэлектрик. Под влиянием ионизирующей радиации генерируются электронно-дырочные пары, положительно заряженные дырки, ввиду их малой подвижности, захватываются в ловушки диэлектрика. С увеличением накопленной дозы протонного излучения увеличивается положительный заряд диэлектрика и сдвиг уровня порогового напряжения рабочих и паразитных МОП-транзисторов. В большей степени это касается n-канальных транзисторов, управляемых положительным потенциалом. Таким образом, при использовании стандартных технологий объемного кремния основная задача – получить транзисторы с малым сдвигом порогового напряжения и большим пробивным напряжением. Для этого используются технологические методы, направленные на улучшение качества подзатворного окисла. С уменьшением толщины подзатвор-

ного окисла влияние накопленной дозы уменьшается (именно этим и объясняются достаточно высокие характеристики по этому параметру СБИС на объемном кремнии с проектными нормами 0,18–0,25 мкм), снижается и сдвиг порогового напряжения, но падает и пробивное напряжение. Например, в стандартный технологический маршрут вводят отжиг подзатворного окисла при температуре около 900 °С, обеспечивающий более однородную структуру SiO_2. Однако с повышением температуры отжига растет сдвиг порогового напряжения.

Кроме того, на величину напряжения пробоя влияет расстояние между охранным кольцом и областью стока, а также концентрация носителей в охранном кольце (от нее зависит уровень порогового напряжения паразитных транзисторов). Изменяя эти параметры в рамках стандартных технологических маршрутов, можно обеспечить необходимые уровни стойкости.

Отдельное внимание следует уделить моделированию эффектов дестабилизирующих факторов космического пространства (ДФ КП) на этапе проектирования СБИС. Существующие стандартные средства проектирования в общем случае [33, 40] не предусматривают специальных процедур оценки потенциальной стойкости СФ-блоков и СБИС к ДФ КП.

Этот вопрос до сих пор практически не проработан. Очевидно, необходима разработка отечественных средств проектирования и соответствующих моделей. Определенные шаги в этом направлении предприняты в Отраслевом центре проектирования СБИС при участии разработчиков отечественной САПР AVOCAD (коллектив В.Н. Перминова). Отечественная САПР AVOCAD [41–43] позволяет встраивать заказные модели полупроводниковых элементов для микроэлектроники, в том числе модели элементов, учитывающие влияние ионизирующих излучений космического пространства. В Отраслевом центре проектирования СБИС уже ведутся работы по интеграции этой системы в единый маршрут проектирования «комплекс – аппаратура – компоненты». Полученные результаты позволяют говорить о возможности создания маршрута проектирования СБИС, учитывающего их поведение в условиях воздействия ДФ КП. Совместно с использованием специальных схемотехнических приемов такой подход позволяет значительно снизить число итераций при отработке схемотехнических решений и значительно уменьшить стоимость разработки.

Рассмотрим производственные возможности и возможные организационные мероприятия в этой области.

Основной проблемой, с которой всегда сталкиваются разработчики и производители ЭКБ для космических применений, – соединить «лед и пламень», т.е. обеспечить малую серийность при большой номенклатуре. Большая номенклатура изделий влечет необходимость применения большого числа технологических процессов, которые обеспечиваются дорогостоящим технологическим оборудованием, сырьем, материалами, необходимостью непрерывного обслуживания и т.п.

Учитывая крайне малую серийность большинства изделий, необходимо предусмотреть подходы, позволяющие обеспечить унификацию типовых решений.

Прежде всего, следует различать аппаратуру служебных и целевых систем космических аппаратов, а также четко понимать ориентировочную серийную потребность в изделиях. К аппаратуре служебных систем КА относятся системы телеметрии, электропитания и командно-измерительные системы. Учитывая, что большин-

ство КА строятся на базе типовых платформ, можно говорить о том, что аппаратура служебных систем в известной степени унифицирована и выполняет одни и те же функции независимо от целевой задачи аппарата. Так, телеметрия не зависит от того, выполняет ли аппарат функции дистанционного зондирования, связи или навигации. Кроме того, платформы КА живут долго, следовательно жизненный цикл приборов служебных систем и компонентов для них также должен быть длительным. Серийность таких систем составляет сотни и даже тысячи приборов. К аппаратуре служебных систем, как правило, не предъявляется сверхвысоких требований по скорости обработки информации, производительности и т.п. Таким образом, для реализации компонентов аппаратуры служебных систем не требуются технологии глубокосубмикронного уровня.

Аппаратура целевых систем, как правило, уникальна для каждого КА. Особенно ярко это проявляется на аппаратуре межпланетных КА, где говорить о серийности не приходится, потребность по каждому типономиналу вряд ли превысит десятки штук. Определенную серийность имеет целевая аппаратура спутниковых систем связи и навигации, состоящих из достаточно большого числа аппаратов, таких как ГЛОНАСС, «Гонец» и т.п. Но в отличие от аппаратуры служебных систем, к компонентам целевых системам часто предъявляются достаточно высокие требования по быстродействию и производительности.

Посмотрим на проблему с точки зрения технологической реализуемости на отечественных производственных мощностях. Их состояние в настоящий момент хорошо известно и неоднократно освещалось на страницах печати. По большому счету, с точки зрения проектирования и производства сейчас доступны 0,09; 0,18; 0,35; 0,8-мкм технологии на ОАО «НИИМЭ и Микрон», ОАО «Ангстрем», ГК «НПК «Технологический центр МИЭТ», и в холдинге «Интеграл» (Минск). Кроме того, имеется ряд кремниевых производств на предприятиях Минпромторга и «Роскосмоса».

Рис. 3.24. Перспективы производства ЭКБ космического уровня качества на отечественной технологической базе [3]

Что касается ОАО «Ангстрем», то там идет работа по монтажу технологического оборудования, и есть надежда, что к 2015–2016 годам будет доступен техпроцесс с проектными нормами 0,13 мкм.

Таким образом (рис. 3.24), в ближайшей перспективе (до 2015 года) возможен переход на существенное увеличение использования отечественной ЭКБ в аппаратуре служебных систем КА. Что касается аппаратуры целевых систем, то там еще долго будет использоваться значительная доля ЭКБ зарубежного производства, причем зачастую индустриального уровня качества в силу отсутствия ЭКБ космического уровня качества, обеспечивающей требуемые функциональные характеристики (быстродействие, логическая емкость, объем памяти и т.п.). И разработчикам аппаратуры надо понимать эту ситуацию при формировании заявок и перечней на разработку ЭКБ.

Несмотря на то, что в России зарождаются первые субмикронные производства, следует отдавать себе отчет в том, что ряд технологий в ближний и среднесрочный период не появится. Достаточно проанализировать текст ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» (например, www.fasi.gov.ru.), чтобы понять, что в ближайшие 5–10 лет не следует ожидать появления технологий радиационно стойкой памяти большой емкости, флеш-памяти, технологий ПЛИС типа antifuse и т.п.

Это означает, что при проектировании аппаратуры необходимо разумное сочетание отечественной и импортной ЭКБ, а при формировании номенклатуры следует учитывать текущие возможности и перспективы развития микроэлектронных производств.

Соответственно, при планировании работ по разработке и производству ЭКБ для высоконадежных применений возможно построить кооперационную схему, где разработка и финальные операции сборки и испытаний остаются за российским производителем, а кристальное производство осуществляется либо на российских фабриках, либо за рубежом (рис. 3.25). Определенные шаги в этом направлении предпринимает Отраслевой центр проектирования специализированных СБИС при ОАО «Российские космические системы», специально созданный для обеспечения потребностей предприятий «Роскосмоса» в специализированных СБИС.

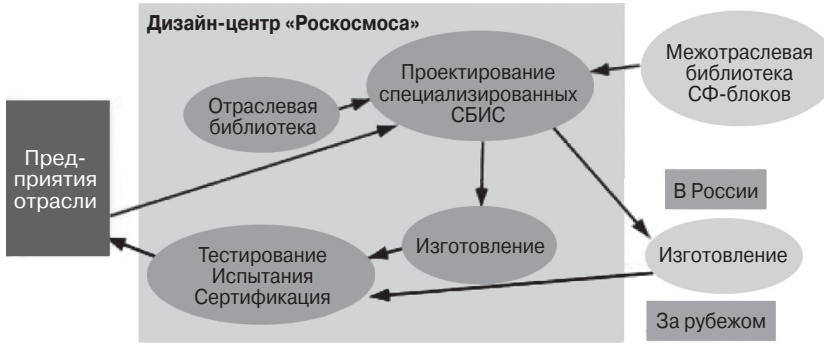


Рис. 3.25. Возможная кооперация при разработке и производстве специализированной ЭКБ космического применения [13]

3.10. Силовые полупроводниковые приборы для электронных систем КА

3.10.1. Основные принципы использования силовых приборов

Наряду с цифровыми и аналоговыми ИМС в электронных блоках КА широко используются и силовые полупроводниковые приборы [44].

Рассмотрим блоки управления бортовых устройств КА, так называемые контрольно-электронные блоки управления. В электронных блоках управления входной сигнал, получаемый с датчика, преобразуется в электрический сигнал. Затем, для получения соответствующих управляющих сигналов, этот сигнал обрабатывается устройствами обработки сигналов. И наконец, блок обработки сигналов подает управляющие сигналы на регулируемый блок, исполнительное устройство, для получения желаемого результата.

В электронных блоках управления производятся измерения и вычисления, в них всегда существует необходимость использования датчиков, микроконтроллеров и силовых полупроводниковых приборов.

На рис. 3.26 представлена общая блок-схема электронного блока управления.

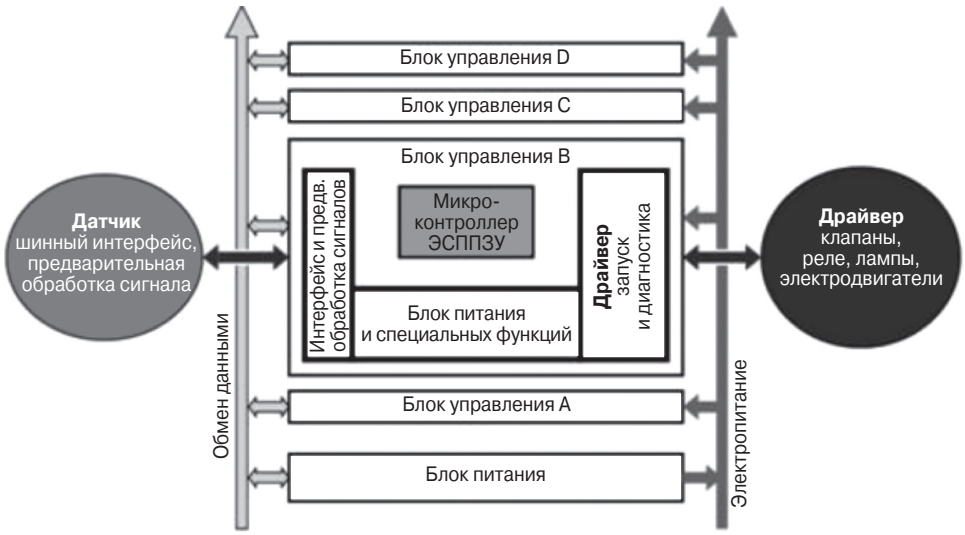


Рис. 3.26. Блок-схема электронного блока управления

Если разделить электронный блок управления на функциональные блоки, то можно выделить блок электропитания, интерфейс обмена данными, микроконтроллер с периферийными устройствами (память и т.д.), устройства последующей обработки сигналов (например, АЦП) и исполнительные устройства. Силовые полупроводниковые приборы используются, главным образом, в исполнительных устройствах и в источниках питания.

Все чаще электронные приборы заменяют электромеханические, например, реле. Поскольку они должны работать в более сложных приборах, требования по надеж-

ности отдельных компонентов (защита от короткого замыкания и от перегрузки) становятся еще жестче. Диагностические функции должны облегчить поиск неисправности в случае отказа и повысить ремонтопригодность. Именно поэтому микросхемы управления и стабилизации в электронных блоках управления часто соединяют в распределенные сети. Они могут иметь очень простую структуру или же, в крайних случаях, могут работать как весьма сложные контроллеры. В связи с этим термин «силовой полупроводниковый прибор» в значительной степени определяется типом рассматриваемого устройства, поскольку, в зависимости от области применения, коммутируемая мощность может отличаться на несколько порядков.

Однако в любом случае одной из функций данных приборов является приведение в действие исполнительных механизмов, например, электродвигателей, ламп, нагревательных резисторов и других электромагнитных приводов. Другой их функцией является обеспечение электроэнергией управляющего устройства в целом. В этом случае наиболее важным параметром становится эффективность (КПД). Наряду с увеличением функциональности постоянно происходит снижение энергопотребления. Если рассматривать это с точки зрения миниатюризации, то можно обнаружить, что плотность выделяющейся в современных микропроцессорах энергии (Вт/м^3) с недавних пор достигла плотности энергии, выделяемой в топливном стержне ядерного реактора. Это ставит новые задачи перед силовой электроникой.

Типы отечественных силовых полупроводников, их номенклатура и основные конструктивно-технологические решения детально рассмотрены в [44].

В качестве примера конструктивно-технологических решений зарубежных изготовителей силовой полупроводниковой электроники на рис. 3.27 представлены технологии и разработки одной из крупнейших полупроводниковых компаний мира – Infinion, В структуру компании Infineon Technologies входят подразделения автомобильной электроники (Automotive Power), промышленной электроники (Industrial Power), микроконтроллеров (Microcontrollers) и датчиков (Advanced Sensors), каждое из которых охватывает свой сегмент рынка.

В отличие от отечественных изготовителей, заказчики этой фирмы, например, микросхем для автомобильной электроники – получают так называемый оценочный комплект. Он состоит из готовой платы, на которой реализована эталонная схема применения; протоколов испытаний и руководства по применению, полного программного обеспечения, которое может понадобиться для управления прибором, и контактных данных ответственных специалистов для решения технических вопросов.

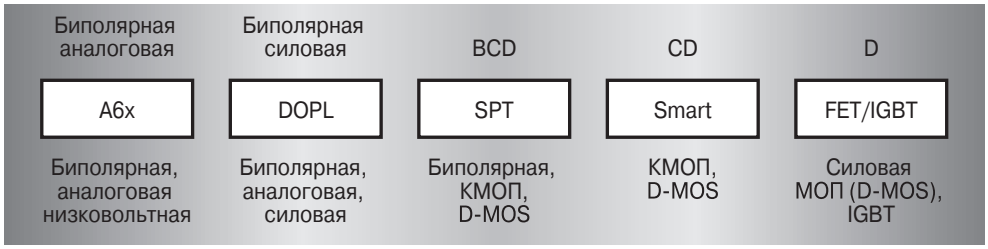


Рис. 3.27. Технологии изготовления полупроводниковых пластин для автомобильной электроники [45]

Для того чтобы классифицировать силовые полупроводниковые приборы по группам, рассмотрим их характеристики как функцию от уровня интеграции (сложности) [44].

Если к МОП-транзистору или IGBT добавить схемы защиты, то в самом простом случае мы получим так называемый TEMPFET (MOSFET с защитой от перегрева). Силовые полупроводниковые приборы с дополнительными интеллектуальными устройствами контроля состояния обычно называются SmartFET. Далее можно выделить PROFET (защищенные полевые транзисторы), или «верхние» ключи (располагаются между плюсом источника питания и нагрузкой, второй вывод нагрузки подключен к земле), и HITFET (полевые транзисторы с высокой степенью интеграции), или нижние ключи.

Если объединить несколько интеллектуальных полевых транзисторов и добавить дополнительные функции, то мы получим интеллектуальную силовую микросхему (PIC – от англ. smart Power Integrated Circuit). К этой группе относятся многоканальные ключи, полумостовые и мостовые микросхемы (полумостовая микросхема состоит из двух последовательно соединенных ключей между положительной и отрицательной шинами источника питания), микросхемы источников питания и микросхемы линейных драйверов.

Еще более высокий уровень интеграции ведет к появлению так называемых силовых системных микросхем. Они изготавливаются и оптимизированы по стоимости специально для конкретной задачи (например, в автоэлектронике – для управления подушками безопасности или антиблокировочной системы тормозов). Наивысшие уровни интеграции достигаются путем использования встроенных силовых устройств. Это уже фактически законченные силовые полупроводниковые системы на одном кристалле (или на нескольких кристаллах в одном корпусе).

3.10.2. Базовые технологии силовых приборов

В области силовой электроники используется множество технологий. Это и базовая биполярная, МОП-, комплементарная МОП- (C-MOS) и силовая МОП-технологии (D-MOS), а также их комбинации [44]. На рис. 3.28 показаны связи этих технологий с конкретными группами продукции.

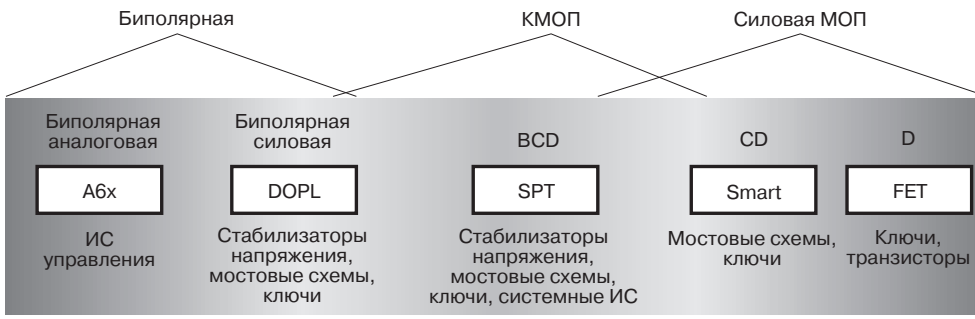


Рис. 3.28. Обзор технологий и связанных с ними групп продукции [45]

КМОП-технология

В этой технологии КМОП (комплементарная МОП) используются только p- и n-канальные МОП-транзисторы, резисторы и конденсаторы. Транзистор изготавливается в карманах p- и n-типа с затвором из поликристаллического кремния. В качестве резистора можно использовать слой из поликремния. Обкладками конденсатора служат слой поликремния и легированная подложка, а диэлектриком – оксидный слой. КМОП-технология оптимизирована для реализации логических функций. По существу, с ее помощью можно создавать устройства с низкими напряжениями питания (5 В; 3 В; 1,8 В), а это позволяет использовать компоненты небольшого размера с высокой степенью интеграции. На КМОП-транзисторах могут быть также реализованы аналоговые функции. Компания Infineon располагает целым рядом технологических процессов (C5, C6, ..., C11) производства логических схем, некоторые из которых используются при изготовлении микросхем ЭСППЗУ или флэш-памяти.

Биполярная технология

В биполярной технологии в качестве активных элементов используются n-p-n и p- n-p биполярные транзисторы. Для чисто биполярных структур не требуются затворы из поликремния. Следовательно, подобные технологические процессы включают меньшее количество операций и поэтому очень рентабельны. Степень интеграции зависит от класса технологии по пробивному напряжению. Класс напряжения зависит от размеров интегральных транзисторов. DOPL – это биполярная технология, разработанная компанией Infineon.

ДМОП-технология (DMOS)

ДМОП-, или DMOS-транзисторы (от англ. Double diffused MOS – МОП-транзисторы, изготовленные методом двойной диффузии) – это транзисторы, оптимизированные для коммутации больших токов и предназначенные для работы при высоких напряжениях. Данный транзистор имеет длинный канал, благодаря чему можно получить высокое пробивное напряжение. Конструктивно он состоит из параллельно соединенных ячеек, что позволяет получить высокие токи (низкое сопротивление в открытом состоянии) и высокую плотность энергии. ДМОП-структуры имеют более толстый, чем у логических структур, подзатворный оксидный слой, что позволяет изготавливать более надежные приборы. Компания Infineon предлагает различные ДМОП-технологии, которые оптимизированы для отдельных устройств, например, PFET- и SFET-технологии.

Если эти базовые технологии объединить в логической последовательности, то мы получим следующие интересные варианты, которые, благодаря их специфическим характеристикам, предназначены для конкретного применения.

БиКМОП-технология

БиКМОП-технология сочетает в себе биполярные и КМОП-компоненты. Такая комбинация компонентов позволяет реализовывать различные аналоговые функции, например, прецизионные источники опорного напряжения. Компания Infineon предлагает различные БиКМОП-технологии, которые, например, оптимизированы для применения в ВЧ устройствах.

CD-технология

CD-технология сочетает в себе КМОП- и ДМОП-компоненты. Это позволяет одновременно в одной микросхеме совмещать логические функции, высокую мощность и большие токи. Один из примеров CD-технологии, предлагаемой компанией Infineon, – интеллектуальная технология.

BCD-технология

BCD-технология – это технология, сочетающая в себе биполярные, КМОП- и ДМОП-компоненты. С их помощью можно изготавливать компоненты на различные классы напряжения. КМОП-структуры позволяют получить высокие плотности размещения логических элементов. Таким образом, существует возможность, например, интегрирования микроконтроллера. Совместное использование биполярных и КМОП-структур позволяет создать прецизионные схемы опорного напряжения. ДМОП-транзисторы позволяют коммутировать высокие токи и напряжения (вплоть до 20 А и 80 В).

В некоторых случаях для достижения высоких степеней интеграции в низковольтных логических схемах используется более одного подзатворного оксидного слоя (субмикронная логика). Также возможно создание нескольких резистивных слоев из поликремния. В передовой BCD-технологии используется более 25 фотолитографий (фотошаблонов). Однако это делает ее более дорогостоящей по сравнению с более простыми технологиями, например, КМОП.

3.10.3. Силовые MOSFET

В большинстве случаев силовые МОП-транзисторы фирмы Infineon используются в качестве ключей. Только в редких случаях их аналоговый режим работы играет какую-либо роль. Можно выделить следующие состояния транзистора.

Транзистор выключен.

Через транзистор должен протекать наименьший возможный ток при максимальном приложенном напряжении. Параметры, связанные с данным режимом работы транзистора, – напряжение пробоя и ток утечки.

Транзистор включен.

В этом состоянии сопротивление транзистора (сопротивление в открытом состоянии) должно быть как можно меньше при максимально возможных значениях тока. Параметры, связанные с данным режимом работы транзистора, – сопротивление сток – исток в открытом состоянии и максимальный ток.

Включение или выключение транзистора.

Время переключения должно быть как можно меньше и величины изменения заряда настолько малыми, насколько это возможно. Параметры, характеризующие данный режим работы транзистора, – время переключения, крутизна передаточной характеристики и величина заряда затвора.

Современные технологии позволяют получать приборы с рабочей температурой свыше +200 °С. Высокие рабочие температуры позволяют уменьшить площадь кремниевого кристалла и снизить затраты на охлаждение. Именно поэтому стремление к более высоким температурам кристалла сочетается с более длительным сроком службы и активной и пассивной надежностью.

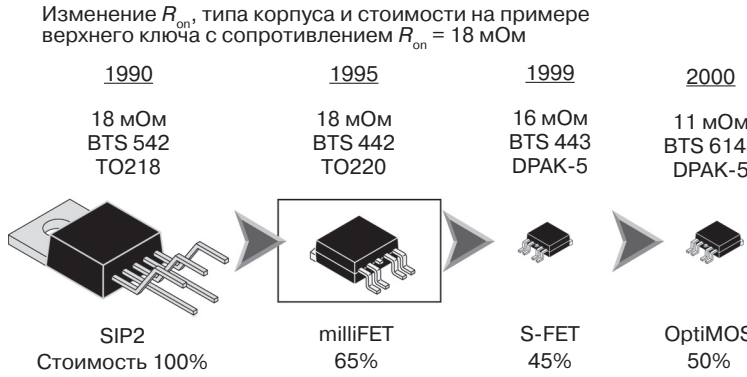


Рис. 3.29. Развитие полупроводниковых ключей на примере 18-мОм верхнего ключа

Дополнительными параметрами, влияющими на надежность, которые следует упомянуть, являются устойчивость к электромагнитным помехам (ElectroMagnetic Interference – EMI) и устойчивость к воздействию электростатических разрядов (ElectroStatic Discharge – ESD).

Специально для космической промышленности компания Infineon в 2013 г. разработала технологию OPTIMOS, позволяющую изготавливать приборы с оптимальными параметрами практически для любых применений.

На рис. 3.29 показано совершенствование транзисторов на примере наиболее важного параметра – сопротивления в открытом состоянии R_{on}.

Здесь представлены четыре последних поколения ключей с сопротивлением в открытом состоянии 18 мОм, а также указаны соответствующие технологии изготовления и снижение стоимости. Соотношение цена/производительность значительно улучшилось: более дешевые гражданские микросхемы меньших размеров могут использоваться для коммутации более высокой мощности. Соответствующие корпуса приборов могут также изготавливаться по более низкой цене, так как потери мощности будут ниже.

3.10.4. Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET)

Если в приборы, изготовленные по силовой МОП-технологии (power-MOS), добавить дополнительные карманы p- и n-типа, то появляется возможность сочетать дополнительные функции в одном устройстве. МОП-транзисторы становятся интеллектуальными. Например, можно интегрировать функции защиты и контроля состояния прибора. Ряд компонентов, которые можно получить в результате данного усовершенствования, представлен на рис. 3.30.

Как мы видим, на данном рисунке не представлены биполярные структуры. Таким образом, мы имеем дело с CD-технологиями (КМОП и ДМОП). Основные параметры приборов, изготовленных по этим технологиям, определяются спецификацией на электронные ключи.

В случае CD-технологии интерес представляет то, какое количество дополнительных компонентов и какого типа можно интегрировать. Данный параметр называется топологической нормой: от него зависит размер компонентов и плот-

ность их размещения, определяется он, как правило, толщиной подзатворного диэлектрика и дополнительными этапами изготовления. В любом случае правило таково: технология с меньшими топологическими нормами является более сложной для реализации и, как следствие, более дорогостоящей.

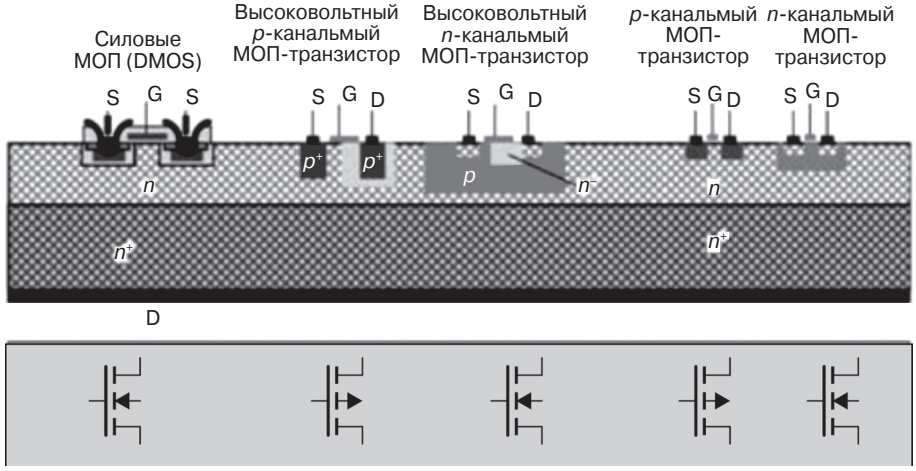


Рис. 3.30. Технологии изготовления полупроводниковых интеллектуальных силовых устройств компании Infineon

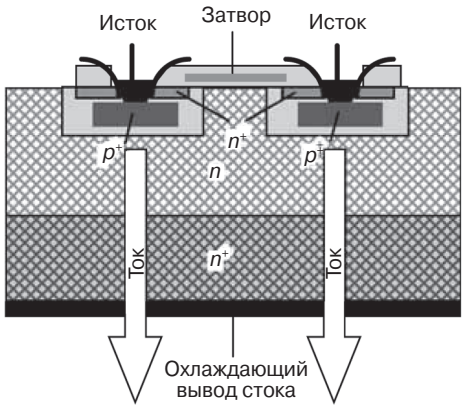


Рис. 3.31. Направление протекания тока в структурах с общим стоком

Как и в случае с силовыми МОП-транзисторами, ток течет вертикально через транзистор. Таким образом, все элементы имеют одну подложку, которая является стоком силовой структуры. Сопротивление в открытом состоянии будет меньше, чем в структурах с изолированным стоком. В дальнейшем оно может быть уменьшено путем сошлифования пластины до толщины в несколько десятков микрон. Таким образом, можно изготовить некоторые силовые структуры, стоки которых будут соединены вместе. У подобных устройств с общим стоком теплоотводящая пластина корпуса должна быть изолирована от внешнего заземленного радиатора, поскольку часто потенциал стока не совпадает с потенциалом земли системы.

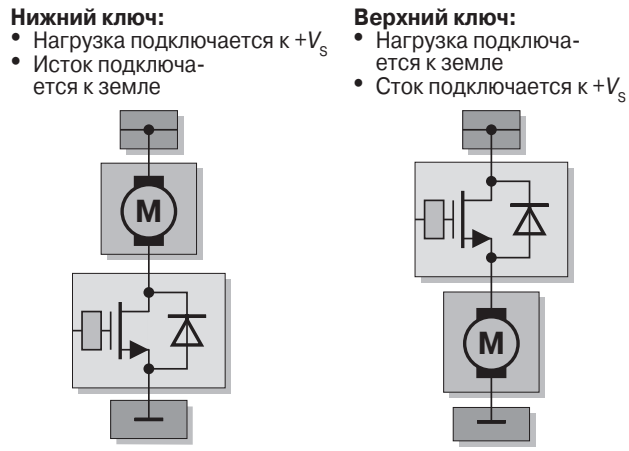


Рис. 3.32. Блок-схема включения верхних и нижних ключей

На рис. 3.31 показан путь протекания тока в структуре такого типа, а на рис. 3.32 – примеры использования данных структур в РЭА.

С точки зрения применения с помощью CD-технологии можно создать так называемые верхние и нижние ключи. Понятия «верхний ключ» и «нижний ключ» следуют из схемы их включения (рис. 3.32), на которой показана последовательность подключения ключа и нагрузки. В общем случае, отрицательный потенциал источника питания соединяется с землей схемы, как, например, в бортовых источниках питания.

Если нагрузка соединена с землей системы, то это позволяет использовать на один провод меньше, потому что ток будет возвращаться в аккумулятор через корпус прибора. Если нагрузка соединена с землей, то ключ должен быть подключен между нагрузкой и плюсом аккумуляторной батареи; на схеме, приведенной на рис. 3.32, он будет находиться на верхней стороне. С другой стороны, нижний ключ всегда соединен с землей системы. На рис. 3.33 показаны типичные верхние и нижние ключи, выпускаемые компанией Infineon.

Выпускаются не только дискретные электронные ключи, но и так называемые мостовые схемы, поскольку все чаще применяются реверсивные электроприводы с электронным управлением. На рис. 3.34 представлена так называемая мостовая (H-bridge) схема. Эта схема может использоваться для соединения нагрузки, обычно двигателя постоянного тока, с источником питания любой полярности.

Помимо интегрированных в одном корпусе слаботочных схем фирмой были также разработаны индустриальные микросхемы семейства TrilithIC. Это мостовые схемы, которые совмещают в одном корпусе МОП-транзисторы и/или управляющий чип. Сокращение TRI взято потому, что оптимальным для создания мостовой схемы является использование двух кристаллов нижних ключей и одного сдвоенного кристалла верхних ключей. На рис. 3.35 представлена типовая микросхема подобного типа. Как видно из рисунка, кристаллодержателем служит выводная рамка. Для наглядности микросхема показана без полимерной формовочной массы, чтобы можно было увидеть ее внутреннюю структуру.

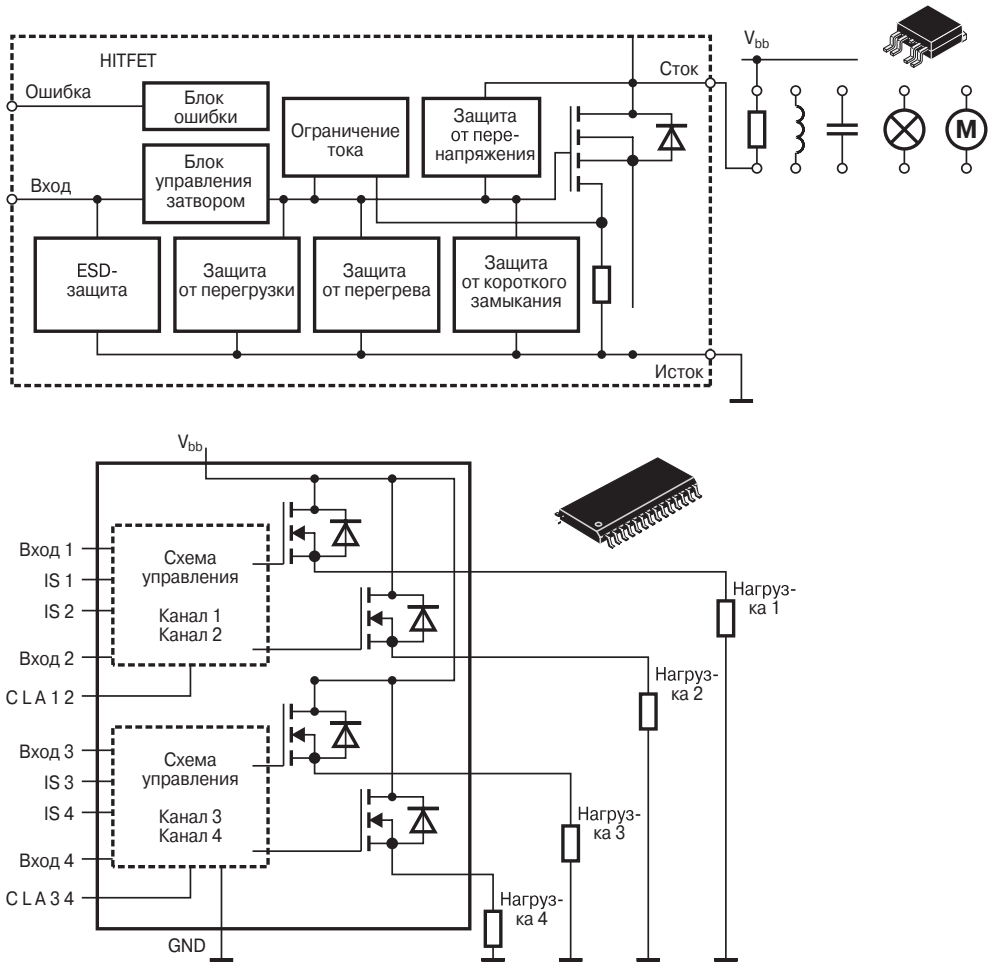


Рис. 3.33. Блок-схемы нижнего ключа BTS3150 (вверху) и верхнего ключа BTS5140 (внизу) компании Infineon [45]

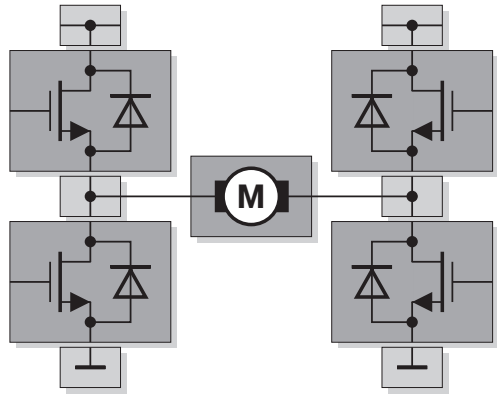


Рис. 3.34. Мостовая схема для реверсивного электропривода

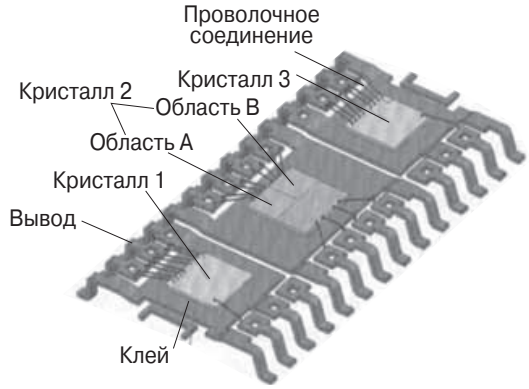


Рис. 3.35. Типовая микросхема семейства TrilithIC [45]

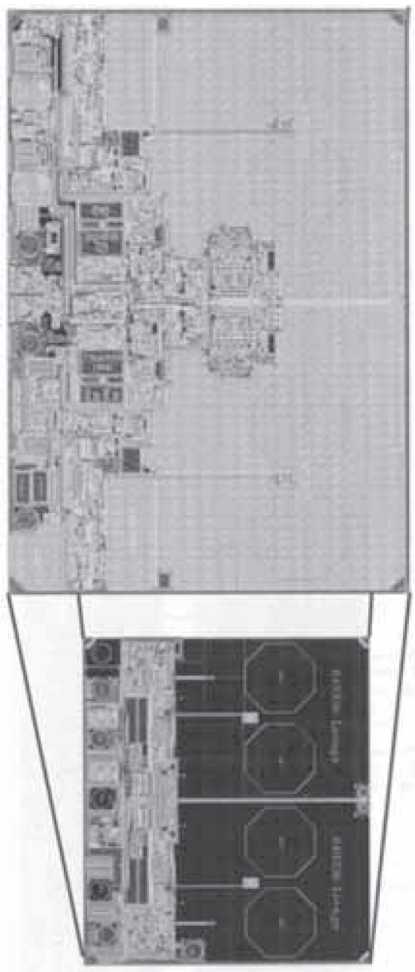


Рис. 3.36. Сокращение размеров кристалла микросхемы поколения Smart 5 [45]

Последнее поколение индустриальных микросхем Smart 5 имеет чрезвычайно низкое сопротивление в открытом состоянии и значительно меньшие топологические нормы. Это сделало возможным изготовление мощных электронных ключей со сложной логикой. Сейчас не осталось преград для производства интеллектуальных ключей с полной диагностикой их состояния.

В самое ближайшее время в погоне за слоганом «Кремний вместо реле» будут востребованы устройства с жесткими требованиями по диагностике; в таких приложениях единственным возможным вариантом является использование интеллектуальных ключей. Практический пример приведен на рис. 3.36. Для того чтобы яснее продемонстрировать эффект сокращения размеров, на данном рисунке в реальном масштабе показаны микросхемы с одинаковым набором функций. Сверху приведена микросхема предыдущего поколения, а снизу – ее аналог, изготовленный по новейшей технологии Smart 5.

Конечно, во всех случаях использования CD-технологии должна проверяться целесообразность применения монолитных ИС.

Компания Infineon учитывала данный факт при разработке своих базовых концепций: «кристалл на кристалле» (Chip-on-Chip – CoC) и «кристалл рядом с кристаллом»

(Chip-by-Chip – CbC). При этом стандартный МОП-транзистор используется в качестве так называемого базового кристалла. Лишь ограниченное количество дополнительных интеллектуальных микросхем требует применения сложных (дорогих) технологий, когда два кристалла монтируются один на другом или один рядом с другим по специальной технологии.

В результате в зависимости от заданного значения тока или сопротивления в открытом состоянии, которое определяется стоимостью изготовления, так называемые сильноточные ключи производятся по технологии «кристалл на кристалле» или «кристалл рядом с кристаллом».

На сегодняшний день при сопротивлениях в открытом состоянии 20–50 мОм метод «кристалл на кристалле» является более дешевым в производстве. При более низких токах существует возможность разместить несколько ключей в одном корпусе. В этом диапазоне токов требуется использование технологии со свободно подключаемыми транзисторами так называемой технологии изготовления интеллектуальных силовых ИС (Smart Power IC).

3.10.5. Интеллектуальные силовые ИС

CD-технология характеризуется довольно низкими топологическими нормами, и по ней нельзя изготовить аналоговые приборы. Указанный пробел заполняется интеллектуальными силовыми технологиями (Smart-Power Technology – SPT), благодаря которым появляется возможность разработки ИС с мощными выходными каскадами, так называемых силовых ИС (Power IC – PIC).

В зависимости от технологического решения набор компонентов ИС может быть значительно более широким, чем минимальный набор элементов, показанный на рис. 3.37.

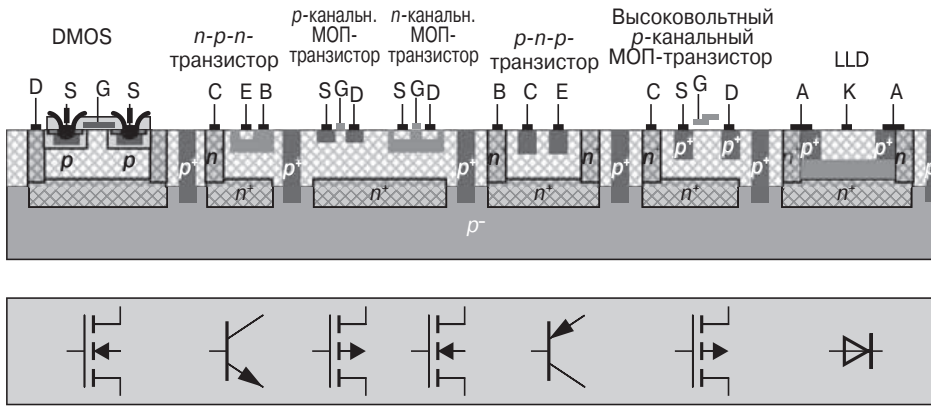


Рис. 3.37. Семейство приборов, изготавливаемых по технологии SPT

При помощи данной технологии можно получать свободно соединяемые мощные транзисторы. Путь протекания тока показан на рис. 3.38. Сначала ток протекает вертикально вниз в скрытый слой интегрального транзистора. Скрытый слой проводит ток в сторону расположенного выше соединения со стоком. Сопротивле-

ние вертикального участка тока, текущего к поверхности, мало благодаря вертикальной n^+-области, что позволяет изготовить изолированные силовые выводы стока на поверхности кристалла. Однако за это приходится платить значительно более высоким сопротивлением в открытом состоянии.

Следовательно, применение SPT-приборов целесообразно для средних уровней тока. Для изолирования стока транзистора от остальной схемы используется подложка p-типа, которая при подключении к земле удерживает p-n-переход между стоком и подложкой в закрытом состоянии. Легко заметить, что p-n-переход между областью стока и карманами элементов будет оставаться в закрытом состоянии, только если p-подложка будет всегда иметь наименьший потенциал в схеме.

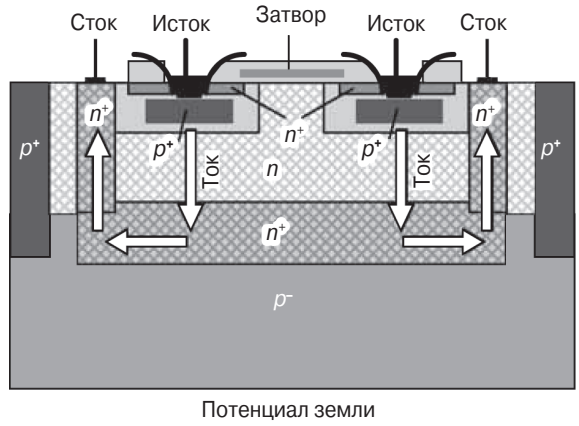


Рис. 3.38. Путь протекания тока и изоляция от подложки в мощных приборах, изготовленных по технологии SPT

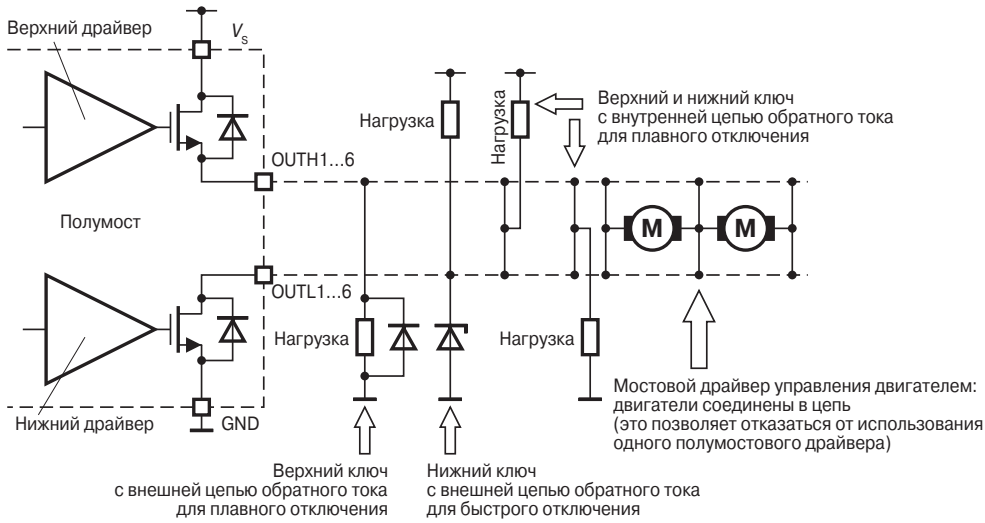


Рис. 3.39. Конфигурация дополнительных устройств для ключей, полумостовых и мостовых схем [45]

Для охлаждения обратная сторона кристалла в приборе может иметь соединение с землей. В этом случае не требуется дополнительных изолирующих экранов. Большое многообразие дополнительных опций представлено на рис. 3.39.

Помимо рассмотренных верхних и нижних ключей по данной технологии может быть реализована полумостовая схема, состоящая из двух последовательно соединенных быстродействующих МОП-транзисторов.

Кроме того, существует возможность изготавливать практически любую из требуемых комбинаций аналоговых и цифровых схем. Типичным примером могут служить микросхема CAN-трансивера TLE6263 с большим количеством прецизионных аналоговых схем и цифровым интерфейсом управления (SPI) и TLE6288 – многоканальный нижний ключ с множеством дополнительных функций.

Компания Infineon производит SPT-приборы уже на протяжении 20 лет, на сегодняшний день используются технологии пятого поколения, SPT5. На рис. 3.40 показано, как совершенствовались наиболее важные параметры – R_{on} и топологические нормы.

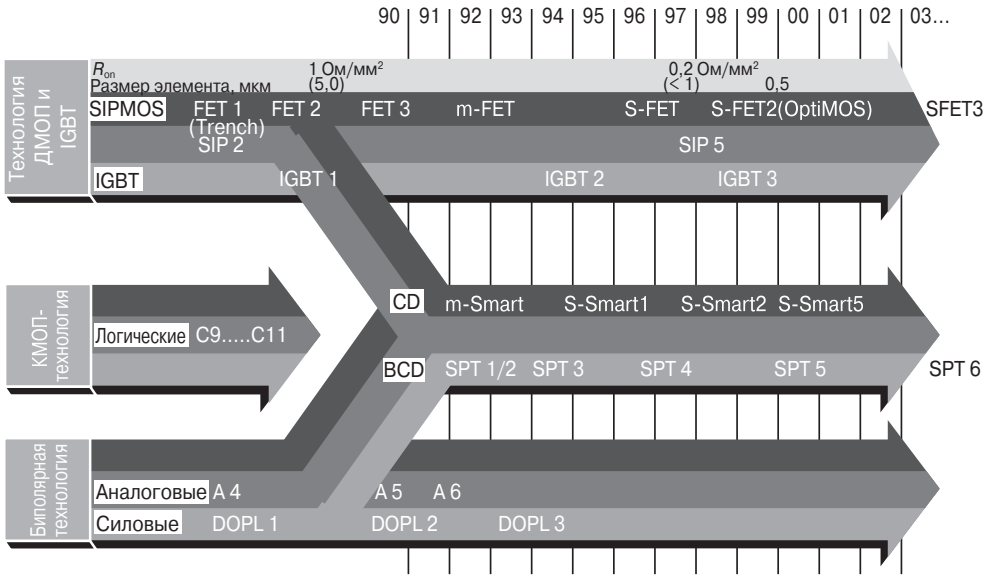


Рис. 3.40. Развитие интеллектуальных силовых полупроводниковых технологий

Также можно увидеть, как технологии изготовления силовых МОП (вверху) и биполярных приборов (внизу) объединились с КМОП-технологиями, в результате чего образовалась SPT-технология.

Основные достоинства SPT-технологии представлены на обобщенной схеме (рис. 3.41). На ней показаны ИС третьего, четвертого и пятого поколения SPT со схожим набором функций. Из рисунка можно увидеть, что более новые ИС при том же размере обладают значительно большей функциональностью.

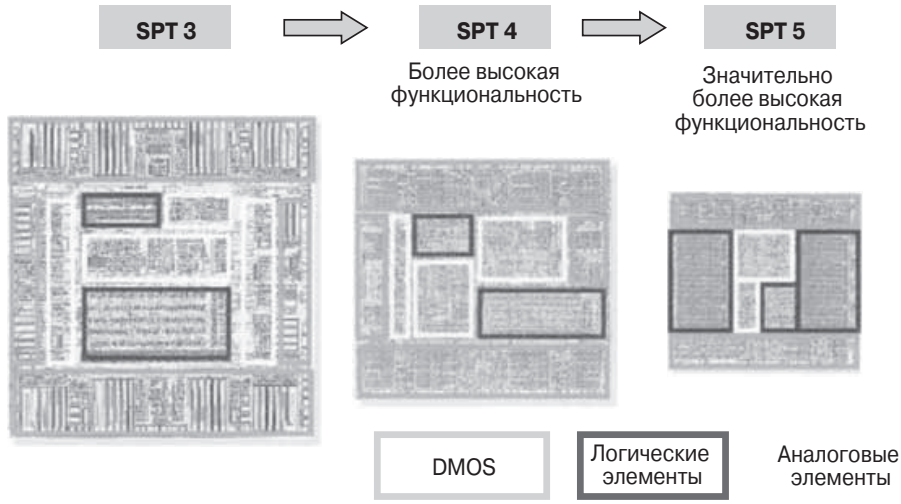


Рис. 3.41. Преимущества высокой степени интеграции

Возрастание сложности электронных схем предъявляет определенные требования к функциональному распределению площади кристалла, изготавливаемого по современным технологиям. Так, в стандартной SPT-микросхеме 30% площади кристалла занимают силовые элементы, около 40% – аналоговые схемы, а оставшиеся 30% – цифровые. Если сложность каждой из этих частей возрастет еще больше, то размер кристалла увеличится втрое. Наибольшую долю в этом увеличении будет иметь цифровая часть, которая увеличится в 6 раз. Чтобы скомпенсировать указанное увеличение, опережающими темпами нужно уменьшать топологические нормы в технологиях следующего поколения. Соответствующее распределение площади микросхемы будет таким: 46% – силовые элементы, 34% – аналоговые схемы и 20% – цифровые. Таким образом, будет существовать дальнейший потенциал для интеграции большего количества как логических, так и системных функций, что реализуется в интеллектуальных ИС систем питания.

3.10.6. Интеллектуальные ИС систем питания

Увеличение степени интеграции интеллектуальных силовых микросхем привело к появлению интеллектуальных ИС систем питания. Для определения оптимальной степени интеграции в электронных блоках управления необходимо учитывать параметры входящих в их состав функциональных блоков. На рис. 3.42 представлены функциональные блоки типового электронного блока управления. Здесь можно выделить логические (цифровые), аналоговые и силовые блоки.

Требования по току, напряжению и температуре определяют, какие дополнительные функции и по какой технологии могут быть реализованы, а также какие типы корпусов должны использоваться. В частности, из рис. 3.43 видно, что интерфейс между контроллером и окружающими его высоковольтными силовыми полупроводниковыми приборами чрезвычайно сложен и интересен.

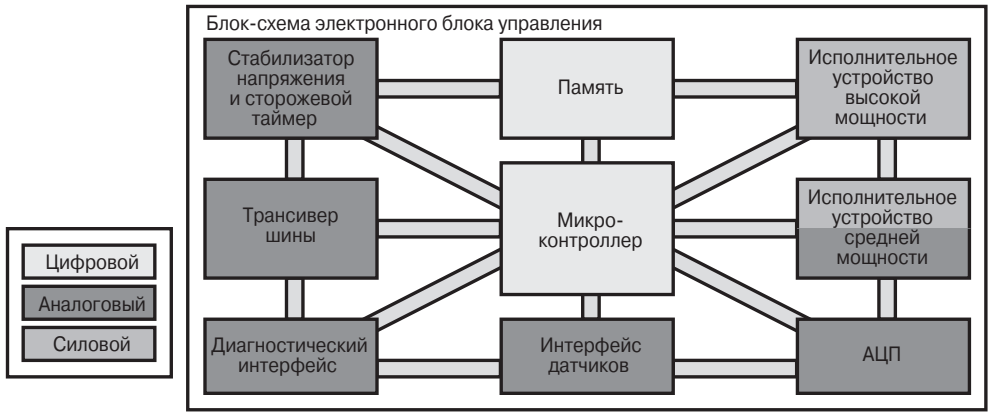


Рис. 3.42. Функциональные блоки электронного блока управления

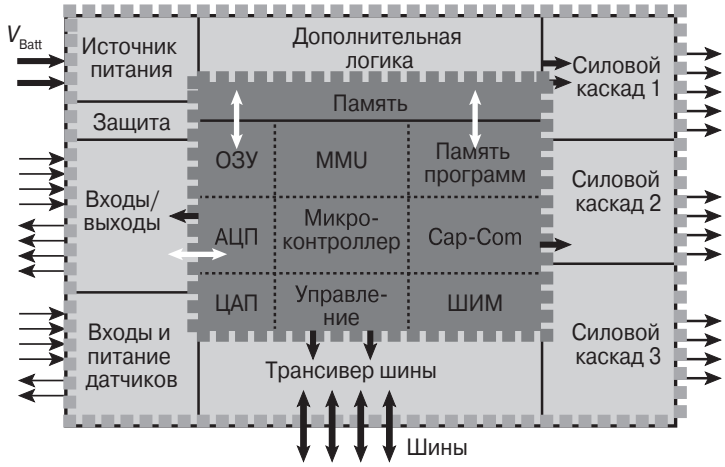


Рис. 3.43. Разбиение электронного блока управления на интеллектуальные функциональные блоки [45]

В данном случае нахождение технико-экономического оптимума требует очень тесного взаимодействия, например, между изготовителем РЭА, его поставщиками и производителем электроники.

Требования, которым должны удовлетворять технологии будущего, несомненно определяются характеристиками, которые улучшаются, в некоторых случаях значительно, совместно с более высокой эффективностью. Это подразумевает, с одной стороны, более высокие вычислительные мощности контроллеров, а с другой – потребность в более совершенных (с более низким сопротивлением в открытом состоянии) силовых полупроводниковых ключах. На рис. 3.44 представлены тенденции изменения отдельных параметров силовых приборов и микроконтроллеров (температура, электромагнитная совместимость, ток и напряжение).

Очевидно, что требования развиваются в различных направлениях.

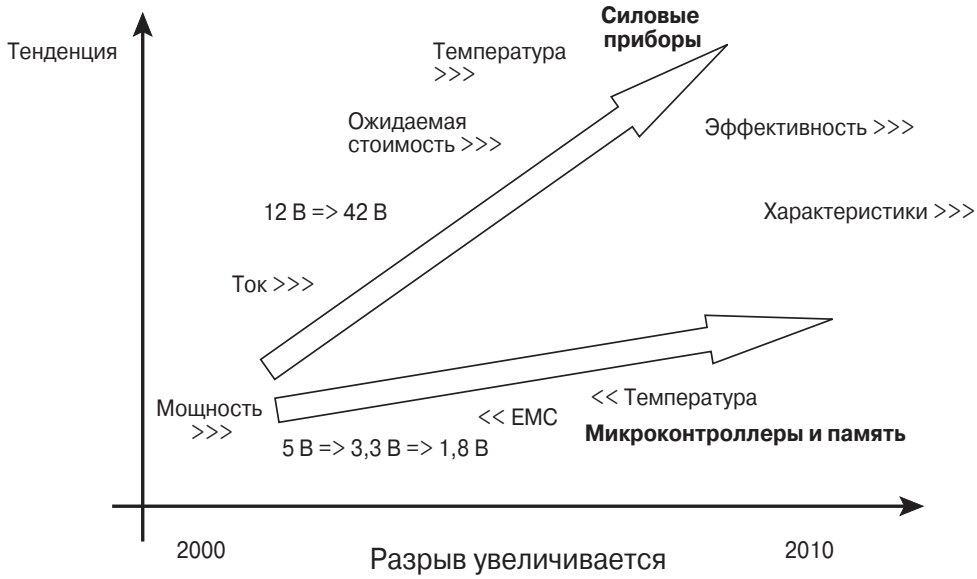


Рис. 3.44. Различные требования, предъявляемые к силовым и логическим устройствам

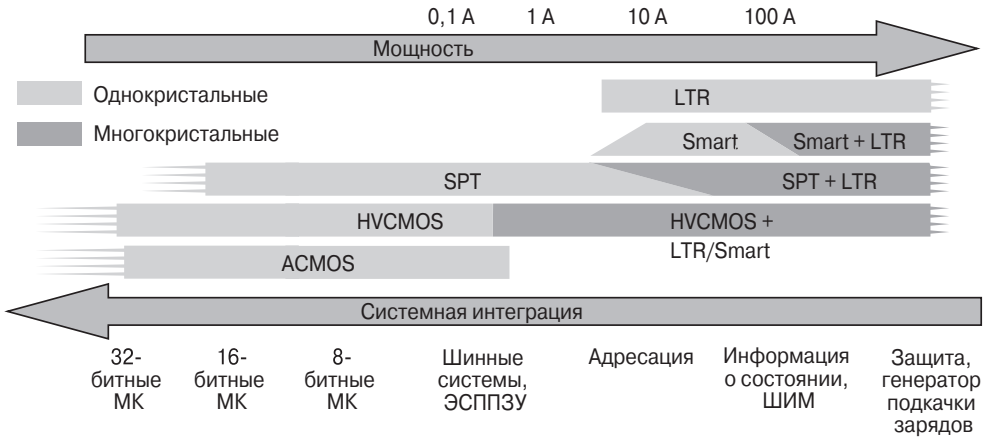


Рис. 3.45. Сравнение технологий изготовления полупроводниковых приборов по току и количеству логических функций

Аналитический обзор этой характерной ситуации в графическом виде приведен на рис. 3.45 [45]. Очевидно, что в зависимости от сочетания характеристик переключения и тока возможны различные технологические варианты, в некоторых случаях одинаково перспективные.

Необходимость оснащения сложных систем всеобъемлющими диагностическими функциями становится понятной, если рассмотреть возможность выхода из строя всей системы в целом. Специалисты по элементной базе для автоэлектроники фирмы Infineon в беседах с заказчиками часто приводят такой аргумент –

при запуске двигателя современного автомобиля высшего класса требуется больше вычислительных мощностей, чем это было необходимо для осуществления первого полета на Луну.

Другим важным фактором является создание интеллектуальных сетей и связанная с ними децентрализация функций управления. Это еще одна движущая сила после так называемой мехатронизации, т.е. полной интеграции электроники в механическую систему. Соответствующим примером можно считать «электронный мускул», который развивает механическое усилие и может быть, например, использован как робот-манипулятор на КА. Это может быть соленоид или электродвигатель. Например, в электродвигатель можно встроить контроллер и, таким образом, превратить его в интеллектуальный привод, как показано на рис. 3.46. В данном случае передача команд управления в одном направлении и данных диагностики в обратном будет осуществляться по последовательному однопроводному интерфейсу. Все, что требуется дополнительно в данном случае, – это два питающих провода (плюс и минус).

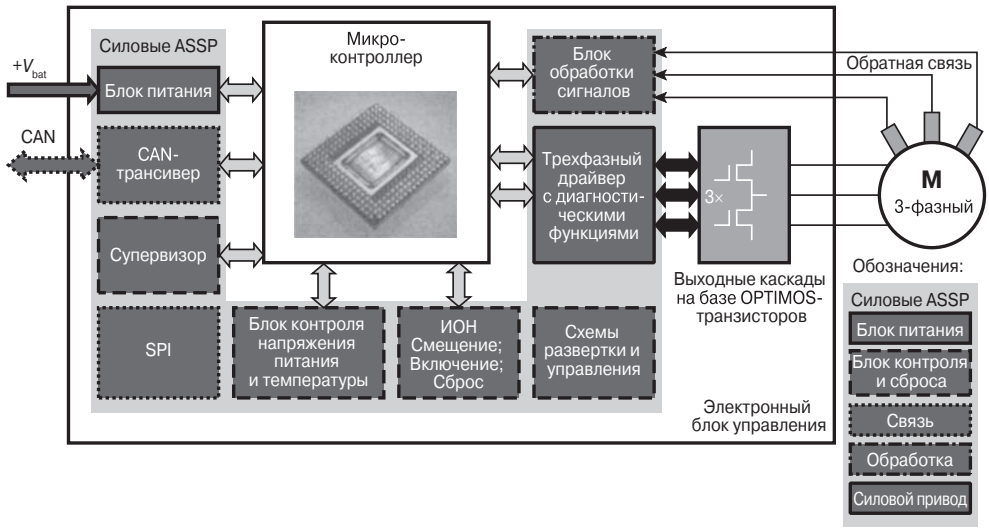


Рис. 3.46. Система управления бесщеточным электроприводом постоянного тока – «электронный мускул» [45]

Следующим шагом может быть использование уже применяющейся в промышленной электронике передачи управляющих сигналов по проводам источника питания.

Если не учитывать аналоговые функции, то одной из технологий будущего будет объединение силовых ключей с высоковольтными КМОП-приборами. В частности, такой подход будет применяться в системах малой сложности, например, в мехатронных системах, упомянутых ранее. Однако высокие и средние вычислительные мощности на протяжении обозримого будущего останутся прерогативой исключительно КМОП-приборов.

Литература к главе 3

1. Белоус А.И., Емельянов В.А., Турцевич А.С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств. – М.: Техносфера, 2012. – 468 с.
2. Белоус А.И., Журба В.В., Поддубный О.В. Микропроцессорный комплект БИС цифровой обработки сигналов. – М.: Радио и связь, 1992. – 340 с.
3. www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?10/03/68
4. www.actel.ru/catalog/SoC%20Catalog%202013.pdf
5. Бумагин А., Гулин Ю., Заводсков С., Стешенко В. и др. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства // Электроника: НТБ. – 2010. – № 1. – С. 50–56.
6. Стешенко В.Б. и др. Проектирование СБИС типа «Система на кристалле». Маршрут проектирования. Синтез схемы // Электронные компоненты. – 2009. – № 1.
7. Стешенко В.Б. и др. Опыт разработки СБИС типа СНК на основе встроенных микропроцессорных ядер // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9.
8. Koons H.C. et al. The impact of the space environment on space systems/ Technical Report, AD-A376872; TR99(1670)-1; SMC-TR-00-10 EL Segundo Technical Operations.
9. Кобзарь Д. Процедурные вопросы применения электронных средств в военной технике: нормативная база и правда жизни // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 3. – С. 86–97.
10. Руткевич А., Стешенко В., Шишкин Г. Самосинхронная электроника: направления развития // Электроника: НТБ. – 2009. – № 8.
11. Lacol R. CMOS scaling, design principes and hardening-by-design methodologies/ 2003 IEEE NSREC/ Radiation effects in advanceed comercial technologies, 2003, California, P. II-1–II-142.
12. Стешенко В.Б. и др. Программируемые логические интегральные схемы: обзор архитектуры и особенности применения // Схемотехника. – 2000. – № 1–2; 2001. – № 1.
13. Стешенко В.Б. Разработка и производство специализированной ЭКБ для космического применения: текущее состояние и перспективы развития. Ч. 1 // Компоненты и технологии. – 2010. – № 11.
14. Осипенко П. Одиночные сбои – вызов для современных микропроцессоров // Электронные компоненты. – 2009. – № 7.
15. Телец Бю, Цыбин С., Быстрицкий А., Подъяпольский С. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности // Электроника: НТБ. – 2005. – № 6.
16. www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2189/doc43922.phtml
17. www.electronics.ru/files/article-8-329.pdf
18. cj.kubargo.ru/2012/02/pdf/39.pdf
19. Белоус А., Солодуха В. Фаблесс-модель организации бизнеса на микроэлектронной фирме: мифы и реалии // Компоненты и технологии. – 2012. – № 8. – С.14–18.
20. Jeorge S. Hurtarte, Evert A. Wolsheimer, Lisa M. Tafoya «Understanding Fabless IC Technology», Newnes, Vol. Communications Engineering Series, ISBN 0750679441. – 2007. – 288 p.
21. AMD отказывается от сотрудничества с Globalfoundries http://servernews.ru/news/595521
22. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением – взболтать // Электроника: НТБ. – 2007. – № 7.
23. Данилин Н., Белослудцев С. Проблемы применения современной индустриальной электронной компонентной базы иностранного производства в ракетно-космической технике // Современная электроника. – 2007. – № 7.

24. Берзичевский К.В., Кулик П.В., Никитин Д.В. Высоконадежные электронные компоненты для применения в космических аппаратах // Петербургский журнал электроники. – 2010. – № 2. – С. 43–50.
25. Захаров А.С., Малинин В.Г., Сапега А.В. Иностранные микросхемы в стратегической РЭА // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 3. – С. 37–44.
26. http://vpk.name/news/Роскосмос: Космические аппараты на 75% состоят из импортных комплектующих/
27. Лыско Р., Глаголев С., Макаров В., Лукачев С., Павлюк П. Россия в ВТО. Что будет с электронной промышленностью // Электроника: НТБ. – 2012. – № 8. – С. 30–32.
28. http://vpk.name/news/В. Головачев И тогда ракетчикам дали 32 тонны золота/
29. Bowers C. Working shop meet / Commercialization of Military and Space Electronics, Nice, France, 1998.
30. Басаев А., Гришин В. Космическое приборостроение: главное – правильная концепция // Электроника: НТБ. – 2009. – № 8.
31. Хартов В. Космические проблемы электроники: перед употреблением – взболтать // Электроника: НТБ. – 2007. – № 7.
32. Стешенко В. и др. Проектирование СБИС типа «Система на кристалле». Маршрут проектирования. Синтез схемы // Электронные компоненты. – 2009. – № 1.
33. Стешенко В.Б. и др. Опыт разработки СБИС типа СНК на основе встроенных микропроцессорных ядер // Компоненты и технологии. – 2008. – № 9.
34. Бухтеев А.А. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news. – 2003. – № 4. – С. 4–14.
35. Кобзарь Д. Процедурные вопросы применения электронных средств в военной технике: нормативная база и правда жизни // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 3. – С. 86–97.
36. Руткевич А., Стешенко В., Шишкин Г. Самосинхронная электроника: направления развития // Электроника: НТБ. – 2009. – № 8.
37. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004.
38. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. – М.: Радио и связь, 1994.
39. Ionizing radiation effects in MOS devices & circuits / Ed. by Ma T.P. and Dressendorfer P.V. – John Wiley and Sons, 1989.
40. Жан М. Рабаи, Ананта Чандракасан, Боривож Николич. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. Изд. 2. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007.
41. Казеннов Г.Г., Перминов В.Н. и др. Системы схемотехнического моделирования AVOCAD. Проектирование аналого-цифровых систем на кристалле // Электроника: НТБ. – 2004. – № 5.
42. Перминов В.Н. и др. AVOCAD + САПР СБИС компаний CADENCE и SYNOPSYS. Интеграция на основе технологии многоязыковых трансляторов и объектных баз данных // Электроника: НТБ. – 2005. – № 4.
43. Кокин С.А., Перминов В.Н., Макаров С.А. Современные технологии схемотехнического моделирования. Система AVOSpice компании ООО «UniqueICs» // Электроника: НТБ. – 2007. – № 5.
44. Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. Полупроводниковая силовая электроника. – М.: Техносфера, 2013. – 216 с.
45. Semiconductor Technical information technologies and characteristics date / Publicist Corporate Publishing, Munich. – 2000. – 780 p.

ГЛАВА 4

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА И ПРИМЕНЕНИЯ ИНОСТРАННОЙ ЭКБ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

4.1. Общие проблемы выбора ЭКБ для РЭА космического назначения

Все национальные программы – от простых (создание спутников связи – навигации) до суперпрограмм (пилотируемая экспедиция на Марс) базируются на «кирпичиках», которые представляют собой используемую электронную компонентную базу (ЭКБ). Эта проблема имеет место и при разработке широкого спектра РЭА для так называемого бытового и промышленного (индустриального) назначения – телевизоров, мобильных телефонов, персональных компьютеров, промышленных контроллеров, автоматизированных систем управления станками с числовым управлением и т.п., но в отношении ЭКБ специального и космического назначения она имеет чрезвычайно важное значение. Можно сказать, что проблема ЭКБ в ракетно-космической технике носит фундаментальный характер и определяет основы национальной безопасности любой космической державы. При определенных политических и экономических условиях все эти национальные программы (и тем более – суперпрограммы), фундаментальной частью которых собственно и является ЭКБ, могут в итоге, образно говоря, оказаться «колоссами на глиняных ногах» вместо «кремниевых ног».

Характерный пример – в настоящее время многие российские предприятия выпускают бортовую аппаратуру для глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, достаточно успешно конкурирующей с американской системой GPS. При этом они используют ЭКБ, произведенную в США, причем в большинстве случаев на это требуется получить разрешение Госдепартамента США, который может разрешить или не разрешить поставки или – что еще хуже – разрешить для комплектации экспериментальных и опытных образцов, а потом отменить разрешение (без объяснения причин) на поставки этой же ЭКБ для комплектации серийной продукции.

Необходимо отметить, что высокие требования заказчика к техническим характеристикам космических аппаратов, к сроку их активного существования в условиях воздействия факторов космического пространства входят в противоречие с возможностями современной российской промышленности к производству ЭКБ космического применения. В результате разработчику бортовых приборов КА оказываются открыты лишь два пути.

Первый подход заключается в проведении комплекса дополнительных испытаний ЭКБ отечественного производства. Они предусматривают входной контроль, отбраковочные испытания, диагностический неразрушающий контроль, выборочный разрушающий контроль. Кроме этого необходимы испытания каждой партии на стойкость к радиационным эффектам и к воздействию тяжелых заряженных частиц. По каждому виду дополнительных испытаний разработаны – и продолжают разрабатываться и совершенствоваться – специальные методики, закупается оборудование, готовится персонал. Сформировалась целая группа организаций, для которых подобные испытания – основной и прибыльный бизнес.

Здесь наблюдается парадоксальная ситуация: обычно затраты на отбор отечественных ЭКБ превышают стоимость самого элемента в 1,5–3 раза [1]. Однако такой подход порочен в принципе. Усилия, средства, время направлены не на достижение должного качества отечественных промышленных процессов, а на сортировку уже проданной продукции – в надежде, что какая-то ее часть случайно окажется пригодной. Кроме того, возможности неразрушающих методов все же ограничены, а разрушающий анализ применим, естественно, только к некой выборке из партии. И в результате всех этих работ лишь несколько снижается вероятность отказа ЭКБ из выбранной партии. Опыт эксплуатации КА на орбите, к сожалению, подтверждает это. Отказов в аппаратуре, укомплектованной прошедшими отбор элементами, более чем достаточно. И выручает только многократное резервирование, снижающее, в свою очередь, функциональные характеристики КА.

Второй подход подразумевает использование так называемой ЭКБ иностранного производства (ЭКБ ИП). Ее применение растет быстро и неуклонно. Причем о ЭКБ космического уровня качества правильнее говорить не «ЭКБ иностранного производства», а «ЭКБ производства США», поскольку США в этой области – практически полный монополист, от них полностью зависят даже европейские спутниковые компании.

Американская ЭКБ космического назначения обладает массой достоинств: нет проблем с радиационной стойкостью и стойкостью к воздействию тяжелых заряженных частиц, а высокая надежность позволяет избежать излишнего резервирования. Но есть и два крупных недостатка: высокая цена и, самое главное, сложности процедур экспорта из США такого класса ЭКБ. Когда Госдепартамент даст разрешение на поставку конкретной партии для конкретного конечного пользователя и даст ли вообще, не знает никто. Создать некий запас также проблематично из-за жесткой привязки поставляемых ЭКБ к конкретной программе.

Эти проблемы, а также следование принципу максимальной эффективности при минимальных затратах и допустимых рисках привели к необходимости использования в бортовой аппаратуре КА импортной ЭКБ **коммерческого назначения**. При этом к ней применяются меры по повышению вероятности многолетней работы в условиях воздействия факторов космического пространства, подобные описанным в первом подходе. Задача осложняется тем, что взятые на открытом рынке элементы не имеют необходимых спецификаций, и для каждого типа приходится на основании самостоятельных исследований выпускать некий эквивалент технических условий. Поскольку в данном случае отсутствуют такие понятия, как «партия», «однородность группы ЭКБ по составу примененных составных частей

и материалов» и т.п., впрочем, как и четкая привязка к конкретной производственной линии, результаты исследований отдельных элементов не обязательно полностью применимы ко всей группе. Все это касается и радиационной стойкости, которую приходится доказывать на отдельных экземплярах из каждой закупленной группы ЭКБ. В надежде, что элемент, впаянный в «летный» прибор, будет не хуже испытанного. На что никаких гарантий нет. Конечно, разрабатываются все более совершенные методики, закупается все более совершенное испытательное оборудование, но принцип один: купить какую-нибудь ЭКБ, а затем потратить время и деньги на снижение рисков, связанных с применением купленного.

Здесь можно привести характерный пример из практики [2]: так, одна из многочисленных партий импортной ЭКБ стоимостью в 1,4 млн руб. потребовала на сертификацию около 2 млн руб., а на проверку радиационной стойкости – еще 7 млн руб. Данная ситуация выгодна различным ИТЦ, но в целом для отрасли – это тупик.

4.2. Ограничение экспорта в Россию электронных компонентов иностранного производства

Предприятия Федерального агентства «Роскосмос» уже испытывают на себе определенные санкции со стороны Госдепартамента США, контролирующего поставки за границу продукции космического и военного назначения [1–3].

Впервые отказ в праве на закупку электронной компонентной базы последовал на фоне скандала с Эдвардом Сноуденом, бывшим сотрудников Агентства национальной безопасности США, выдачи которого американцы требовали от РФ. В частности, они запретили поставку элементной базы для космического аппарата «Гео-ИК-2», назвав его военным, хотя «Гео-ИК-2» можно назвать военным спутником с натяжкой. Предназначение аппарата – геодезические измерения высокой точности, обеспечение потребности российской науки в обновлении модели Земли и уточнении ее геофизических параметров. Орбитальная группировка системы состоит из двух аппаратов. Первый спутник «Гео-ИК-2» был запущен еще в декабре 2010 г., но из-за нештатной работы разгонного блока был выведен на нерасчетную орбиту. В связи с этим запуск второго аппарата был отложен, а на замену первому в ИСС имени Решетнева начали делать новый спутник на основе его модернизации, связанной с его переводом на электронную компонентную базу класса space в соответствии с новыми нормативными документами.

Экспорт американских (в том числе частично американских, например, прошедших проверку или наладку на территории США) деталей для систем военного и двойного назначения регулируется ITAR (International Traffic in Arms Regulations) – набором правил, устанавливаемых правительством США для экспорта товаров и услуг оборонного характера.

В соответствии с правилами ITAR экспорт ЭКБ категорий military (для использования в военных системах) и space (радиационно-стойкие комплектующие) в РФ возможен только с разрешения Госдепартамента США. Следует иметь в виду, что речь идет о поставках импортной ЭКБ в Россию на сумму более 2 млрд долл. в

год (только в интересах космической промышленности). Поэтому как один из альтернативных вариантов рассматривался вариант импорта ЭКБ из Китая.

Сегодня предприятия «Роскосмоса» ЭКБ из Китая не используют, поэтому уровень их качества достоверно не известен. В то же время космическая программа КНР развивается быстрыми темпами, а уровень аварийности изделий китайского космопрома в последние годы ниже, чем у российских.

Американцы давно вообще не поставляют в Китай ЭКБ категорий space и military из вполне обоснованных опасений, что их начнут дублировать. Поэтому Китай был ***вынужден*** переходить на свою элементную базу, и китайские специалисты эту проблему достаточно быстро решили – сейчас Китай в своих спутниках использует до 98% комплектующих собственного производства, что является хорошим стимулом и примером для развития отечественной микроэлектронной отрасли.

Отметим, что санкции со стороны США уже коснулись наземного сегмента ГЛОНАСС. В феврале 2013 г. «Роскосмос» сообщил о принципиальном согласии американцев разместить на своей территории станции сбора измерений системы дифференциальной коррекции и мониторинга ГЛОНАСС, однако уже осенью этого года американцы официально отказались размещать у себя любое оборудование для уточнения характеристик российской навигационной системы.

Поэтому отечественным разработчикам РЭА КН необходимо детально знать и учитывать в своей деятельности все нюансы действующих правил и ограничений международной нормативно-правовой и законодательной базы, регламентирующей все стадии и этапы приобретения импортной ЭКБ.

4.2.1. Ограничение экспорта ЭКБ из США

Иностранные производители предлагают широкий спектр компонентов и изделий с требуемыми характеристиками. Однако зарубежные производители вводят все новые ограничения на поставку в Россию необходимых компонентов, вследствие чего получать эти компоненты для космического или военного применения становится все более затруднительно. Поэтому как заказчикам РЭА КН, так и разработчикам РЭА и подразделениям и службам, ответственным за приобретение электронных компонентов иностранного производства, важно знать все эти ограничения, а также порядок их учета при оформлении и реализации заказов на их поставку. В этой связи следует обратить особое внимание на ЭКБ двойного назначения.

Поскольку в изделиях двойного назначения соединяются коммерческие технологии и требования для военных программ, то за последние 15 лет это направление эффективно развивает передовые технологии и одновременно обеспечивает оборонные программы. Производитель изделий двойного назначения становится участником обоих рынков, при этом расходы на исследования и разработку продукции уменьшаются, так как военная и коммерческая продукция может изготавливаться на одной и той же производственной линии.

Основными технологическими тенденциями на рынке ЭКБ можно считать микроминиатюризацию, увеличение производительности, функциональных воз-

можностей, плотности микросхем, интегрирование различных электро-радиокомпонентов (ЭРК) в одном, переход к новым материалам, переход к верхней части диапазона СВЧ. Наряду с этими тенденциями можно отметить также повышение требований к характеристикам ЭРК для авиационной и космической промышленности и для военных целей. В первую очередь это касается стойкости к дестабилизирующим факторам, надежности, отказоустойчивости и длительности жизненного цикла.

Целевое использование продукции на мировом рынке ЭКБ стало решающим фактором при выборе компонентов, а его отслеживание – составной частью контроля над экспортом стран-производителей. Требования к компонентам основываются на стандартах, разработанных как в США, так и международными организациями, например, Европейским космическим агентством, НАСА, Министерством обороны США (серии MIL-STD, MIL-SPEC). Подтверждение соответствия установленным требованиям осуществляется в рамках международных систем сертификации технологий и ЭРК.

Являясь мировым лидером в развитии новейших технологий, США внимательно следят за их распространением в мире. Так как современные микросхемы – это основа для построения эффективных систем вооружения, доступ к технологиям их изготовления и поставка жестко регулируются.

Государственное регулирование экспорта в США появилось после Второй мировой войны, когда технологии стали критическим фактором военной стратегии США. Были утверждены Правила международной торговли оружием (International Traffic in Arms Regulations, ITAR). В 1976 году принят Закон о контроле над экспортом вооружений (Arms Export Control Act, AECA) [2], содержавший первые ограничительные меры. В частности, раздел 38 этого закона обязывает предоставлять список экспортируемого вооружения и военной техники и определяет правила их экспорта. Сама система регулирования экспорта технологий и вооружения в США относится к президентско-парламентскому типу – в соответствии с AECA на президента США возложено определение государственной политики в области военно-технического сотрудничества и регулирование экспорта и импорта военной продукции, при этом конгресс выполняет законодательные, ограничительные и контролирующие функции.

Важно знать, что ответственность за регулирование экспорта технологий и продукции военного назначения в США распределена между несколькими государственными ведомствами: Министерством обороны и Государственным департаментом, Министерством торговли и Министерством финансов. Имеется несколько перечней продукции, связанных с этим регулированием. Самые известные – Перечень вооружений (US Munitions List – USML) [3] и Перечень критических товаров (Commerce Control/Critical Commodities List – CCL) [4].

К функциям Государственного департамента относятся реализация программ военной помощи, продаж вооружений иностранным государствам и разрешение сделок, заключаемых Министерством обороны США с другими странами. С этой целью Государственный департамент осуществляет лицензирование экспорта вооружений, составление и периодические пересмотры USML. Министерство обороны непосредственно реализует экспорт вооружений. Государственный департамент ответственен

за одобрение продаж по перечню ITAR на основании AECA (22 U.S.C. 2778). Пункты ITAR согласуются с соответствующими пунктами USML [5]. Министерство обороны (Department of Defense – DoD) руководствуется Основным срочным перечнем (Master Urgency List – MUL), выполняемым в первую очередь.

Бюро промышленности и секретности (Bureau of Industry and Security, BIS) Министерства торговли США отвечает за регулирование экспорта технологий двойного назначения. В этом процессе также принимают участие Департамент внутренней безопасности, Министерство финансов и некоторые другие ведомства.

На основании Правил экспортного регулирования (Export Administration Regulations, EAR) [6] регламентируются:

- радиационно-стойкие ЭРК;
- электронные компоненты (микроконтроллеры, процессоры, АЦП, ЦАП, ПЛИС и др.), имеющие расширенные температурные диапазоны (–55...125 °С включительно, ниже –55 °С, выше 125 °С);
- высокоразрядные и быстродействующие процессоры (с разрядностью от 8 бит и производительностью от 2,5 MSPS);
- радиоэлектронные компоненты, в особенности СВЧ-компоненты (в зависимости от мощности и частоты);
- ЭРК для построения радиочастотных систем с реализованными в них криптографическими функциями (например, системы на кристалле с микроконтроллером и радиочастотным приемопередатчиком).

Кроме компонентов регулируется экспорт программного обеспечения, технологий и продукции, произведенной с применением этих компонентов и технологий на территории США либо других государств.

Почти все страны в мире так или иначе имеют свои ограничения по экспортному регулированию США в зависимости от типов угроз, которые, по мнению Государственного департамента США, исходят от этой конкретной страны. Конечно, в EAR существует и список стран, с которыми запрещены вообще любые сделки (Part 746 – Embargoes and Other Special Controls). Кроме того, в части 744 (Part 744 Spir – Supplement № 4 to Part 744, Entity List) определен список организаций и физических лиц, которым на поставки любых товаров необходимо получать соответствующее разрешение. Весьма существенные ограничения имеются для поставок ЭКБ в Россию, в том числе для Минобороны, Росатома, «Роскосмоса» и в научно-исследовательские институты. Поставщики ЭКБ обязаны иметь основную информацию о конечном получателе поставляемых ЭРК и о видах продукции, производимой из них.

При экспорте ЭКБ в Россию всеми участниками сделки должны быть предприняты меры по строгому контролю их получения, транспортировки, хранения и применения. Так, по прибытии в Россию после таможенного оформления груз необходимо разместить на складе поставщика в специальном охраняемом помещении с ограниченным доступом. Документы по каждой транзакции должны храниться не менее 5 лет. Каждые полгода экспортер обязан предоставлять отчет в Бюро промышленности и безопасности, а при возврате компоненты, в том числе бракованные, поврежденные или выпаянные, отправить производителю в США.

Ответственность за соблюдение EAR возлагается как на производителей электронных компонентов, так и на фирмы-поставщики. Производители, в свою очередь, обеспечивают передачу ответственности за распространение своей продукции на поставщиков путем включения в договора поставок пунктов об обязательном исполнении законодательства США. В противном случае производитель оставляет за собой право расторгнуть договор с поставщиком в одностороннем порядке. В качестве наказания на нарушителей, находящихся под юрисдикцией США, могут быть наложены крупные штрафные санкции, аннулированы внешнеторговые лицензии, а должностные лица компаний подвергнуты уголовному преследованию. Компании-нарушители (конечные потребители, поставщики, а также физические лица), не находящиеся под юрисдикцией США, могут быть внесены в ограничительные списки EAR. В этом случае доступ к изделиям американского производства для них существенно затрудняется, поскольку каждый раз их поставщик будет обязан оформлять специальную лицензию, что зачастую равносильно закрытию бизнеса. Поэтому каждый из них имеет свою собственную систему контроля за распространением продукции. В соответствии с EAR такая система также содержит классификаторы продукции и направлений экспорта.

BIS разработало комплекс документов по классификации товаров, лицензированию и контролю исполнения Правил экспортного регулирования (Export Administration Regulations, EAR). Классификатор, часть 774 EAR (Part 774 – The Commerce Control List) содержит полный перечень товаров, подлежащих экспортному контролю. В него входят товары 10 категорий, в том числе категории 3 (электроника), категории 5 (ч. 1 – телекоммуникации, ч. 2 – информационная безопасность).

Для оформления лицензии на экспорт компонента экспортеру нужно подать заявку в BIS с информацией об ЭРК, изделии, конечной продукции, компании – конечном пользователе, логистической цепочке и т.д. Заявка оценивается и изучается в BIS с точки зрения опасности распространения компонента в указанном направлении с привлечением технических экспертов и специалистов из спецслужб. Срок рассмотрения заявки составляет 3-4 месяца, а срок действия лицензии – 1-2 года.

Следует подчеркнуть, что для большинства производителей ВЧ- и СВЧ-компонентов важен раздел «детали» в каждой категории USML. Как правило, в эту категорию входят ракеты, пусковые установки, космические корабли и т.п. Однако она включает положение о том, что все используемые в них компоненты, специально спроектированные или модифицированные для военного применения, относятся к категории USML. Чтобы определить, не предназначен ли продукт для военных целей, Государственный департамент проверяет разработку или модернизацию ЭРК на основе спецификации заказчика. Однако эксперты могут запретить экспорт даже коммерческих ЭРК без объяснения причин отказа [1, 7].

В настоящее время законом в ряде случаев допускается экспорт некоторых изделий без получения лицензий, если в их состав входят части, подлежащие лицензированию, но составляющие не более 25% общей стоимости товара. Также возможен реэкспорт некоторых товаров иностранным партнером, если контролируемая США технология составляет не более 25% общей стоимости изделия. Однако на практике это реализуется не всегда.

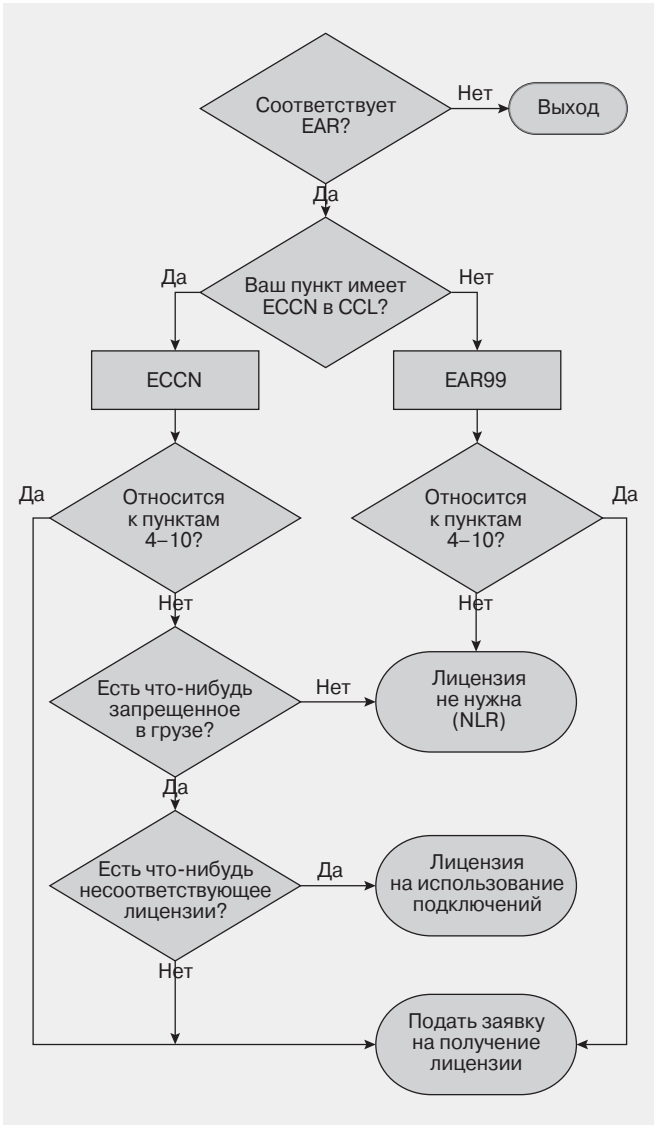


Рис. 4.1. Алгоритм получения разрешения на экспорт

Алгоритм получения разрешения на экспорт (рис. 4.1) представляет собой пошаговую товарную классификацию [1, 8]. В первую очередь определяется, имеет ли продукция классификационный номер экспортного контроля (ECCN). Также анализируются исключения из перечня, требующего лицензирования (EAR99). Отметим, что для продукции, классифицированной как EAR99, может потребоваться разрешение на экспорт или может быть наложен арест на отправку странам или лицам, для которых имеются запреты.

В заявлении указывается место назначения, к нему прилагаются копии счетов, грузовой накладной или других документов, которые сопровождают продук-

цию до конечного получателя и потребителя за границей. Контроль за товаром ведется до отгрузки, причем таможенная служба США имеет право проверять доставленные в доки грузы и конфисковывать их. После отгрузки компании предоставляют отчетность о движении и использовании груза, а уполномоченные государственные структуры могут командировать представителя для проверки продукции в месте получения и применения.

Администрация президента Барака Обамы приняла к реализации план по модернизации системы регулирования экспортного контроля. Его цель состоит в переходе к более эффективному мониторингу и контролю трансфертов продукции и технологий, подпадающих под категорию секретных, и одновременно укреплению кооперации с партнерами. Ряд технологий был передан для гражданских нужд, например, радары для гражданской авиации и др. [9]. При этом предусмотрено ужесточение процедуры выдачи экспортных лицензий на оборудование и технологии двойного назначения, особенно для малых и средних компаний, получение более подробной информации об импортере и его гарантий по предоставлению права инспекции Министерства торговли США производить проверку оборудования на месте после осуществления экспорта. Обсуждается вопрос создания единого экспортного агентства на единой информационной платформе [10]. В целом, несмотря на наметившиеся тенденции либерализации внешней торговли, США продолжают политику ужесточения экспортного контроля.

Все эти факторы необходимо учитывать уже на стадии формирования заказчиком РКТ конкретных технических требований.

4.2.2. Ограничение экспорта электронных компонентов из Европы и других стран

Великобритания – второй в мире экспортер по объемам вооружений после США. В 2007 году этими странами был подписан Договор о кооперации в области безопасности торговли продукцией военного, аэрокосмического и секретного назначения (US-UK Defence Trade Cooperation Treaty, DTCT). Цель договора – оптимизация и усовершенствование процессов оборонного экспорта, защита безопасности и обороны обеих стран, ускорение поставки американского производственного оборудования в Великобританию и содействие сотрудничеству между двумя военно-промышленными комплексами. В соответствии с DTCT экспортер должен быть зарегистрирован в Управлении оборонной торговли, а также должен получить экспортную лицензию (или другую форму разрешения на экспорт) в любом агентстве правительства США. Получатель экспортного товара обязан быть членом сообщества Великобритании. Все необходимые документы такого экспорта должны находиться у экспортера и получателя и предоставляться по просьбе правительства США.

Система государственного управления в области экспорта вооружений и военной техники Франции отражает сложившуюся политическую структуру общества и включает в себя многоступенчатый механизм принятия решения по экспорту военной продукции. Межведомственная комиссия по изучению проблем экспорта продукции военного назначения выдает необходимые заключения по производству и поставкам вооружений и военной техники иностранным государ-

ствам. При осуществлении внешнеторговых сделок в отношении продукции военного назначения Министерство иностранных дел следит за соблюдением внешнеполитических интересов посредством выдачи соответствующего заключения, на основании которого Министерство экономики и финансов через Генеральное управление таможен и косвенных налогов выдает разрешение на вывоз военной продукции за пределы страны.

В Германии в соответствии с законом «О контроле над вооружениями» от 20.04.1961 г. производство, использование, хранение, приобретение, передача и транспортировка вооружения с целью его вывоза из страны осуществляются на основании экспортной лицензии федерального правительства.

Правительственный тип государственного управления военно-техническим сотрудничеством – наиболее распространенный в мире и присущ таким государствам-экспортерам военной продукции, как Австрия, Швейцария, Италия, Швеция, Португалия, Бельгия и др.

Израиль имеет хорошо развитую оборонную отрасль, однако США заблокировали продажу самых передовых вооружений Израиля со ссылкой на американские компоненты, используемые в военной и аэрокосмической технике. США, которые обеспечивают Израилю 3 млрд долл. в год в виде военной помощи, желают контролировать их военные проекты.

4.2.3. Международные организации контроля экспорта

Наряду с законодательными ограничениями на экспорт США и других стран существуют международные организации, контролирующие экспорт. В 1949 г. по инициативе США был создан первый международный режим экспортного контроля – Координационный комитет по контролю над экспортом (Coordinating Committee for Multilateral Export Controls, CoCom). На замену CoCom в 1995 г. были созданы Вассенаарские договоренности. В состав этой организации вошли 23 страны, в том числе страны НАТО и Россия, с целью:

- обеспечения большей открытости и ответственности в отношении передачи вооружений и чувствительных товаров и технологий;
- недопущения поставок товаров и технологий двойного назначения для военных нужд в страны, политика которых тревожит мировое сообщество;
- обеспечения обмена информацией и возможности проведения скоординированной национальной политики в области контроля экспорта товаров и технологий двойного назначения.

В то же время Вассенаарские договоренности не направлены против конкретных государств, не препятствуют осуществлению добросовестной торговли и не ущемляют прав государств на приобретение законных средств для собственной обороны (ст. 51 Устава ООН).

Европейское оборонное агентство (European Defence Agency, EDA) ответственно за состояние обороноспособности и развитие военных технологий Евросоюза. В EDA считают, что боеспособность базируется на цифровых технологиях и слаженной работе всех звеньев информационной цепи. Это требует новых решений в области ВЧ- и СВЧ-техники [11]. EDA поддерживает развитие самых современ-

ных технологий в области военных электроники и радиоэлектроники и одновременно контролирует их нераспространение [12].

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать только один вывод – в условиях существующих ограничений оснащение отечественной космической промышленности должно опираться в первую очередь на конкурентоспособную отечественную элементную базу, для чего необходима соответствующая государственная программа поддержки микроэлектронной отрасли.

Применению безлицензионной импортной продукции – ЭКБ класса industrial в аппаратуре для авиационно-космического и военного назначения – препятствует ряд факторов. Во-первых, гарантируемые изготовителем показатели надежности и радиационной стойкости недостаточны. Во-вторых, затраты на дополнительные испытания и сертификацию таких компонентов соизмеримы с разработкой и изготовлением специализированных БИС. А для аппаратуры авиационно-космического и военного назначения требуется закупка сертифицированной ЭКБ классов military, space у аттестованных поставщиков, контроль характеристик и испытания в соответствии с российскими требованиями [1]. При этом тестирование импортных ЭРК по всем параметрам отечественными испытательными лабораториями возможно далеко не всегда, так как отсутствует доступ к технологической информации ЭРК.

Импорт ЭРК требует обоснования покупки именно лицензированных компонентов. Если конечная продукция предназначена для особых условий эксплуатации либо для особо ответственных применений (медицина, системы жизнеобеспечения), то требуется тщательное обоснование целевого назначения. Правильная классификация поставляемой продукции, предоставление исчерпывающей информации и оформление требуемых лицензий и разрешений – необходимые условия обеспечения поставок ЭРК.

На момент написания этой книги просматриваются только некоторые положительные тенденции по снятию ограничения на экспорт ЭРК. Например, новые аспекты ECCN разрешают поставки в Россию высокоскоростных АЦП со скоростью преобразования до 200 МГц при разрядности 12 бит и до 125 МГц при разрядности 14 бит [13]. Открываются возможности поставки СВЧ-компонентов и узлов с частотами до 26 ГГц.

4.3. Особенности применения индустриальных ЭКБ иностранного производства в ракетно-космической технике

Рассмотрим сложившиеся в Российской Федерации основные тенденции и особенности применения в ракетно-космической технике и смежных отраслях промышленности новейших образцов зарубежной электронной компонентной базы (ЭКБ), не имеющих отечественных аналогов в своем классе компонентов космического и военного назначения, а также попробуем сформулировать основные практические рекомендации по выбору элементов для реализуемых проектов с учетом эволюции технологий и рынка современной электронной компонентной базы.

Необходимость использования современной индустриальной (промышленной) электронной компонентной базы иностранного производства в ракетно-кос-

мической технике обусловлена рядом объективных факторов. В последние двадцать лет произошло коренное перераспределение на рынке электронной компонентной базы военного и космического назначения, объем которой оценивается суммой около 1,4 млрд долл. в год. Доля космоса составляет всего около 1% этого рынка по сравнению с 3000 млрд мирового рынка всей ЭКБ. Большинство производителей ЭКБ не имеют экономических стимулов для участия в военном и аэрокосмическом бизнесе. Предполагаемые финансовые прибыли здесь слишком малы, требования к качеству и надежности слишком высоки. Так, с развитием космических аппаратов (КА) серии Constellation (Англия), где использовались самые современные технологии и большое число специфических космических требований, преимущества ЭКБ индустриального уровня качества стали более необходимыми и очевидными. Пионерами использования ЭКБ индустриального уровня качества являются КА Iridium и Globalstar (США).

Приоритет применения ЭКБ иностранного производства индустриального уровня качества в подобных российских проектах должен отдаваться стабильным, крупным фирмам-изготовителям космического приборостроения с отлаженной прецизионной технологией производства.

Это подтверждается и тем, что стоимость строительства современного завода по производству микроэлектронных схем с проектными нормами 0,35–0,25 мкм достигает 2-3 млрд долл., а для норм менее 45 нм превышает 5-6 млрд долл.

В отсутствие развитого внутреннего рынка, опытных менеджеров и в существующих условиях раздела мирового рынка экономический эффект даже в случае успешного запуска специализированного для космических применений полупроводникового завода в России и полной государственной поддержки маловероятен.

Но сложность процедуры выбора, поставки, проведения достоверных испытаний, обеспечения долговременного производства и ремонта РЭА с ЭКБ иностранного производства (ИП) индустриального уровня качества в большинстве случаев окупается ее преимуществами. Необходимо учитывать тот факт, что время с момента выпуска на рынок ЭКБ ИП, произведенных по новым технологиям, до момента снятия их с производства постоянно сокращается. Это обстоятельство отражается на рассматриваемых ниже особенностях проектирования и производства РЭА, ставит задачи по совершенствованию испытательного оборудования и вносит свои коррективы при планировании долгосрочного производства РЭА.

Развитие ЭКБ ИП меняет представление разработчиков РЭА о составе и структуре изделия, что исключает или минимизирует возможность ускоренного проектирования, когда разрабатываемый объект комплектуется из ранее разработанных узлов. В этой ситуации просто не будет необходимой ЭКБ ИП, а элементы важнейших частей аппаратуры не будут рассчитаны на необходимые режимы и характеристики: иное напряжение питания, повышенные рабочие частоты, что характерно для ускоренной эволюции ЭКБ ИП, происходящей при изменении технологии производства кристаллов ЭКБ. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 4.2 [14], где технологии, расположенные выше, являются более новыми и перспективными по сравнению с расположенными ниже. Так, например, с увеличением быстродействия микросхемы возникают проблемы влияния задержки сигнала в соединителях блоков и плат.

Рис. 4.2. Сокращение жизненного цикла ЭКБ ИП, произведенных по новейшим технологиям

Появление новых типов корпусов приводит к необходимости повторной разработки топологий печатных плат и использования иных коммутационных решений, а также изменения технологических процессов.

Развитие ЭКБ ИП продолжается, а вместе с тем изменяется время жизненного цикла: оно сокращается для последующих поколений ЭКБ ИП, как показано в табл. 4.1. Среднее время выпуска последующих поколений ЭКБ ИП приведено в табл. 4.2 [14, 15].

Таблица 4.1. Среднее время жизненного цикла ЭКБ ИП

Категории ЭКБ	**Период полного устаревания ЭКБ ИП, лет**
ЭКБ ИП военного и космического уровня* качества	> 12,5
ЭКБ ИП индустриального уровня качества**	< 8,5
Всего: все уровни качества	~10

* Изначально устаревшие.
** Последние разработки.

Таблица 4.2. Среднее время жизненного цикла ЭКБ ИП индустриального уровня качества [14, 15]

Вид ЭКБ	**Период полного устаревания ЭКБ ИП**
Семейства памяти	< 9 месяцев
Программируемые логические устройства	> 1 год
Микропроцессоры, вентильные ячейки	< 2 года
Цифровые сигнальные процессоры	~3 года
Семейства логических элементов	~6 лет

На примере модулей памяти видны изменения времени жизненного цикла ЭКБ ИП (рис. 4.2), в том числе изменение технологических норм объема памяти, типа памяти, типа корпуса и напряжения питания с момента объявления о выпуске до снятия с производства – активный жизненный цикл каждого поколения микросхем составляет два года.

В табл. 4.3 [14] представлено описание этапов существования ЭКБ ИП с точки зрения всех участников рынка: фирм-производителей ЭКБ ИП и конкурирующих производств, выпускающих аналогичные элементы, а также приведены данные, характеризующие производственные процессы при изготовлении элементов. Как реакцию на происходящие этапы развития и спада производства можно наблюдать изменение во времени стоимости элементов. Развитие производственно-экономического жизненного цикла изделий диктует производителю, какие элементы в настоящее время экономически выгодно использовать в РЭА с максимально возможными функциональными возможностями, а какие элементы необходимо исключить из перечня компонентов, используемых при разработке новых образцов РЭА.

Любое несоответствие этим рыночным требованиям может поставить под угрозу реализацию технического задания или сделать РЭА неконкурентоспособной. Причиной может явиться увеличение времени производства из-за проблем с поставками устаревших элементов, а следствием – изготовление морально устаревших образцов РЭА, функциональные возможности которых ниже, чем у более оперативно работающих конкурентов. Здесь можно использовать сформулированную известной группой U.K. Components Obsolescence Group (COG) зависимость основных этапов жизненного цикла ЭКБ ИП по критерию, учитывающему объем выпуска элементов в единицу времени, от финансовой заинтересованности производителей ЭКБ ИП (рис. 4.3). До момента запуска серийного производства производитель вправе вносить конструктивные и программные изменения в структуру компонентов (табл. 4.3), а потребитель рискует приобрести ЭКБ, выпущенную по предварительным спецификациям.

Существует много аргументов за и против использования ЭКБ индустриального уровня качества, ряд которых сформулирован в так называемых «директивах Перри».

29 июня 1994 года министр обороны США Уильям Перри (William Perry) выпустил директиву, предписывающую всем видам вооруженных сил при закупке военной продукции и разработке новых систем оружия в обязательном порядке использовать технические характеристики, спецификации и стандарты индустриальных микросхем. Отступать от этого правила разрешалось только с санкции министра обороны. Следует подчеркнуть, что директива Перри не утверждает, что должны использоваться только изделия, произведенные для коммерческого или промышленного применения.

Конкретно эта директива предписывает:

- необходимо использовать технические условия (ТУ), ориентированные на выходные характеристики изделия;
- на партию ЭКБ надо распространить предельные характеристики, достигнутые для коммерческих и промышленных изделий;
- в первую очередь использовать промышленные ТУ и стандарты;
- использовать военные ТУ и стандарты только в тех случаях, когда нет соответствующих промышленных.

Таблица 4.3. Этапы существования ЭКБ ИП для сегментов производственно-экономического жизненного цикла

Сегменты	Объявление о выпуске	Увеличение производства	Производство	Насыщение	Снижение производства	Снятие с производства
Продажи	Медленно возрастают	Стремительно возрастают	Стабильные	Спад	Уменьшение	Единичные и по договору
Цена	Наивысшая	Снижение цены	Стабильная	Стабильная	Резкое повышение	Высокая
Применение	Низкое	Возрастающее	Стабильно	Стабильно	Снижающееся	Единичное
Изменение компонента	Частое	Постоянное	Периодические изменения	Незначительное	Незначительное или нет	Нет
Конкуренция	Незначительная	Высокая	Стабильно высокая	Начало снижения	Уменьшение	Уменьшение
Заинтересованность производителя	Низкая	Возрастающая	Стабильная	Стабильная	Согласованная с потребителем	Согласованная с потребителем

Таблица 4.4. Стоимость и сроки поставки ЭКБ различного уровня качества

Характеристики	ЭКБ индустриального уровня качества	ЭКБ военного уровня качества	ЭКБ космического уровня качества
Стоимость ЭКБ	Низкая	Средняя	Максимальная
Затраты на оборудование рабочего места контроля ЭКБ		Средние	Малые
Затраты по испытаниям на радиационную стойкость	Средние (необходимы испытания)	Средние (выборочные испытания)	Малые
Затраты на подготовку технических условий (ТУ)	Большие (большой объем ТУ, минимум информации)	Средние (информационно-технические материалы, краткий аналог ТУ)	Малые (ТУ поставляется с ЭКБ, но необходим перевод)
Затраты на подготовку разрешительной сопроводительной документации	Большие	Средние	Малые
Вероятность приобретения современной ЭКБ	Высокая	Средняя	Низкая
Вероятность поставки в требуемые сроки,%	95 (поставки со склада)	40	0...5 (эмбарго)

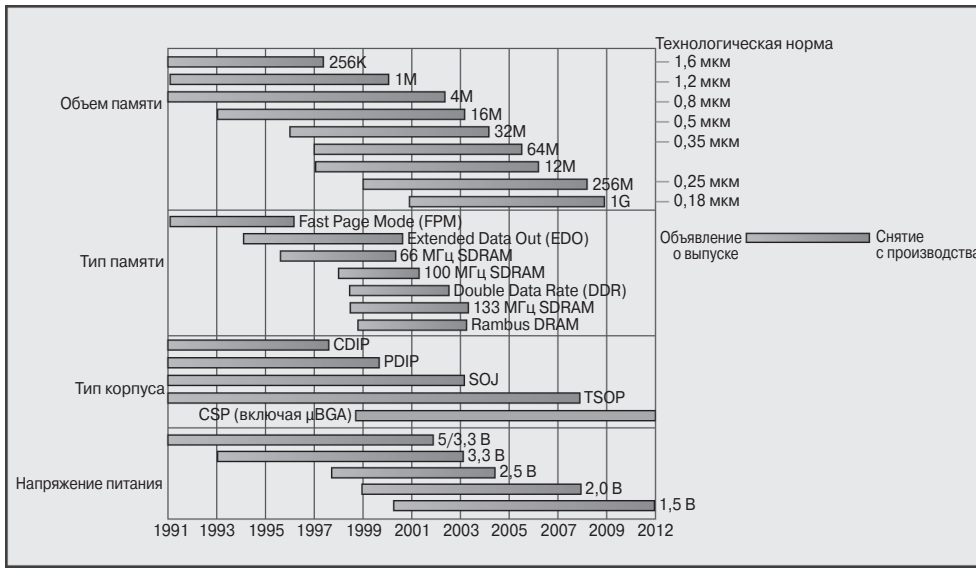


Рис. 4.3. Изменение времени жизненного цикла, объема, типа памяти и рабочих частот, типа корпуса и напряжения питания модулей памяти [14]

В качестве методологических подходов применения ЭКБ индустриального уровня качества рекомендованы методы отбраковки (JANTXV), контроля и ограниченной отбраковки (JANS) [16].

Рассмотрим основные очевидные преимущества ЭКБ индустриального уровня качества.

Основным и существенным фактором является доступность приобретения в кратчайшие сроки ЭКБ индустриального уровня качества для различных целей, соответствующих требованиям стандартов производителя, т.е. полностью готовых изделий по минимальным ценам. Стандарты производителя в этом случае могут означать продукцию со стандартными характеристиками и отбраковку поступивших элементов по требованиям военной приемки.

В этом случае реализуются преимущества крупносерийного производства и, что более существенно, нет необходимости в линиях специального производства, наличие которых ранее было основным требованием для производства традиционных ЭКБ военного и космического назначения. Программа поставки ЭКБ индустриального уровня качества может выявить и устранить потенциальные аномалии посредством целевого отбора на основании выборки из партии. За счет этого можно избежать больших затрат, необходимых для проведения полной отбраковки или квалификационных процедур, а также связанных с ними потерь времени.

Целевой отбор предусматривает [16, 17]:

- наличие информации о производителе;
- наличие результатов испытаний на воздействие внешних воздействующих факторов (ВВФ) и разрушающего физического анализа (РФА);
- информационную поддержку партнеров по ЭКБ, такую как IGG (Портсмут, Англия), Technologica (Севилья, Испания);

- знание условий применения, заложенных на этапе проектирования;
- тесный контакт разработчиков аппаратуры и специалистов по ЭКБ, понимающих требования друг друга.

Например, приобретенные на бирже или у производителей компоненты JANTXV, эквивалентные компонентам военного стандарта 883B или компонентам по стандарту уровня качества производителя, являются компонентами индустриального уровня качества. Из периодической печати известно, что многие потребители использовали ЭКБ индустриального уровня качества в течение длительного времени, в том числе применялись индустриальные изделия с ограниченной отбраковкой.

Побочным следствием этого процесса является тот факт, что значительно сокращается рынок специализированных ЭКБ военного и космического назначения, что следует из статистического распределения по секторам рынка (рис. 4.4) [15]. Военно-космический рынок в 2000 г. составил менее 1% при общем объеме мирового рынка 250 млрд долл. США.

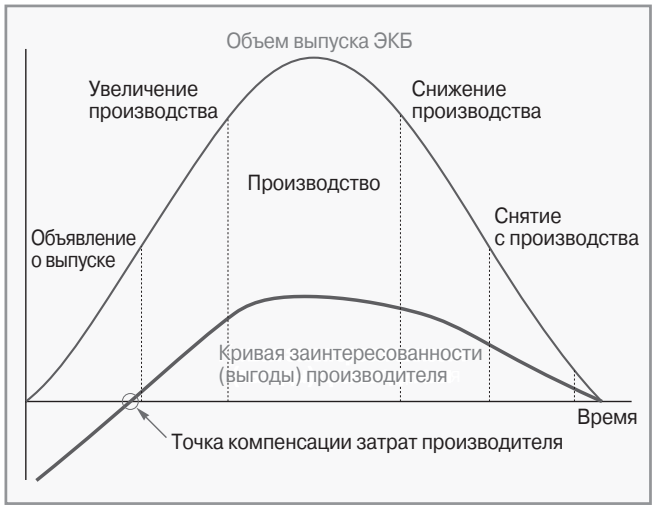


Рис. 4.4. Этапы жизненного цикла ЭКБ ИП, характеризующиеся объемом выпуска, с приведением кривой заинтересованности производителя ЭКБ ИП [14, 15]

Сравнительная оценка стоимости и сроков поставки ЭКБ индустриального, военного и космического уровней качества представлена в табл. 4.4.

Преимущества ЭКБ индустриального уровня качества:

- экономия по весу до 60%;
- экономия по объему до 70%;
- большой выбор изделий. На каждый тип ЭКБ, включенный в перечень MIL QML, имеется до 100 промышленных аналогов;
- быстрое внедрение новых технологий, новизна разработки;
- многие изделия, имеющиеся в перечнях стандартных промышленных типов ЭБК, в перечне MIL QML отсутствуют.

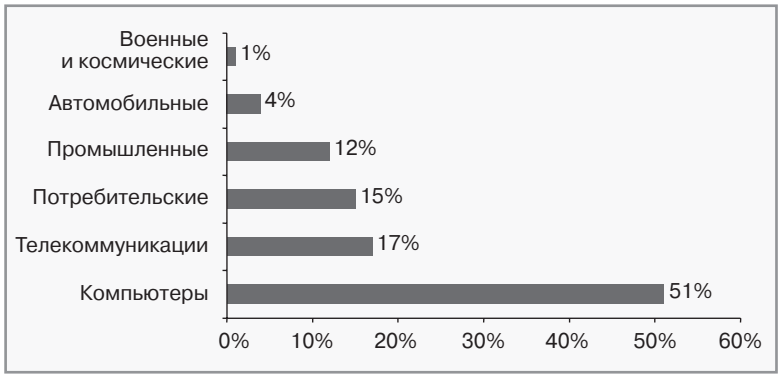


Рис. 4.5. Распределение ЭКБ по секторам рынка [6]

На рис. 4.5 приведены функционально аналогичные компоненты коммерческого и военного назначения. Следует отметить экономическую составляющую такого подхода. Так, компонент 74AC в пластмассовом корпусе в 2010 году стоил 76 центов, и была возможна быстрая поставка со склада, а аналогичный компонент NSC 54AC в керамическом корпусе MILLMM 38510 Class S стоил уже 132 долл. со сроком поставки 32 недели.

Все изделия, относящиеся по своим параметрам к новым разработкам, обычно предлагаются потребителю как стандартные коммерческие изделия. Обычно надо 6–12 месяцев, чтобы провести стандартную процедуру квалификации этих изделий по военному стандарту. Для того чтобы спроектировать наиболее эффективное и производительное радиоэлектронное оборудование, разработчики РЭА зачастую выбирают ЭКБ самых новых разработок. Такие изделия иногда имеются только на коммерческом рынке.

Необходимо отметить, что наряду с преимуществами имеются и определенные проблемы, связанные с особенностями использования ЭКБ индустриального уровня качества.

Основная проблема – большие статистические разбросы по показателям качества и надежности, очень ограниченные возможности по наглядности показателей качества. Часто отсутствует конкретная информация по количественным показателям надежности, отсутствует жесткий контроль сборки и качества партии, характерный для военной приемки.

Достоверных данных о надежности для ЭКБ индустриального уровня качества не существует.

Следующая проблема связана с массо-габаритными характеристиками проектируемых РЭА – для индустриальной ЭКБ используются негерметичные корпуса. Термином «PEM» обозначаются микросхемы, капсулированные в пластике. Обычно PEM имеют негерметичный корпус, поэтому неприятная проблема газовыделения должна быть принята во внимание.

Поскольку для ЭКБ индустриального уровня качества покупателю самому необходимо проводить радиационные испытания, полученные данные для ограниченной партии могут не отражать действительные характеристики партии.

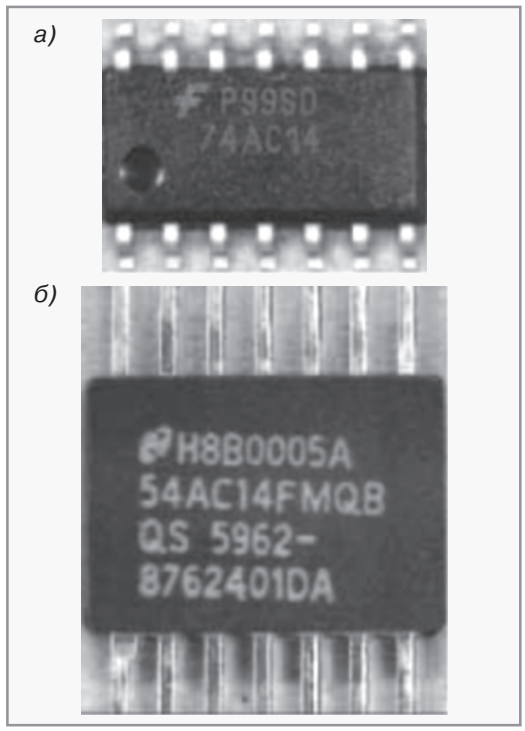


Рис. 4.6. Габариты коммерческого изделия (*а*) и изделия военного назначения (*б*) [15]

Следует принять во внимание короткий жизненный цикл – срок до снятия с производства ЭКБ индустриального уровня качества может составлять всего 6 месяцев.

Тем не менее, если разработчик РЭА КН принял решение использовать ЭКБ индустриального уровня качества, необходимо учитывать ряд нижеизложенных рекомендаций.

Прежде всего, проводя собственную оценку ЭКБ индустриального уровня качества, в которую должна входить некоторая целевая отбраковка, должна быть сделана детальная аттестация таких изделий ЭКБ индустриального уровня качества, дающая полную уверенность в них. Для этого необходимо использовать собственную или заимствованную базу данных накопленных результатов испытаний. Для создания ряда РЭА рекомендуется применять однородные партии ЭКБ.

Почти каждое изделие имеет накопленные базы данных по испытаниям, в которых должны быть установлены такие параметры, как повторяемость и надежность. Сюда входят изделия MILLB, Class M и 883.

При выполнении этих рекомендаций промышленные изделия в пластиковых и керамических корпусах могут быть включены во вновь разрабатываемую аппаратуру при условии обеспечения повторяемости производства и однородности партии.

Конструкторам известно, какие зоны в космическом аппарате могут обеспечивать наибольшую защиту от радиации, поэтому при выборе мест привязки приборов на борту космического аппарата надо руководствоваться соображениями обеспечения наилучшей защиты приборов, имеющих в своем составе чувстви-

тельные к радиации компоненты (память, процессоры). Такие приборы устанавливают в «тени» за более радиационно-стойкими приборами, чтобы специально не увеличивать толщину металлических защитных экранов. Для увеличения надежности рекомендуется использовать двойное или даже тройное ненагруженное резервирование.

Испытания подсистем на термоциклирование или на функционирование при повышенной температуре увеличивают вероятность обнаружения ранних отказов, и этот факт необходимо использовать при составлении программ эксплуатационных испытаний.

Обычно для повышения надежности вводится излишняя избыточность системы (увеличивается фактор безопасности), что снижает весовые и габаритные преимущества ЭКБ индустриального уровня качества.

Чтобы достичь уверенности в безотказности космических систем, на уровне подсистем должны проводиться дополнительные испытания с имитацией эксплуатационных условий для выявления ранних отказов в соответствии с рекомендуемым в работе [15, 18] и представленном на рис. 4.7 алгоритмом.

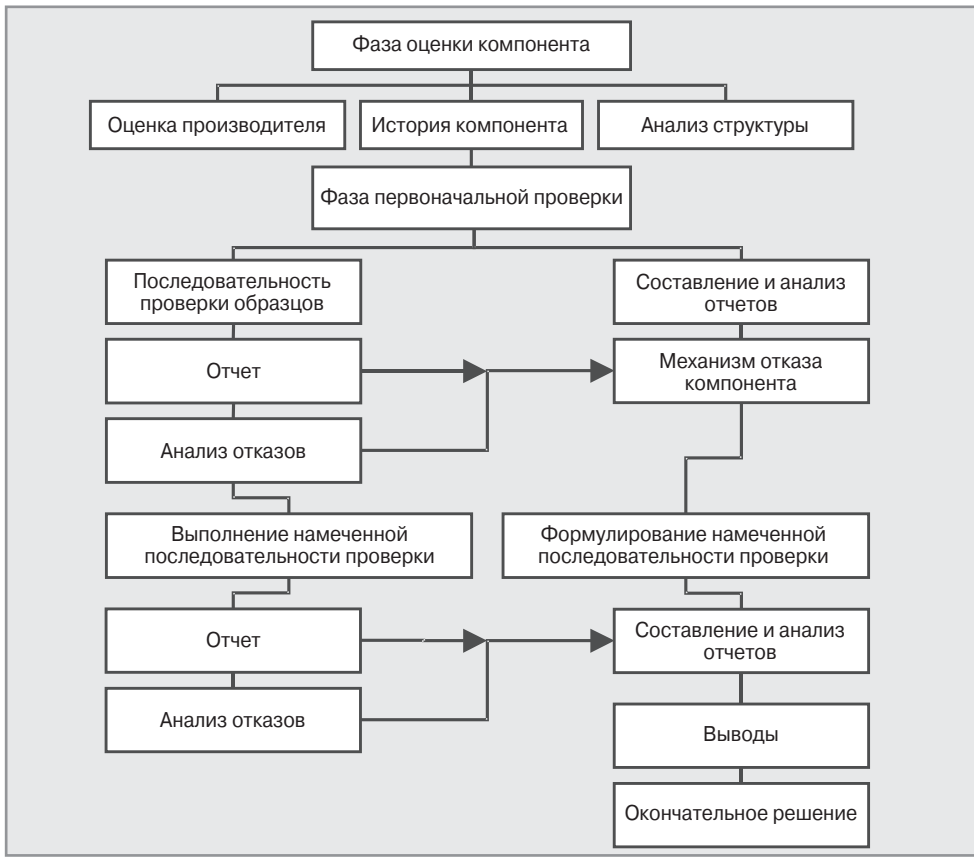


Рис. 4.7. Алгоритм выбора перспективных для применения в космической аппаратуре компонентов индустриального качества

Таким образом, можно сформулировать краткие выводы в следующем виде.

1. Индустриальные компоненты успешно применяются в космической отрасли. Стоимость применения индустриальных компонентов играет роль в экономии общих затрат на проект. В некоторых случаях применение современной индустриальной (промышленной) электронной компонентной базы иностранного производства может дать единственное решение таких проблем, как вес и функциональные возможности.
2. К применению индустриальных компонентов следует подходить осторожно, поскольку вероятны устаревание и изменения конструкции без уведомления. Индустриальные компоненты требуют контроля каждой партии, особенно по характеристикам радиационной стойкости.

4.4. Контрафактные микроэлектронные изделия и методы их выявления

4.4.1. Типы контрафактных компонентов

Контрафактные электронные компоненты представляют серьезную угрозу при комплектации устройств и систем потребительской электроники, промышленной и военной техники [19–21]. Одни из них представляют собой воспроизведенные копии (клоны) оригинальных изделий, другие же (с перебитыми, как у угнанных автомобилей, номерами) выдаются за дорогостоящие оригиналы. Например, компоненты, произведенные для бытовых приборов, поставляются как устройства для военной или авиакосмической техники, в отношении которых действуют более строгие требования. Даже оригинальные изделия категории space с корректным индивидуальным номером образца являются контрафактными, если они повторно используются.

Общеизвестно, что контрафактные компоненты вызывают отказы и сбои в работе оборудования, их применение угрожает здоровью и безопасности людей и даже целых стран. Они могут испортить репутацию приметившей их компании, ухудшить надежность целого ряда систем ответственного применения. По данным International Chamber of Commerce [22], в 2008 г. рынок контрафактных изделий в странах G20 составил 450–650 млрд долл. США, а к 2015 г. его объем вырастет до 1,2–1,7 трлн долл. США.

Современные стандарты, регламентирующие методы обнаружения контрафактной продукции [23–25], действуют в отношении уже существующих на рынке компонентов. Эти стандарты в основном касаются только двух типов поддельных изделий – перемаркированных (бывших в употреблении и проданных под видом новых компонентов) и незаконно (без лицензии) произведенных, которые в реальности не соответствуют техническим требованиям. Однако такие незаконно произведенные изделия нельзя обнаружить только с помощью этих стандартов. Предлагаемые в них методы испытаний, к сожалению, не позволяют выявить некоторые другие типы контрафактной продукции, например, клонированные или отремонтированные устройства, и не являются эффективными. В современных защищенных ИМС используются превентивные методы противодействия под-

делкам путем использования встроенных в кристаллы специальных датчиков, позволяющих отличить бывшие в употреблении компоненты от еще не использованных [26], или применяются физически неклонируемые функции путем генерации уникального идентификационного номера для каждого кристалла [27–28].

Рассмотрим более подробно известные типы контрафактных компонентов. Существуют следующие типы контрафактных электронных компонентов (КЭК):

1) компонент представляет собой нелицензионную (пиратскую) копию подлинного изделия;
2) компонент не соответствует стандартам проектирования, моделирования и качества функционирования, заданным производителем оригинальных компонентов;
3) компонент не изготовлен сертифицированным производителем (или изготовлен неавторизованными подрядчиками);
4) компонент не отвечает техническим условиям, является дефектным или бывшим в употреблении изделием, которое поставляется под видом нового компонента;
5) компонент имеет некорректную или поддельную маркировку или документацию [29].

В свою очередь, основываясь на этих отличительных особенностях контрафактной продукции, можно отнести ее к семи различным категориям. Это повторно используемые (бывшие в употреблении), перемаркированные, дефектные (бракованные), незаконно (например, сверх договорного объема) произведенные, клонированные, незаконно измененные (восстановленные) изделия, а также компоненты с поддельной документацией.

К повторно использованным ранее и перемаркированным компонентам обычно относятся демонтированные с печатных плат, снятых с эксплуатации (вышедших из строя) устройства с перекрашенными корпусами. В некоторых случаях эти кристаллы извлекаются с помощью специальных инструментов из одних корпусов и устанавливаются в другие с иной, правильной маркировкой. Эти компоненты широко продаются под видом новых на открытом рынке. Они могут вообще не работать или же не соответствовать спецификациям производителей. Иногда в результате предшествовавшей длительной эксплуатации эти компоненты получают внутренние (скрытые) повреждения, из-за которых надежность системы катастрофически снижается. В свою очередь, эти перемаркированные компоненты бывают двух типов. К первому типу относятся эквивалентные по функциям устройства с менее дорогой (менее известной) маркой производителя, а ко второму – действительно новые компоненты, на которых указывается принадлежность к более высокой категории. Так, например, новый компонент промышленного назначения маркируется под military (для производства военной техники) и space (для аэрокосмического применения).

К ***незаконно (без лицензий) произведенным*** компонентам относятся изделия, изготовленные производителем, у которого имеется доступ к интеллектуальной собственности компании-разработчика. Этот производитель проектирует, изготавливает, собирает и продает компоненты на открытом рынке в обход основного контракта с дизайн-центром. Поскольку обычно эти компоненты не проходят

тестирования в условиях, определенных разработчиком, они не обеспечивают надежной работы в соответствии со спецификацией.

Другой разновидностью таких компонентов является несанкционированное изготовление и поставка некондиционной продукции или заведомо дефектных компонентов, ранее забракованных основным изготовителем.

Клонированные компоненты изготавливаются производителем, у которого не имеется законных прав на использование чужой интеллектуальной собственности. Клонирование также часто осуществляется методом обратной инженерии или путем нарушения авторских прав.

Подделка документации – вероятно, самый простой и дешевый для поставщика способ фальсификации, с помощью которого изменяется реальная спецификация на изделие на желаемую потребителем. В некоторых случаях кристаллы с такой поддельной документацией обнаруживаются на этапе ее тестирования на входном контроле. Однако это довольно-таки затратный способ, реализовать который практически невозможно в отсутствие требуемых дорогостоящих испытательных приборов и программ тестирования, используемых производителем оригинальных компонентов.

Наконец, к категории ***незаконно измененных ИС*** относятся те компоненты, которые могут содержать так называемую «аппаратную закладку». Эти устройства в системах ответственного назначения подобны минам замедленного действия [30]. Как правило, эта категория разрабатывается и реализуется через специальные каналы под контролем соответствующих спецслужб, высокий уровень квалификации которых нельзя недооценивать.

4.4.2. Эффективные методы выявления контрафактных изделий

Следует понимать, что фальсификация – это не только своеобразный бизнес, это многоаспектная проблема в силу многообразия типов подделываемых компонентов, различий в видах дефектов, а также в силу постоянно меняющейся стратегии фальсификаторов. Как только появляются новые методы обнаружения такой поддельной продукции, контрафакторы, в свою очередь, изобретают новые обходные пути. Поскольку простые тесты не дают ответа на вопрос о подлинности изделия, требуется использовать целый комплекс дорогостоящих сложных испытаний для обнаружения контрафактных изделий. Эти методы условно можно разделить на три различные категории, а именно: физико-химические исследования, испытания на воздействие внешних условий и электрические тесты.

Физико-химические исследования, как правило, выполняются для проверки физических и химических параметров элементов, из которых изготовлен компонент: корпуса, выводов, кристалла и т.д. Эти исследования делятся на четыре категории: 1) ***внешний осмотр***, когда с использованием средств визуального контроля (микроскоп, тепловизор и т.п.) тщательно изучается и документируется внешний вид каждой детали; 2) ***анализ корпуса***: вскрывается корпус, отбираются и исследуются отдельные его детали. Если в результате осмотра образцов выявляются какие-либо отклонения от существующих требований, эти образцы направляются на прохождение следующего этапа испытаний.

При осмотре корпуса прежде всего проверяется наличие технологических признаков перемаркировки или нанесения нового покрытия, которые указывали бы на ***закраску*** (blacktopping), ***микроочистку*** (microblasting) или ***грунтовку*** (flatlapping). В первом случае пластиковая поверхность корпуса микросхемы механически шлифуется до полного удаления следов оригинальной маркировки, после чего на очищенную поверхность наносится черное эпоксидное покрытие и печатаются (гравируются) новый номер и индивидуальный код детали. Для удаления маркировки с поверхности устройств, кроме механической полировки, фальсификаторами также применяется химическая мокрая микроочистка с помощью использования мелкодисперсных веществ разных типов. В случае использования фальсификаторами третьего метода в подпольных производствах применяют специальный станок, который имеет вращающийся с невысокой скоростью полировальный круг и рыхлую смесь, подаваемую на обрабатываемую поверхность под небольшим давлением, с помощью которой постепенно обрабатывается (обновляется) поверхность корпуса микросхемы. Во избежание остаточных следов такой полировки на обработанной поверхности корпуса микросхемы круг описывает фигуры в виде восьмерки.

При использовании этого метода осмотра поверхности корпуса на наличие перемаркировки или нового покрытия могут применяться активные химические растворители, быстро удаляющие изначально нанесенный изготовителем верхний слой краски и обнажающие исходную поверхность корпуса микросхемы. Поскольку их применение относится к разрушающему методу контроля, данный вид испытаний обычно проводится только на нескольких образцах из партии, выбранных случайным образом.

3) ***Вскрытие корпуса*** – метод внутреннего контроля микросхемы, с помощью которого полностью удаляется внешнее защитное покрытие корпуса или изоляция для изучения внутренней структуры с целью установить подлинность компонента. В отдельных случаях исследователи – эксперты используют рентгенографический анализ.

4) ***Комплексный структурно-морфологический анализ материалов***, включающий в себя проверку химического состава компонента. К основным методам этого анализа относятся: рентгеновская флуоресценция (XRF), инфракрасная спектрофотомерия с преобразованием Фурье (FTIR), комбинационное рассеяние света (RAMAN), энергодисперсионная спектроскопия (EDS) и т.д. При применении методов FTIR и RAMAN дополнительно определяются ИК-спектры материалов.

Для выявления уже бывших в употреблении компонентов, поставляемых под видом новых изделий, применяется целый ряд исследований и испытаний, для чего вводится так называемый «входной контроль». Прежде всего – это испытания на воздействие внешних факторов (термоциклирование, виброустойчивость, тепловой удар, механические испытания, гидроиспытания). Эти тесты позволяют обнаружить проблемы, связанные с надежностью или качеством продукции. Затем испытываемые компоненты подвергаются воздействию определенных электрических нагрузок, в ходе которых определяются их ***физические и электрические характеристики***. Часто бывает, что интерпретация результатов такого тестирования представляет собой серьезную проблему для испытательных лабораторий и заказчиков, принимающих решение об использовании компонентов, поскольку

необходимо четко определить, с чем связана причина выявления каждого отказа – с использованием поддельного устройства или с невысоким качеством (надежностью) компонента. Но в любом случае эти испытания являются своеобразным фильтром для некачественной продукции.

Методы электрических испытаний, главным образом, применяются для определения полноты соответствия функциональных и рабочих характеристик компонента его спецификации. Это разные тесты для разных типов компонентов – аналоговых, микропроцессоров, ПЛИС, микросхем памяти, интерфейсных ИМС и т.д. Для некоторых современных цифровых и аналоговых ИС может потребоваться дополнительное автоматизированное испытательное оборудование [31–32].

Электроиспытания делятся на несколько видов.

Параметрические испытания – выполняются для измерения численных значений всех параметров полупроводникового кристалла по постоянному и переменному токам (DC и AC). К этим испытаниям относятся тестирование надежности контактов, тесты на энергопотребление, тесты на выходной (нагрузочный) ток, определение величин пороговых напряжений, определение времени нарастания и спада фронтов и т.д. Полученные экспериментальные значения сравниваются с нормативными (типовыми и предельными), которые в обязательном порядке всегда приводятся в спецификациях на этот компонент основного изготовления.

Функциональные испытания. Это наиболее эффективный и, возможно, самый дорогостоящий способ определить действительную работоспособность компонента. Так, для проверки ИС памяти в различных режимах тестируется способность устройства выполнять операции хранения и чтения/записи. Например, для выявления поддельных микросхем памяти применяются тесты типа MARCH. В качестве другого примера можно привести функциональный анализ f_{max} для обнаружения поддельных микропроцессоров, как правило в ходе испытаний выявляются ИМС, быстродействие которых хуже стандартной величины, что характерно для ИМС-клонов и бывших в употреблении устройств, выдаваемых за новые изделия.

Испытания на принудительный отказ. Устройство эксплуатируется в условиях повышенной температуры для выявления ранних и непредвиденных отказов, свидетельствующих о его ненадежности. На испытуемые ИМС, находящиеся в камерах тепла, подаются в течение заданного времени разнообразные последовательности команд в соответствии с алгоритмом ее функционирования. В основе этого метода лежит известный факт – повышенная температура способствует ускорению проявления различных физических механизмов дефектов.

Испытания на прочность. Эти тесты очень эффективны при выявлении скрытых производственных дефектов бракованных изделий. Однако эффективность всех этих испытаний может оказаться невысокой из-за того, что дизайн-центры, как правило, не предоставляют необходимый доступ к внутренним цепям сканирования ИС.

Методы обнаружения контрафактных электронных компонентов все еще находятся на ранней стадии своего развития, и существует немало серьезных проблем, которые требуется решить, чтобы повысить эффективность известных способов борьбы с подделками. Необходимо, чтобы более совершенные методы позволяли предотвратить широкое распространение контрафактной продукции не только в электронные системы космической и военной техники, но и в современные элект-

ронные системы жизнеобеспечения. Например, в декабре 2011 г. Конгресс США подписал Закон о национальной обороне NDAA 2012 (National Defense Authorization Act) [33]. В разделе 818 этого документа изложены новые требования к Министерству обороны США по обнаружению контрафактных компонентов, а также по реализации методов оценки рисков, чтобы свести к минимуму возможность использования поддельной продукции.

Следует отметить среди появившихся сравнительно недавно такие стандарты, как SAE AS6171, CTI CCAP-101 и IDEA STD-1010, позволяющие обнаруживать и избегать применения контрафактных компонентов. Однако все эти стандарты, которые, в основном, относятся к выявлению двух типов поддельных изделий – перемаркированных бывших в употреблении компонентов и незаконно произведенных устройств, не соответствующих техническим требованиям, – не распространяются на другие типы контрафактной продукции. Испытания в таких случаях не имеют систематического характера и не основаны на использовании контрольных показателей. Большинство тестов выполняется неавтоматизированными средствами, а выводы, по большей части, зависят от субъективных оценок экспертов и их интерпретации результатов испытаний. Иногда кристалл может оказаться контрафактным по мнению одной лаборатории и оригинальным изделием – по заключению другой. Такое расхождение в оценке контрафактной продукции может иметь катастрофические последствия для заказчика. Кроме того, при тестировании контрафактных изделий некоторых типов (произведенных незаконным способом, клонированных или восстановленных компонентов) очень трудно установить факт фальсификации. До сих пор невозможно наверняка обнаружить подделку ни одним из известных методов тестирования. Время и стоимость – главные факторы, сдерживающие реализацию стандартных методов обнаружения подделок.

Некоторые из применяемых в настоящее время физических методов испытаний с разрушением требуют тщательной подготовки образцов к исследованиям и соответствующего опыта при осуществлении случайных выборок для полноты статистического тестирования. Наконец, чтобы исключить поступление контрафактной продукции в каналы сбыта, создаются специальные методы проектирования с учетом возможности предотвратить появление подделок, что упростит работу OCM-, OEM-производителей и испытательных лабораторий в этом направлении.

4.4.3. Электрические испытания микроэлектронных изделий космического назначения

По мере постоянного усложнения технологий производства электронных компонентов для выявления подделок требуется использовать все более сложное тестирование. Поддельное устройство в соответствующем корпусе и с нужной заказчику маркировкой может выглядеть как оригинальное и даже пройти функциональные и параметрические испытания. Однако только визуального контроля корпуса и вскрытого кристалла недостаточно, чтобы выявить контрафактную продукцию; с этой целью требуется выполнить цикл намного более полного тестирования.

Полный цикл анализа подразумевает такие действия, как проверка подлинности заявленных в сопроводительной документации минимальных норм и фи-

зических размеров, всех обозначений (маркировок) на кристалле, а также рентгеноскопический анализ и электрические испытания.

В силу ограничений объема книги более подробно рассмотрим только один из наиболее часто используемых методов выявления контрафактных изделий – метод электрических испытаний.

В качестве примера можно привести опыт компании New Jersey Micro Electronic Testing (NJMET), которая разработала и использует ряд специальных тестов в рамках аналитической программы Mission Imposter, которая предназначена для выявления контрафактных электронных компонентов.

Тестирование электрических характеристик в зависимости от температуры – это своего рода общепринятый отраслевой стандарт, позволяющий установить соответствие функциональным и параметрическим требованиям в диапазоне рабочих температур устройства, рекомендованного поставщиком. Цель электрических испытаний заключается в определении реального качества каждого изделия. Серия испытаний позволяет проверить функциональные и параметрические характеристики компонентов, поскольку результаты получаемых в итоге тестов представляют собой полноценные наборы данных, с помощью которых успешно выявляются поддельные компоненты в тех случаях, когда это не удается с помощью других методологий анализа.

Как отмечалось выше, здесь одной из проблем является выбор наиболее эффективного для такого анализа контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

Во-первых, для этих целей, как правило, нельзя использовать стандартное контрольно-измерительное оборудование, которое используется в производстве полупроводниковых компонентов, поскольку у этого оборудования другие задачи – обеспечить максимальную производительность измерений при максимальном охвате проверки всех внутренних элементов и цепей их взаимосвязей на кристалле в соответствии с заложенными алгоритмами обработки данных. Иногда эти тестеры легко обнаруживают явные признаки поддельной продукции, но не позволяют получить функциональные и параметрические данные. Во-вторых, новое измерительное оборудование позволяет сравнивать отдельные параметры каждого отдельного вывода прибора с параметрами другого хорошо известного устройства (аналога). При этом измеряются только напряжения между выводами и землей и выводами и напряжением питания, а также измеряется напряжение каждого вывода относительно других заземленных контактов. Поэтому для качественного и эффективного выполнения электрического анализа требуется использовать специальное измерительное оборудование.

Так, в методе тестирования вольт-амперной характеристики к каждому выводу оригинальной микросхемы прилагается напряжение и измеряется ток, что позволяет построить выходную кривую импеданса. Однако этот эффективный метод для определения отказов некоторых типов устройств не позволяет протестировать их функциональность. Кроме того, для этого испытания требуется хорошо проверенный исходный (заведомо неконтрафактный) образец ИС. Такой метод полезен для обнаружения разрушений, вызванных только электростатическим разрядом, но не пригоден в качестве функционального теста.

Для полной проверки электронного компонента требуется максимально полное тестирование, позволяющее получить и задокументировать все основные функциональные и параметрические данные.

Наиболее подходящая методология электрического тестирования заключается в использовании специальных автоматизированных тестеров ИС, которые могут выполнять несколько различных функциональных и параметрических испытаний.

Такая автоматизированная испытательная установка позволяет быстро провести испытания и автоматически (в соответствии с заданной программой) оценить полученные результаты. Эта система обычно состоит из десятка соединенных между собой сложных приборов для автоматического тестирования и диагностики отказов электронных компонентов в корпусе, на пластине или даже на плате.

Эти испытательные установки широко используются не только для тестирования авионики и ИМС КН, но и автомобильных электронных модулей, радарных и беспроводных систем, медицинской электронной техники и устройств промышленного применения.

Важной и необходимой особенностью применения этих систем в практике анализа является то, что при электрическом тестировании также создается приборный интерфейс между электронными компонентами, контрольно-измерительным оборудованием для автономных испытаний и контрольно-измерительным оборудованием на базе ПК, который обеспечивает специализированное функциональное и параметрическое тестирование. Эти испытания проводит либо производитель компонентов, либо испытательная лаборатория, причем их результаты для ИМС КН в любом случае утверждаются конечным заказчиком.

Связь устанавливается с помощью параллельных и последовательных интерфейсов, включая шину интерфейса общего назначения (general purpose interface bus, GPIB). Однако современные технологии уже требуют использования более мощного интерфейса, обеспечиваемого универсальной последовательной шиной (USB), PXI, VXI и портами LXI/Ethernet.

После подготовки программы испытаний и измерительного оборудования можно приступать к тестированию устройства. Все начальные тесты проводятся при комнатной температуре 25 °C. Для последующего испытания компонентов при заданных экстремальных температурах используются установки для точного поддержания температуры (precision temperature forcing system, PTFS) или жидкий азот – для низких температур.

Серийная установка PTFS использует сжатый воздух и заказное комплектующее оборудование для прецизионного поддержания очень низких температур вплоть до –100 °C, при которых проходит испытания устройства. Эта установка также обеспечивает очень высокие температуры (до 300 °C).

В отличие от ранее используемых камер тепла/холода, современные установки PTFS в качестве теплоподводящей к корпусу ИМС среды используют специальный материал-наполнитель рабочего пространства камеры – фторуглеродный компаунд.

Хорошо подобранный фторуглеродный компаунд обеспечивает вязкость, необходимую для испытаний при экстремальных температурах. Испытательный модуль, погруженный в этот компаунд, подвергается воздействию требуемой высокой или низкой температуры.

Таблица 4.5. Виды и температурные диапазоны испытаний электронных устройств

Область применения компонента	Температура, °С	Виды испытаний
Коммерческое назначение	0…70	Функциональное и параметрическое тестирование DC, AC
Промышленная техника	–40…85	Функциональное и параметрическое тестирование DC, AC
Автомобильная электроника	–45…110	Функциональное и параметрическое тестирование DC, AC
Военная/авиакосмическая техника	–55…125	Подгруппы 1–11
Космическая техника	–65…150	Подгруппы 1–11

В табл. 4.5 представлены температурные диапазоны, используемые зарубежными испытательными центрами при испытаниях электронных устройств в зависимости от области их применения.

Например, устройство (микросхема, транзистор, диод), предназначенное для использования в военной или авиакосмической технике, сначала проходит испытания при 25 °С. В случае успешного их прохождения устройство тестируется при высокой температуре 125 °С. Наконец, если и это испытание завершается успешно, устройство подвергается воздействию низкой температуры –55 °С. Если устройство не проходит какой-либо один функциональный или параметрический тест, оно отбраковывается.

В табл. 4.6–4.9 перечислены стандартные испытания, которые позволяют выявить контрафактные изделия.

Таблица 4.6. Перечень стандартных электрических параметров цифровых ИМС, контролируемых в температурном диапазоне испытаний

Международное обозначение контролируемого параметра	Отечественное обозначение контролируемого параметра
Continuity Test	Проверка целостности соединений
VOH – Output Voltage High	Высокое выходное напряжение
VOL – Output Voltage Low	Низкое выходное напряжение
IIH – Input Current High (Leakage)	Входной ток при высоком логическом уровне сигнала (утечка)
IIL – Input Current Low (Leakage)	Входной ток при низком логическом уровне сигнала (утечка)
IOH – Output Current Low (Source)	Выходной ток при высоком логическом уровне сигнала (вытекающий)
IOL – Output Current High (Sink)	Выходной ток при низком логическом уровне сигнала (втекающий)
IOS – Output Short Circuit Test	Тест выходного тока короткого замыкания
ICEX – Output High Leakage Test/Collector Cutoff Current	Тест тока утечки на выходе/обратный ток коллектора
ICCL – Supply Current (Outputs Low)	Ток потребления (на выходе – низкие логические уровни)
ICCH – Supply Current (Outputs High)	Ток потребления (на выходе – высокие логические уровни)
ICCZ – Supply Current (Outputs 3-State)	Ток потребления (выходы в третьем логическом состоянии)
ICCQ – Quiescent Supply Current	Собственный ток потребления

Таблица 4.6 (окончание)

Международное обозначение контролируемого параметра	Отечественное обозначение контролируемого параметра
BV/IBVI – Input Breakdown Voltage/Current	Входное напряжение/ток пробоя
IOZH – 3-State Output Current High	Выходы с тремя логическими состояниями; выходной ток при высоком логическом уровне
OZL – 3-State Output Current Low	Выходы с тремя логическими состояниями; выходной ток при низком логическом уровне
VIH – Input Voltage High	Высокое входное напряжение
VIL – Input Voltage Low	Низкое входное напряжение
VIK/VIC – Input Clamp Diode	Входной ограничительный диод
IOFF – Off-State Input/Output Current	Входной/выходной ток в выключенном состоянии
IOD – Output Drive Current	Выходной управляющий ток
Functional Test	Функциональный тест
AC Dynamic (Timing)	Динамические характеристики (синхронизация)

Таблица 4.7. Перечень стандартных контролируемых параметров биполярных транзисторов, контролируемых при температурных испытаниях

Международное обозначение контролируемого параметра	Отечественное обозначение контролируемого параметра
ICE (O, S, R, X, V) O = OPEN; S = SHORT; R = RESISTANCE; X = EXTERNAL CONTACTS; V = VOLTS	O = открытый; S = закороченный; R = сопротивление; X = внешние контакты; V = вольты
ICBO – Collector Cutoff Current	Обратный ток коллектора
IEBO – Emitter Cutoff Current	Обратный ток эмиттера
ICES – Collector Cutoff Current	Обратный ток коллектора
ICER – Collector Cutoff Current	Обратный ток коллектора
ICEX – Collector Cutoff Current	Обратный ток коллектора
VF – Forward Voltage	Прямое напряжение
BVZ – Zener Voltage	Напряжение туннельного пробоя p-n-перехода
BVCBO – Collector Base Breakdown Voltage	Напряжение пробоя база–коллектор
BVCEO – Collector Emitter Breakdown Voltage	Напряжение пробоя коллектор–эмиттер
BVEBO – Emitter Base Breakdown Voltage	Напряжение пробоя база–эмиттер
BVCES – Collector Emitter Breakdown Voltage	Напряжение пробоя эмиттер–коллектор
VCE(sat) – Collector Emitter Saturation Voltage	Напряжение насыщения эмиттер–коллектор
VBE – Base to Emitter Voltage	Напряжение эмиттер–база
VBE(sat) – Base Emitter Saturation Voltage	Напряжение насыщения эмиттер–база
HFE – DC Current Gain	Коэффициент усиления по постоянному току

Таблица 4.8. Перечень стандартных контролируемых параметров диодов

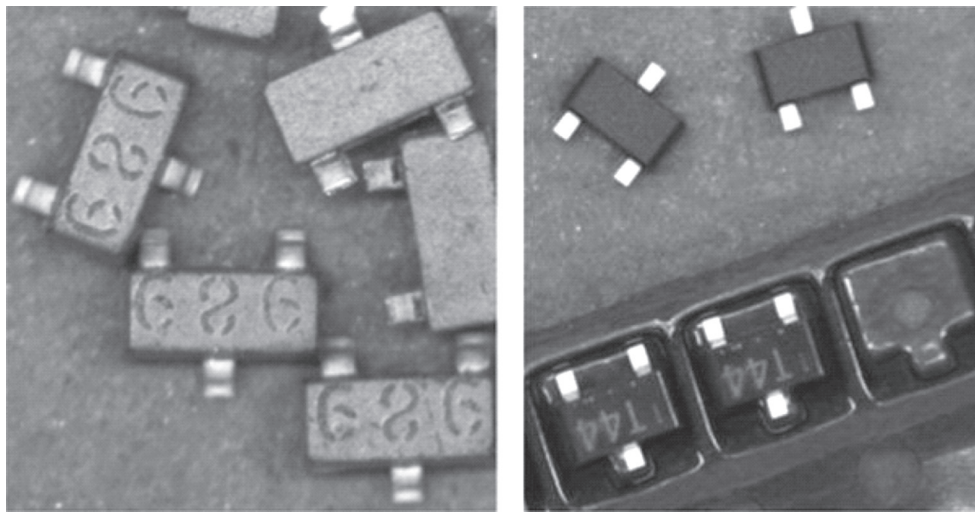
Международное обозначение контролируемого параметра	Отечественное обозначение контролируемого параметра
VF – Forward Voltage	Прямое напряжение
BVZ – Zener Voltage BVR – Breakdown Voltage	Напряжение туннельного пробоя p-n-перехода Напряжение пробоя
IR – Reverse Current	Обратный ток
ZZ – Zener Impedance	Полное сопротивление диода при лавинном пробое
ZZL – Zener Impedance	Полное сопротивление диода при лавинном пробое

Таблица 4.9. Перечень стандартных контролируемых параметров полевых транзисторов

Международное обозначение контролируемого параметра	Отечественное обозначение контролируемого параметра
BVGSS – Gate Source Breakdown Voltage	Напряжение пробоя затвор–исток
VDS(on) – Drain Source Voltage	Напряжение сток–исток
BVDSS – Drain to Source Breakdown Voltage	Напряжение пробоя сток–исток
RDS(on) – Static Drain Source ON Resistance	Статическое сопротивление исток–сток в открытом состоянии
IGSS – Gate Reverse Current	Обратный ток затвора
GFS – Forward Transconductance	Проводимость в прямом направлении
IDSS – Zero Gate Voltage Drain Current	Начальный ток стока при нулевом напряжении затвора
VSD – Diode Forward Voltage	Прямое напряжение диода
VGS – Gate Source Voltage	Напряжение исток–затвор

Известны достаточно редкие случаи, когда в одну поставку компонентов входили оригинальные и поддельные изделия. На рис. 4.8 показаны две партии компонентов из одной такой поставки. И хотя они даже выглядят по-разному, все поддельные компоненты имеют оригинальные номера.

Для более полного понимания процедуры анализа с использованием специализированных тестеров в табл. 4.10–4.11 приведены распечатки результатов испытаний поддельных и оригинальных компонентов, соответственно – компоненты партии А не прошли тесты Т4, Т5 и Т6, а компоненты партии Б прошли все семь испытаний.



а) *б)*

Рис. 4.8. Устройства, поступившие на испытания из одной поставки под одинаковым каталожным номером: поддельные компоненты (*а*); оригинальные компоненты (*б*)

Таблица 4.10. Компоненты из партии А (не прошли тесты Т4, Т5 и Т6)

STA# 3 SORT# 2 RTN# 75T SER# 1
T1; IEV=88,80 мА T2; IBV=88,00 мА T3; ICV=86,80 мА
FT4; ICBO=O.R. FT5; VCE =O.R. FT6; HFE =O.R.
T7; HFE =O.R.
STA# 3 SORT# 2 RTN# 75T SER# 2
T1; IEV=88.50 MA T2; IBV=88.00 MA T3; ICV=87.20 MA
FT4; ICBO=204.8 NA FT5; VCE =O.R. FT6; HFE =O.R.
T7; HFE =O.R.
STA# 3 SORT# 2 RTN# 75T SER# 3
T1; IEV=88.50 MA T2; IBV=88.00 MA T3; ICV=87.20 MA
FT4; ICBO=O.R. FT5; VCE =O.R. FT6; HFE =O.R.
T7; HFE =O.R.

Таблица 4.11. Компоненты из партии Б (прошли все тесты Т1–Т7)

STA# 3 SORT# 1 RTN# 75T SER# 1
T1; IEV=88.00 мА T2; IBV=87.40 мА T3; ICV=86.60 MA
T4; ICBO=5.000 PA T5; VCE =63.50 MV T6; HFE =153.9
T7; HFE =153.9
STA# 3 SORT# 1 RTN# 75T SER# 2
T1; IEV=88.00 MA T2; IBV=87.40 MA T3; ICV=86.80 MA
T4; ICBO=5.000 PA T5; VCE =63.50 MV T6; HFE =160.5
T7; HFE =159.0

Понятно, что не существует такого универсального теста, который позволил бы обнаружить контрафактные изделия на 100%. Поскольку все компоненты и области их приложения отличаются друг от друга, план (программа) испытаний в каждом отдельном случае должен учитывать эти различия. Для идентификации контрафактных компонентов необходим полный комплект тестов, а данных, полученных даже с помощью этого испытательного оборудования, бывает недостаточно для уверенной идентификации поддельных изделий.

Те методы функциональных и параметрических испытаний, которые применяются для выявления контрафактных компонентов уже более 40 лет, в какой-то мере позволяют сдержать распространения поддельной продукции в электронной отрасли. И хотя проверка на соответствие каждому пункту функционального и параметрического тестирования представляется невозможной как физически, так и из соображений экономии финансовых средств и времени, проведение тестовых испытаний совместными усилиями тестовых лабораторий и заказчиков позволяет существенно снизить риск попадания в отечественные стратегические системы контрафактных изделий. Известно, что современные контрафактные устройства могут исправно функционировать в одних условиях эксплуатации и отказывать в других. Проведение функциональных и параметрических испытаний в широком температурном диапазоне намного повышает уверенность заказчика в подлинности испытываемых электронных компонентов.

Опасности приобретения контрафактных компонентов можно избежать, следуя одному простому правилу – использовать только официальные каналы поставок. Чтобы найти эти каналы, следует внимательно изучить перечень официальных дистрибьюторов на сайте производителя искомых изделий. Покупая компоненты официальным путем, потребитель получит как минимум два преимущества: 100%-ную гарантию качества и минимальные цены, так как отсутствуют посредники.

Более подробно некоторые важные для практического использования особенности выбора иностранной ЭКБ для высоконадежных радиоэлектронных устройств и систем рассмотрены в следующем разделе.

4.5. Особенности выбора и применения в отечественных космических аппаратах иностранных процессоров

4.5.1. Проблемы применения иностранных процессоров в отечественных КА

Функциональное назначение бортовых вычислительных систем в современных космических аппаратах весьма разнообразно и связано с решением задач по управлению и обработке информации как для систем полезной нагрузки, так и для платформы аппаратов. Требования к аппаратуре бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК) определены в соответствующих отечественных руководящих материалах и отраслевых стандартах для их проектирования и изготовления как по уровням надежности, так и по требуемым характеристикам применяемой ЭКБ.

Особое место в перечне ЭКБ для БЦВК занимают микропроцессоры, которые являются ядром любого бортового вычислительного устройства ввиду своей компактности, малой потребляемой мощности, больших функциональных возможностей и наличия соответствующих интерфейсов.

За прошедшие 25 лет в отечественной космической аппаратуре были апробированы различные микропроцессоры (иностранного и отечественного производства) с различной архитектурной, функциональными возможностями и соответствующим инструментарием для разработки прикладного программного обеспечения. На основании анализа результатов их практического применения в составе типовых БЦВК [35] можно сделать несколько выводов об их основных недостатках.

1. Отсутствие унификации и преемственности технических решений как на уровне применения в полезной нагрузке, так и в платформах.
2. Невысокая надежность из-за индустриальной или коммерческой квалификации этих микросхем.
3. Отсутствие основных необходимых для современной космической бортовой аппаратуры встроенных интерфейсов (SpaceWare, CAN, MIL-STD-1553B, JTAG, Telemetry&Telecommand Interface и др.).
4. Ограниченная схемотехническая гибкость этих микропроцессоров из-за невозможности выбора нужной разработчику конкретной конфигурации.

5. Проблемы реализации многоядерных процессоров и недостаточная эффективность построения конвейерных многопроцессорных конфигураций.
6. Неоднородность встроенного и прикладного программного обеспечения на уровне БЦВК.
7. Недостаточно развитая система встроенной самодиагностики как на уровне отдельного микропроцессора, так и на уровне БЦВК.

Начиная с 2009 г. в космической отрасли США и странах ЕС в аппаратуре БЦВК достаточно широко стали применяться микропроцессоры нового семейства Leon 3FT, которые были разработаны компанией Aeroflex (США).

Первая известная реализация этого процессора (2007 г.) была реализована на ПЛИС RTAX 200S с тактовой частотой 25 МГц. В 2009 г. уже была выпущена микросхема нового поколения UT 699 на 75 МГц, а в 2011 г. на рынок вышла микросхема уже двухъядерного процессора GR 712 (140 МГц.). Европейское космическое агентство и НАСА сертифицировали и рекомендовали процессоры UT 699 и GR 712 для применения в БЦВК. Компания Aeroflex в 2014 г. объявила о выпуске первых партий NGMP – четырехъядерного процессора (400 МГц).

Модернизированный вариант процессора Leon 2FT, разработанного Aeroflex-Gaisler по заказу ESA в 2008 г., также был выпущен фирмой Atmel в исполнении AT 697, но поскольку не был принят на вооружение ESA по ряду причин (в том числе из-за конкурентной борьбы этих фирм в космическом сегменте рынка ЭКБ), больше не поддерживается в библиотеках Aeroflex-Gaisler.

Современный базисный вариант Leon 2FT – это модульный сбоеустойчивый 32-разрядный микропроцессор с SPARCV8/V9-архитектурой и с шинной организацией AMBABus. Библиотека составляющих микропроцессора IP-ядер также разработана Aeroflex- Gaisler и в настоящее время коммерчески доступна со средой для проектирования, состоящей из программных продуктов GRMON, TSIM, GRSIM и набора для аппаратного прототипирования, содержащего платы формата 6U/3U (Leon 3 UT 699, Leon GR 712), а также конструктивные деск-топ модули с встроенным питанием и разъемы (RASTA, Ethernet/SpaceWireRoutingBridge, CCSDS/ECSSTM&TCEGSE) [35].

4.5.2. Варианты исполнения и квалификационные характеристики микропроцессоров UT 699 и GR 712

Схемотехническое применение микропроцессора Leon 3FT определяется двумя его исполнениями: первое – микропроцессор на базе ПЛИС; второе – на ASIC в виде двух вариантов микросхем UT 699 и GR 712. В зависимости от выбранного исполнения разработчиком могут быть использованы различные версии библиотеки (IP-ядра).

GRLIB – для ПЛИС или для ASIC. Кроме того, GRLIB может быть выполнен по заказу в сбоеустойчивом варианте (как для ПЛИС, так и для ASIC). Как правило, все бесплатные (демонстрационные) версии GRLIB не являются FT-версиями. Нужно также отметить, что радиационно-стойкое исполнение процессора требует применения радиационно-стойкой ПЛИС или радиационно-стойкой

«кремниевой» библиотеки с соответствующим технологическим процессом на 250, 130 или 65–45 нм (для UT 699, GR 712 или NGMP процессора соответственно).

Тактовая частота и производительность в разных исполнениях процессора варьируется от 25 (ПЛИС) и до 75–140 МГц (UT 699 и GR 712).

В соответствии с известными квалификационными требованиями МО США и НАСА (MIL-PRF-38535, MIL-PRF-38534 и MIL-STD-883) для этих микросхем с применением в военной (квалификация QMLQ) и космической (квалификация QMLV) аппаратуре вся продукция компании Aeroflex, которая является сертифицированным QML-производителем микроэлектронной продукции, относится к классам QMLQ и QMLV. Для снижения стоимости этапов макетирования и отладки по каждой микросхеме из указанных классов поставляется и прототип – микросхема, которая является полным функциональным и конструктивным аналогом QMLQ/V-варианта и которая произведена на базе кристалла из той же пластины, из которой изготавливается полетная микросхема, но с проведением только функциональных испытаний при комнатной температуре.

Модификации UT 699 и GR 712 являются микросхемами с гарантированной радиационной стойкостью (по MIL-STD-883) в металлокерамическом корпусе и с военным температурным диапазоном от –55 до + 125 °С. Допустимая накопленная доза при этом составляет от 100 до 300 крад (по кремнию), а устойчивость к тиристорным эффектам (эффекты «защелки») – более 115 МэВ-см^2/мг при температуре + 125 °С. Устойчивость этих микросхем к одиночным воздействиям ТЗЧ гарантирована радиационно-стойкой топологией (например, транзисторная ячейка построена на 12 транзисторах) и встроенной системой для обнаружения и коррекции сбоев по всем видам памяти, расположенной на кристалле.

4.5.3. Архитектурные и аппаратные особенности микропроцессоров UT 699 и GR 712 семейства Leon 3FT

Обобщенные структурные схемы микросхем UT 699 и GR 712 представлены на рис. 4. 9 и 4.10 соответственно [35].

Основные общие элементы представленных архитектур включают следующее:

- 7-ступенчатое конвейерное CPU;
- SPARCV8 набор команд;
- IEEE 754 FPU;
- аппаратные модули для умножения и деления;
- CAN 2.0, EthetnetMAC 10/100, PCI, SpW с LVTTL, JTAG, RS-232 интерфейсные порты (разное число в обоих процессорах);
- встроенную диагностику через интерфейс JTAG;
- приоритетность доступа к шине AMBA (быстродействующий сегмент шины AHB и периферийный л сегмент APB);
- 8/32-битный контроллер для PROM/SRAM/SDRAM внешней памяти (DMA-обмен с CPU);
- 7-битную BCH схему обнаружения и коррекции 1 ошибок для PROM и SRAM памяти;
- 16-битный Reed-Solomon SDRAM памяти;
- возможность конфигурирования процессора без применения внешней памяти.

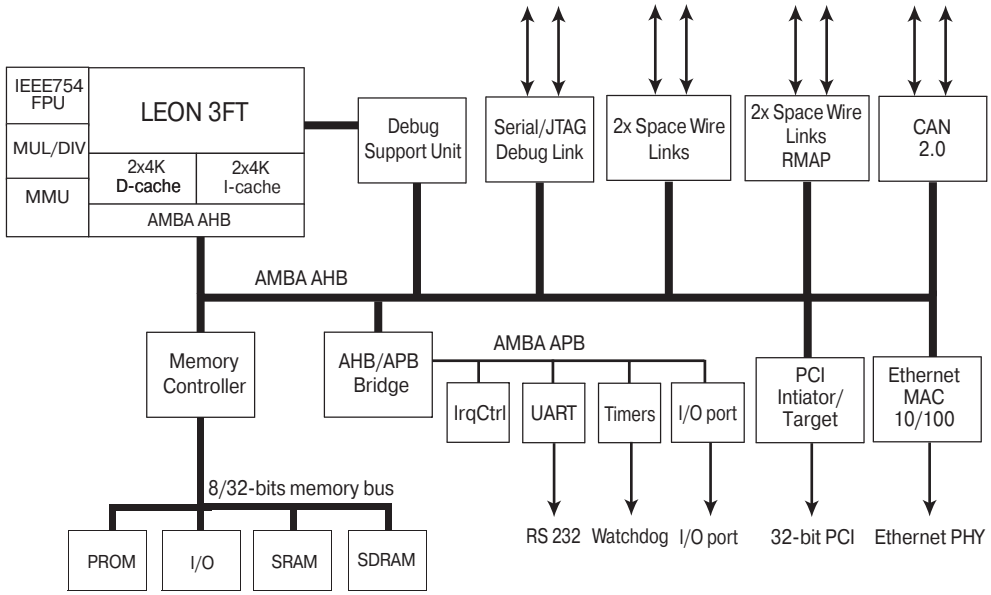


Рис. 4.9. Обобщенная структурная схема UT 699

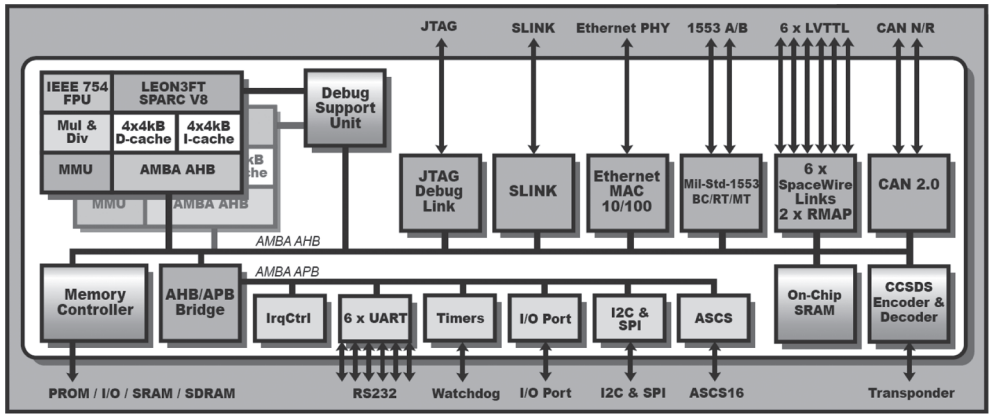


Рис. 4.10. Обобщенная структурная схема GR 712

Напряжение питания ядра процессора составляет 1,8 В, а питание буферов ввода/вывода – 3,3 В.

Основные отличия двухъядерного GR 712 от моноядерного UT 699 следующие:

- 2xLeon 3FTCPU по симметричной мульти процессинговой схеме (SMP);
- 32 Кбайт кэш-память с 4 битами контроля четности на слово (в UT 699 всего 16 Кбайт);
- сопроцессор для арифметике плавающей запятой для каждого CPU;
- встроенная диагностика и возможность доступа через интерфейс SpW;
- интерфейсы 1553B BC/RT/BM, SATCAN, SPI I2C SLINK, ASCS16, CCSDS/ ECSS TC & TM с Reed–Solomon;

– конфигурация интерфейсов для конкретного приложения микропроцессора осуществляется с помощью встроенной программно управляемой матрицы переключений, так как используемый корпус на 240 выводов не обеспечивает полностью всех интерфейсных возможностей кристалла;
– модуль для предварительного обнаружения и анализа переходов по отдельным ветвям программы;
– SPARCV9 CASA набор команд;
– 150 MIPS/125 MFLOPS @ 125 МГц (на CPU);
– 150 DMIPS/ядро в SRAM на кристалле;
– 55 MFLOPS/ ядро Whetstone.

Следует учитывать тот факт, что потребляемая мощность на один CPU на 100 МГц при полной нагрузке составляет 1 Вт, а в режиме standby составляет 0,5 Вт (на обоих CPU).

В табл. 4.12 приведены сравнительные характеристики при тестировании образцов процессоров UT 699 и UT 712, которые были определены после выполнения набора из 12 стандартных процедур при тактовой частоте 50 МГц и при наличии 32-битного SDRAM в конфигурациях процессоров. Все данные в таблице показаны как величины относительно данных тех же измерений на AT 697, предоставленных для сопроводительной документации компании Atmel после тестирования AT 697 [35].

Таблица 4.12. Сравнительные характеристики при тестировании образцов процессоров UT699 и UT712

Обозначение тест процедуры	AT 697	UT 699	GR 712
164,gzip	1	0,94	1,1
176,gcc	1	0,79	0,97
256,bzip2	1	0,93	1,06
AOCS	1	1,2	1,52
Basicmath	1	1,3	1,46
Coremark, 1 thread	1	0,89	1,09
Coremark, 4 threads	1	0,89	2,05
Dhrystone	1	0,94	1,05
Dhraystone, 4 instances	1	0,94	1,61
Unpack	1	1,2	1,26
Whetstone	1	1,94	2,0
Whetstone, 4 instances	1	1,94	3,7

4.5.4. Особенности программирования микропроцессора Leon 3

В поставленную программную инструментальную среду – для процессоров Leon входит следующий набор инструментов [35].

а) Стандартные инструменты:
– кросс-компиляторы с Ассемблера, C и C++;
– операционная система реального времени.

б) Инструменты, разработанные Aeroflex-Gaisler:
– библиотека IP-ядер GRLIB;

– интегрированная инструментальная среда GRMON для Windows и Linux;
– симуляторы TSIM (Leon 3) и GRSIM (Leon 4).

Технологическая последовательность работы с программной средой следующая:
– предкомпиляция исходного кода с ассемблера, C f или C++ в промежуточный код;
– компиляция промежуточного кода в ассемблерный код;
– генерация объектного файла;
– связывающее редактирование объектного файла в двоичный код; при этом используются предварительно созданные библиотеки из объектных файлов (динамические и статические), библиотеки бинарных файлов и библиотеки с отладочными процедурами;
– исполнение и отладка полученного после редактирования бинарного файла.

Не останавливаясь на компиляторах C и C++ ввиду их распространенности, следует отметить, что в инструментальной программной среде допускается применение также и широкого набора стандартных операционных систем реального времени – BCC, ThreadX, eCOS, RTEMS, Nucleus, VxWorks, Linux. Необходимость в таком разнообразии продиктована универсальностью применения процессоров Leon в различных по характеристикам реального времени приложениях, как например:
– управление процессами с защищенными адресными пространствами и с использованием контролера внешней памяти (MM11 на рис. 4.9 и 4.10) – VxWorks, Linux;
– управление процессами с защищенными адресными пространствами без MMU – BCC, RTEMS;
– режим многозадачной работы – ThreadX, eCOS, RTREMS, Nucleus, VxWorks, Linux;
– режим асимметричного мультипроцессинга ASMP – RTEMS, Linux;
– режим симметричного мультипроцессинга SMP – eCOS, VxWorks, Linux.

Важно отметить, что для многих приложений существенен объем занимаемой операционной системы памяти. По этому признаку указанные операционные системы можно классифицировать по нарастанию объема занимаемой памяти таким образом: BCC, ThreadX, eCOS, RTEMS, Nucleus, VxWorks, Linux.

В этом смысле операционные системы BCC, ThreadX, eCOS и Nucleus относятся к классу компактных, RTEMS – к системам средней размерности, а VxWorks и Linux – к системам большой размерности.

Важным достоинством является тот факт, что GR 712 допускает использование двух операционных систем одновременно (например, RTEMS на одном CPU и Linux – на другом), что позволяет реализовать уникальные задачи по управлению инструментами полезной нагрузки в космических аппаратах различного назначения.

Таким образом, можно сформировать основные преимущества применения UT 699 и GR 712 в БЦВК по сравнению с другими процессорами иностранного производства:
– семейство Leon принято для комплектации космических аппаратов ESA и НАСА, развивается и сопровождается (в смысле технической поддержки) компанией Aeroflex;

– для разработчиков отечественных БЦВК имеется широкий набор аппаратных и программных средств как для прототипирования и отладки, так и для реализации полетных вариантов. При этом программное обеспечение можно разрабатывать и отлаживать отдельно от разработки аппаратуры, в том числе и с использованием сети Internet;
– вариант микропроцессора GR 712 предоставляет широкие возможности по управлению инструментами полезной нагрузки КА в реальном масштабе времени за счет своей производительности, применения режима мультитаскинга и эффективной проблемной адаптации шинной архитектуры;
– возможность создавать однородную вычислительную среду из модульно структурированных, радиационно-стойких и сертифицированных для применения в космической аппаратуре микропроцессоров с гибким и структурированным сквозным программным обеспечением реального времени от уровня ядра операционной системы до приложений;
– модификация UT 699 позволяет решать проблемы создания высокопроизводительных мультипроцессорных структур ДЛЯ мощных центральных управляющих устройств за счет объемного 3D-объединения в одном модуле до четырех процессоров с общей коммутационной средой;
– встроенные возможности для проведения диагностики в каждом процессоре вместе с его интерфейсными возможностями позволяют реализовать сквозную автодиагностическую систему реального времени;

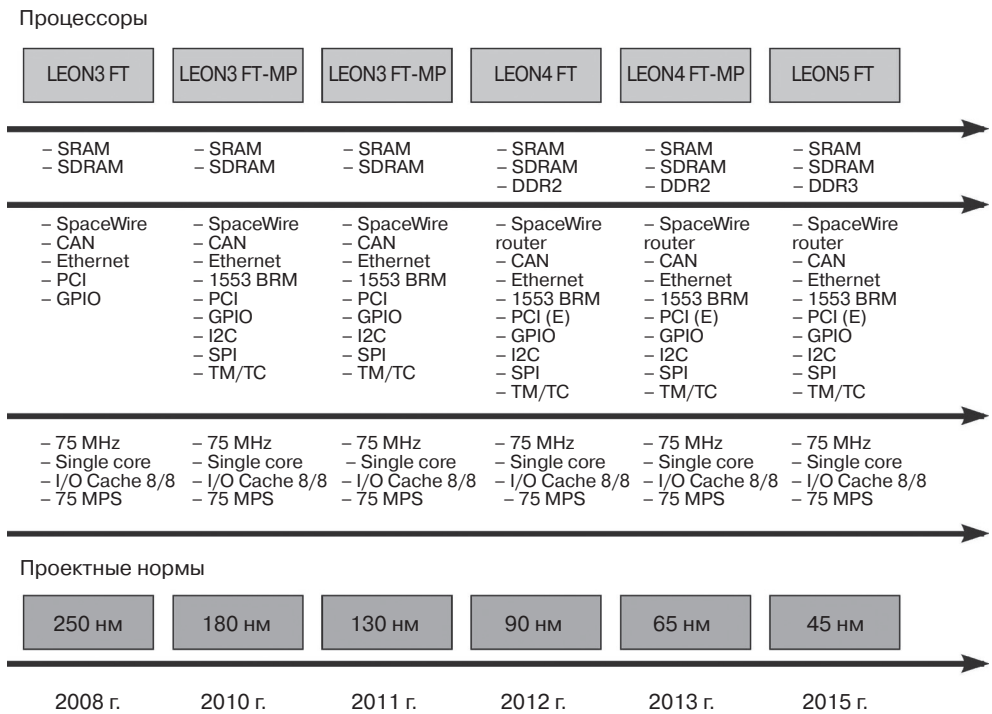


Рис. 4.11. Дорожная карта развития семейства микропроцессоров Leon

– процессоры семейства Leon связаны с большим набором радиационно-стойких и сертифицированных микросхем компании «Aeroflex», которые в большой степени перекрывают список традиционно применяемой в КА ЭКБ.

На рис. 4.11 представлена дорожная карта развития этого направления процессоров в фирме Aeroflex.

4.6. Радиационно-стойкие преобразователи постоянного тока для космических и военных применений

Повышение надежности и отказоустойчивости систем, предназначенных для решения ответственных задач в космических и военных приложениях, требует применения радиационно-стойких компонентов, в том числе устройств для управления питанием.

Преобразование постоянного тока является важным и наиболее широко используемым компонентом любых систем космического и военного назначения, к которому предъявляются повышенные требования по надежности и стойкости к внешним факторам, в частности, всех видов радиации. Поэтому на их примере кратко рассмотрим важнейшие технические характеристики радиационно-стойких DC/DC-преобразователей и требования к ним, установленные в соответствующих стандартах, а также приведем описание используемых методов их проектирования, в том числе – особенности реализации схемотехнических и технологических решений в некоторых наиболее широко используемых моделях микросхем преобразователей ведущих иностранных производителей [36].

Как уже выше упоминалось, в США требования к высоконадежным радиационно-стойким DC/DC-преобразователям регулируются Приложением G стандарта MIL-PRF-38534, утвержденного Управлением материально-технического обеспечения (DLA) Министерства обороны США. Такие DC/DC-преобразователи должны соответствовать техническим условиям для стандартных интегральных схем (Standard Microcircuit Drawings, SMD) DLA.

Стандарт MIL-PRF-38534 устанавливает требования не только к конечному продукту, но и к компонентам, материалам и процессам, используемым для его изготовления. Это значит, что DC/DC-преобразователь должен быть изготовлен согласно требованиям DLA и пройти соответствующие испытания. Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи сертифицируются по классу K этого стандарта.

Рассмотрим типичные характеристики и основные требования к зарубежным радиационно-стойким DC/DC-преобразователям [36–41].

Суммарная доза радиации (Total Ionizing Dose, TID

TID – это постепенно нарастающий (накопленный) долговременный радиационный дефект, вызванный протонами, электронами и другими ионизирующими частицами. Все космические и военные приложения требуют обеспечения определенного уровня TID. Для космических аппаратов на низкой околоземной орбите или при условии достаточной экранировки DC/DC-преобразователя часто достаточным уровнем TID является 30 крад (Si). Для более высоких орбит или более длительных программ требуется уровень TID в 100 крад (Si). Суммарную дозу радиации можно снизить с помощью соответствующей экранировки элект-

ронного блока, где используется данный компонент. Уровень суммарной дозы радиации должен быть гарантирован производителем путем испытаний компонента в процессе производства или с помощью проведения исследований и анализа наихудшего сочетания внешних воздействующих факторов, причем результаты этих исследований и испытаний должны быть доступны для заказчика.

Чувствительность по ELDRS

Испытания на суммарную дозу радиации (TID), как правило, выполняются при большой мощности дозы, чтобы сократить время и затраты. Тестирование при малых мощностях дозы, близких к реальным условиям космического пространства, в соответствии с требованиями ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity – уменьшение величины предельной накопленной дозы при воздействии реального ионизирующего излучения космического пространства с мощностью дозы ниже 10^3–10^2 рад (SiO_2)/с) обычно показывает более высокую чувствительность к радиации некоторых компонентов, в частности изготовленных по биполярной технологии. Для современных космических и военных приложений обязательным требованием является проведение приемо-сдаточных испытаний на воздействие дозы излучения малой мощности по программе ELDRS.

Одиночные эффекты (Single Event Effects, SEE)

Одиночные радиационные эффекты вызываются частицами высокой энергии (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т.д.), которые взаимодействуют с полупроводниковым материалом внутри DC/DC-преобразователя. С помощью экранировки нельзя обеспечить защиту от SEE, поэтому данную проблему необходимо решать на этапе конструктивно-схемотехнического проектирования DC/DC-преобразователя (выбор компонентной базы, схемотехнических решений, технологических процессов и др.). Одиночные радиационные эффекты могут вызывать нежелательные переходные процессы на выходе микросхемы, просадку напряжения, временное отключение, повторное включение или в худшем случае – устойчивые отказы. Кстати, одной из причин появления таких устойчивых отказов DC/ DC-преобразователей часто является выход из строя мощного MOSFET.

Отсутствие одиночных эффектов при линейной потере энергии ионизирующей частицы до 44 МэВ-см^2/мг обеспечивается для большинства частиц, с которыми космический объект может сталкиваться в течение срока службы, что является вполне достаточным уровнем для большинства известных космических программ. Линейная потеря энергии ионизирующей частицы на уровне 85 МэВ-см^2/мг охватывает практически все виды частиц, которые могут встретиться в течение активного срока существования космического аппарата. Показатель стойкости к SEE проверяется, главным образом, во время испытаний готового DC/DC-преобразователя, которые должны включать в себя проверку стойкости устройства к эффекту защелкивания при высокой температуре [36–41].

Анализ предельных значений параметров при наихудшем сочетании внешних факторов

Условия функционирования космических аппаратов характеризуются большим перепадом температур, воздействием различных видов вибрации, механи-

ческих ударов, радиационного излучения и других факторов. Поскольку зарубежный заказчик всегда требует гарантий сохранения характеристик прибора после эксплуатации DC/DC-преобразователя в течение 10–15 лет, производителю следует выполнить и предъявить заказчику результаты обширных и детальных исследований того, как изменяются характеристики прибора при наихудшем сочетании внешних факторов, в том числе исследовать влияние радиационных эффектов и оценить характеристики DC/DC-преобразователя к концу срока службы прибора. Радиационная деградация компонентов учитывается при моделировании поведения прибора в процессе и после воздействия радиационной нагрузки. Для такого анализа на практике обычно используются методы экстремальных значений, метод среднеквадратичной погрешности и метод Монте-Карло.

Требования стандарта MIL-PRF-38534 класс K

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи, как правило, должны соответствовать требованиям стандарта MIL-PRF-38534 класса K. Этот класс включает в себя помимо требований класса FI дополнительное тестирование и отбраковку компонентов. Большинство DC/DC-преобразователей космического класса надежности соответствует техническим условиям для стандартных интегральных схем (SMD).

Отсутствие оптопар в гибридных DC/DC-преобразователях

Как известно, хотя развязка цепи управления с обратной связью в DC/DC-преобразователях может быть выполнена с помощью оптрона в линейной области характеристики, светодиод оптопары является чувствительным компонентом к одиночным эффектам и структурным повреждениям кристаллической решетки из-за смещения атомов (Displacement Damage) при воздействии высокоэнергетических частиц. Поэтому в DC/DC-преобразователях космического уровня надежности (space grade) обычно не используются оптопары. Вместо оптронной обратной связи конструкторы используют магнитную обратную связь, которая нечувствительна к радиационным эффектам.

Снижение влияния на работоспособность микросхем в условиях космического пространства факторов радиационного излучения, в частности одиночных эффектов, требует применения специальных методов проектирования DC/DC-преобразователей, таких как использование избыточных элементов и специальных топологических решений, направленных на подавление кратковременных отклонений выходного напряжения, возникающих из-за воздействия высокоэнергичных частиц. Например, требованиями по разбросу напряжения питания для таких микросхем, как ПЛИС, определено, что типовое отклонение выходного напряжения DC/DC-преобразователей в случае одиночных эффектов должно быть ограничено ±5% при линейной потере энергии ионизирующей частицы 86 МэВ-см^2/мг. Кроме того, эти устройства должны быть стойкими к суммарной дозе радиации (TID), как правило, на уровне 100 крад (Si) для высокой мощности дозы (50–300 pafl(Si)/c) и 50 крад (Si) для дозы малой мощности (0,01 pafl(Si)/c) [37–41]. При этом меньшая мощность дозы точнее отражает реальные условия космического пространства.

Чтобы обеспечить высокую радиационную стойкость DC/DC-преобразователей, предназначенных для работы в космических и военных приложениях, зарубежные разработчики обычно используют следующие подходы и методы проектирования:

- использование MOSFET, устойчивых к эффекту пробоя подзатворного диэлектрика и к импульсному изменению напряжения, а также использование токоограничивающих резисторов,
- выбор топологии DC/DC-преобразователя с высоким импедансом,
- проектирование устройства с учетом значительного уменьшения коэффициента усиления транзистора под воздействием радиации,
- использование биполярных усилителей, которые менее чувствительны к ионизирующему излучению,
- ограничение допустимых значений напряжений, прилагаемых к активным элементам изделия,
- применение микросхем малой степени интеграции,
- применение схем управления, которые допускают значительные изменения напряжений смещения и токов смещения,
- управление выключением MOSFET отрицательным напряжением затвор-исток для компенсации изменения пороговых напряжений при наихудшем сочетании внешних факторов.

Кроме того, важную роль играют испытания и отбраковка всех чувствительных к радиации компонентов, что, конечно, требует дополнительных затрат времени и средств.

Так, на основе этих подходов к проектированию радиационно-стойких устройств управления питанием компания International Rectifier разработала DC/DC-преобразователи серии LS, которые выдерживают высокий уровень ионизирующего излучения. Эти устройства, рассчитанные на выходную мощность до 30 Вт и широкий диапазон входного напряжения, построены на основе многослойной гибридной технологии и производятся на линии, соответствующей требованиям стандарта MIL-PRF-38534. Они гарантируют среднее время наработки на отказ (MTBF) на уровне 4,8 млн ч при температуре корпуса 35 °C в условиях космического пространства.

На рис. 4.12 приведена упрощенная электрическая схема такого DC/DC-преобразователя, где в качестве конструктивно-топологического решения используется специальная несимметричная топология элементов с номинальной фиксированной частотой 500 кГц, магнитной обратной связью, компенсацией по каналу прямой связи, управлением по напряжению и встроенным фильтром электромагнитных помех (что позволяет использовать эти преобразователи без применения дополнительных внешних компонентов для подавления кондуктивных помех) [36].

На рис. 4.12 использованы следующие обозначения внутренних элементов микросхемы: **EMI Filter** – фильтр электромагнитных помех; **House-keeping supply** – вспомогательный источник питания; **Level Translator & FET Driver** – преобразователь уровня и драйвер полевого транзистора; **Short Ckt & Overload Protection –** защита от короткого замыкания и повышения напряжения; **Oscillator** – тактовый генератор; **PWM –** ШИМ-формирователь; **Ramp Generator** – генератор пилообразного напряжения; **Sample and Hold** – устройство выборки и хранения; **Feedback Trigger** – триггер обратной связи; **EA** – усилитель сигнала ошибки.

На рис. 4.13 представлены кривые эффективности этого преобразователя с выходным напряжением ±15 В при $T = +25$ °C.

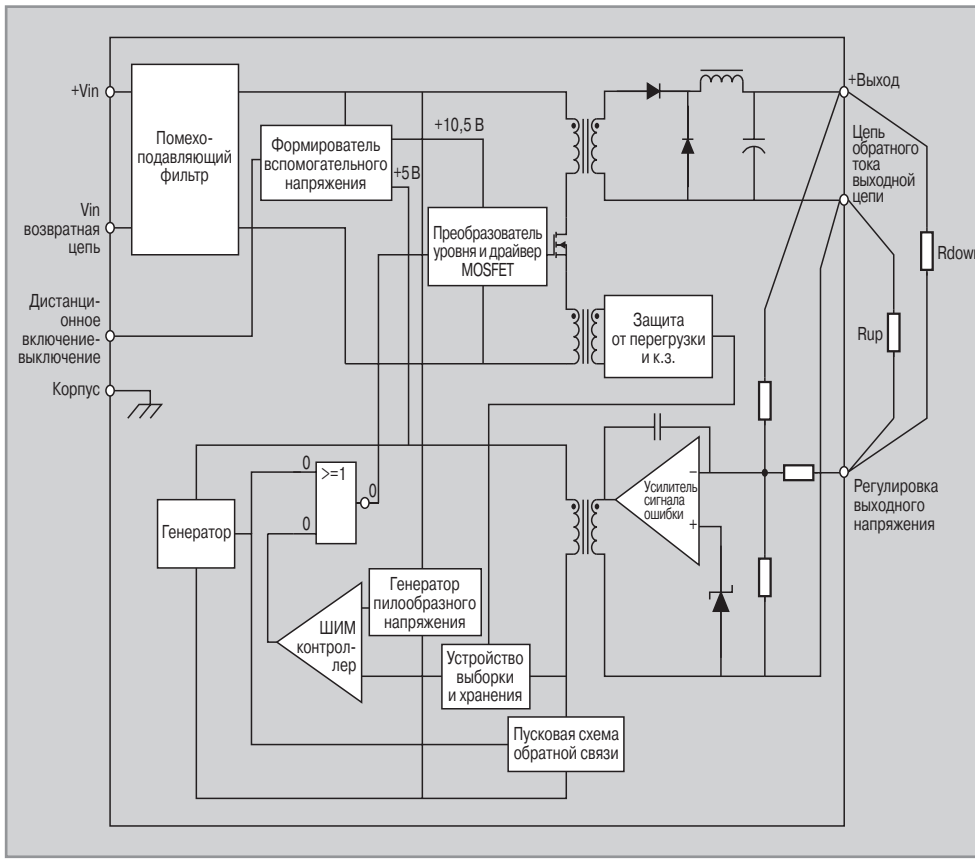


Рис. 4.12. Радиационно-стойкий DC/DC-преобразователь LS2815D фирмы International Rectifier

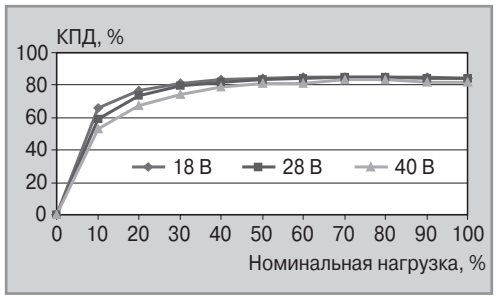


Рис. 4.13. Типовая эффективность DC/DC-преобразователя LS2815D

Цепь магнитной обратной связи, установленная в этот DC/DC-преобразователь вместо оптронов, минимизирует чувствительность схемы к температуре, старению компонентов и воздействию радиации. Преобразователь обеспечивает различные варианты выходных напряжений, в том числе для однополярной версии: 1,5; 1,8; 2,5; 3,3; 5 и 12 В; для двуполярной версии: ±5, ±12 и ±15 В. Кроме того, преобразователи демонстрируют оптимизированную эффективность в широком

диапазоне рабочих токов нагрузки и входных напряжений. Данные представлены для трех входных напряжений – от минимального (18 В) до максимального (40 В) при температуре корпуса 25 °С. Из рис. 4.13 видно, что в диапазоне от 50% до максимальной нагрузки эффективность преобразователя остается на уровне выше 80% в широком диапазоне входных напряжений [36].

DC/DC-преобразователи этой серии заключены в герметичный стальной корпус размерами 1,5 × 2,3 × 0,425 дюймов и весят менее 80 г. Корпус оборудован особо прочными медными выводами с керамический изоляцией и герметизируется с помощью параллельной роликовой сварки. Согласно стандарту MIL STD-975, номинальные параметры преобразователей снижены для повышения надежности при высоких температурах, напряжениях и токах. Производитель этих DC/ DC-преобразователей предоставляет всю необходимую документацию, в том числе данные термоанализа, результаты исследований характеристик при наихудшем сочетании внешних факторов, данные о режимах отказов и характеристики надежности в течение всего срока службы устройства.

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии LS выдерживают накопленную суммарную дозу радиации (TID) более 100 крад (Si). Они являются стойкими к одиночным радиационным эффектам (SEE), таким как одиночные сбои (Single-Event upset, SEU), одиночные эффекты защелкивания транзисторов (Single-Event Latchup, SEL) и одиночные эффекты вторичного пробоя (Single-Event Burnouts). Линейная потеря энергии тяжелых ионов для одиночных эффектов определена на уровне 82 МэВ-см^2/мг согласно стандарту MIL-STD-883.

Чтобы убедиться самим и подтвердить заказчикам уровень качества микросхем, а также подтвердить отсутствие существенного ухудшения параметров устройства после воздействия дозы радиации 150 крад (Si), эти преобразователи были подвергнуты испытаниям на суммарную дозу радиации (TID) и одиночные эффекты (SEE) [36]. В испытаниях использовались четыре модели преобразователей серии LS: два устройства с одиночным выходом и два – со сдвоенным выходом. В категории преобразователей с одним выходом для испытаний были выбраны модели с 5-В выходным напряжением, а в категории преобразователей со сдвоенным выходом – 15-В модели. Выход испытываемых преобразователей был нагружен на резистивную нагрузку, величина которой составила половину максимально допустимой.

Испытания на суммарную дозу радиации проводились в камере с мощностью дозы около 1 крад (SiO)/мин. После радиационного облучения устройства отжигались в течение 160 ч при 100 °С.

Испытания на одиночные эффекты были выполнены на двух образцах, взятых случайным образом из выборки: 2,5-В преобразователе с одиночным выходом и на 15-В преобразователе со сдвоенным выходом. В процессе воздействия радиации на оба прибора подавалось смещение при полной нагрузке. Облучение производилось ионами ксенона и золота с линейной потерей энергии ионов на уровнях 47,6 и 83 МэВ-см^2/мг.

Полученные данные показали, что преобразователи серии LS выдержали испытания на общую дозу радиации (TID) до 150 крад (Si) и одиночные эффекты (SEE), соответствующие линейной потери энергии ионов на уровне 83 МэВ-см^2/мг.

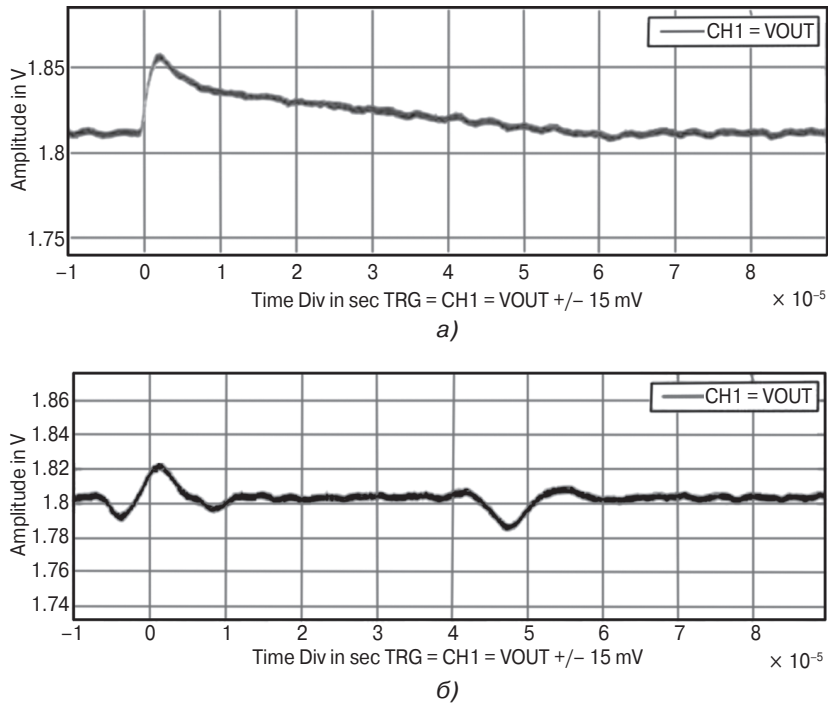


Рис. 4.14. Зависимость выходного напряжения преобразователя от суммарной дозы радиации: для ИМС 2,5 В с одиночным выходом (*а*) и 15-В-преобразователь со сдвоенным выходом (*б*)

Из рис. 4.14 видно, что изменения параметров после воздействия TID незначительны, хотя наблюдается небольшая тенденция к понижению рабочей точки выходного напряжения с увеличением дозы радиации, эти изменения компенсируются после отжига образцов. Кроме того, отмечается небольшое падение эффективности (менее 1%) после воздействия общей дозы 150 крад.

Компания Intersil – один из 15-ти поставщиков радиационно-стойких изделий для Управления материально-технического обеспечения Министерства обороны США, входящий в перечень одобренных производителей (QML). Intersil предлагает радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи для использования в условиях космического пространства, а ее изделия имеют так называемые индивидуальные технические условия для стандартных интегральных схем SMD (Standard Microcircuit Drawings).

Как известно специалистам, например, система питания любого спутникового оборудования должна быть адаптирована к высокой тактовой частоте и быстрому изменению нагрузки на шине питания. Для этого требуется, чтобы радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи и стабилизаторы обладали хорошими переходными характеристиками на уровне dI/dt = 10 А/мкс при изменении нагрузки в диапазоне 0–100%. При таком быстром изменении нагрузки необходимо обеспечить максимальное отклонение выходного напряжения преобразователя в пределах менее ±5%, ибо любое превышение предельно допустимого напряже-

ния питания ПЛИС или процессора при таком изменении нагрузки может привести к мгновенному или скрытому отказу микросхемы. Для построения системы питания с нагрузкой до 2 А обычно используют LDO-стабилизаторы, при нагрузке 2–12 А – импульсные стабилизаторы с интегрированным MOSFET.

Быстрая переходная характеристика и высокая скорость нарастания напряжения, как правило, требуют применения компенсированной широкополосной замкнутой обратной связи, которая должна оставаться стабильной в определенном диапазоне изменения выходной нагрузки. В известной степени время отклика устройства определяет также время восстановления после случайных радиационных эффектов.

В LDO-стабилизаторах в качестве выходного каскада обычно используются PMOS-транзисторы, которые обеспечивают работу устройства при минимальном входном напряжении 2,2 В и низком собственном токе потребления. Кроме того, LDO-стабилизаторы обладают весьма малым сопротивлением в режиме включения и малым падением напряжения. Например, типовое значение падения напряжения LDO-стабилизатора ISL75051SRH составляет 65 мВ при токе нагрузки 1 А и 225 мВ – при 3 А. Малое падение напряжения и низкий ток в «земле» помогают снизить общее потребление в системе питания КА и ограничить рост температуры преобразователя [36].

Подводя итог вышеизложенному, следует сказать, что радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи, предназначенные для работы в космических и военных приложениях, могут обеспечивать надежную и устойчивую работу бортового оборудования в условиях воздействия различных видов радиации только при условии выполнения рассмотренных специальных методов проектирования и цикла специальных исследований и испытаний.

4.7. Мировой опыт организации работ по созданию электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических систем

Развитие ракетно-космической техники (РКТ) ставит перед разработчиками аппаратуры жесткие требования – улучшение надежности габаритно-массовых характеристик, увеличение функциональных возможностей аппаратуры и повышение сроков ее активного существования. Электронная компонентная база (ЭКБ), применяемая в бортовой аппаратуре космических аппаратов (КА), должна обладать следующим набором специфических условий [42]:

- разнообразие функциональных задач, выполняемых КА, приводит к необходимости использования широкой номенклатуры типономиналов ЭКБ при крайне малой количественной потребности;
- широкая функциональная номенклатура ЭКБ требует при производстве применения разнообразных технологий (многие из которых уникальны и отсутствуют в Российской Федерации);
- жесткие требования к сроку активного существования (САС) при полном отсутствии возможностей ремонта приводят к сверхжестким требованиям надежности и стойкости к дестабилизирующим факторам космического пространства (рис. 4.15).

Рис. 4.15. Специфика ЭКБ для аппаратуры космического назначения [42]

Специфика ЭКБ космического применения состоит еще и в том, что ее развитие идет путем, отличным от развития электроники общепромышленной, ориентированной на массовый выпуск продукции с коротким жизненным циклом и быстрой сменой типов.

Следствием всех этих особенностей оказывается крайне длительный жизненный цикл аппаратуры – и, соответственно, повышенные требования к жизненному циклу компонентов. Налицо противоречие между требованиями к жизненному циклу аппаратуры и реальной сменяемостью поколений ЭКБ.

Еще одной важной задачей при создании ЭКБ для применения в аппаратуре РКТ является обеспечение приемлемой стоимости мелкосерийного производства при безусловном обеспечении требований широкой номенклатуры, длительного жизненного цикла, надежности, стойкости к дестабилизирующим факторам и отказоустойчивости.

Заказчики предъявляют к разработчикам РЭА для космических аппаратов все более жесткие требования: необходимо увеличение функциональных возможностей аппаратуры при одновременном уменьшении габаритно-массовых характеристик и повышении срока ее активного существования. Снижение себестоимости конечной продукции и повышение качества надежности и функциональности изделия – основные задачи, решаемые мировыми лидерами в области космического приборостроения. Эти требования постоянно стимулируют исследователей и производителей разрабатывать и внедрять все новые и новые технологии.

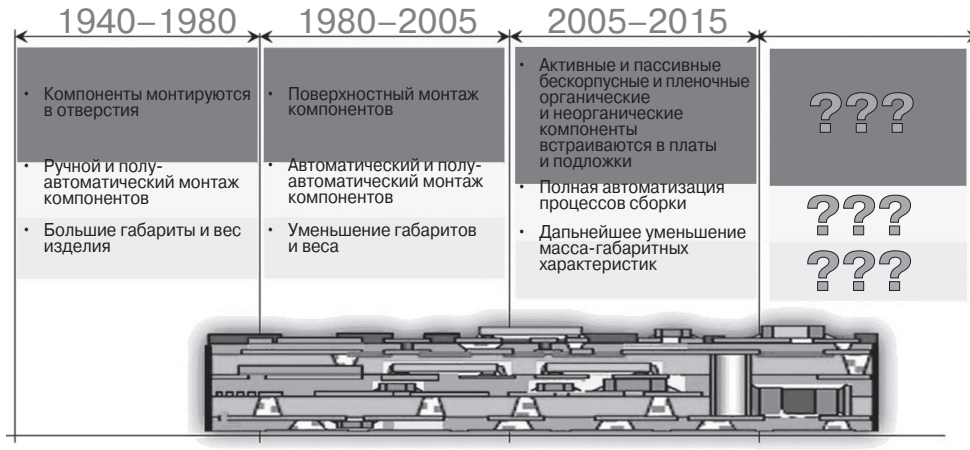


Рис. 4.16. Развитие технологий сборки и монтажа

В своем развитии мировая электронная промышленность прошла через несколько этапов. В 1940–80-е гг. активно использовался монтаж в отверстия в основном, при ручной пайке и монтаже. Конечные изделия отличались достаточно большим весом и габаритами.

Начиная с 1980-х гг. печатные узлы стали разрабатываться с применением компонентов поверхностного монтажа, и при их сборке начали широко применяться полуавтоматические и автоматические методы монтажа. Вес и габариты изделий уменьшились в 6-7 раз.

Около семи лет назад появилась новая технология – встраиваемые компоненты внутри печатных плат. Формируется печатный узел со сложной 3-D структурой, в которой как дискретные, так и пленочные компоненты расположены внутри самих печатных плат. Это позволяет в еще большей мере уменьшить габариты изделия и увеличить его функционал (рис. 4.16).

По аналогии с известным в микроэлектронике «Законом Мура» эти тенденции получили название «Больше, чем Мур», так как помимо уменьшения размеров элементов до нанометрового диапазона существенные преимущества достигаются за счет гетерогенной интеграции, что позволяет совместить в одном корпусе элементы, изготовленные с применением различных микро- и нанотехнологических маршрутов (рис. 4.15) [42].

Данная технология является крайне перспективной для создания бортовой аппаратуры современных КА.

Как было показано выше, отсутствие необходимой номенклатуры ЭКБ отечественного производства вынуждает использовать ЭКБ иностранного производства (ЭКБ ИП), доля которой в современной бортовой аппаратуре составляет более 70%.

В периодической печати уже давно поднимался вопрос о технологической безопасности страны в части ЭКБ. Однако в настоящее время ни одна страна в мире не может позволить себе полный цикл производства всех вариантов технологий создания компонентов. Ведущие мировые производители компонентов,

модулей и приборов – компании BAE Systems, Aeroflex и т.д. – также развивают кооперационные связи, ориентируясь не только на американские предприятия, но и на Тайвань, Израиль, Европу.

Технологическая безопасность – это, прежде всего, возможность обеспечить выполнение национальных программ в течение длительного жизненного цикла изделий и с учетом безусловного соответствия требованиям назначения, условиям применения и экономической целесообразности.

Как уже отмечалось, выпуск высоконадежных компонентов в небольшом количестве нерентабелен для предприятий электронной промышленности, нацеленных на массовое производство, однако представляет весьма доходный и динамично развивающийся бизнес для специализированных нишевых компаний. В США и ряде европейских стран работает много предприятий такого рода. Это могут быть как самостоятельные фирмы, например, Aeroflex, так и подразделения крупных фирм, создающих сложные комплексы, например, Boeing.

Как уже было отмечено выше, организацией работ и формированием программ по производству радиационно-стойкой элементной базы в США занимаются три ведомства: Министерство обороны, Министерство энергетики, Национальное космическое агентство (NASA).

Министерство обороны США с 2001 г. реализует программу ускоренного развития радиационно-стойкой элементной базы в рамках Программы производства вооружений (Defense Production Act, Title III). В структуре Министерства обороны США Программа контролируется Агентством по уменьшению военной угрозы, подчиняющимся непосредственно заместителю министра обороны США по закупкам, технологии и логистике. Поставка радиационно-стойкой элементной базы для нужд Министерства обороны США, а также других ведомств контролируется Центром снабжения вооруженных сил (DSCC) в Колумбусе. Центр DSCC в Колумбусе ведет реестр QML (Qualified Manufacturers List) сертифицированных изготовителей элементной базы для нужд Министерства обороны США.

Помимо сертифицированных фирм производством радиационно-стойкой элементной базы занимаются несертифицированные фирмы других ведомств (например, Сандийские лаборатории Министерства энергетики США) или частные фирмы типа Peregrine Semiconductor. Взаимодействие с другими ведомствами и промышленностью США в области радиационно-стойкой элементной базы координируется Центром микроэлектроники США (DMEA) в Сакраменто, шт. Калифорния.

В свою очередь, Министерство энергетики США производит специализированную радиационно-стойкую ЭКБ в Центре микроэлектроники Сандийских национальных лабораторий, а также проводит исследования по данной проблеме в Ядерном центре Лос-Аламоса. Министерство энергетики США также имеет собственные требования к радиационно-стойкой элементной базе, но большей частью они унифицированы с требованиями стандартов Министерства обороны США.

Национальное космическое агентство США (NASA) проводит работы по радиационно-стойкой микроэлектронике в своих исследовательских центрах, например, Лаборатории реактивного движения (JPL) Стэндфордского университета.

Известно, что в 1998 г. совместно с компанией Intel эта лаборатория передала (не безвозмездно) технологии радиационно-стойких процессоров Pentium в Сандийские лаборатории.

Известная компания BAE Systems в 2010 г. закончила модернизацию своего производства пластин при спонсорской поддержке Министерства обороны США по обеспечению внутреннего гарантированного ресурса для радиационно-стойкой микроэлектроники для стратегических военных и космических приложений следующего поколения. Производство пластин производится в полном объеме по технологическим нормам 250 и 150 нм. Компания BAE Systems продолжает играть важную роль в качестве внутреннего торгового поставщика радиационностойкой техники, производя продукты следующего поколения и предлагая услуги по производству пластин на вновь обновленных технологических мощностях.

Компания Aeroflex участвует в международной производственной кооперации, в том числе не только изготавливает заказные кристаллы, но и осуществляет корпусирование предварительно оттестированных кристаллов в металлокерамические корпуса.

Аналогичным путем идут в Японии. В частности, Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) совместно с рядом компаний создало специализированное производство изделий радиационно-стойкой ЭКБ. Институт космических исследований и астронавтики (ISAS) Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) владеет технологическим базисом для гибкой разработки и производства логических интегральных микросхем с очень высокой радиационной стойкостью и приемлемой ценой. Это было достигнуто путем интеграции технологии проектирования радиационно-стойких схем ISAS в современные технологии КНИ от Mitsubishi Heavy Industries Ltd., производителя электронной продукции с высокой надежностью. Кроме того, была создана библиотека блоков для проектирования интегральных схем с перспективой применения в различных областях помимо космической.

Европейское космическое агентство имеет свой опыт построения кооперации при создании специализированной ЭКБ совместно с компаниями Atmel и Aeroflex.

Таким образом, мировой опыт свидетельствует о том, что создание необходимых технологий ЭКБ для космического приборостроения осуществляется с помощью механизмов частно-государственного партнерства через заинтересованные государственные институты.

Современные подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства, можно разделить на следующие большие группы: технологические методы повышения стойкости, конструктивные и схемотехнические, а также обеспечение поддержки моделирования влияния ДФ КП на этапе проектирования компонентов (рис. 4.17).

К ***технологическим методам*** следует отнести использование специализированных техпроцессов изготовления СБИС и материалов. Так, в частности, это технологии «кремний-на-сапфире» (КНС), «кремний-на-изоляторе» (КНИ), специализированные операции легирования и т.д. Все эти способы чрезвычайно дорогостоящи, и потому они реализованы на небольшом числе производств. В частности, ведущими производителями подобных структур являются компании Honeywell (США), Peregrine Semiconductors (США) и ряд других.

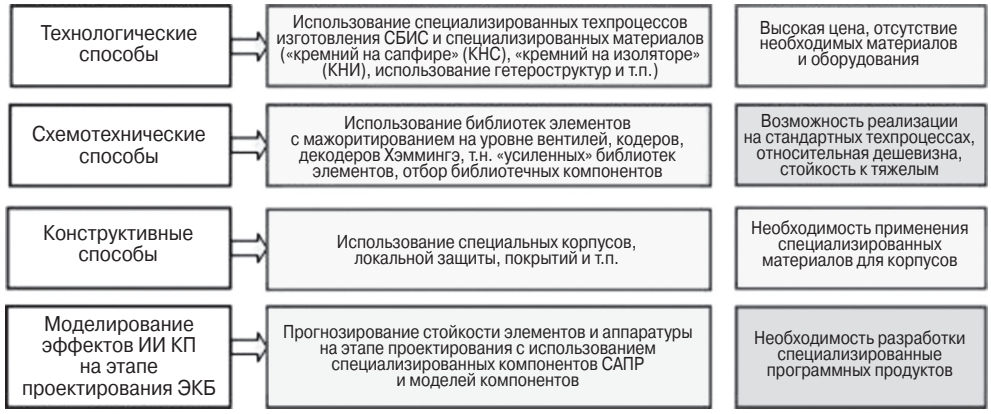


Рис. 4.17. Подходы к созданию специализированной ЭКБ, стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства [42]

К ***схемотехническим методам*** повышения радиационной стойкости, в том числе к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ), относятся применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилей, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «усиленных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов и ряд других приемов. Основным достоинством такого подхода является возможность его реализации на существующих и перспективных фабриках, обладающих стандартной (предназначенной для массовой продукции) технологией. Такой подход получил международное название Rad hard by design [43]. Так, французская компания MHS обеспечивает таким путем гарантированную стойкость порядка 100 крад по объемному кремнию. Аналогичным путем работает Aeroflex, используя обычные технологические линейки ведущих производителей. При этом можно использовать как уже существующие мощности зарубежных фабрик, так и вводимые мощности ОАО «НИИМЭ и Микрон» и ОАО «Ангстрем». Использование такого подхода дает повышение стойкости, сопоставимое с применением специальной технологии, но при существенно (в 5-7 раз) меньшей стоимости.

К ***конструктивным способам*** повышения стойкости следует отнести использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т.д. Получить высокую функциональность за приемлемую цену и с необходимыми массогабаритными характеристиками на сегодняшний день также можно с применением технологии интеграции кристаллов, изготовленных по различным технологиям в одном корпусе, т.е. с применением подхода «система в корпусе» (СВК), который более детально рассмотрены в гл. 11.

Технологическая цепочка разработки и изготовления компонентов космического применения высокой степени интеграции (БИС, СВК) включает в себя ряд достаточно обособленных технологических подциклов, которые в принципе могут выполняться на различных производственных площадях и имеют достаточно формализованные процедуры контроля и приемки результатов каждого такого подцикла. В идеальном случае вся эта технологическая цепочка должна быть расположена на территории Российской Федерации и работать под контролем ПЗ.

Одним из важнейших этапов этой цепочки является изготовление партии пластин с кристаллами микросхем. В силу исключительно высокой стоимости современных субмикронных кристальных производств изготовление многих типов изделий неизбежно будет осуществляться на фабриках (в том числе зарубежных), работающих по коммерческим технологиям и не обладающих системами менеджмента качества, которые соответствовали бы требованиям производства изделий космического или военного применения. Это предполагает наличие соответствующих точек входа в технологической цепочке для несертифицированных комплектующих в виде полуфабрикатов пластин с кристаллами микросхем. Технически возможно провести сертификацию таких пластин на территории Российской Федерации с дальнейшим производственным циклом на отечественных предприятиях.

Развитие технологий трехмерной сборки (3D) позволяет реализовать многослойные структуры со встроенными активными и пассивными компонентами, объединяющими в единой микроминиатюрной конструкции функционально законченный узел.

Применение такого рода технологий в космическом приборостроении позволит не только уменьшить массу и габариты систем как минимум в 5–10 раз по сравнению с существующими сегодня, но и повысить надежность за счет сокращения числа паяно-сварных соединений, улучшения теплофизических характеристик конструкции и снижения стоимости в серийном изготовлении за счет унификации конструктивов, схемных и аппаратных решений.

Примером технологий трехмерной сборки для изделий типа «система-в-корпусе» является разработка компании EADS, включающая процессорное ядро, интерфейсные схемы и схемы памяти (рис. 4.18) [42]. Применение подобных модулей позволяет уменьшить массу и габариты перспективной аппаратуры в 10–12 раз по сравнению с существующими уровнями.

Типовой узел такой системы в корпусе характеризуется следующими параметрами:

- максимальные линейные размеры: 150 × 250 мм;
- количество кристаллов: 1–20 шт.;
- количество компонентов поверхностного монтажа: до 100 шт.;
- количество микросварок: 250 шт.;
- тип подложки: многослойная низкотемпературная керамика;

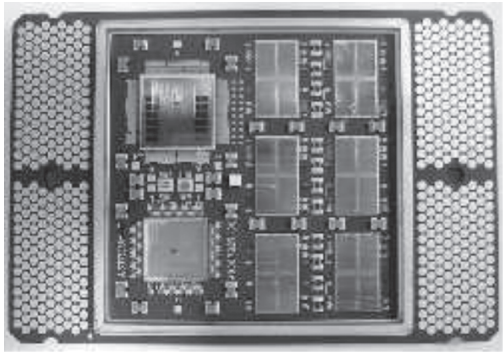


Рис. 4.18. Система в корпусе компании EADS

- герметичный корпус с контролируемой атмосферой;
- объем партий: 1–500 в зависимости от спроса на рынке;
- серийность и номенклатура: мелко- и среднесерийное многономенклатурное производство.

На основе обобщения вышеизложенного мирового опыта организации работ по созданию ЭКБ КН можно предложить аналогичные схемы организации взаимодействия для отечественных разработчиков и изготовителей РЭА КН и центров проектирования ЭКБ КН. На рис. 4.19 [43] представлены базовые элементы такой системы обеспечения и контроля качества отечественной ЭКБ КН.

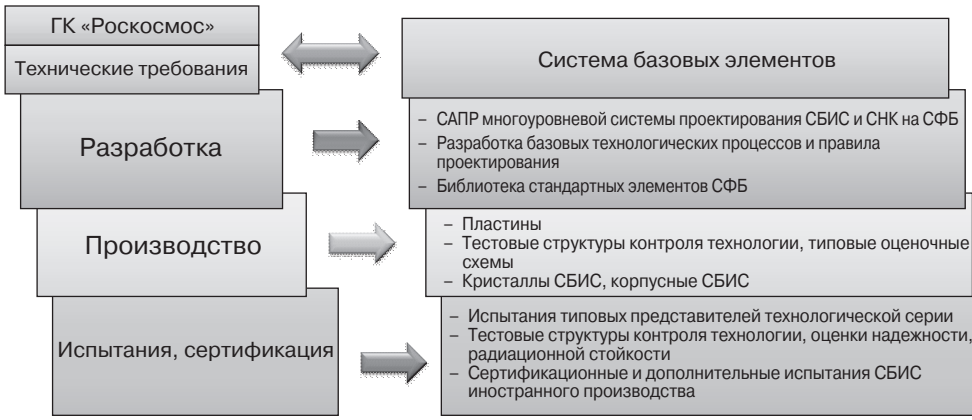


Рис. 4.19. Базовые элементы системы обеспечения и контроля качества ЭКБ КН

Рис. 4.20. Алгоритм взаимодействия разработчиков-изготовителей РЭА КН и центров проектирования СБИС КН [43]

На рис. 4.20 [43] представлен один из возможных для этого случая алгоритмов организации взаимодействия разработчиков и изготовителей РЭА КН и отечественных дизайн-центров, специализирующихся в области проектирования ЭКБ КН.

4.8. Ускоренные испытания ЭКБ КН на надежность

Проведение ускоренных (экстремальных) испытаний на безотказность и устойчивость ИМС является эффективным способом оперативного получения информации о надежности планируемых к применению ИМС в тех случаях, когда требуется в сжатые сроки оценить надежностные параметры поставленной изготовителем партии приборов, а также в случае использования субмикронных технологий изготовления этих ИМС, поскольку для технологий глубокого субмикрона не всегда имеется обширная база данных о надежностных характеристик.

Так, отсутствуют сведения о физико-химических процессах и механизмах деградации в структурах интегральных микросхем, изготавливаемых по КМОП технологиям с топологическими нормами от 0,09 мкм и менее.

Существующий и активно используемый в настоящее время в отечественной практике документ РД 11 0755-90 «Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность» был выпущен еще в далеком 1990 г. и является единственным отраслевым документом, содержащим справочные данные по такому важному компоненту надежности, как энергии активации основных механизмов отказов в структурах интегральных микросхем. К сожалению, справочные данные в РД 11 ограничиваются известными к концу 80-х гг. значениями для передовых в то время микроэлектронных технологий с топологическим нормами 2,0–1,0 мкм.

Спустя более 30-ти лет существенно повысились как уровень контроля технологий, так и качество производства интегральных микросхем, а топологические нормы достигают уже субмикро- и наноразмеров. С развитием программных технических средств обеспечения качества производства современной электронной компонентной базы, повышением стабильности воспроизведения параметров полупроводниковых структур выросли и значения энергий, необходимых для активации как уже ранее известных, так и новых механизмов отказов в структурах ЭКБ, а соответственно, повысились и показатели надежности производимой ЭКБ.

В последние годы современные интегральные схемы демонстрируют отсутствие отказов при достижении миллиардов элемент-часов по результатам ускоренных испытаний, о чем говорят данные отчетов по надежности ведущих мировых производителей [45–48]. Так, по данным крупнейшего в мире Центра исследования надежности (Reliability Information Analysis Center) (по состоянию на 2010 г.), распределение отказов радиоэлектронной аппаратуры общегражданского назначения по причинам возникновения выглядит следующим образом (рис. 4.21).

Отказы аппаратуры по причине дефекта комплектующих за последние 15–20 лет снизились от 30 до 22%, что подтверждает возросшую надежность ЭКБ за счет повышения качества технологий и применения современных систем управления этим качеством.

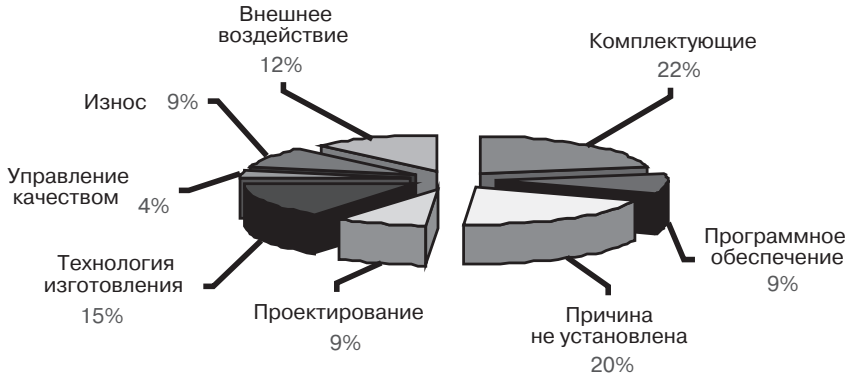


Рис. 4.21. Диаграмма распределения причин отказов радиоэлектронной аппаратуры

Анализ данных рис. 4.21 позволяет сделать ряд других интересных выводов. Так, несмотря на улучшение качества микроэлектронных технологий, использования в микроэлектронном производстве самых современных методов и аппаратуры контроля качества, почти стопроцентную роботизацию технологических процессов и исключение человеческого фактора в задании режимов выполнения всех технологических операций, 15% отказов РЭА обусловлены дефектами, внесенными в ходе реализации технологических процессов изготовления блоков и узлов РЭА. Причем еще 4% отказов обусловлены недостатками в системах управления качеством изготовления РЭА. Вклад ошибок в программном обеспечении и вносимых в процессе проектировании РЭА примерно одинаков (по 9%), но тем не менее остается недопустимо высоким. Еще 9% добавляет износ (старение, усталость металла, деградация, характеристик пластмасс и т.д.).

На этом фоне величина в 22% отказов комплектируемых изделий является недопустимо высокой и ставит перед проектировщиками и технологами микроэлектронных производств задачу разработки соответствующего комплекса мероприятий по увеличению надежности современной ЭКБ.

А принимая во внимание тот факт, что практически в каждом пятом случае (20%) отказов РЭА их истинная причина не была однозначно установлена, можно предположить, что и дефекты комплектующих изделий внесли свой вклад в этот сегмент неполадок РЭА, что только обостряет проблему надежности ЭКБ.

Поскольку аналогичные данные в статистическом распределении причин отказов РЭА специального (военного и космического) назначения по понятным причинам не публикуются в открытой периодической печати, можно с большой долей вероятности распространить эту картину и на эту сферу специальной микроэлектроники.

Таким образом, в сложившейся в отечественной отрасли ситуации производители интегральных схем и независимые испытательные центры вынуждены использовать для экспериментальной оценки надежности современных изделий справочные данные, полученные на основании экспериментальных исследований заведомо менее надежных изделий, изготовленных в соответствии с технологиями конца 80-х гг. прошлого века.

Как следует из данных отечественной периодической печати за последние 5-7 лет для решения проблемы ускоренной оценки показателей надежности современных интегральных схем в отечественных испытательных центрах выполняется ряд исследований, направленных на развитие методов ускоренных испытаний на безотказность и наработку до отказа применительно к микросхемам с субмикронными размерами элементов. Основной целью выполнения этих работ является внесение соответствующих дополнений в новую редакцию РД 11 0755-90 «Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность».

Суть этих работ заключается в исследовании образцов отечественных и зарубежных современных интегральных схем с целью дополнения «Таблицы 1 РД 11» значениями энергий активации механизмов отказов для КМОП технологий с топологическими нормами следующего типоряда: 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,35, 0,42; 0,5; 0,6; 1,0 мкм. Определение значений энергий активации механизмов отказов осуществляется путем выборки для проведения испытаний в соответствии с методом 2-1 РД 11 «Определение энергии активации на основе параллельных испытаний выборок в различных режимах», где проводятся испытания не менее трех выборок при трех различных температурах, а сами выборки формировались из интегральных схем, указанных в табл. 4.13. Наработки испытуемых выборок достигают 10 000,0 ч. В основном среди исследуемых выборок присутствуют микросхемы памяти и ПМС как обладающие максимальной плотностью упаковки, а диапазон используемых для их изготовления проектных норм включает полный ряд от 1,0 мкм до 0,12 мкм.

Таблица 4.13. Структура выборки испытываемых микросхем

Типономинал	Изготовитель	Технология изготовления, мкм	Температуры испытаний выборок, °С
СОЗУ 4М	ОАО «НИИМЭ и Микрон»	0,18	
СОЗУ 8М		0,09	
5559ИН19У	ЗАО «ПКК «Миландр»	0,18	
1636РР1У		0,25	130
1645РУ1У		0,35	140
1886ВЕ1У		0,6	150
5559ИН14У		0,6	
1645РУ2Т		1,0	
XC95216-10PQ1601	Фирма «Xilinx Incorporation»	0,5	
XC2V250-5FG256I		0,12	
XCV300E-6BG352I		0,12	
XCV300E-6BGG432I		0,12	85
XC V4010E-3PQ208I		0,35	105 125
EPF10K50RI240-4N	Фирма «Altera»	0,42	
EPM7128SQI-100-10		0,5	
EP2C50F484C6N		0,09	

По результатам экспериментальных исследований этих интегральных микросхем определяются численные значения средних энергий активации механизмов отказов. В результате проведенных испытаний были получены значения средних энергий активации механизмов отказов субмикронных интегральных микросхем на уровне 0,7–0,8 эВ в диапазоне температур от 71 до 150 °С. Использование в расчетах этих значений энергий активации повышает значения коэффициентов ускорения испытаний на безотказность в 2-3 раза по сравнению с предыдущими значениями.

Значения энергий активации механизмов отказов для диапазонов температур на 25–70, 151–200, 201–250 °С определяются расчетным путем в соответствии с правилом Вант-Гоффа для температурного коэффициента скорости химической реакции $y = 2$ [5].

Проект дополнения табл. 1 РД 11 по результатам экспериментальных исследований интегральных схем, выполненных в ОАО РНИИ «Электростандарт», показан в табл. 4.14.

Таблица 4.14. Дополнение табл.1 PD11 0755-90 в части методов ускоренных испытаний

Группа интегральных микросхем	**Значение средней энергии активации отказов при различных температурах кристалла (перехода), эВ**			
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}	E_{a4}
	25–70 °С	**71–150 °С**	**151–200 °С**	**201–250 °С**
КМОП 1,0–0,5 мкм	0,84–0,95 эВ	0,78–0,83 эВ	0,7–0,62 эВ	
КМОП 0,5–0,09 мкм				

Параллельно исследованиям образцов интегральных схем в этом испытательном центре проводятся такие исследования встроенных тестовых структур аналогично испытаниям интегральных схем также на трех выборках при трех различных температурах. По результатам исследований тестовых структур также могут определяться энергии активации отдельных механизмов отказов для современных технологий изготовления интегральных микросхем, что необходимо для развития РД 11 в части «Метода прогнозирования показателей надежности на основе ускоренных испытаний тестовых структур».

В табл. 4.15 представлены номенклатура испытуемых тестовых структур и соответствующие им исследуемые механизмы отказов.

Полученные значения энергий активации отдельных механизмов отказов позволяют проводить расчетно-экспериментальную оценку средних значений энергий проектируемых активаций интегральных схем уже на начальных этапах разработки и при необходимости оперативно вносить соответствующие применения в процесс проектирования.

Дополнение РД 11 0755 информацией по результатам испытаний позволит разработчикам и потребителям интегральных схем использовать более достоверные исходные данные для планирования ускоренных испытаний на надежность.

Таблица 4.15. Использование текстовых структур для ускоренных испытаний

Тестовые структуры для испытаний	Активируемые механизмы отказов	Определяемые величины
Параллельные металлизированные шины, в том числе с переходными контактами	Электродиффузия, электромиграция (разрушение металлизации)	Энергия активации для Al Cu металлизации
Параллельные змейки металлизации минимальной ширины (0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 мкм) и с минимальным (0,45; 0,5; 0,6 мкм) зазором (без проходных контактов в каждом слое; с переходными контактами металл–металл во всех слоях; с контактами	Зарядовая нестабильность в слое окисла и на границе окисла с полупроводником (дрейф порогового напряжения, повышение канальных утечек, потеря заряда в РПЗУ, случайные изменения содержимого ячеек памяти)	Энергия активации изменения порогового напряжения, энергия активации канальных утечек
Металл-полупроводник. 100 параллельно включенных, изолированных n-канальных транзисторов минимальных размеров (W = 0,5 мкм, L = 0,35 мкм) с общим истоком, стоком, подложкой и затвором.	Электрический пробой (пробой тонкого окисла; микропробои, приводящие к повышенным утечкам; пробой p-n переходов диффузионных областей)	Энергия активации пробоя тонкого подзатворного окисла, энергия активации пробоя p-n перехода
100 параллельно включенных, изолированных p-канальных транзисторов минимальных размеров (W = 0,5 мкм, L = 0,35 мкм) с общим истоком, стоком, подложкой и затвором.	Утечки по поверхности между диффузионными шинами (дефекты фотолитографии, уходы параметров за нормы ТУ)	Энергия активации утечек по поверхности между шинами металлизации
Группы транзисторов разделяются перемычкой слоя металла по стокам (для возможности ее механического разрушения при анализе и подсчете отказавших элементов).	Взаимодействие металлизации с полупроводником на границе	Энергия активации взаимодействия металлизации с полупроводником
	Дефекты объема кристалла	Энергия активации проявления дефектов кристалла

Для получения достоверной базы данных в части значения энергий активации механизмов отказов в структурах интегральных микросхем необходимо наблюдать достаточное количества отказов интегральных микросхем в каждой испытуемой выборке. Накапливание большой статистики результатов испытаний способствует повышению правильности оценки и достоверности соответствия полученных эмпирически результатов энергиям активации механизмов отказов, присущих интегральным микросхемам с субмикронными топологическими нормами.

4.9. Анализ результатов испытаний микросхем, закупленных в РФ в период с 2009 по 2011 г.

Как было показано выше, к сожалению, в силу ряда объективных причин одной из устойчивых тенденций последних лет по применению ЭКБ при проектировании КА является увеличение потребления микроэлектронных элементов иностранного производства (ЭКБ ИП). Использование ЭКБ ИП при создании систем управления стратегически значимых объектов и перспективных КА требует повышенного внимания к ее уровню качества.

Ниже приведены опубликованные в открытой печати результаты многолетних исследований и испытаний иностранной ЭКБ, проведенных за определенный период времени в головной в России организации – в испытательном центре ОАО «РНИИ «Электронстандарт», который обладает многолетним опытом про-

ведения сертификационных испытаний ЭКБ ИП и, естественно, большим объемом статистического материала по уровню ее качества.

Следует привести ряд опубликованных сотрудниками этой организации данных, которые безусловно будут полезны для всех разработчиков современных КА, поскольку эти данные основаны на результатах статистического анализа имеющейся достоверной информации [34].

Ниже приведены некоторые важные результаты статистического анализа испытаний микросхем ИП, проходивших в испытательном центре ОАО «РНИИ «Электронстандарт» в период 2009–2011 гг. При этом основными первичными характеристиками выбранной совокупности микросхем являлись следующие.

1. По **составу выборки** исследуемых микросхем:
   а) элементы – интегральные и гибридные микросхемы;
   б) производители – продукция 105 фирм.
2. По **объему выборки** элементов для проведения тестовых испытаний:
   - общий объем – 99 836 микросхем (почти сто тысяч);
   - количество типономиналов микросхем – 1102 (почти каждый в перечне разрешенных «Роскосмосом»).
3. По независимым факторам, повлиявшим на формирование выборки, учитывались следующие основные факторы:
   - маркетинговая политика фирм – производителей микросхем, обеспечившая продвижение своей продукции на российский рынок;
   - знания разработчиками систем управления КА рынка ЭКБ ИП и их способность выбрать микросхемы, исходя из модели внешних воздействующих факторов;
   - факты закупок, осуществляемых различными вторыми поставщиками;
   - состав и результаты сертификационных испытаний, проводимых этим испытательным центром (РНИИ «Электронстандарт»).

Целью этого анализа (РНИИ «Электронстандарт») было определение качественного состава элементов в выборке и выявление наиболее востребованных разработчиками элементов.

В основу статистического анализа были положены следующие факторы:

1) определение номенклатурного состава ЭКБ иностранного производства, поступивших от разработчиков КА для испытаний этой ЭКБ по уровням качества и радиационной стойкости,
2) оценка фирм-производителей ЭКБ по следующим основным показателям: общий объем поставок, объем поставок микросхем с зафиксированным уровнем качества, объем поставок радиационно-стойких микросхем,
3) определение конкретных типов микросхем – лидеров поставок исходя из объемов заказа разработчиков и производителей электронных систем отечественных КА.

В свою очередь, анализ каждой выборки микросхем проводился в два этапа.

На первом этапе анализировалась информация о конкретной фирме-производителе микросхем, в частности – ее общественное признание мировым сообществом. В качестве критерия такого общественного признания использовался признак наличия оценки качества технологий и продукции фирмы одной из го-

сударственных организаций, связанных с оценкой ЭКБ для высокотехнологических приложений (в первую очередь военных и космических). Как было отмечено выше, в настоящее время в процессе оценки уровня качества ЭКБ и формирования соответствующих ограничительных перечней наиболее существенную роль играют следующие международные организации:

- Центр военных поставок в Коламбусе (Defense Supply Center Columbus – DSCC), входящий в состав Управления материально-технического снабжения МО США (Defense Logistics Agency, DLA);
- Центр космических полетов имени Р.Х. Годдарда (Goddard Space Flight Center, GSFC), входящий в состав Национального комитета по астронавтике и исследованию космического пространства США (National Aeronautics and Space Administration, NASA);
- Европейский совет по координации космических компонент (European Space Components Coordination, ESCC), действующий в составе Европейского управления космических исследований (European Space Agency, ESA);
- Японское агентство аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA).

По результатам статического анализа на этом этапе все подобные фирмы были разделены на две группы. В 1-ю группу фирм-производителей входили фирмы, у которых хотя бы одно из подразделений получило соответствующую оценку уровня качества в одной из вышеперечисленных организаций, т.е. вошло в один из так называемых «ограничительных перечней» производителей (QML). Во 2-ю группу фирм-производителей входили фирмы, не имеющие такого общественного признания уровня качества своей продукции, но, тем не менее, выдавшие соответствующие сертификаты получателям ЭКБ в РФ.

На втором этапе анализа экспертами рассматривается вопрос обоснованности признания соответствующего присвоенного уровня качества каждого конкретного типономинала микросхемы.

Прежде всего для микросхем, производимых квалифицированными производителями, по спецификациям, выпущенным одним из перечисленных выше центров (квалифицированная ЭКБ ИП), выявляются присвоенный данному типономиналу класс уровня качества, а также уровень радиационной стойкости. Эти данные определяют принципиальную возможность использовать эти микросхемы в высоконадежных космических и военных приложениях.

Для микросхем, производимых фирмами по своим внутренних спецификациям (как правило, это коммерческая ЭКБ ИП), в процессе анализа возможно их отнесение к одному из следующих двух видов исполнения:

а) для применения в индустриальных условиях эксплуатации – при наличии у фирмы-производителя сертификатов о соответствии данной продукции стандартам (в основном по внешним воздействующим факторам, условиям испытаний и контроля продукции в процессе производства) одной из негосударственных профессиональных организаций: Международная электротехническая комиссия – IEC, Объединенный совет по электронным устройствам Ассоциации электронной промышленности США – EIA, Совет по автомобильной электронике – AEC и т.д.;

б) для применения в коммерческих условиях эксплуатации – процесс производства и процедуры контроля характеристик изделия определяются внутренней документацией фирмы исходя из рыночных условий.

Анализ всей совокупности исследуемых микросхем уже на первом этапе показал, что только четвертая часть (конкретно – 26,7%) производителей (а это всего лишь 28 фирм) была официально включена в известные (опубликованные) ограничительные перечни Минобороны США. Неожиданно даже для самих исследователей продукции действительно квалифицированных на законных основаниях производителей космической отрасли (по соответствующим ограничительным перечням GSFC, ESCC, JAXA) вообще не было выявлено.

С другой стороны надо отметить, что оценка качественного состава общего объема закупок микросхем российскими потребителями показала, что 67,4% таких микросхем были произведены на фирмах, где как минимум одно из подразделений входит в известный ограничительный перечень квалифицированных производителей Минобороны США.

Статистический рейтинг фирм-производителей поставляемых в РФ микросхем (по общим объемам поставок) представлен на рис. 4.22. Как видно из этого рисунка, в группе квалифицированных производителей (рис. 4.22*а*) десять фирм (TOP 10) обеспечили поставки около 60% всего объема микросхем. При этом необходимо отметить, что в данной группе явными лидерами являются только две фирмы:

- Analog Devices – это 16 889 микросхем в выборке (16,9%), всего поставлено 163 типономинала;
- Texas Instruments – это 16 677 микросхем в выборке (16,7%), всего поставлено 175 типономиналов.

Только две этих фирмы за весь анализируемый период в совокупности поставили в РФ не менее 338 типономиналов микросхем общим объемом не менее 33 500 штук.

Ближайшие конкуренты среди фирм 1-й группы (National Semiconductor, Intersil, Linear Technology, International Rectifier) согласно статистике отстают от этих лидеров поставок по объемам поставляемой продукции примерно в три раза. Объемы поставок продукции остальных фирм-производителей 1-й группы не превышают для каждой фирмы всего лишь 2,5% от общего объема выборки.

Не менее интересным является тот факт, что десять лидирующих фирм-производителей 2-й группы (рис. 4.22*б*), обеспечили поставки уже около 23% от всего объема микросхем, предназначенных для специальных (военных и космических) применений, что является весьма существенным для результатов, полученных по фирмам 1-й группы. Явным лидером в данной группе является фирма Maxim, продукция которой составляет 7109 микросхем в выборке (7,1%) из 75 типономиналов. Ближайшие конкуренты в данной группе фирм отстают от этого лидера по объемам продукции в 2–3 раза, и вклад поставляемой ими продукции в общей совокупности поставляемых по импорту микросхем следующий:

- Samsung – 3816 микросхем в выборке (3,8%), 7 типономиналов;
- Agilent Technologies – 2794 микросхем в выборке (2,5%), 13 типономиналов;
- Mini-Circuits – 2793 микросхем в выборке (2,5%), 59 типономиналов.

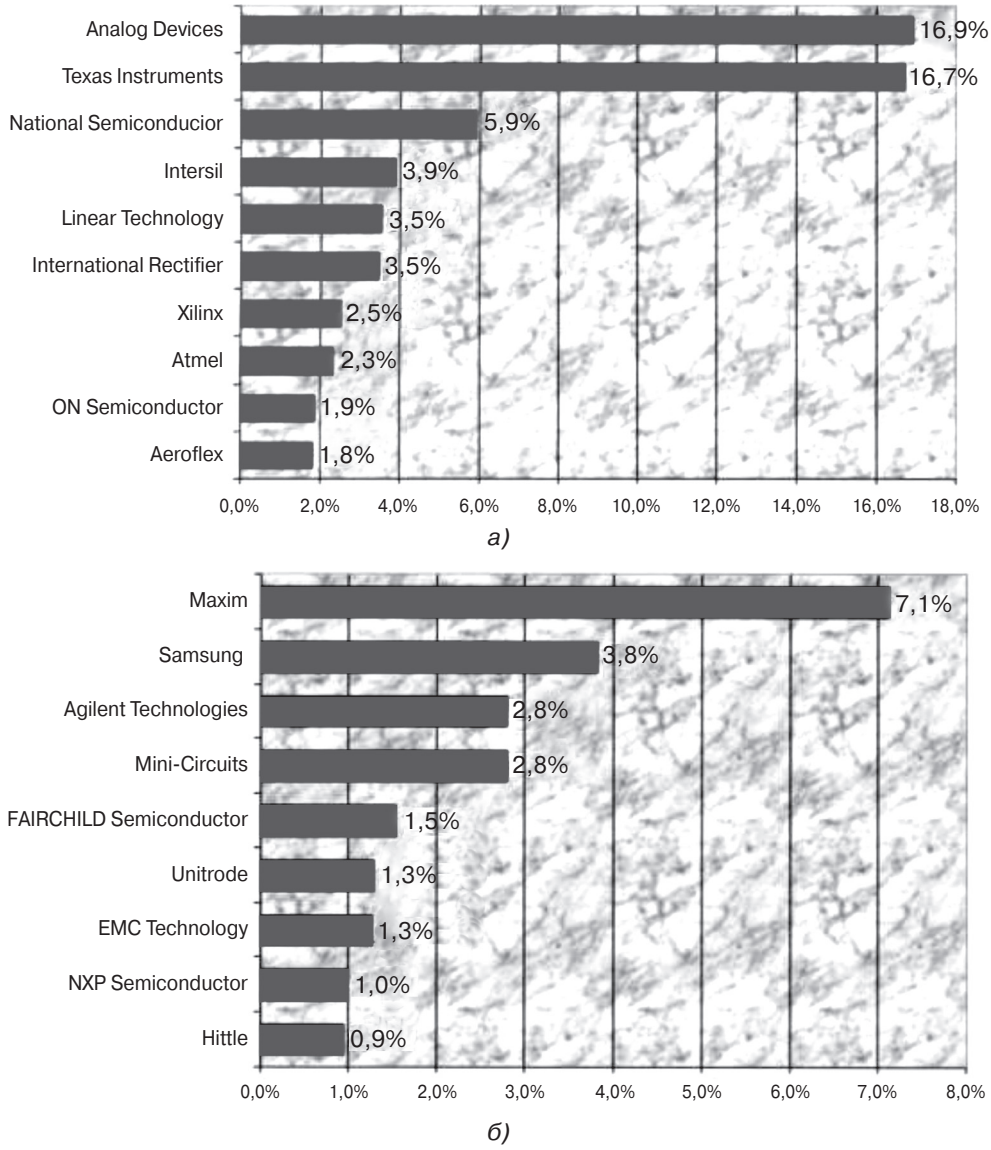


Рис. 4.22. Рейтинг фирм-производителей по объемам поставок в РФ микросхем за период с 2009 по 2011 г.: TOP 10 фирм, являющихся квалифицированными производителями (*а*); TOP 10 фирм, не вошедших в ограничительные перечни (*б*)

Объемы поставок продукции остальных фирм-производителей 2-й группы не превышают для каждой фирмы 1,5% от общего объема выборки.

На втором этапе этого статистического анализа общей совокупности микросхем основное внимание экспертов уделялось качественным показателям микросхем, которые были заказаны и закуплены для создания радиоэлектронной аппаратуры различных стратегически важных объектов. В первую очередь это относится к

дифференциации всей выборки на две большие группы по уровню качества поставляемых микросхем – КВАЛИФИЦИРОВАННАЯ (элементы для военных и космических приложений, выпускаемые по нормативной документации, выпущенной госструктурами) и КОММЕРЧЕСКАЯ (элементы, выпускаемые по нормативной документации фирм). Анализ выборки этих микросхем на втором этапе статического анализа показал, что в заказах предприятий-разработчиков РЭА на микросхемы иностранного производства средняя доля коммерческой элементной базы достигает недопустимо большой величины – 88,1%, и только 11,9% из этих микросхем вошли в так называемый мастер-перечень квалифицированных производителей.

Это в какой-то мере ответ на риторический вопрос «неспециалистов»: почему так часто падают российские ракеты? При этом данная категория микросхем в заказах различных предприятий, по данным «Электростандарта», весьма существенно различается [18].

Так, для ОАО «РКК «Энергия» доля коммерческой элементной базы составила всего 28%.

Для ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» доля коммерческой элементной базы составила 77%.

Для ФГУП «ЦНИИ «Комета» доля коммерческой элементной базы – 90%.

И для ОАО «ИРЗ» доля коммерческой элементной базы достигала 99%.

Авторы предостерегают читателей этой книги от поспешных дилетантских выводов типа «так вот почему и так часто мы имеем проблемы с отечественными спутниками», хотя эти статистические данные заслуживают серьезного технического анализа, что не является задачей данной книги.

Статистический анализ результатов испытаний группы микросхем, выпущенных на предприятиях, входящих в перечень квалифицированных производителей (QML) и зафиксированных в перечнях производимой ими продукции (Master Listing of QML), показал, что можно выделить семь основных подгрупп исходя из того, по какой нормативно-технической документации выпускается эта микросхема и какой класс качества ей присваивается. Результаты такого статистического анализа представлены на рис. 4.23.

Как видно, группа микросхем наивысшего уровня качества, предназначенных для космических приложений (квалификацию класса качества уровня «S»), составила всего лишь 29% (процентный состав дан от выборки микросхем, вошедших в мастер-перечень продукции). При этом только 22,3% из них составляют микросхемы, изготовленные по стандартным спецификациям (Standardized Microcircuit Drawing – SMD), а 6,7% – это микросхемы, имеющие маркировку конкретного производителя с указанием его выпуска по сертификационной программе QML.

Группа микросхем, предназначенная для применения в военных приложениях (квалификация класса качества уровня «B»), составила тоже небольшую величину – 15,8%. Из них микросхемы, изготовленные по стандартным спецификациям, составляют всего 14,1%, а микросхемы, имеющие требуемую маркировку производителя с указанием на выпуск по программе QML, всего лишь 1,7%.

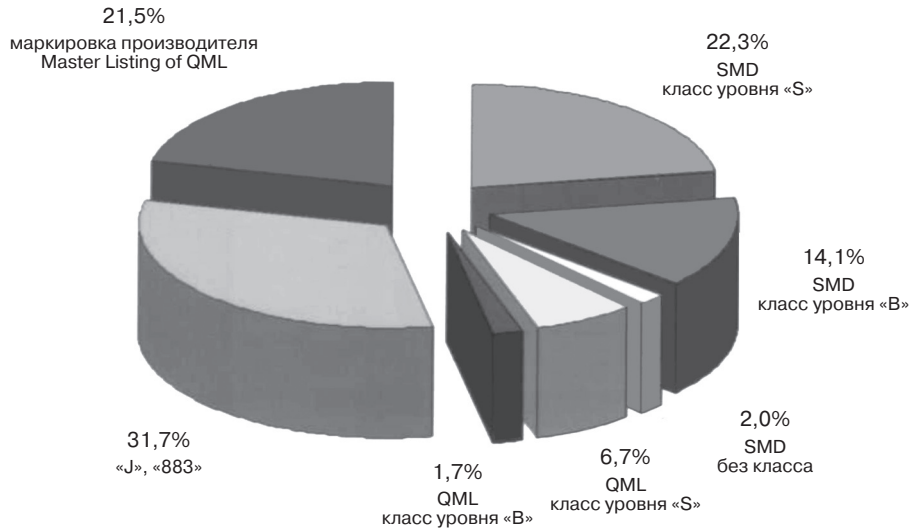


Рис. 4.23. Распределение поставленных в РФ микросхем по группам уровня качества за период с 2009 по 2011 г.

В то же время исследуемая группа микросхем, являющихся по заявленной документации коммерческими аналогами военных образцов, составила 21,5%. В данной группе – микросхемы, имеющие маркировку производителя и вошедшие в перечень продукции, выпускаемой предприятием, имеющим статус квалифицированного производителя (Master Listing of OML). Кстати, разработчиком РЭА КН следует знать, что фактически данная группа микросхем является всего лишь коммерческой продукцией, предназначенной для применения в индустриальных условиях эксплуатации (условия применения определены МО США, процесс производства и контроля параметров микросхем определяется внутренними документами фирмы-производителя) .

Наиболее представительной из специализируемой выборки (31,7%) является группа микросхем, произведенная по переходным программам, использующим военные нормативные документы и имеющие маркировку производителя с указанием на выпуск по программе «J» или «883».

Конечно, у любознательного читателя вызовет многочисленные вопросы к отечественным разработчикам РЭА КН тот неожиданный факт, что при этом радиационно-стойкие микросхемы составляют всего лишь 4,4% от всего объема совокупности закупленных в РФ микросхем. Конкретно – за весь анализируемый специалистами «Электронстандарта» период времени было закуплено всего лишь 52 типономинала радиационно-стойких микросхем. Результаты же анализа всего объема закупленных радиационно-стойких микросхем представлены отдельно на рис. 4.24.

Как видно, наиболее доступными (или же наиболее популярными у разработчиков) оказались микросхемы, представленные на рис. 4.24*а*. При этом всего лишь около половины таких радиационно-стойких микросхем имели наивысший уровень качества, соответствующий применению в космических приложениях

(рис. 4.24*б*). Необходимо отметить, что на втором месте по объему (31,3%) оказалась группа радиационно-стойких микросхем, являющихся коммерческими аналогами военных образцов. В этой подгруппе было 1389 микросхем 19-ти типономиналов.

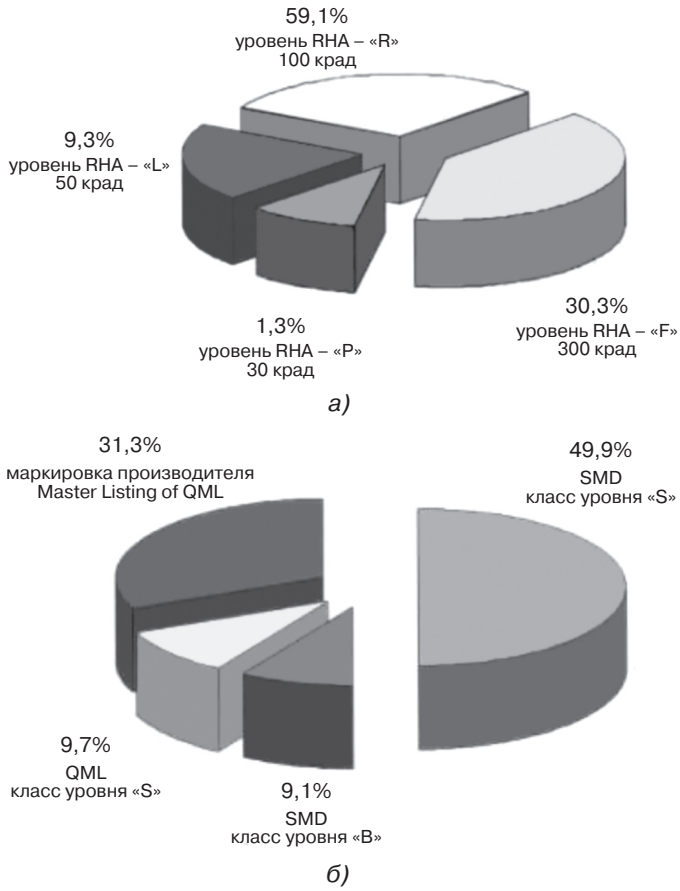


Рис. 4.24. Оценки выборки радиационно-стойких микросхем, поставленных в РФ в период с 2009 по 2011 г.: распределение по присвоенным уровням радиационной стойкости (*а*); распределение по группам уровней качества (*б*)

Дальнейший анализ высококачественной элементной базы по их производителям показал, что в данной номинации этот список существенно отличается от желаемого высокого рейтинга по общим объемам поставки микросхем. Для удобства представления и визуализации результатов анализ производился по микросхемам, уровень качества которых зафиксирован одной из сертифицированных организаций – GSFC, ESCC, JAXA, а также по микросхемам в радиационно-стойком исполнении, уровень радиационной стойкости которых был где-то ранее подтвержден и документально зафиксирован. Данные такого упрощенного статистического анализа представлены на рис. 4.25.

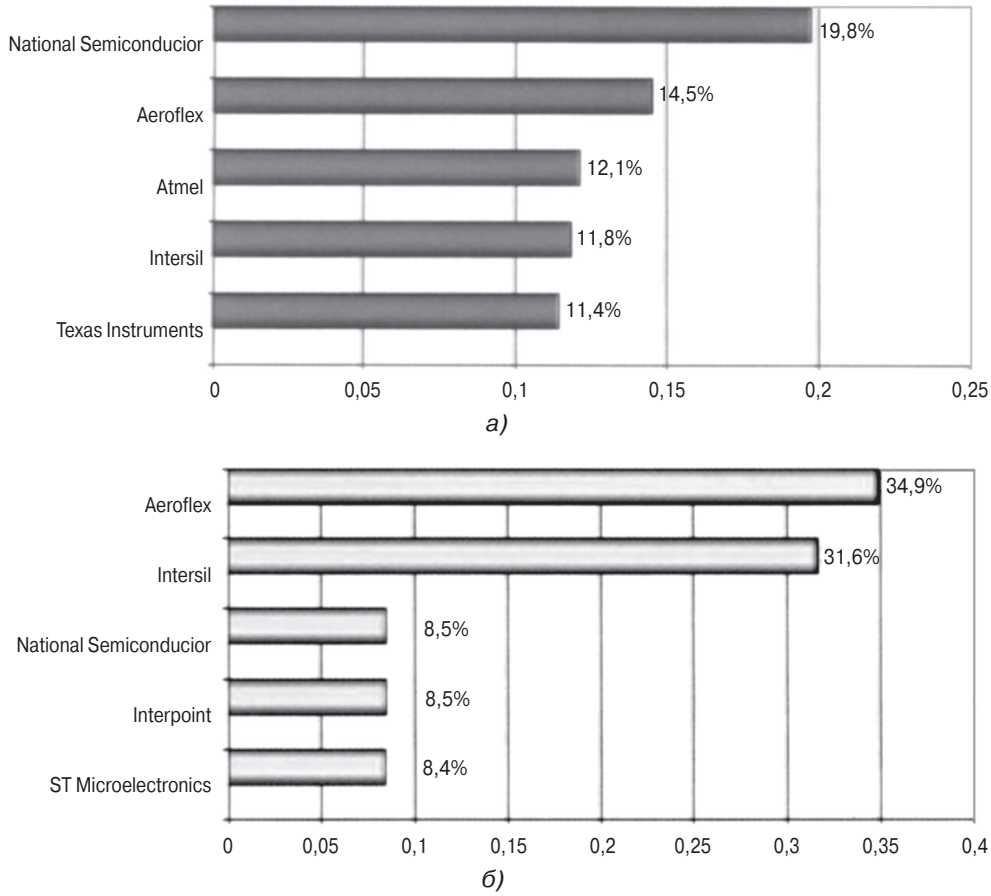


Рис. 4.25. Рейтинг поставщиков микросхем: микросхем для космических и военных приложений (*а*); радиационно-стойких микросхем (*б*)

Всего в поставках квалифицированных по уровню качества микросхем за анализируемый период времени участвовало 17 (меньше половины) фирм из 28, вошедших в 1-ю группу производителей на первом этапе анализа. Основные фирмы-производители, вошедшие в так называемый TOP-5 производителей высококачественных микросхем (по их объему в выборке), представлены на рис. 4.25*а*. Следует отметить, что общий объем высококачественных микросхем, поставленных этой пятеркой производителей в РФ, составляет 69,7%. Остальные 30,3% высококачественных микросхем (3619 шт., 77 типономиналов) были поставлены 12-ю другими производителями.

Всего же в поставках радиационно-стойких микросхем в РФ за анализируемый период времени участвовало 6 иностранных фирм. Эти основные фирмы-производители, вошедшие в TOP-5 производителей радиационно-стойких микросхем (по их объему в выборке), представлены на рис. 4.25*б*. Следует отметить, что общий объем радиационно-стойких микросхем, поставленных этой пятеркой производителей, составляет 92,0%. Остальные же 8,0% радиационно-стой-

ких микросхем (357 шт., 7 типономиналов) были изготовлены всего лишь двумя зарубежными фирмами – Analog Devices и Xilinx.

Представляют интерес и микросхемы-лидеры закупок, выявленные по результатам проведенного анализа, которые представлены на рис. 4.26. В данную группу вошли микросхемы, объемы закупок которых превышают 1000 ед. Что касается лидеров поставок в РФ, необходимо отметить следующее:

- объемы поставок в анализируемый период составляют всего лишь 11 типономиналов микросхем;
- все поставленные в РФ микросхемы не были изготовлены для космических и военных приложений, что оставляет ряд важных вопросов без ответа;
- поставляемые (закупленные) микросхемы не являются радиационно-стойкими, что ставит еще один ряд аналогичных вопросов.

Исходя из вышеприложенного в части результатов анализа микросхем, закупленных в РФ в период 2009–2011 гг., можно дать некоторые общие рекомендации по выбору микросхем иностранного производства.

1. Статистический анализ микросхем, предназначенных для использования в аппаратуре стратегически значимых объектов и поступивших в испытательный центр ОАО «РНИИ «Электронстандарт» (закупки 2009–2011 гг.), показал, что большой объем составляют элементы коммерческого уровня, а объем радиационно-стойких элементов крайне незначителен.
2. Почему-то практически не используются огромные потенциальные возможности известных на мировом рынке специализированных фирм с надежной репутацией, производящих высоконадежные микросхемы для военных и космических приложений.

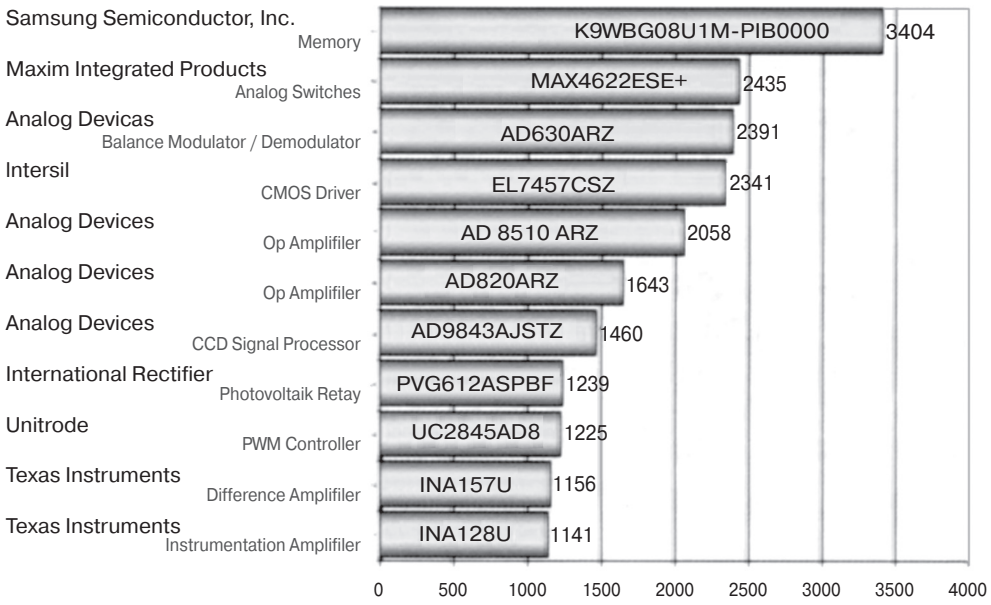


Рис. 4.26. Микросхемы-лидеры закупок ЭКБ в РФ за период с 2009 по 2011 г.

3. Обширность номенклатуры закупаемых типономиналов элементов, имеющих одинаковое функциональное назначение, однозначно указывает на исключительно низкий уровень унификации элементной базы аппаратуры, использующей эту ЭКБ ИП.
4. Представительность анализируемой совокупности микросхем (по их количеству, номенклатуре типономиналов и множеству других факторов, влияющих на процесс ее формирования) позволяет предположить, что сделанные в результате анализа выводы, к сожалению, можно распространить на всю генеральную совокупность микросхем иностранного производства, поступающих в распоряжение отечественных разработчиков РЭА космического и специального (военного) назначения, в том числе и в последующий после анализируемого авторами период времени. Последнее обстоятельство должно являться предметом уже не научного исследования, а рассмотрения отечественных специалистов с другими (не техническими) красными дипломами о высшем образовании.

Литература к главе 4

1. Кочемасов Д.В., Кувшинов В.В., Строганова Е.П. Качество электронных и радиоэлектронных компонентов для современной промышленности // Компоненты и технологии. – 2012. – № 1. – С. 17–20.
2. http://pmddtc.state.gov/regulations_laws/aeca.html
3. http://export.stanford.edu/lists.html
4. Cheadle Sh. Defense priority ratings: know the rules. – Microwave journal, June 2003. – P. 102–108.
5. Chandler Joe. ITAR: what does it mean for you? – Military microwaves supplement, August 2008. – P. 8–19.
6. http://www.access.gpo.gov/bis/ear
7. Cheadle Sh. Are you up to date on export compliance? – Military microwaves supplement, August 2008. – P. 8–19.
8. Cheadle Sh. Export compliance: understanding ITAR and EAR. – Microwave journal, October 2005. – P. 80–91.
9. Ferraro E., Gunter D. Cold war to counter drug. – Microwave journal, March 1998. – P. 82–91.
10. Fallon J. U.S. Export Control Reform: getting it right this time. – Military microwaves supplement, August 2011. – P. 6–18.
11. Shankar Bh. European pacts to challenge US dominance. – Microwave journal, June 1998. – P. 90–92.
12. Викулов И. Модернизация военной ВЧ- и СВЧ-электроники в Европе // Электроника: НТБ. – 2011. – № 3. – С. 86–89.
13. Новые экспортные правила поставки в Россию АЦП Linear Technology // Компоненты и технологии. – 2011. – № 8. – С. 18.
14. Данилин Н.С., Белослудцев С.А. Проблемы применения современной индустриальный электронной компонентной базы иностранного производства в ракетно-космической технике // Современная электроника. – 2007. – № 7.
15. Урличич Ю.М., Данилин Н.С. Проблемы качества и долговечности современного космического приборостроения. – М.: МАКС Пресс, 2003.

16. Урличич Ю.М., Данилин Н.С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. – М.: МАКС Пресс, 2003.
17. Урличич Ю.М., Данилин Н.С., Белослудцев С.А. Многоплановые инженерно-физические исследования электронной компонентной базы для космоса. – М.: МАКС Пресс, 2005.
18. Басаев А.С., Денисов А.Н., Конякин В.В., Сухоруков А.Г. Технологические испытания – инструмент обеспечения надежности ЭКБ космического назначения // Петербургский журнал электроники. – 2011. – № 2. – С. 7–14.
19. Кондратьев В. Функциональные испытания для выявления контрафактных и нестандартных компонентов // Электронные компоненты. – 2013. – № 7. – С. 15–17.
20. A Functional Test Approach for Countereit, Substandart and High Risk Microcircuit Detection / www.kozio.com
21. Рыков И. Как выявить контрафактные электронные компоненты? // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 4. – С. 38–42.
22. International Chamber of Commerce. Estimating the global economic and social impacts of counterfeiting and piracy. February 2011.
23. SAE. Counterfeit electronic parts; avoidance, detection, mitigation, and disposition. 2009// http://standards.sae.org/as5553
24. CTI. Certification for counterfeit components avoidance program. September 2011 // www.ctius.com/pdf/CCAP101Certification.pdf
25. IDEA. Acceptability of electronic components distributed in the open market // www.idofea.org/products/118-idea-std-1010b.
26. X. Zhang, N. Tuzzio, and M. Tehranipoor. Identification of Recovered ICs using Fingerprints from a Light-Weight On-Chip Sensor. Proc. of IEEE/ACM on Design Automation Conference (DAC). 2012.
27. R. Pappu. Physical one-way functions. Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology. 2001.
28. G. Suh and S. Devadas. Physical unclonable functions for device authentication and secret key generation. Proc. of IEEE/ACM on Design Automation Conference (DAC). 2007.
29. U.S. Department Of Commerce. Defense Industrial Base Assessment: Counterfeit Electronics. January 2010.
30. M. Tehranipoor and C. Wang. Introduction to Hardware Security and Trust. Springer. 2012.
31. A. Grochowski, D. Bhattacharya, T. Viswanathan, and K. Laker. Integrated circuit testing for quality assurance in manufacturing: history, current status, and future trends. Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. IEEE Transactions on. – Aug 1997. – Vol. 44. – No. 8. – P. 610–633.
32. Tom Saven and Terry Harvell. Low Cost Electrical Test for Counterfeit Device Detection. US Tech Magazine. 2013. March.
33. US Congress. National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2012 // www.gpo.gov
34. Захаров А.С., Малинин В.Г., Сапега А.В. Иностранные микросхемы в стратегической РЭА // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 3. – С. 37–42.
35. Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х., Булаев И.Ю. Особенности семейства микропроцессоров LEON 3FT // Петербургский журнал электроники. – 2012. – № 3. – С. 69–75.
36. Жданкин В. Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии LS обеспечивают надежность космического уровня // Современная электроника. – 2011. – № 8. – С. 12–17.
37. Steve Butler. Selecting the Correct Level of DC-DC Converter for Your Application. VPT White Paper // www.vpt-inc.com

38. Abhijit D. Pathak, Arturo Arroyo. Rad- Hard DC/DC Converters Deliver Space-Grade Reliability // www.epn-online.com
39. Hybrid-High Reliability Radiation Hardened DC-DC Converter. LS-Series 28VInput, Single/Dual Output. IRF Datasheet // www.irf.com
40. Josh Broline, Nick Vanvonno, Theju Bernard. Latest Radiation Hardened Power Management Products Solve New Design Challenges. Intersil White Paper // www.intersil.com
41. Space Qualified, Radiation Tolerant Point-Of-Load Converters Combine High Efficiency and Electrical Performances in a Small Form Factor // www.miiitaryaerospace. com.
42. Жданкин В. DC/DC-преобразователи CRANE Electronics: результаты испытаний на воздействие радиации – экзамен сдан / Z www.cta.ru
43. www.elcomdesign.ru/market/interview/ Перспективы развития электронных компонентов для бортовой аппаратуры космических систем
44. Мироненко Л., Юдинцев В. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы по базе промышленной технологии // Электроника: НТБ. – 2012. – № 8. – С. 74–86.
45. Quality and Reliability Handbook, 6 February 2012, ON Semiconductor.
46. Quality and Reliability Report, First Quarter 2012, Silicon Laboratories.
47. Reliability Datapack, April 2011, Linear Technology.
48. Reliability report, 2nd quarter 2009, Microchip.

ГЛАВА 5

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

5.1. Основные тенденции изменения параметров энергопотребления микроэлектронных устройств

Вследствие быстрого прогресса технологий производства полупроводниковых интегральных схем, в частности, перехода к субмикронным и наноэлектронным технологиям, возникают новые задачи в области проектирования микроэлектронных устройств, реализованных на основе данных технологий. Одной из таких задач является разработка специальных технологических решений и конструкций устройств с низким энергопотреблением [1]. Актуальность данной задачи определяется следующими основными факторами:

- микроэлектронные устройства космического назначения должны сочетать высокую надежность, радиационную стойкость и требуемое быстродействие с низким потреблением энергии, в том числе с целью достижения заданной продолжительности автономной работы устройств;
- необходимость снижать потребляемую мощность для решения проблемы отвода тепла, так как это в значительной степени определяет надежность и массогабаритные показатели устройств;
- возможность создания сложнофункциональных изделий – процессорных БИС, систем на кристалле, систем на пластине и др. со сверхбольшой степенью интеграции.

Чтобы лучше понять сущность проблемы снижения энергопотребления микроэлектронной элементной базы, рассмотрим тенденцию изменения во времени важнейших технических характеристик микропроцессоров – базовых элементов построения любых вычислительных и управляющих устройств. Такими параметрами являются тактовая частота работы F микропроцессора, определяющая производительность устройства, и мощность потребления $P_{И}$. Развитие микропроцессоров, появившихся в 1971 году (Intel-4004), подчиняется известному закону Мура. На рис. 5.1 представлена динамика изменения рабочей частоты микропроцессоров с момента их появления на рынке по настоящее время. Здесь представлены только основные типы микропроцессоров фирмы Intel, наиболее широко используемые в промышленных системах.

На рис. 5.2 для этих же типов микропроцессоров представлена тенденция изменения их мощности потребления.

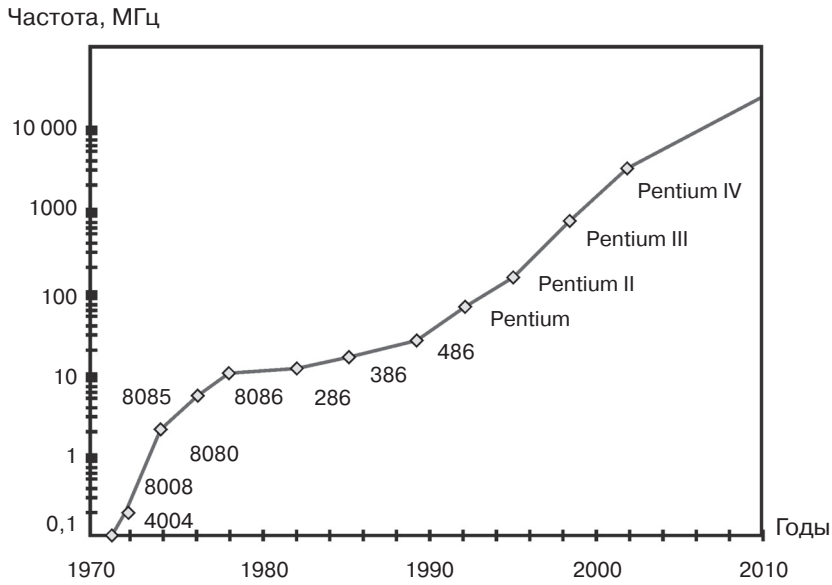


Рис. 5.1. Изменение рабочей частоты микропроцессоров фирмы Intel

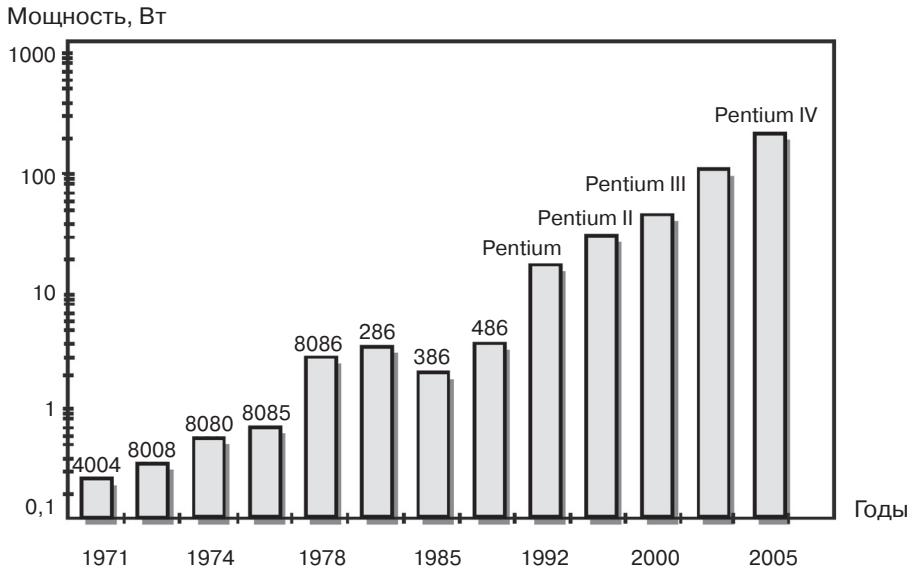


Рис. 5.2. Тенденции изменения мощности потребления микропроцессоров фирмы Intel

Как видно из сравнения этих двух рисунков, обе характеристики(F и P_W) также подчиняются действию закона Мура – практически каждые полтора-два года происходит удвоение их численных значений. При этом следует иметь в виду, что и другие их характеристики – разрядность, функциональная сложность и степень интеграции также практически удваиваются в среднем каждые полтора года.

Эта тенденция носит универсальный характер и наблюдается не только у микропроцессоров, но и у остальных типов микроэлектронных устройств – микросхем памяти, процессоров цифровой обработки сигналов, аналоговых мультиплексоров, цифро-аналоговых БИС и др. [2, 3, 4, 5].

Таким образом, с одной стороны, наблюдается тенденция непрерывного уменьшения геометрических размеров элементов (транзисторов, диодов, резисторов) микросхем, с другой стороны – аналогичная тенденция непрерывного увеличения потребляемой от внешних источников и рассеиваемой на кристалле мощности. И здесь на первый план выходят проблемы теплоотвода: каким образом отводить от кристалла тепло, выделяющееся в объеме кристалла микросхемы в результате рассеивания этой возрастающей мощности и как обеспечить надежность функционирования базовых элементов (транзисторов) и микросхемы в целом?

Для анализа этой проблемы удобно использовать такой параметр, как плотность мощности, или удельная мощность (P_{WS}), имеющая размерность [Вт/см^2] [3]. На рис. 5.3 представлены значения этого параметра для тех же микропроцессоров мирового лидера в этой области фирмы Intel, разработанные и поставленные этой фирмой на рынок за последние тридцать лет с момента появления первого микропроцессора.

Характер изменения с течением времени этого параметра представляет собой интерес для понимания последующего изложения материала книги.

Так, после разработки и появления на рынке хорошо зарекомендовавшего себя микропроцессора Intel-8080 разработчиками был сделан следующий шаг – были спроектированы и поставлены на рынок две новые усовершенствованные версии – Intel-8085 (1974 год) и Intel-8086 (1976 год), отличавшиеся более широкими функциональными возможностями по сравнению с прототипом. При этом было обеспечено увеличение тактовой частоты Intel-8085 в 1,27 раза, Intel-8086 в 1,75 раза по сравнению с прототипом. Как видно из рис. 5.2, при этом примерно в таком же соотношении возросла и величина потребляемой ими мощности.

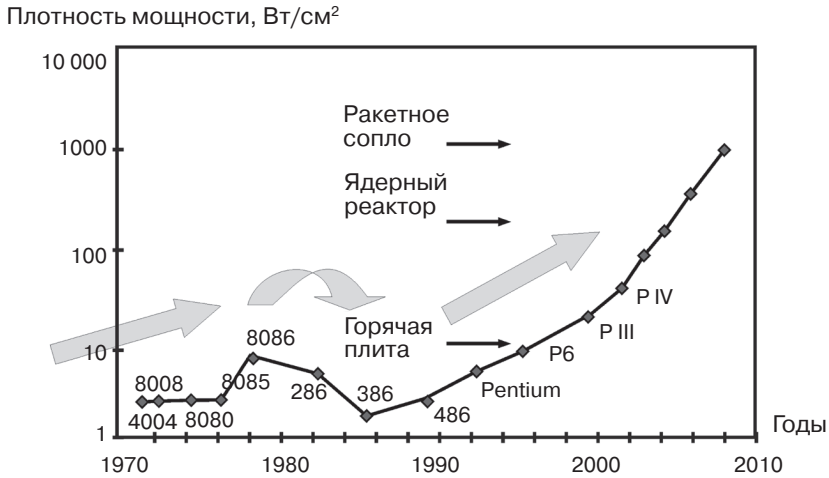


Рис. 5.3. Изменения плотности мощности для поколений микропроцессорных БИС

Разработчики радиоэлектронной аппаратуры – потребители изделий фирмы Intel – были удовлетворены расширением функциональных возможностей и повышением тактовой частоты, что позволяло им повысить производительность своих устройств. Однако уже тогда для разработчиков фирмы Intel прозвучал первый тревожный звонок – от части потребителей начала поступать информация о сбоях в работе отдельных блоков, на платах которых были поставлены микропроцессоры Intel-8086. От потребителей микропроцессора Intel-8085 таких сигналов разработчикам фирмы не поступало. В результате проведенного анализа была установлена причина, впоследствии названная экспертами эффектом горячей плиты (рис. 5.3) и обусловленная более высоким (в 1,8 раз) значением потребляемой микропроцессором Intel-8086 мощности, по сравнению с Intel-8080, для микропроцессора Intel-8085 этот коэффициент увеличения составил 1,1. Сущность этого эффекта заключалась в нарушении условий работоспособности транзисторов микропроцессора из-за недостаточного теплоотвода.

В это же время в разрабатывающих подразделениях фирмы создавался микропроцессор следующего поколения Intel-286, характеристики которого для того времени позволяли существенно расширить функциональные возможности вычислительных и управляющих систем на его основе.

В результате реализации разработчиками комплекса конструктивно-технологических и схемотехнических решений удалось возникшую проблему решить – если значения частоты и потребляемой мощности микропроцессора Intel-286 по сравнению с аналогичными параметрами Intel-8086 возросли всего на 10–15% против планировавшихся 25–30%, то величину удельной мощности P_{WS} при этом удалось даже уменьшить (рис. 5.3).

Найденные технические решения, наряду с переходом на новые проектные нормы, позволили впоследствии для более сложных поколений микропроцессоров (Intel-386, 486, Pentium.pro и последующих) обеспечить значения P_{WS}, не превышающие численные значения P_{WS} для Intel-8086, на котором впервые у разработчиков эта проблема проявилась.

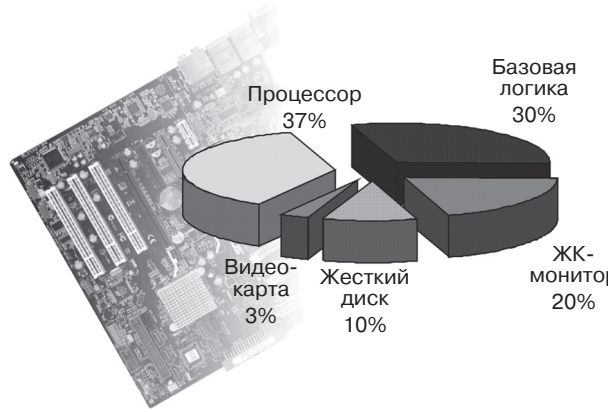


Рис. 5.4. Типовое распределение энергопотребления персонального компьютера класса Notebook

Как показано на рис. 5.3, всего лишь на один-два порядка величин отличает достигнутые для микроэлектронных изделий (микропроцессоров) значения P_{WS} от величин, характерных для материалов, работающих в космической технике (сопло ракетного двигателя) или в ядерной энергетике (ядерный реактор), что подтверждает актуальность задачи поиска путей уменьшения P_{WS}.

На рис. 5.4 представлена диаграмма [3], поясняющая актуальность проблемы снижения потребляемой мощности для одного из классов изделий вычислительной техники – персонального компьютера класса Notebook [6]. Так, если устройство отображения информации – дисплей потребляет только 20% от всей потребляемой компьютером мощности, а жесткий диск – 10%, то «сердце» компьютера (процессор) забирает в среднем 37% мощности, а базовая логика обрамления, без которой нельзя реализовать все сервисные функции компьютера, забирает до 30% всей потребляемой мощности.

5.2. Пути уменьшения величины рассеиваемой мощности в КМОП БИС

Два последних десятилетия лидирующее положение на рынке полупроводниковых интегральных схем занимает КМОП-технология. Успешная реализация всех функциональных модулей вычислительных систем по этой технологии позволила создавать на одном кристалле функционально законченные устройства с высокой степенью интеграции. Это значительно увеличило функциональную насыщенность кристалла, снизило массогабаритные параметры конечного продукта, увеличило его производительность и уменьшило потребление энергии. Например, в 2007 году фирма Intel начала массовое производство процессора с рабочим названием Penryn, который изготавливается по техпроцессу 45 нм в двух конфигурациях: двухядерной (около 410 млн транзисторов) и четырехядерной (более 820 млн транзисторов) [7]. При этом, несмотря на значительное увеличение количества транзисторов и возрастание функциональных возможностей (добавлено порядка 50 новых инструкций Intel SSE4 для увеличения производительности обработки мультимедийных данных), величина потребляемой мощности нового процессора не увеличилась. Так, процессор мобильного компьютера потребляет порядка 35 Вт, настольной системы – порядка 65 Вт и порядка 80 Вт – четырехядерный серверный процессор.

Для микронных КМОП-технологий львиную долю рассеиваемой мощности составляет динамическая, которая определяется током заряда-разряда паразитной емкости узла и сквозным током от источника питания к общему проводу в момент изменения логического уровня. В последующих главах будут представлены основные методы, позволяющие уменьшить величину рассеиваемой мощности на этапах проектирования КМОП БИС.

Не существует универсального решения, которое было бы применимо во всех возможных ситуациях. Поэтому необходимо учитывать особенности проектируемого устройства (такие как быстродействие, затраты на реализацию, надежность, тестируемость, ремонтопригодность и т.п.) для выбора методов и средств минимизации потребления энергии.

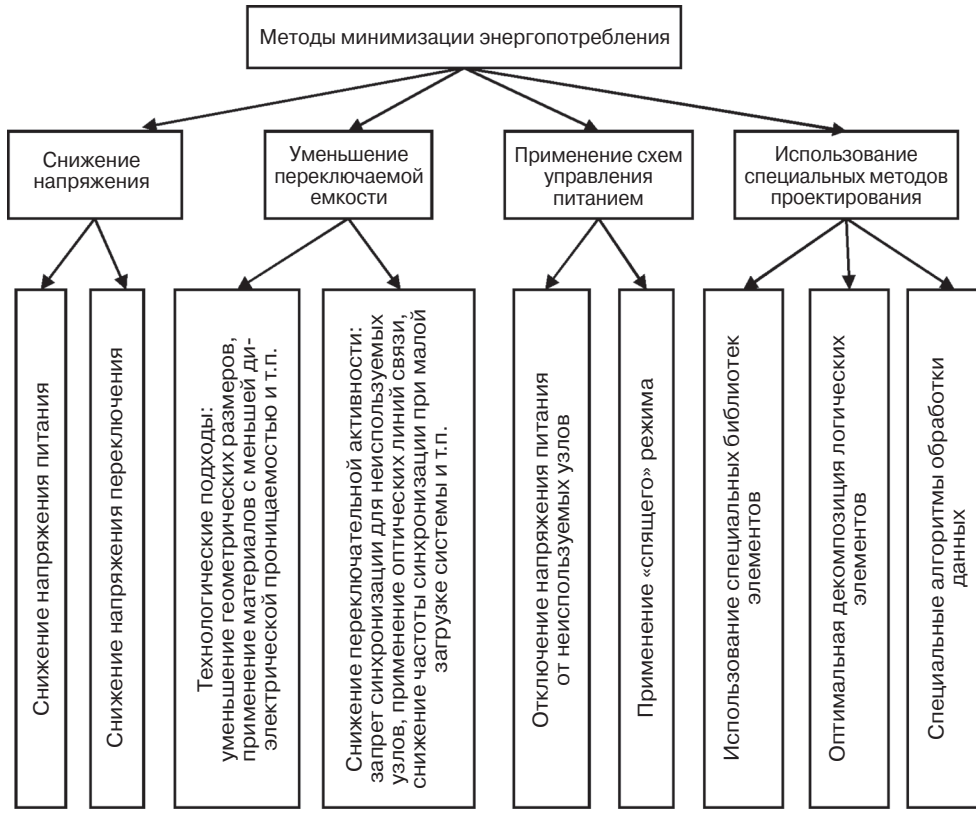


Рис. 5.5. Классификация основных методов минимизации потребления энергии при проектировании КМОП БИС

Рассмотрим основные подходы, применяемые комплексно или в отдельности для уменьшения потребления энергии при проектировании КМОП БИС [2, 3, 7, 8, 9, 10, 11].

На рис. 5.5 представлена обобщенная классификация основных используемых методов минимизации энергопотребления.

При использовании традиционных КМОП-технологий (минимальные размеры элементов не переходят в субмикронную область) основную долю рассеиваемой микросхемами мощности составляет динамическая. Снижение любого параметра – напряжения питания, напряжения переключения, величины перезаряжаемой емкости или частоты переключения – приводит к уменьшению величины рассеиваемой мощности.

Традиционно наибольшее внимание ученых было направлено на снижение величины напряжения питания. Это связано с тем, что для большинства КМОП схем напряжение питание равно переключаемому напряжению. Между динамической рассеиваемой мощностью и напряжением питания БИС существует квадратичная зависимость. Кроме того, при уменьшении напряжения питания одновременно уменьшается и статическая мощность.

В совершенствовании микромощных СБИС можно выделить по крайней мере три основных направления [12]. Первое – минимизация потребляемой мощности для микросхем телекоммуникационных устройств и переносных компьютерных систем за счет их модернизации на системном уровне. Большинство разработок сфокусировано на снижении напряжения питания и тактовой частоты с одновременным распараллеливанием обработки информации. При этом создание систем базируется на КМОП схемотехнике и, соответственно, на существующей технологической базе. Некоторые успехи в этом направлении связаны с использованием чисто системных решений, и в частности альтернативных систем синхронизации, таких как самосинхронизация и т.п. Выигрыш по мощности при этом достигается в основном за счет совершенствования архитектуры самих систем [1].

Второе направление можно охарактеризовать как схемотехническое. Использование возможностей САПР СБИС с целью укорочения путей передачи информации в пределах цифровой СБИС позволяет уменьшить потребляемую мощность за счет уменьшения тактовой частоты, но без потери быстродействия. Снижение потребляемой мощности достигается, в частности, за счет использования проходных ключей и других схемотехнических приемов. Этот подход также базируется в основном на традиционной КМОП технологии [13, 14, 15].

Третье направление – разработка новых технологических процессов и маршрутов изготовления СБИС.

Для нового поколения навигационных и телекоммуникационных систем, включающих в качестве основных составляющих и вычислительные системы, наиболее перспективной по-прежнему остается технология КМОП. Данное направление рассматривается как основное и включает совершенствование процессов фотолитографии с целью уменьшения топологических размеров [16]; разработку способов уменьшения (подгонку) пороговых напряжений n- и p-канальных МОП транзисторов [17].

Снижение мощности – сложная комплексная, многоплановая проблема. Ее решение зависит от прогресса в каждом из трех данных направлений. Все они в качестве теоретической основы используют известную зависимость потребляемой мощности от напряжения питания (E), тактовой частоты (f) и эффективного значения паразитной емкости (C), определяемую формулой:

$$P = kC\Delta UEf + I_C E + I_{ут} E, \tag{5.1}$$

где k – фактор переключательной активности элементов; C – эффективное значение паразитной емкости логического вентиля; ΔU – размах логических уровней; I_C – сквозной ток в переходном процессе; $I_{ут}$ – ток утечки в стационарных состояниях.

В настоящее время наблюдается высокая научно-исследовательская и патентная активность по всем трем направлениям минимизации потребляемой мощности КМОП БИС для средств телекоммуникаций и портативных средств вычислительной техники. Создание новых схемотехнических решений не требует больших временных затрат, дорогостоящих физических и технологических экспериментов и, соответственно, нового дорогостоящего технологического оборудования

и материалов. Задачи решаются методом численных экспериментов с помощью различных пакетов САПР [18]. Однако этот путь предполагает наличие у фирмы-разработчика большого интеллектуального потенциала. В данном направлении работают мощные зарубежные фирмы IBM, AT&T Bell Lab., Intel Corp., Motorola Corp. и университеты. На территории СНГ это направление развивают НПО «Интеграл» (г. Минск), ОАО «Микрон», «Ангстрем» (г. Москва, г. Зеленоград).

Схемотехнический путь тесно связан с технологическим и системным, но имеет свои специфические особенности. Рассмотрим выражение (2.1) для мощности, потребляемой базовым вентилем КМОП типа. При $\Delta U = E_n$ формула (5.1) приобретает вид:

$$P = kCE^2f + I_C E + I_{ут} E. \qquad (5.2)$$

Величина коэффициента переключательной активности k зависит от конкретного вида системы и имеет значение, равное или меньшее единицы. Цель технологического подхода – уменьшение значений эффективной емкости и токов утечки МОП транзисторов в стационарном состоянии. Однако основная составляющая потребляемой мощности – динамическая. Мощность, обусловленная сквозным током, обычно составляет около 30 процентов. Как видно из выражения (5.2), уменьшение питающего напряжения обычных КМОП схем – один из самых эффективных и очевидных путей снижения энергии переключения. Это особенно верно в отношении стандартных КМОП вентилей, для которых мощность переключения пропорциональна квадрату напряжения питания. Однако существует предел уменьшения питающего напряжения, связанный с технологическим разбросом параметров элементов, особенно с разбросом пороговых напряжений МОП транзисторов [19]. При снижении напряжения питания разброс задержек между вентилями увеличивается до тех пор, пока некоторые вентили не перестанут работать правильно, что случается при напряжении питания, лишь слегка превышающем наибольшее из пороговых у n-МОП и p-МОП транзисторов. Так как типичное пороговое напряжение лежит в пределах от 0,4 до 0,9 В, то это устанавливает нижний предел питающего напряжения приблизительно в 1 В для общепринятого КМОП технологического процесса.

Хотя пороговое напряжение может быть подогнано в процессе производства, а пределы его изменения – сужаться за счет улучшения технологии, оба эти пути трудны и дорогостоящи. Всегда существует неконтролируемый технологический разброс порогового напряжения между транзисторами, являющийся случайной функцией качества полупроводниковой пластины и места расположения на ней прибора. Произвольная флуктуация порогового напряжения возникает даже между двумя идентичными приборами из-за того, что процесс ионной имплантации, используемый для задания $U_{пор}$, плохо поддается точному контролю.

В относительно малых субмикронных транзисторах, используемых в цифровых интегральных схемах, такое произвольное несоответствие $U_{пор}$ обратно пропорционально квадрату длины канала с коэффициентом пропорциональности от 4 до 30 мВ/мкм. При коэффициенте 4 мВ/мкм стандартная девиация $U_{пор}$ для тран-

зистора 4 мВ на 1 мкм должна быть только 2 мВ. Даже прибор, случайно выбранный из триллиона, имеет только 10 мВ-ный сдвиг величины $U_{пор}$. Таким образом, в случае совершенного технологического процесса этот коэффициент близок к 4 мВ/мкм. Но здесь сравниваются идентичные приборы, в реальных же цифровых схемах идентичных приборов нет. К примеру, вследствие анизотропной природы производственного процесса простой поворот пластины на 90 или даже 180° может привести к существенному изменению $U_{пор}$.

Один из возможных методов компенсации разброса пороговых напряжений – электронная подгонка [2], где предлагается модифицировать производственный процесс для достижения малых величин $U_{пор}$ (около 0,12 В) и варьировать подзатворный потенциал на обоих n-МОП и p-МОП приборах, чтобы скомпенсировать вариацию $U_{пор}$, возникающую в технологическом процессе. В этом подходе есть три недостатка. Прежде всего, он требует изменения базового производственного процесса. Кроме того, так как быстродействие пропорционально питающему напряжению, во многих случаях имеет смысл питать различные блоки ИС разным напряжением. Здесь же все приборы на подложке связаны общей подзатворной коррекцией и, следовательно, имеют одинаковый порог. И, наконец, приборы, имеющие только очень низкое пороговое напряжение, крайне затрудняют понижение мощности схемы, так как большие токи утечки могут протекать, даже когда вентили закрыты.

Последние две проблемы в принципе решаемы путем создания подзатворной коррекции независимо для каждого прибора. Однако достигаемый при этом разброс пороговых напряжений ограничен снизу подзатворным потенциалом и допустимым диапазоном внутренних потенциалов. Другой подход – добавление комплиментарной пары транзисторов с большим пороговым напряжением – используется для достижения энергии переключения 300 фДж на вентиль при питании в 1 В. Однако пороговое напряжение в этом случае устанавливается не за счет подзатворного потенциала. Недостаток обоих решений – усложнение технологического процесса и увеличение стоимости микросхемы.

В работе [19] предложена так называемая методика QuadRail (четыре шины), которая позволяет снизить питающее напряжение при сохранении стандартных КМОП производственных процессов. Суть этого оригинального подхода, позволяющего схемотехнически скомпенсировать разброс порогов МОП транзисторов, – использование двух отдельных пар шин «питание–земля» с разницей в напряжении между ними, изменяя которую можно сглаживать вариацию порогов у МОП транзисторов на пластине. Пороговые напряжения транзисторов, расположенных в карманах, устанавливаются по отношению к приборам, расположенным на подложке, за счет варьирования потенциала их кармана. QuadRail методология теоретически дает возможность снизить питающее напряжение до 0,25 В при сохранении стандартного серийного КМОП технологического процесса. Результаты моделирования и экспериментальных измерений подтверждают работоспособность таких схем и достижение значения энергии переключения менее 40 фДж, что в 400 раз ниже по сравнению с пятивольтовым КМОП базисом.

В работе [20] описана так называемая «схема с пульсирующим потреблением мощности» (PPS) КМОП, которая позволяет уменьшить мощность рассеяния

обычных КМОП примерно в десять раз (рис. 5.6). Управляющая схема периодически возбуждает шину питания пилообразными сигналами, действующими между шинами V_{DD} и V_{SS}. В течение спадающего фронта импульса питания паразитные емкости обеспечивают сохранение логических состояний интегральной схемы. Все импульсы имеют амплитуду в интервале с границами V_{SS} (логический нуль) и V_{DD} (логическая единица). В начале спада на входе инвертора имеет место логический нуль, p-канальный транзистор выключен из-за того, что напряжения на затворе и истоке одинаковы. Однако когда напряжение превысит пороговое, n-канальный МОП транзистор открывается и состояние выхода инвертора сохраняется. В то же время при нулевом напряжении, приложенном к входу инвертора, когда напряжение на шине питания возрастает, n-канальный МОП транзистор всегда закрыт, поскольку напряжение между затвором и истоком равно нулю. При превышении на шине питания порогового напряжения p-канальный транзистор открывается и напряжение на выходе инвертора будет следовать за напряжением на шине питания. Если два инвертора соединить последовательно, то импульс, приложенный к первому инвертору, пройдет через два инвертора и воспроизведется на выходе третьего. Таким образом, состояние двух или более последовательно соединенных логических элементов может быть определено во время возрастающего фронта перепада. Когда перепад напряжения достигнет величины V_{DD}, все инверторы получат возможность работать как обычные КМОП схемы. При уменьшении перепада напряжения до логического нуля состояние поддерживается паразитными емкостями.

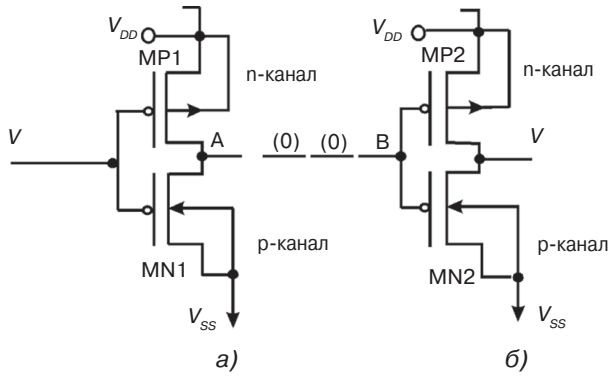


Рис. 5.6. Принцип работы КМОП инвертора с пульсирующим потреблением мощности

В работе [20] также предложено техническое решение, которое может обеспечить небольшую экономию мощности в КМОП схемах при переключении больших емкостных нагрузок (рис. 5.7). Это решение нацелено на использование в узлах КМОП схем, которые работают с большими значениями нагрузочной емкости (когда емкость много больше, чем емкость затвора с минимальными размерами). Аналогично варианту PPS КМОП оно полностью совместимо с обычной КМОП технологией, что весьма важно для быстрого внедрения.

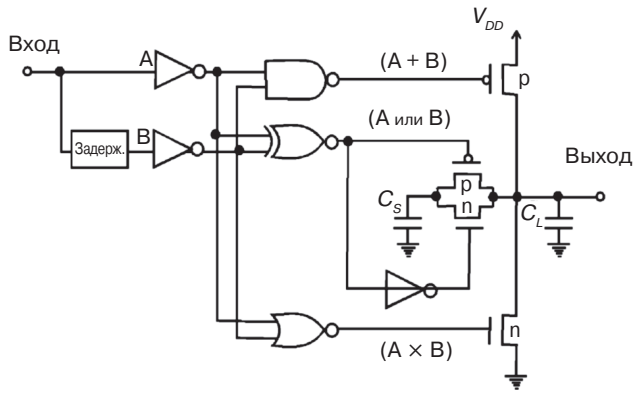


Рис. 5.7. Схема КМОП инвертора для работы с большими емкостными нагрузками

Каждый раз, когда классический вентиль КМОП переходит из состояния логической единицы в состояние логического нуля, сбрасывается на землю заряд, накапливаемый в паразитной емкости выходного узла. Этот бесполезно потерянный заряд обусловливает динамическую составляющую мощности потребления обычного КМОП вентиля, определяемую как

$$P = Q_L \Delta U, \tag{5.3}$$

где Q_L – заряд, накопленный на паразитной емкости в состоянии логической единицы.

В предложенной схеме (рис. 5.7) введен дополнительный буфер с емкостью C_S. Во время разряда узловой емкости на землю при переходе из состояния логической единицы в состояние логического нуля буфер снимает некоторый заряд с паразитной емкости выходного нуля и сохраняет его на другой емкости C_S. Во время следующего перехода из состояния логического нуля в состояние логической единицы буферная схема возвращает сохраненный заряд в выходной узел, уменьшая заряд, а следовательно, ток, потребляемый от источника питания. Мощность, сэкономленная буфером, определяется выражением:

$$P = Q_S \Delta U f. \tag{5.4}$$

При передаче заряда из нагрузочной емкости в емкость C_S без рассеяния мощности на резистивных элементах схемы сохраненный заряд определяется формулой:

$$Q_S = \frac{C_S C_L \Delta U}{2C_S + C_L}. \tag{5.5}$$

Таким образом, процент экономии мощности составит:

$$Э = \frac{C_S}{2C_S + C_L} 100\%. \tag{5.6}$$

Для отношений величин емкостей C_S и C_L, равных 1/4, 1, 4, сохраненная мощность будет соответственно 16,7; 33,3; 44,4 и 50 процентов. Результаты моделирования схемы с помощью компьютерной системы SPISE показали 24%-ную экономию мощности.

Рассмотренные схемотехнические решения открывают новые возможности уменьшения потребляемой мощности КМОП СБИС. Общая черта зарождающихся новых стилей проектирования – стремление вписаться в существующие недорогие стандартные КМОП технологии, чтобы избежать больших финансовых затрат на модернизацию производства. Технические решения разнообразны, но их можно сгруппировать в несколько классов: схемы с импульсным питанием; с сохранением заряда; с электронной компенсацией разброса пороговых напряжений и т.п. [21].

Формирующиеся стили проектирования – результат компромисса между техническими эксплуатационными характеристиками (быстродействие, помехоустойчивость) и экономическими факторами. Среди известных методов уменьшения потребляемой мощности схемотехнический наиболее выгоден, так как требует только интеллектуальных затрат и компьютерного моделирования.

Следует отметить, что уменьшение порогового напряжения приводит к значительному возрастанию токов утечки канала. Максимальное снижение общей рассеиваемой мощности наблюдается в том случае, когда мощность, определяемая токами утечки, имеет тот же порядок, что и динамическая мощность [22]. Например, для технологии 0,13 мкм минимум рассеиваемой мощности без потери производительности наблюдается при $V_{DD} = 1{,}5$ В; $V_{th} = 0{,}15$ В; $T = 125$ °C.

Следующим неблагоприятным следствием уменьшения напряжения питания является снижение помехоустойчивости, так как уменьшается разница между логическими уровнями. Кроме того, изменение логических уровней требует применения специальных преобразователей уровней напряжения для стыковки выходов СБИС с элементами стандартной логики. В современных процессорных СБИС используется, как правило, два напряжения питания: одно – для питания ядра (0,9–1,7 В), а второе – для питания обрамления (2,5 или 3,3 В). Альтернативным подходом является снижение переключаемого напряжения. То есть заряд/разряд конденсатора происходит не на величину напряжения питания V_{DD}, а на некоторую его часть, например, от 1/3 до 2/3 V_{DD}. При этом не теряется быстродействие, не требуются преобразователи уровня. Помехоустойчивость уменьшается из-за уменьшения разницы в логических уровнях. Однако в отличие от предыдущего подхода, мощность, рассеиваемая вследствие протекания статического тока, не уменьшается [23].

Как отмечено выше, для работы цифровых КМОП схем конденсаторы не нужны, однако они фактически формируются в современных БИС за счет паразитных емкостей p-n-переходов, паразитных емкостей линий связи и т.п. Избавиться от этих емкостей невозможно, поэтому при проектировании СБИС необходимо учитывать и минимизировать их величины. При этом необходимо использовать различные подходы: уменьшение геометрических размеров элементов, уменьшение длины линий связи, оптимизацию размещения компонентов и линий связи, применение новых материалов и технологий изготовления и т.п. Кроме того, для ми-

нимизации величины сквозного тока, который учитывается в виде дополнительной емкости C_{CS} на основании [1–3], необходимо использовать быстродействующие транзисторы, которые работают на минимально возможной частоте. Это позволяет существенно снизить длительность фронтов сигнала и, соответственно, уменьшить сквозной ток [24].

Следующим фактором, влияющим на величину динамической мощности, является частота переключения, поэтому ее снижение также будет приводить к снижению рассеиваемой мощности. Однако при этом возникает конфликт с требованиями, касающимися производительности. Для устранения этого конфликта можно использовать различные подходы. Во-первых, при проектировании новых устройств приоритет должен отдаваться решениям с пониженными требованиями к рабочей частоте функциональных компонентов [25]. Во-вторых, для снижения тактовой частоты необходимо применять методы параллельного выполнения операций на конвейере. В-третьих, целесообразно использовать различные схемы запрета синхронизации как для неиспользуемых функциональных модулей, так и для модулей или компонентов, информация в которых не изменяется в данный момент [26]. Например, при проведении целочисленных вычислений обычно не используются узлы сопроцессора, которые предназначены для вычислений с плавающей запятой, поэтому на эти узлы в данный момент импульсы синхронизации поступать не должны.

При проектировании цифровых устройств с минимальным потреблением энергии в качестве оценки обычно используют произведение переключаемой емкости и частоты переключения – так называемую «переключательную активность». Существует множество решений – технологических, схемотехнических, алгоритмических и т.п., которые позволяют минимизировать и этот параметр. Во-первых, для узлов с большой емкостью необходимо минимизировать частоту переключения. Для узлов с высокой частотой переключения надо минимизировать переключаемую емкость. Во-вторых, весьма эффективно можно применять эквивалентные преобразования схемы для минимизации переключательной активности. Например, семивходовый элемент И может быть реализован на шести двухвходовых элементах И, двух четырехвходовых элементах и т.д. [9]. В-третьих, используют специальные методы кодирования данных, которые также позволяют минимизировать переключательную активность при работе схемы. Например, для перебора всех адресов памяти при использовании счетчика Грея в качестве генератора адреса требуется только 2^n переключений, тогда как использование двоичного счетчика потребует $2^{n+1} - 2$ переключений [27].

И, наконец, слабым местом, которое существенно ограничивает возможность увеличения производительности КМОП микропроцессоров и «систем-на-кристалле», является цепь синхронизации. Импульсы синхронизации должны одновременно поступать на все узлы цифрового устройства. Однако на кристалле БИС линии синхронизации имеют большую длину и, как следствие, большие сопротивление и емкость. Поэтому высокая частота работы, большое сопротивление и большая емкость линий связи приводят к тому, что в цепях синхронизации современных БИС иногда рассеивается до 50% от общей мощности. Одно из решений – замена металлических проводников оптическими линиями передачи тактовых

импульсов на кристалле. Так, в [28] показано, что для технологии 70 нм применение оптических линий связи позволяет в пять раз снизить рассеиваемую мощность в цепи синхронизации.

Дальнейшее совершенствование технологии производства СБИС и уменьшение геометрических размеров элементов приводит к изменению степени влияния различных источников на суммарное значение рассеиваемой мощности. Так, при переходе в субмикронную область значительно возрастает доля статической мощности, которая в основном определяется токами утечки и обратными токами p-n-переходов. Если для технологии 1,0 мкм при напряжении питания 3,3 В доля статической мощности составляла всего 0,01%, то для технологии 0,13 мкм и напряжении питания 1,3 В она возрастает до 10% [12]. При дальнейшем уменьшении геометрических размеров элементов доля статической мощности еще больше возрастает, и для технологии 0,07 мкм при напряжении питания около 1,0 В она уже достигает 50% от общей величины мощности, рассеиваемой полупроводниковым кристаллом БИС [13].

Еще одним путем снижения энергопотребления микроэлектронных устройств и систем на их основе является применение различных схем управления питанием [14] (рис. 5.8) – встроенных в БИС блоков, которые позволяют отключать напряжение питания от элементов, узлов и блоков БИС, не используемых в текущий момент при выполнении текущей микрокоманды, а также переводить всю микросхему в «спящий» режим при отсутствии текущих команд. Эти решения позволяют существенно снизить энергопотребление на уровне законченной системы, хотя и требуют введения дополнительных аппаратных затрат, увеличения количества используемых элементов. Конкретному рассмотрению этого направления снижения энергопотребления в книге посвящается отдельная глава, где на конкретных примерах интерфейсных микросхем будут проанализированы используемые в практике проектирования БИС схемотехнические решения.

И, наконец, несколько слов следует сказать об использовании специальных стилей и методов проектирования микросхем с пониженным энергопотреблением [18]. Как показано на рис. 5.9, это – использование специальных библиотек базовых элементов, оптимальная с точки зрения мощности компоновка базовых элементов топологии БИС, специальные алгоритмы обработки данных и т.д. [16, 17].

На рис. 5.8 в упрощенном виде представлен маршрут проектирования таких БИС, где на основных этапах проектирования постоянно осуществляются текущий мониторинг получаемых расчетных значений мощности (на этапе разработки архитектуры БИС, при генерации RT-кодов и синтезе узлов и блоков БИС на высоком уровне, на вентильном уровне) и последующая оптимизация значений рассеиваемой мощности по результатам этого мониторинга. Здесь, к сожалению, действует простое правило, связывающее длительность разработки и получаемую в итоге величину рассеиваемой микросхемой суммарной мощности: если быстро проектировать, то микросхема будет потреблять большую мощность, а если стоит задача получить минимальную мощность потребления без существенного ущерба для других технических параметров (производительность, радиационная стойкость, рабочий диапазон температур и т.д.), то сроки проектирования и соответственно сроки появления изделия на рынке существенно удлиняются, что и изображено в условно-графическом виде на рис. 5.8.

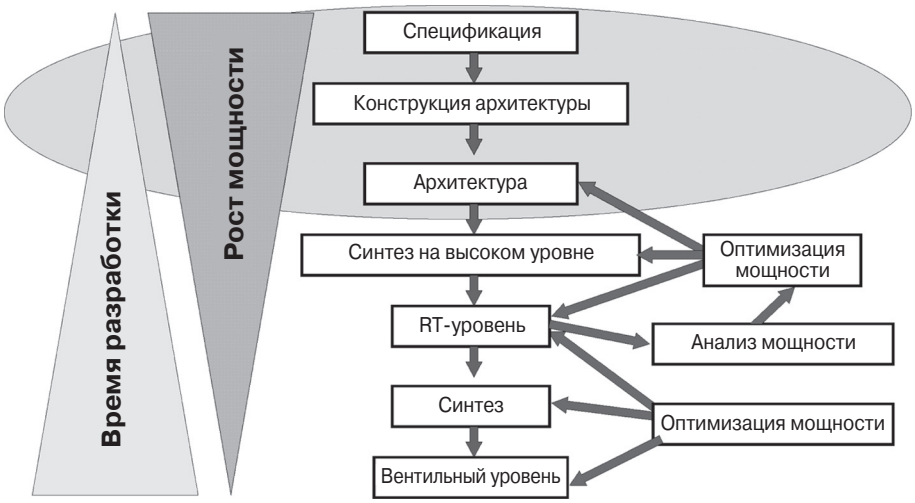


Рис. 5.8. Маршрут проектирования микросхем с пониженным энергопотреблением

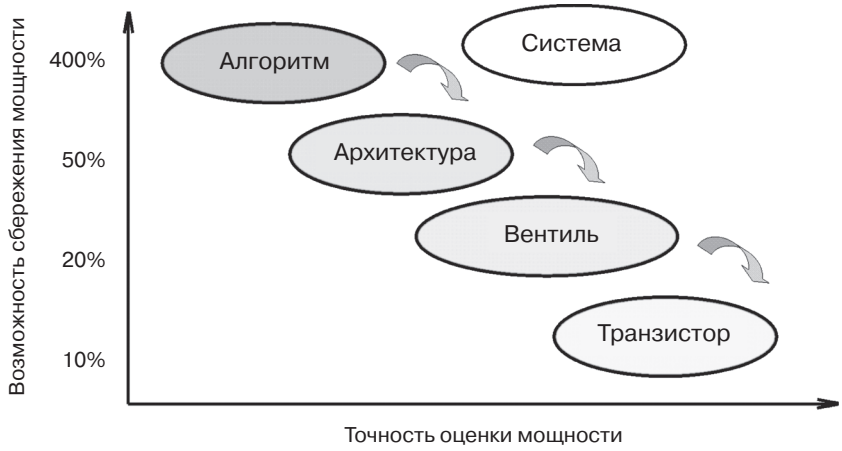


Рис. 5.9. Возможности управления мощностью в процессе проектирования

И еще одно замечание: чем ниже уровень представления схемы, тем меньше возможностей для управления мощностью. На рис. 5.9 в символической форме представлен относительный вклад в проблему снижения мощности основных этапов проектирования [2, 18]. Здесь по оси X представлена условная шкала точности оценки величины ожидаемой мощности потребления микросхемы, а по оси Y – возможность уменьшения (сбережения) этой мощности.

Как видно из этого рисунка, самая высокая точность оценки мощности у базового элемента – транзистора, но вклад этого компонента в общую возможность снижения мощности в пределах 10–15%. Самая низкая прогнозируемая точность оценки характерна для алгоритмического уровня, и это понятно. Но зато на этапе синтеза алгоритмов работы сложнофункциональной микросхемы мы можем уменьшить эту мощность, применяя специальные решения, до 400% по отноше-

нию к тому варианту, когда задача по оптимизации мощности не ставится еще на этапе разработки спецификации.

Применяя специальные решения типа уже упомянутых «спящих» режимов, на этапе разработки архитектуры можно сэкономить до 50% величины потребляемой мощности БИС, а оригинальные схемотехнические решения базовых вентилей позволяют снизить эту мощность в среднем на 20% [20–28].

Хотя эти количественные характеристики носят весьма приблизительный характер и зависят от конкретных системо- и схемотехнических особенностей проектируемых микросхем, в целом рис. 5.9 отражает реальную ситуацию в этой исследуемой авторами области проектирования.

5.3. Основные источники рассеиваемой мощности в КМОП БИС

Как известно, основу КМОП-технологии составляет использование комплементарной пары полевых (или униполярных) транзисторов с индуцированными каналами n- и p-типа. Еще раз напомним известные принципы работы базовых логических элементов, выполненных по КМОП-технологии.

В состав типового инвертора (рис. 5.10*а*) входят два последовательно соединенных транзистора различного типа, затворы которых соединены параллельно и являются входом. При подаче на вход высокого ($+V_{dd}$) или низкого (около 0 В) напряжения открыт только один из транзисторов. Сопротивление сток-исток закрытого транзистора очень велико (мегаомы), поэтому через инвертор протекает очень малый статический ток. Таким образом, основное потребление энергии происходит только в момент переключения инвертора. На рис. 5.10*б* показана структура этого КМОП-инвертора. Поскольку для формирования p-канального МОП-транзистора требуется создать «карман» n-типа, то при равных геометрических размерах p-канальный транзистор всегда имеет меньший ток насыщения, чем n-канальный.

Рассеиваемую мощность КМОП-схем можно разделить на два вида –динамическую и статическую. Классификация источников рассеиваемой мощности представлена на рис. 5.11 [2, 18, 29]. Рассмотрим эти источники более подробно.

Динамическая рассеиваемая мощность возникает в момент переключения схемы из одного логического состояния в другое и определяется двумя основными источниками – сквозными токами, которые протекают через логический элемент в момент переключения, и токами заряда/разряда паразитных емкостей логических элементов. Следовательно, чем выше переключательная активность схемы, тем больше рассеиваемая мощность. При отсутствии переключений динамическая мощность равна нулю.

Большинство цифровых КМОП БИС не требуют использования конденсаторов для выполнения своих функций. Исключение составляют устройства динамической памяти, устройства выборки-хранения, устройства задержки сигналов. Конденсаторы в эквивалентной схеме КМОП-элемента образуются за счет паразитных емкостей транзисторов и линий связи, поэтому паразитная емкость оказывает существенное влияние как на время задержки распространения сигнала, так и на величину рассеиваемой мощности.

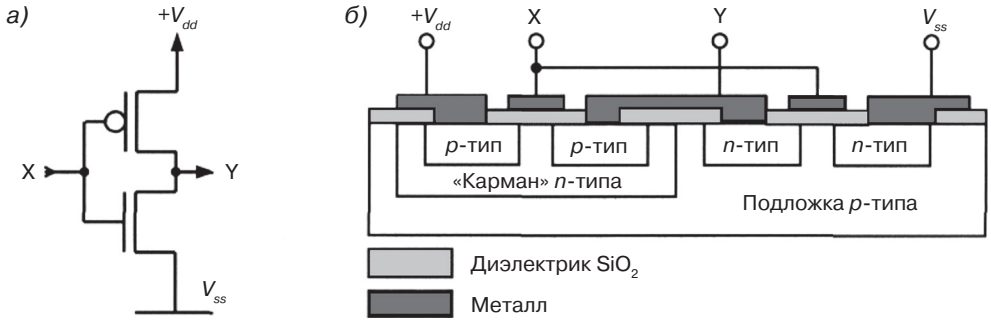


Рис. 5.10. Принципиальная схема КМОП-инвертора (*а*) и его структура (*б*)

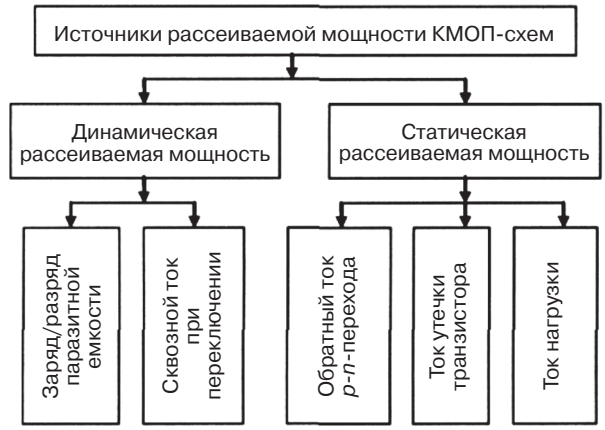


Рис. 5.11. Источники рассеиваемой мощности КМОП-схем

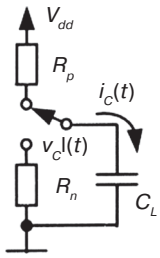


Рис. 5.12. Эквивалентная электрическая схема инвертора

Для приблизительной оценки величины рассеиваемой мощности представим инвертор на рис. 5.10*а* в виде переключаемой емкости C_L. Ее заряд и разряд происходят через резисторы R_p и R_n, параметры которых определяются сопротивлением открытого канала p-канального и n-канального транзисторов, соответственно (рис. 5.12).

Переключение элемента в состояние логической единицы «1» соответствует заряду C_L, а переключение элемента в состояние логического нуля «0» соответствует разряду C_L. При заряде половина энергии, поступающей от источника питания, сохраняется на конденсаторе C_L, а другая половина рассеивается в виде тепла на резис-

торе R_p [2, 30]. При переключении инвертора в состояние логического нуля энергия, сохраненная на конденсаторе, будет рассеяна на резисторе R_n, а ее значение составит:

$$E_n = E_p = \frac{1}{2} C_L V_{dd}^2. \tag{5.7}$$

Если частота управляющего сигнала равна f, то рассеиваемую мощность можно вычислить из простого выражения:

$$P = \frac{1}{2} C_L V_{dd}^2 f. \tag{5.8}$$

Вторым источником динамической рассеиваемой мощности КМОП-схем является сквозной ток через логический элемент при его переключении $i_C(t)$.

Отметим особенности сквозного тока:

1) Сквозной ток протекает только в момент времени t, когда входное напряжение $V_{in} > V_{tn}$ и $V_{in} < V_{tp}$, где V_{tn} и V_{tp} соответственно пороговые напряжения n- и p-канальных транзисторов. Следовательно, чем меньше разница между этими значениями, тем меньше сквозной ток.
2) Величина сквозного тока обратно пропорциональна емкости нагрузки C_L. При отсутствии емкости значение тока максимально, при возрастании емкости нагрузки ток уменьшается.
3) Величина сквозного тока прямо пропорциональна длительности фронтов входного сигнала, т.е. чем длиннее фронт, тем больше сквозной ток.

Для упрощения расчетов сквозной ток будем учитывать в виде дополнительной емкости C_{SC}, которая размещается параллельно C_L. Значение этой емкости может быть найдено из простого выражения:

$$C_{SC} = \frac{t_{SC} I_{peak}}{V_{DD}}, \tag{5.9}$$

где V_{DD} – напряжение питания; I_{peak} – ток насыщения транзисторов; t_{SC} – время протекания сквозного тока.

Это позволяет для оценки динамической мощности использовать вышеприведенное выражение.

Мощность, рассеиваемая КМОП-схемой вследствие протекания сквозного тока, может составлять от 10 до 60% от общей динамической мощности. Ее величина зависит от таких параметров, как вольт-амперные характеристики транзисторов (напряжения отпирания и запирания транзисторов), длительности переднего и заднего фронтов входного сигнала, емкости нагрузки, напряжения питания и т.п. Точные выражения для расчета сквозных токов и рассеиваемой мощности мы выведем в следующем разделе.

Статистическая мощность в КМОП БИС рассеивается тогда, когда логический элемент находится в некотором фиксированном состоянии («0» или «1»), и ее величина определяется значением токов утечки канала МОП-транзистора, обратных токов p-n-переходов и нагрузочными токами (рис. 5.13, 5.14).

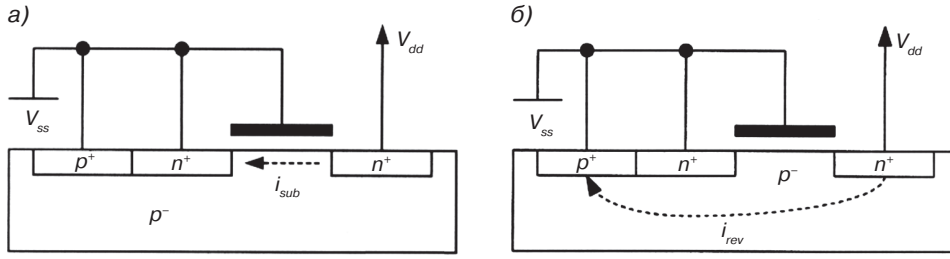


Рис. 5.13. Статические токи КМОП-схем: ток утечки канала i_{sub} (*а*); обратный ток p-n-перехода i_{rev} (*б*)

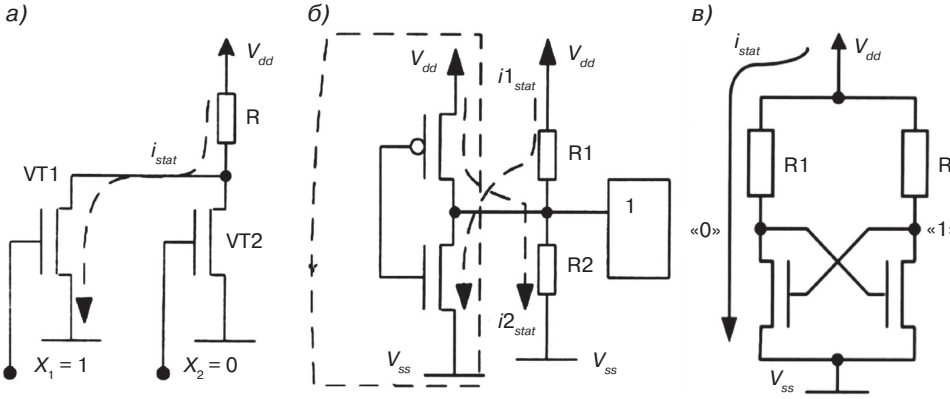


Рис. 5.14. Статические токи КМОП-схем: схема «монтажное ИЛИ» (*а*); выход с «открытым стоком» (*б*); схема с резистивной нагрузкой выхода (*в*)

В идеальном случае в статическом состоянии КМОП-элемент не потребляет мощность, т.е. ток через него не протекает. Однако в реальных схемах значение тока утечки канала составляет единицы пикоампер.

На рис. 5.13*а* показано направление протекания тока через закрытый канал транзистора. Он экспоненциально зависит от величины порогового напряжения и линейно зависит от уровня входного сигнала, геометрических размеров транзисторов и топологии схемы, температуры (ток удваивается при повышении температуры на каждые 8–10 °С) и используемой технологии [31].

Вторым источником тока утечки является обратный ток p-n-переходов, которые формируются между различными областями КМОП интегральной схемы (рис. 5.13*б*). Величина обратного тока зависит от используемой технологии изготовления, площади p-n-перехода, температуры и напряжения смещения и составляет, как правило, пикоамперы.

Поскольку суммарное значение токов утечки в 10^5–10^6 раз меньше, чем динамических токов, в расчетах их, как правило, не учитывают. В тех случаях, когда необходимо учесть мощность, рассеиваемую вследствие токов утечки, можно использовать следующее упрощенное выражение:

$$P_{lesk} = V_{DD} N K_d I_{leak}, \qquad (5.10)$$

где V_{DD} – напряжение питания; N – число транзисторов; K_d – эмпирический коэффициент, учитывающий особенности применяемой технологии; I_{leak} – суммарный ток утечки одного транзистора.

В некоторых случаях, таких как схемы с открытым стоком, элементы «монтажное ИЛИ» или резистивная нагрузка выходов схемы, КМОП-схема может потреблять ток и в статическом режиме (рис. 5.14). Тогда величина тока и, соответственно, рассеиваемая мощность зависят от логического состояния и сопротивления нагрузки. Например, для схемы «монтажное ИЛИ» (рис. 5.14*а*) или схем с открытым стоком (рис. 5.14*б*) ток протекает только в состоянии «0». В состоянии «1» он равен нулю. Для схем с резистивной нагрузкой ток протекает как в состоянии логического нуля, так и в состоянии логической единицы (рис. 5.14*в*). В общем случае мощность, рассеиваемая вследствие протекания постоянного тока, определяется выражением:

$$P_{stat} = V_{DD} I_{stat}. \tag{5.11}$$

Для учета изменения мощности в зависимости от логического состояния можно использовать следующее выражение:

$$P_{stat} = p(0)P^0_{stat} + p(1)P^1_{stat}, \tag{5.12}$$

где $p(0)$, $p(1)$ – вероятность нахождения узла схемы в состоянии «0» или «1», соответственно; P^0_{stat}, P^1_{stat} – мощность, потребляемая узлом схемы в состоянии «0» или «1», соответственно.

При использовании КМОП-технологии в проектируемых устройствах не рекомендуется применять резистивную нагрузку выходов. Если без этого обойтись нельзя, то необходимо увеличить величину сопротивления нагрузки, уменьшить напряжение питания или минимизировать вероятность нахождения схемы в логическом состоянии, при котором ток нагрузки максимален.

Как показано выше, основной вклад в величину рассеиваемой мощности оказывают две компоненты тока – протекающие через комплементарные транзисторы непосредственно от положительного вывода питания на обычную шину и заряжающие (разряжающие) эквивалентную выходную емкость (емкость нагрузки). Оба этих компонента необходимо учитывать как при анализе величины статической, так и динамической мощности потребления КМОП-инвертора. В технической литературе компонент рассеиваемой мощности, обусловленной протеканием сквозного тока по цепи «положительный вывод питания – открытые транзисторы – общая шина», иногда называют *мощностью рассеивания «закороченного» (проводящего) инвертора*, а компоненту мощности, обусловленную процессами заряда-разряда нагрузочных емкостей, называют *переключательной мощностью* инвертора.

Прежде чем перейти к детальному анализу этих составляющих мощности, необходимо сделать ряд дополнительных замечаний. Как отмечено выше, динамическая составляющая общей мощности потребления КМОП инвертора является определяющей, и ее величина пропорциональна произведению емкости нагрузки C_L на квадрат напряжения питания. Следовательно, снижение величин напря-

жений V_{tn} и V_{tp} является очевидным путем уменьшения общей рассеиваемой мощности. Однако, как известно, существует жесткая связь между пороговыми напряжениями и минимальным пределом величины потенциала напряжения, обусловленная фундаментальными физическими ограничениями. Например, эти параметры в совокупности существенно влияют на задержки переключения инверторов, следовательно – на производительность (рабочую частоту) проектируемой КМОП БИС.

С точки зрения быстродействия КМОП инвертора желательно иметь самые низкие значения порогов переключения транзисторов. Однако при слишком низких значениях порогов возрастает вторая составляющая общей мощности рассеивания – статическая мощность потребления, что обусловлено вышеупомянутой проблемой допороговых токов. Поэтому в каждом конкретном случае проектирования КМОП БИС с пониженным энергопотреблением необходимо выбирать компромиссные решения комплексной проблемы «конструкция БИС – пороги переключения – напряжение питания – производительность».

5.4. Логическое проектирование КМОП БИС с пониженным энергопотреблением

5.4.1. Основы логического синтеза КМОП микросхем с пониженным энергопотреблением

Прогресс в области микроэлектронных технологий обусловливает постоянное повышение степени интеграции и тактовой частоты, что позволяет, в свою очередь, создавать на одном кристалле все более быстродействующие и функционально сложные устройства. Однако наряду с огромными возможностями, которые открывают для электронных изделий эти успехи, они обусловливают также и серьезные проблемы, прежде всего связанные с рассеянием мощности. Высокая степень интеграции привела к обострению проблемы надежности по сравнению с аналогичными устройствами меньшей степени интеграции. Эти проблемы не могут быть проигнорированы, так как проектируются все более сложные изделия для различных сфер применения, в том числе космических, которые должны быть надежными и способными работать длительное время без подзарядки батареи питания.

Обеспечение работоспособности интегральных микросхем в условиях воздействия ионизирующих излучений и автономности энергопитания становится все более важной проблемой в настоящее время в силу того, что интегральные микросхемы широко применяются в военной и космической технике. Преимущество использования КМОП технологии в космической технике обусловлено тем, что микросхемы, выполненные по данной технологии, имеют низкое энергопотребление, повышенную помехоустойчивость, достаточное быстродействие. В космических применениях эти качества становятся определяющими вследствие автономности энергопитания космических систем. Для того чтобы реализовать их в полной мере, недостаточно иметь хорошие базовые логические элементы, необходимо также проектировать на их основе хорошие схемы. На логическом уровне проектирования вопросы повышения радиационной стойкости схем обычно не

рассматриваются, однако за счет построения удачной логической структуры возможно снижать энергопотребление [33, 34]. Этому направлению исследований придается в последние годы все большее значение в связи с тем, что рассеивание энергии становится камнем преткновения при дальнейшем повышении уровня интеграции, в то время как расширяется рынок портативных устройств с автономным питанием, для которых важно увеличить время их автономной работы без подзарядки.

Проектирование с учетом энергопотребления до сих пор остается по большому счету искусством, что связано, в частности, и с отсутствием эффективных средств оценки эффекта используемых в процессе проектирования эвристик на энергопотребление схемы, реализуемой в дальнейшем на кристалле СБИС. Решением проблемы энергопотребления при проектировании СБИС занимаются многие специалисты и фирмы, например, Cadence Design Systems (лидер в области автоматизации проектирования), Apache Design, Atrenta, Magma Design Automation, Synopsys, Mentor Graphics и др. [35].

Основные из упоминаемых в литературе [34, 36] используемые пути сокращения рассеиваемой мощности состоят в уменьшении величины напряжения питания; уменьшении емкостей микросхем и межсоединений; специальной организации цепей управления синхронизацией и подачей питания (отключением от питания частей схемы на время, в течение которого они не выполняют полезной работы); уменьшения динамического рассеивания энергии путем минимизации интенсивности переключений сигналов на входах КМОП микросхем. Первые два из этих методов сокращения энергопотребления микросхем достигаются на схемотехническом уровне за счет выбора удачных технологических решений и топологии, третий метод – на системном уровне и последний – на логическом уровне за счет построения удачной логической структуры.

Снижение энергопотребления проектируемой схемы может обеспечиваться на разных уровнях ее проектирования. При этом, чем более ранним является этап, тем более важно получать на нем более качественные решения. В частности, на логическом уровне (за счет построения удачной логической структуры) можно достичь сокращения рассеивания мощности на 10–20% без ущерба для быстродействия и сложности схемы [37]. САПР микроэлектронных схем должны иметь средства, позволяющие оценивать и минимизировать энергопотребление схем уже в процессе их логического проектирования.

В качестве примера такой САПР ниже рассмотрим комплекс программ «Энергосберегающий логический синтез», или сокращенно – ЭЛС для проектирования логических схем из библиотечных элементов, выполненных на основе технологии статических КМОП схем [38]. Эта технология в настоящее время является доминирующей в области цифровых СБИС, так как логика, выполненная по этой технологии, имеет хорошие технологические параметры и характеристики рассеивания мощеости. Большинство специализированных интегральных микросхем (ASIC) изготавливаются на основе инверсной КМОП логики, 95% заказных интегральных микросхем используют статическую КМОП логику [39].

Далее описывается сам подход к логическому проектированию таких КМОП схем, а также структура и функциональные возможности комплекса ЭЛС, кото-

рый содержит средства: оптимизации проектируемых цифровых блоков заказных КМОП микросхем на функциональном и структурном уровнях; верификации состояний проектируемых схем; оценки энергопотребления схем как в процессе их проектирования, так и спроектированных схем из библиотечных элементов. Этот программный комплекс ЭЛС:

– позволяет по функциональному описанию проектируемого устройства на языке высокого уровня VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language) или на языке SF (Structural and Functional description language) [40], который является внутренним языком комплекса, получить структурное описание логической схемы в библиотеке проектирования КМОП СБИС;
– реализует подход к синтезу, позволяющий минимизировать площадь кристалла КМОП СБИС и энергопотребление, измеряемое средним значением рассеиваемой схемой мощности;
– имеет интерактивные средства проектирования логических схем, верификации и оценки проектных решений;
– позволяет производить оценку энергопотребления схем из библиотечных элементов на логическом и схемотехническом уровнях.

Рассматривается случай синтеза комбинационных схем, для которого:

– предполагается синхронная реализация схем;
– частота синхронизации и напряжение питания фиксированы;
– для оценки энергопотребления в процессе синтеза схем используется статистический метод, основанный на вероятностных характеристиках входных сигналов.

5.4.2. Определение источников рассеиваемой мощности в КМОП микросхемах

Под оценкой величины энергопотребления далее понимается расчет величины среднего значения энергии, рассеиваемой схемой. Эта оценка существенно отличается от оценки мощности, максимально потребляемой в каком-то отдельном такте функционирования схемы.

В общем случае энергопотребление логической схемой является сложной многофакторной функцией, зависящей от задержек распространения сигналов через схему, частоты синхронизации, технологических параметров изготовления, топологии микросхемы, а в случае КМОП технологии мощность рассеивания существенно зависит от последовательности прилагаемых к схеме входных воздействий. Всю мощность, рассеиваемую КМОП микросхемой, можно разделить на статическую и динамическую составляющие. Статическая составляющая обусловлена наличием статических проводящих путей между шинами питания или токов утечки. У большинства хорошо спроектированных КМОП схем эта составляющая энергопотребления мала. В типичных КМОП цепях от 60 до 80% всей рассеиваемой мощности приходится на ее динамическую составляющую [36, 41], порождаемую нестационарным поведением узлов схемы. Согласно упрощенной модели энергия рассеивается КМОП микросхемой всякий раз,

когда изменяется сигнал на ее выходе. Отсюда следует, что более активные в переключательном плане КМОП схемы рассеивают больший объем энергии. Таким образом, рассеивание мощности существенно зависит от переключательной активности элементов схемы, а она, в свою очередь, определяется последовательностью подаваемых входных воздействий на КМОП схему, т.е. динамикой функционирования.

В КМОП технологии основной вклад в суммарную динамическую мощность вносят два фактора [34, 36, 42, 43]: чисто динамическая мощность P_{dyn}, обусловленная зарядом и разрядом емкостной нагрузки узла, и мощность рассеивания энергии за счет сквозных токов через микросхему при переключениях в ней. Обычно величину последней составляющей рассчитывают, используя понятие внутренней емкости микросхемы, и на логическом уровне ее можно уменьшить за счет синтеза такой схемы, которая позволяет минимизировать площадь кристалла СБИС, требующуюся для размещения схемы, реализующей заданную функциональность. Динамическая рассеиваемая мощность P_{dyn} является наиболее существенной причиной потребления мощности КМОП схемой в динамике. Она обусловлена токами заряда/разряда паразитных емкостей транзисторов и линий связи, эти емкости учитываются в виде емкостной нагрузки C_L выхода узла. При смене входного сигнала с 0 на 1 ток, протекающий через транзистор с p-каналом, заряжает емкость C_L; при смене входного сигнала с 1 на 0 емкость C_L разряжается током, текущим через транзистор с n-каналом. В каждом из этих случаев на сопротивлении открытого транзистора рассеивается мощность, выражаемая известным упрощенным соотношением [33, 42]:

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} V_{dd}^2 f_{clk} E_s C_L, \tag{5.13}$$

где V_{dd} – напряжение питания; f_{clk} – частота синхронизации; E_s – переключательная активность выхода схемы, определяемая как математическое ожидание числа логических переходов сигнала (из 1 в 0 или из 0 в 1) за один период синхронизации; C_L – емкостная нагрузка выхода микросхемы.

Основной вклад в величину выходной емкости C_L микросхемы вносят три фактора: паразитная емкость C_p на выходе микросхемы; емкостная нагрузка C_{load} выхода, обусловленная суммарной емкостью транзисторов питаемых микросхем, и емкость C_{wire} соединений ее выхода. Величина C_{wire} становится известной только после разводки соединений и на уровне проектирования схемы обычно игнорируется. Величины C_p и C_{load} могут быть вычислены на основе данных, приводимых для микросхем заданной для проектирования технологической библиотеки.

Зависимость (5.13) выведена на базе следующих основных допущений о функционировании хорошо спроектированной КМОП микросхемы:

1) вся емкость КМОП элемента сосредоточена на его выходном полюсе;
2) ток внутри элемента течет только от источника питания к выходной емкости или от последней к земле;
3) напряжение на выходе элемента изменяется только от значения напряжения источника питания до напряжения земли или наоборот.

Этот подход игнорирует мощность, рассеиваемую а) в процессе переключения внутренних узлов сложных КМОП элементов, б) за счет сквозных токов через микросхему внутри КМОП элементов, в) в результате переходных процессов (глюков, гонок).

Значения параметров V_{dd} и f_{clk} в (5.13) определяются при архитектурном проектировании; на логическом уровне произведение $1/2V_{dd}^2 f_{clk}$ (оценивающее рассеивание мощности на единицу емкости при смене значения питающего напряжения) можно считать константой, одинаковой для всех узлов схемы. Минимизация динамической мощности сводится таким образом к минимизации произведения $E_s C_L$ (часто называемого переключаемой емкостью), и рассеивание энергии схемой на уровне проектирования логики оценивается как сумма переключаемых емкостей всех ее узлов:

$$P_s = \sum_{i=1}^{n} E_i C_i, \tag{5.14}$$

где n – число узлов в схеме (суммирование проводится по всем узлам схемы); C_i – емкостная нагрузка i-го узла; E_i – переключательная активность i-го узла схемы.

Оценку динамической мощности (5.14) целесообразно использовать для сравнения вариантов схемной реализации заданной функциональности.

На этапе логического проектирования, когда электрической схемы еще нет и часто не известен даже технологический базис, в котором она будет реализована, рассеивание мощности будущей схемой может быть снижено путем такого преобразования описания схемы, которое обеспечивает уменьшение ее переключательной активности без изменения функциональности [34, 44]. Для оценки предпочтительности вариантов оптимизации схемы на логическом уровне может быть использовано количественное изменение переключательной активности. Такой подход к оценке рассеивания мощности дает возможность сравнивать варианты реализации схемы в процессе ее проектирования, что позволяет уже на логическом уровне проектировать схемы, потенциально имеющие низкое рассеивание мощности.

5.4.3. Вероятностная оценка вариантов оптимизации по прогнозируемой переключательной активности узлов микросхемы

В основе методов оценок переключательной активности узлов микросхемы, используемых в процессе ее проектирования, лежит подход, основанный на вероятностных характеристиках входных сигналов и функционально-структурных свойствах исследуемой схемы [45]. Подход предполагают задание вероятностей переключения сигналов на входе схемы, отражающих частоту смены их значений, и используется для вычисления вероятностей переключения сигналов на выходах узлов схемы. Методы оценки переключательной активности основаны на распространении вероятностной информации о смене значений сигналов через всю схему, от входов к выходам, именно поэтому эти методы называют в литературе также вероятностными [45]. Вероятностный подход позволяет определить возможные последователь-

ности входных воздействий на схему и оценить энергопотребление схемы исходя из взаимного влияния входных сигналов в последовательные моменты времени.

Подавляющая часть оценок интенсивности переключений сигналов на полюсах схемы, используемых в практике проектирования, выведена в предположении нулевой задержки сигнала узлами схемы, когда все переходы в схеме происходят одновременно. Эти оценки предполагают, что все изменения на входах схемы распространяются через ее элементы мгновенно (а значит, одновременно) и учитывают смену сигналов только в устойчивых состояниях, предусмотренных реализуемой узлом функцией. Эти оценки не учитывают переключения, обусловленные переходными процессами, которые также рассеивают энергию, не выполняя при этом предусмотренных схемой вычислений. Использование моделей реальных задержек существенно повышает время вычисления оценок переключательной активности схемы, одновременно повышая их точность. Однако в процессе синтеза для сравнения вариантов оптимизации достаточно использовать более простые, быстро вычисляемые оценки, какими и являются оценки в предположении нулевого разброса задержек сигналов.

Кроме того, в известных методах вычисления вероятностей предполагается, что сигналы на входных полюсах любого узла схемы независимы во временном и пространственном плане. Временная независимость предполагает, что значение сигнала в любом такте синхронизации не зависит от его значений в предшествующих тактах. Пространственная независимость полюсов предполагает отсутствие корреляции значений сигналов на них. Она может возникать, когда пространственно связанные сигналы зависят друг от друга, что вызывается, например, наличием разветвлений на выходах элементов или обратных связей. На практике между сигналами может существовать устойчивая зависимость, вызываемая и другими причинами.

В литературе предложено множество вероятностных методов оценки энергопотребления логических схем [36, 41, 42, 45, 46], основная масса из них применима только для комбинационных схем. Методы оценки энергопотребления сформулированы:

1) относительно разных предположений о задержке сигналов узлами схемы, о возможности разных видов зависимостей между сигналами, об учете переходных процессов при смене сигнала и т.д.;
2) с использованием разных статистических характеристик (вероятности появления сигнала 1, вероятности смены сигнала на полюсе, интенсивностей переключений сигналов – плотностей переключений сигналов, равновесных вероятностей, вероятностных форм сигналов и т.д.);
3) с использованием разных моделей (на основе бинарных диаграмм решений (от англ. Binary Decision Diagram, BDD), коэффициентов корреляции и т.д.).

Суть предлагаемых ниже методов синтеза КМОП схем из библиотечных элементов остается неизменной при любых используемых оценках переключательной активности узлов схемы, поэтому ниже используется наиболее простой метод ее оценки, в основе которого лежат следующие предположения:

1) изменения на входах схемы распространяются через все ее элементы схемы мгновенно, а значит, все переходы в схеме происходят одновременно;

2) для каждого входного полюса узла имеет место временная независимость, предполагающая, что значение сигнала в любом такте синхронизации не зависит от его значений в предшествующих тактах;
3) входные полюсы узла пространственно независимы, что означает отсутствие корреляции значений сигналов на них (что может быть вызвано, например, наличием разветвлений на выходах элементов или обратных связей).

Различают [14] вероятность p_i^1 появления сигнала 1 (0) на некотором i-м полюсе и вероятность смены сигнала на этом полюсе. Первая вероятность p_i^1 называется *сигнальной вероятностью* (вероятностью появления сигнала 1) и определяется средней долей тактов, на которых сигнал на i-м полюсе имеет единичное значение. Вторая вероятность $p_i^{1\to0}$ (или $p_i^{0\to1}$) есть вероятность смены значения сигнала с 1 на 0 (или с 0 на 1) и определяется средней долей тактов, на которых сигнал на i-м полюсе меняет свое значение по сравнению со значением в предшествующем такте.

В предположениях нулевых задержек элементов (что исключает переключения за счет переходных процессов) и временной независимости сигналов вероятность $p_i^{1\to0}$ ($p_i^{0\to1}$) равна произведению вероятности появления на нем сигнала 1 (0) в одном такте на вероятность того, что в следующем такте на нем появится 0 (1). Соответственно переключательная активность i-го полюса схемы равна произведению $E_i = p_i^{1\to0} p_i^{0\to1} = 2p_i^1 p_i^0$, а в предположении, что $p_i^1, p_i^0 < 1$, и обозначая p_i^1 просто через p_i,

$$E_i = 2p_i(1 - p_i). \tag{5.15}$$

Вероятность p_e появления сигнала 1 на выходе элемента e существенно зависит от вероятностных характеристик сигналов на его входах и от функции, реализуемой этим элементом. В случае, когда сигналы на входах элемента не коррелируют в пространстве и во времени, сигнальные вероятности простых элементов, типа инвертора, И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ с $n(e)$ входными полюсами, легко могут быть подсчитаны исходя из таблиц истинности реализуемых ими функций:

$$\begin{gathered}
p_e^{\neg} = 1 - p_1; \\
p_e^{\wedge} = \prod_{i=1}^{n(e)} p_i; \\
p_e^{\vee} = 1 - \prod_{i=1}^{n(e)} (1 - p_i); \\
p_e^{\bar{\wedge}} = 1 - \prod_{i=1}^{n(e)} p_i; \\
p_e^{\bar{\vee}} = \prod_{i=1}^{n(e)} (1 - p_i),
\end{gathered} \tag{5.16}$$

где p_i – сигнальная вероятность (вероятность появления сигнала 1) i-го входа элемента.

Если заданы сигнальные вероятности входных сигналов схемы, то они могут быть распространены на выходы элементов схемы и через всю схему на ее выходные полюсы. Таким образом, могут быть подсчитаны переключательные активности всех полюсов схемы и соответственно переключательная активность схемы в целом как сумма переключательных активностей всех ее полюсов. Следует заметить, что если даже требование пространственной (и временной) независимости выполняется для входных сигналов схемы, оно может не иметь места для входных сигналов внутренних элементов схемы (как результат наличия разветвлений на выходах элементов и линий обратной связи). В этом случае вычисленные по формулам (5.15, 5.16) вероятности имеют погрешность. Однако для сравнительной оценки вариантов оптимизации достаточно, как правило, ограничиться этими простыми оценками, не прибегая к более точным, но гораздо более трудоемко вычисляемым оценкам.

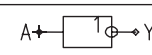
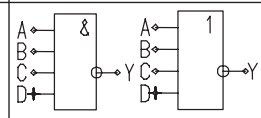
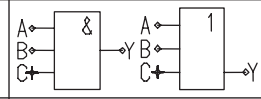
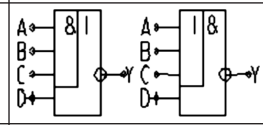
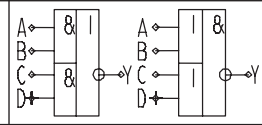
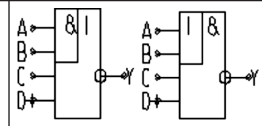
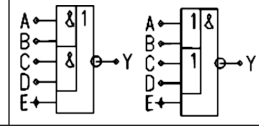
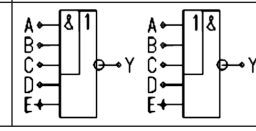
5.4.4. Выбор элементного базиса при проектировании КМОП СБИС с пониженным энергопотреблением

Элементный базис содержит достаточно широкий спектр различных логических элементов, среди которых центральное место занимает комбинационная логика – простые древообразные схемы из вентилей И, ИЛИ, НЕ. В этот набор, как правило, входят элементы И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ на разное число входов (обычно на два – четыре, а иногда и шесть, восемь входов, как в базисе [47]) и древообразные схемы (из вентилей И, ИЛИ) с числом входных полюсов не более четырех и числом уровней два – четыре. За сложность (цену) библиотечного элемента можно принять число транзисторов его микросхемы (или число топологических базовых ячеек, размеры которых зависят от технологии изготовления КМОП элементов). Это число прямо связано с площадью, занимаемой элементом на кристалле, и его емкостной нагрузкой, от которой существенно зависит энергопотребление элемента.

Элементный базис КМОП СБИС характеризуется наличием полного множества вентилей. Структуры элементов библиотеки можно представить древообразными сетями из вентилей И, ИЛИ, НЕ. Каждое из этих деревьев имеет ограниченное число листьевых вершин и ограниченный коэффициент ветвления выхода. КМОП библиотека характеризуется тем, что для каждого элемента в ней, как правило, имеется элемент, реализующий двойственную функцию.

Так, в табл. 5.1 приведены характеристики некоторых элементов КМОП библиотеки, на примере которых будет демонстрироваться предлагаемый метод синтеза: n – число входных полюсов; k – суммарное число входных полюсов вентилей; l – число ярусов его древообразной структуры (кроме инвертора); t – число транзисторов его микросхемы. Элементы рассматриваемой КМОП библиотеки имеют следующие ограничения: $n \le 4$; $k \le 9$; $l \le 4$; $t \le 12$.

Таблица 5.1. Элементы КМОП библиотеки

Библиотечные элементы	*n*	*k*	*t*	*l*	Показатель логической эффективности	Графические обозначения элементов
НЕ N	1	1	2	1	0,5	
И-НЕ, ИЛИ-НЕ NA, NA3, NA4 NO, NO3, NO4	2, 3, 4	2, 3, 4	4, 6, 8	2	0,5; 0,5; 0,5	
И, ИЛИ A, A3 O, O3	2, 3	2, 3	6, 8	1	0,33; 0,37	
3И-2ИЛИ-НЕ 3ИЛИ-2И-НЕ NOA3 NAO3	4	5	8	3	0,63	
2-2И-2ИЛИ-НЕ 2-2ИЛИ-2И-НЕ NOAA NAOO	4	6	8	3	0,75	
2И-3ИЛИ-НЕ 2ИЛИ-3И-НЕ NO3A NA3O	4	5	8	3	0,63	
2-2И-3ИЛИ-НЕ 2-2ИЛИ-3И-НЕ NO3AA NA3OO	5	7	10	3	0,7	
3И-3ИЛИ-НЕ 3ИЛИ-3И-НЕ NO3A3 NA3O3	5	6	10	3	0,6	

Для целей оценки эффективности вариантов отображения схем в технологический базис вводится количественный показатель его логической эффективности, выражающийся в числе полюсов покрываемой библиотечным элементом схемы, которое приходится на единицу его сложности – один транзистор. Логическая эффективность элемента равна отношению k/t числа входных полюсов вентилей, представляющих структуру этого библиотечного элемента, к числу транзисторов его микросхемы. Чем больше это отношение, тем выше функциональная эффективность элемента (для целей покрытия).

Из таблицы видно, что наиболее эффективными являются элементы с наиболее сложной структурой: NOAA (2-2И-2ИЛИ-НЕ) и NO3A3 (3И-3ИЛИ-НЕ) и двойственные им NAOO (2-2ИЛИ-2И-НЕ) и NA3O3 (3ИЛИ-3И-НЕ), наименее эффективными – инвертор и двухвходовые вентили И и ИЛИ (A2 и O2). Цена сложного элемента библиотеки, как правило, меньше суммы цен составляющих его вентилей, реализованных более простыми элементами. Например, элемент

NOAA может быть реализован в виде композиции инвертора, двух элементов A2 и элемента O2. Цена элемента NOAA (восемь транзисторов) меньше цены композиции (2 + 8 + 4 = 14 транзисторов).

5.4.5. Логический синтез КМОП БИС в базисе библиотечных элементов

Энергопотребление цифровых схем в общем случае прямо пропорционально площади, занимаемой ими на кристалле СБИС. Это означает, что основной путь энергосбережения при функционировании логических схем прежде всего подразумевает сокращение площади, занимаемой схемой на кристалле СБИС. Практика показывает, что существующие методы, при которых оптимизируется сложность схемы, являются хорошей отправной точкой для развития методов минимизации энергопотребления логических схем [48]. Применение этих методов в качестве канвы для разрабатываемых методов минимизации энергопотребления требует рассмотрения также новых критериев, используемых наряду с критериями минимизации площади схем. Эти критерии существенно зависят от технологии реализации синтезируемых логических схем.

В процессе логического синтеза абстрактное описание поведения синтезируемой схемы (система булевых функций) представляется в базисе элементов технологической библиотеки КМОП СБИС. Каждый из элементов характеризуется своей функцией и физическими характеристиками. Подход основан, как и большинство известных методов синтеза, на разбиении процесса логического синтеза на стадии технологически независимой оптимизации и технологического отображения. Первая стадия синтеза ориентирована на оптимизацию и декомпозицию логики, а вторая – на реализацию полученного функционального описания в заданном технологическом базисе. Цель первого этапа заключается в минимизации сложности многоуровневой схемы в технологически независимом базисе элементов. Последний состоит, как правило, из простых вентилей, выбор которых может быть не привязан ни к какому элементному базису или может выбираться исходя из реальной технологической библиотеки, как это делается в [49]. Сложность многоуровневой схемы измеряется числом вентилей, глубиной схемы и оценкой рассеивания мощности на логическом уровне.

Второй этап заключается в переводе многоуровневой схемы из вентилей в технологический базис на основе структурного покрытия соответствующей объектной сети подсхемами, реализующими библиотечные элементы. Такой подход не предполагает кардинальную перестройку схемы, полученной на этапе технологически независимой оптимизации, а отсюда следует, что качество искомого покрытия существенно зависит от ее структуры. Просчеты, допущенные при ее синтезе, не могут быть компенсированы в полной мере на этапе технологического отображения, поэтому в существующих САПР большое внимание уделяется этапу технологически независимой оптимизации.

Технологически независимая оптимизация включает в себя в качестве первого этапа минимизацию функций реализуемых логических описаний в классе дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ). Принимая во внимание специфику КМОП

базиса, рационально проводить совместную минимизацию с учетом полярности функций, выбирая ту ее форму (ДНФ или ее инверсию), которая имеет меньшую сложность и энергопотребление. На втором этапе минимизированная система ДНФ, представляемая двухуровневой схемой, декомпозируется в многоуровневую объектную сеть из вентилей И, ИЛИ с ограниченным числом входов, на которые распадаются структуры основных элементов КМОП библиотеки, в которую планируется отобразить схему.

Сложность схемы и рассеивание ею мощности тесно связаны в том смысле, что уменьшение площади схемы имеет тенденцию обеспечивать также и снижение ее энергопотребления, а увеличение площади, наоборот, как правило, ведет также к увеличению энергопотребления [42]. Из этих соображений следует, что в процессе синтеза необходим компромисс между критериями минимизации энергопотребления и площади. Основная проблема оптимизации схемы заключается в том, что на этапе логического синтеза, еще не привязанного к конкретному технологическому базису, трудно оценить энергопотребление реальной схемы на достаточно достоверном уровне. В связи с этим минимизация динамической составляющей энергопотребления схемы (оцениваемой переключательной активностью схемы) на этапе логического синтеза в ущерб сложности схемы может, в итоге, привести к увеличению ее энергопотребления. Это происходит из-за возрастания значений других составляющих энергопотребления.

Поскольку решение проблемы оптимизации логических схем исходит из того, что основной путь энергосбережения при проектировании логических схем подразумевает сокращение площади, занимаемой схемой на кристалле, то на всех этапах логического синтеза при оценке вариантов оптимизации используется ранжированный критерий: в первую очередь количественная оценка изменения площадь, затем количественная оценка изменения переключательной активности схемы.

5.4.6. Оптимизация двухуровневых логических схем с учетом рассеивания мощности

Для оптимизации двухуровневых схем с учетом рассеяния мощности используются методы минимизации функциональных описаний систем полностью и частично определенных булевых функций, которые представляют собой модификации известных методов минимизации булевых функций в классе ДНФ путем добавления в них эвристик, направляющих процесс минимизации к получению систем ДНФ, реализуемых схемами с наименьшим рассеиванием мощности. Практически все методы минимизации двухуровневых представлений булевых функций основаны на разделении множества искомых простых импликант на три подмножества: существенные, несущественные и условно существенные. Первые должны быть включены в любое безызбыточное решение, вторые не должны включаться ни в одно решение, а из третьих выбирается некоторое безызбыточное подмножество, покрывающее все интервалы единичных областей задания минимизируемых функций, которые оказались не покрытыми существенными импликантами.

Методы минимизации различаются способами построения простых импликант из числа условно существенных и критериями, которым они должны удовлетворять для включения их в решение. Различают методы:

1) последовательного построения простых импликант, включаемых в решение (например, метод конкурирующих интервалов [50]), путем укрупнения интервала булева пространства аргументов, представляющего импликанту, за счет включения в него непокрытых элементарных конъюнкций;
2) последовательного расширения интервала булева пространства аргументов, представляющего сначала конъюнкцию исходной ДНФ, а в перспективе простую импликанту, покрывающую эту конъюнкцию, за счет исключения некоторых литералов, входящих в нее (например, методы реализуемые ESPRESSO [51]).

Простейший метод минимизации может использовать лишь одну операцию расширения условно существенных импликант. Наиболее просто с целью учета энергосбережения модифицируются методы минимизации, в которых в качестве кандидатов в искомое решение строится сразу несколько простых импликант, или методы, в которых найденное решение модифицируется методом последовательных улучшений.

Для того чтобы направить минимизацию к получению энергосберегающего решения, необходимо в процессе получения простых импликант и безызбыточных покрытий вычислять и учитывать переключательные активности всех простых импликант, используя формулы (5.15), (5.16). Для пояснения процедур, направляющих процесс минимизации на получение нужного результата, рассмотрим операции, входящие практически во все методы минимизации.

Операция расширения интервала выполняется путем исключения его литералов. При расширении интервала принимаются во внимание две цели: уменьшить сложность этого интервала, т.е. максимально расширить его и покрыть с его помощью (полностью или частично) как можно больше непокрытых еще интервалов. При минимизации энергопотребления желательно

1) исключать не любые, а наиболее активные литералы;
2) покрывать не любые, а наиболее энергоемкие интервалы.

В силу первого утверждения на предмет исключения проверяются сначала литералы с большей переключательной активностью. В силу второго утверждения важен порядок расширения интервалов: слишком раннее расширение интервала может препятствовать ситуации, когда некий другой интервал покроет этот рассматриваемый. Чтобы снизить энергопотребление, оценивается энергетический вклад каждого интервала, и энергоемкие (с большой переключательной активностью) интервалы расширяются последними в надежде на то, что некоторые другие интервалы расширятся и покроют их.

Операция нахождения безызбыточного покрытия заключается в приведении текущего покрытия ДНФ к безызбыточному виду. При поиске безызбыточного множества простых импликант выбирается минимальное число наименее активных (с меньшей переключательной активностью) импликант. При этом из безызбыточных множеств простых импликант, представляющих собой покрытие исходного множества интервалов единичных областей минимизируемых булевых функций, отбираются минимальные по мощности или по суммарному числу литералов всех импликант. Каждое из отобранных множеств оценивается суммой переключательных активностей (или плотностей переключений [45, 52]) входящих в него имп-

ликант, и в качестве решения выбирается безызбыточное множество с минимальной оценкой переключательной активности.

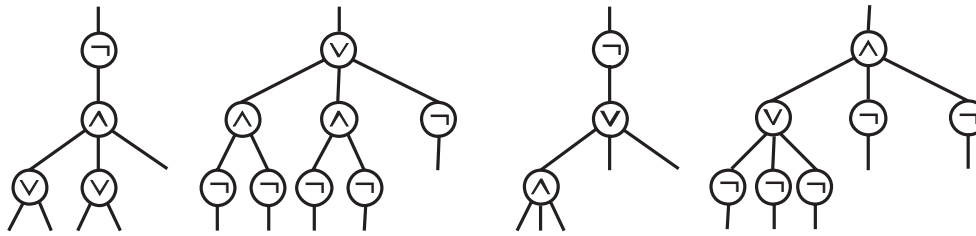
Проведенное сравнение модифицированных методов минимизации [53] с исходными методами (без учета энергопотребления) показало, что минимизация булевых функций с учетом переключательной активности сигналов позволяет получить уменьшение энергопотребления схем без увеличения их сложности. При этом вычислительные затраты на минимизацию увеличиваются незначительно.

5.4.7. Выбор базовых вентилей технологически независимой функциональной схемы

Существуют разные подходы к выбору базовых вентилей при синтезе технологически независимой схемы. Обычно описание реализуемой логики транслируется (в результате минимизации) в эквивалентное И-ИЛИ-описание, которое на этапе декомпозиции переводится в однородный базис двухвходовых И-НЕ или ИЛИ-НЕ [51, 54]. Использование минимального числа базовых вентилей за счет их простоты (например, 2И-НЕ), как это принято в ряде известных САПР (например, MIS [33], SIS [56], ABC), приводит к повышению гранулярности логической сети, а значит, в общем случае может повысить и качество ее покрытия библиотечными элементами за счет увеличения числа вариантов покрытия. Однако в случае КМОП базиса это преимущество может перекрываться значительно большим числом недостатков: усложняются представления библиотечных элементов (в таком «мелком» базисе); увеличивается число разных представлений одного и того же элемента; уменьшается быстродействие методов покрытия, что приводит, в свою очередь, к необходимости еще большего их огрубления.

Для случая КМОП библиотеки значительно более привлекателен выбор технологически обусловленного базиса базовых вентилей [49]. В качестве базовых выбираются вентили, входящие в состав библиотечных элементов технологического базиса. Такой подход позволяет получать на этапе технологически независимой оптимизации логическую сеть, максимально приближенную к технологическому базису, а соответственно и применять более эффективные и простые алгоритмы покрытия при технологическом отображении. Кроме того, такой подход позволяет упростить сами модельные представления библиотечных элементов (они представляются в том же вентильном базисе, что и покрываемая объектная сеть) и их число (а значит, и размер библиотеки), что немаловажно для увеличения быстродействия алгоритма покрытия.

Если проанализировать состав КМОП библиотеки, то можно заметить, что структуры всех сложных элементов могут быть представлены схемами из чередующихся вентилей И и ИЛИ. Это значит, что простое представление многоместных функций И или ИЛИ в виде композиции двухместных не даст новых возможностей для покрытия, но приведет к упомянутым негативным последствиям. Поэтому для рассматриваемого технологического базиса целесообразно выбрать в качестве базовых вентили НЕ, И и ИЛИ с ограниченным числом входов, не бóльшим максимального числа входов вентилей (И-НЕ, ИЛИ-НЕ) этой библиотеки.



а) *б)*

Рис. 5.15. Структуры двух нетривиальных элементов КМОП библиотеки: 2-2ИЛИ-3И-НЕ (NA3OO) (*а*); 3И-3ИЛИ-НЕ (NO3A3) (*б*)

В процессе покрытия структурные схемы библиотечных элементов сравниваются с фрагментами покрываемой схемы и в случае полного совпадения заменяют их. Соответственно каждый библиотечный элемент должен быть представлен разными структурами, реализующими его функцию. Как уже было отмечено, основная масса наиболее эффективных элементов реализует инверсную логику, а отдельно выполненные инверторы являются достаточно дорогими КМОП элементами. В связи с этим при структурном покрытии схемы наряду со структурами элементов, отображающими реализуемую ими функцию, в библиотеку структурных описаний предлагается включать также двойственные структуры, получаемые путем переноса инверторов с выходов на входы (смены вентилей И на ИЛИ, а ИЛИ на И) (рис. 5.15). Например, элемент 2И-2ИЛИ-НЕ (NOA), реализующий функцию $ab \vee c$, порождает элемент 2ИЛИ-2И (AON) с инверторами на входах, реализующий функцию $(\overline{a} \vee \overline{b})\overline{c}$.

5.4.8. Оптимизация многоуровневых логических схем из многовходовых вентилей

На этом этапе рассматривается задача построения многоуровневой логической схемы из вентилей И, ИЛИ, НЕ, реализующей систему булевых функций. Эта задача непосредственно следует за минимизацией булевых функций в классе ДНФ и предшествует синтезу логических схем из библиотечных элементов, выполненных по КМОП технологии. Цель этапа заключается в том, чтобы построить такой вариант представления схемы из вентилей, который мог бы служить хорошей отправной точкой для этапа технологического отображения в базис библиотечных элементов. В качестве количественных оценок эффективности проектирования на этом этапе используются суммарное число входных полюсов вентилей и суммарная переключательная активность полюсов схемы.

Комбинационные элементы типичной библиотеки КМОП СБИС на логическом уровне можно представить древообразными структурами из вентилей НЕ, И и ИЛИ, реализующими инверсную логику. Например, двухъярусные И-НЕ, ИЛИ-НЕ, трехъярусные 2-2И-2ИЛИ-НЕ. Элементы, реализуемые многоярусными структурами, включают в себя вентили с двумя и тремя входными полюсами. Логическую эффективность элемента библиотеки можно оценивать отношением

суммарного числа полюсов его структуры к числу транзисторов. Наиболее эффективными элементами являются сильно структурированные микросхемы из вентилей И и ИЛИ с числом входов 2 и 3, наименее эффективными – инвертор и двухвходовые вентили. Соответственно наиболее привлекательными с точки зрения покрытия библиотечными элементами являются сильно структурированные сети из вентилей И, ИЛИ с малым числом входных полюсов. Эти соображения положены в основу принятого метода синтеза многоуровневых схем.

Основным, используемым во всех САПР, методом решения задачи декомпозиции систем ДНФ является алгебраическая декомпозиция [48], в основе которой лежит построение факторизованных форм (или факторизованных ДНФ) путем поиска факторов – общих частей конъюнкций или дизъюнкций ДНФ системы. Факторизованная форма является алгебраической формой задания многоуровневого представления ДНФ. Преобразование исходной минимизированной системы ДНФ в факторизованную форму, которой соответствует многоуровневая реализация из вентилей с ограниченным числом входов разбивается на два этапа [57].

Совместная нетривиальная факторизация системы ДНФ: выделяются факторы (конъюнкции или ДНФ), которые имеют длину (число литералов) не более максимальных чисел входов n_{max} и m_{max} вентилей И и ИЛИ и входят в не менее чем в n_{dl} выражений. Ключевым вопросом при поиске факторов является вопрос оценки их стоимостного и энергосберегающего качества. Стоимостное качество T_s фактора s, входящего в выражения из его порождающего множества U_s, упрощенно оценивается площадью соответствующего ему минора булевой матрицы, задающей факторизуемое множество выражений:

$$T_s = c(s)\,(|\,U_s| - 1), \tag{5.17}$$

где $c(s)$ – цена реализации выражения s по Квайну.

Энергосберегающее качество фактора количественно оценивается тем выигрышем в переключательной активности искомой схемы, который дает выделение этого фактора. В факторизованном множестве выражений переключательные активности всех выражений не изменятся по сравнению с их значениями в исходном множестве, но изменяется нагрузка полюсов схемы, соответствующих литералам, входящим в фактор s: она уменьшится на $(|\,U_s| - 1)$, соответственно изменяется и суммарная переключательная активность полюсов схемы, реализующих факторизованное множество выражений. Энергосберегающее качество фактора $s = \{z_1, z_2, ..., z_l\}$ оценивается как

$$P_s = (|U_s| - 1) \sum_{z_i \in s} E(z_i). \tag{5.18}$$

Построение скобочных выражений ДНФ каждой из функций системы основано на итеративном вынесении общих литералов конъюнкций заданной ДНФ D за скобки, т.е. на декомпозиции [58]:

$$D = k\,(A) + B, \tag{5.19}$$

где D, A и B – ДНФ (дизъюнкции некоторого множества конъюнкций), а k – конъюнкция, состоящая из некоторого множества литералов, общих для всех конъюнкций из A. Конъюнкция k выбирается следующим образом: ее ядром является некоторый «лучший» литерал x, вместе с этим литералом за скобки выносятся и другие литералы, общие для конъюнкций из ДНФ A. Лучшим считается тот литерал x, который входит в максимальное число l конъюнкций из D, а из равноценных по этому критерию – тот, что имеет максимальное значение переключательной активности. Такой выбор литерала обосновывается тем, что

1) энергонагрузка на полюс схемы, имеющий переключательную активность E_x и соответствующий литералу x, выносимому из l выражений, уменьшается на величину: $(l-1)E_x$;
2) наиболее активный сигнал будет подаваться на схему ближе к выходу, что позволит уменьшить суммарную переключательную активность схемы.

После окончания итеративного процесса вынесения общих литералов конъюнкций за скобки оставшиеся конъюнкции ранга, большего, чем n_{max}, факторизуются раздельно. При этом в фактор включаются в первую очередь литералы, соответствующие полюсам с наименьшей переключательной активностью, так как наиболее активные сигналы желательно подавать на входы элементов схемы как можно ближе к выходу.

Проведенные экспериментальные исследования [57] показали, что предложенный метод синтеза позволяет получить достаточно стабильный выигрыш в оценке рассеивания мощности проектируемой схемы по сравнению с аналогичным методом без учета энергопотребления.

5.4.9. Оптимизация многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилей

Оптимизация многоуровневых представлений осуществляется как на уровне алгебраических представлений систем булевых функций, так и на функциональном уровне на основе поиска BDD-представлений систем булевых функций, которым соответствуют многоуровневые логические схемы из двухвходовых вентилей И и ИЛИ.

BDD-представление строится на основе последовательного разложения Шеннона по переменным x_i, применяемого к булевым функциям $f(x_1, ..., x_2)$:

$$f = \bar{x}_i f(x_1,...,x_{i-1},0,x_{i+1},...,x_n) \vee x_i f(x_1,...,x_{i-1},1,x_{i+1},...,x_n). \qquad (5.20)$$

Коэффициенты разложения $f(x_1, ..., x_{i-1}, 0, x_{i+1}, ... x_n)$ и $f(x_1, ..., x_{i-1}, 0, x_{i+1}, ... x_n)$ получаются из функции $f(x_1, ..., x_n)$ подстановкой вместо переменной x_i константы 0 или 1 соответственно. BDD задает в виде графа последовательность разложений Шеннона исходной функции и получаемых коэффициентов разложения. Минимизация сложности BDD основана на том, что в процессе разложения могут появляться одинаковые коэффициенты разложения не только у одной, но и у нескольких (либо даже у всех) разлагаемых функций исходной системы. Под BDD-минимизацией далее понимается оптимизация многоуровневых представлений систем булевых функций, соответствующих сокращенным упорядоченным BDD (англ. Reduced Ordered BDD, ROBDD).

Например, при разложении системы булевых функций

$$
\begin{aligned}
f^1 &= x_1 x_2 \overline{x}_4 x_5 \overline{x}_6 \vee \overline{x}_1 x_4 \overline{x}_5 x_6 \vee x_2 \overline{x}_3 x_5;\\
f^2 &= \overline{x}_1 \overline{x}_4 x_5 \overline{x}_6 \vee \overline{x}_1 \overline{x}_3 x_5 \vee x_1 x_2 x_3 x_5 \overline{x}_6 \vee x_1 \overline{x}_2 x_4 \overline{x}_5 x_6;\\
f^3 &= x_1 \overline{x}_2 \overline{x}_3 x_6 \vee x_1 \overline{x}_2 x_4 x_6 \vee x_1 \overline{x}_3 x_4 x_6 \vee \overline{x}_1 x_2 \overline{x}_4 x_5 \overline{x}_6 \vee x_1 \overline{x}_2 x_5 \vee x_2 \overline{x}_3 x_5
\end{aligned}
\qquad (5.21)
$$

по переменным x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 получается BDD-представление (рис. 5.16), которое описывается следующим многоуровневым представлением логической схемы из двухвходовых вентилей И и ИЛИ:

$$
\begin{aligned}
&f^1 = \overline{x}_1 \psi^1 \vee x_1 \psi^2;\ f^2 = \overline{x}_1 \varphi^2 \vee x_1 \psi^3;\ f^3 = \overline{x}_1 \psi^2 \vee x_1 \psi^4;\\
&\psi^1 = \overline{x}_2 \varphi^1 \vee x_2 \varphi^1;\ \psi^2 = x_2 \varphi^2;\ \psi^3 = \overline{x}_2 s^1 \vee x_2 \varphi^3;\ \psi^4 = \overline{x}_2 \varphi^4 \vee x_2 \varphi^5;\\
&\varphi^1 = \overline{x}_3 s^2 \vee x_3 s^1;\ \varphi^2 = \overline{x}_3 \lambda^3 \vee x_3 s^3;\ \varphi^3 = x_3 \lambda^4;\ \varphi^4 = \overline{x}_3 \lambda^2 \vee x_3 s^2;\\
&\varphi^5 = \overline{x}_3 s^2;\ s^1 = x_4 \lambda^1;\ s^2 = \overline{x}_4 \lambda^3 \vee x_4 \lambda^2;\ s^3 = \overline{x}_4 \lambda^4;\\
&\lambda^1 = \overline{x}_5 \omega^1;\ \lambda^2 = \overline{x}_5 \omega^1 \vee x_5;\ \lambda^3 = x_5;\ \lambda^4 = x_5 \omega^2;\ \omega^1 = x_6;\ \omega^2 = \overline{x}_6.
\end{aligned}
\qquad (5.22)
$$

Каждой функциональной вершине BDD соответствует разложение Шеннона либо его частный случай. Сложность BDD оценивается числом вершин, помеченных символами функций, вершины, соответствующие аргументам, при оценке сложности BDD в расчет не принимаются. Например, сложность BDD (рис. 5.16) равна 21. Основной проблемой при построении BDD является выбор последовательности переменных, по которой ведется разложение Шеннона.

При «энергетической» оптимизации BDD в качестве первого, основного, критерия принят минимум сложности BDD, в качестве второго, подчиненного, принят критерий, связанный с вероятностями изменения сигналов на входах схемы. Первый критерий ориентирован на минимизацию сложности (числа транзисторов) логической схемы, которая строится на этапе технологического отображения, так как сокращение числа транзисторов позволяет уменьшить энергопотребление. Второй критерий позволяет отобрать среди BDD одинаковой сложности такие, по которым могут быть построены комбинационные логические схемы, характеризующиеся низким энергопотреблением.

За оценку энергетического качества переменной x_i в BDD-представлении принята величина

$$K_i = p_i s_i, \text{ если } p_i < 0{,}5;\ K_i = (1 - p_i) s_i, \text{ если } p_i \geq 0{,}5, \qquad (5.23)$$

где p_i – вероятность появления единичного значения сигнала x_i на входе логической схемы, реализующей BDD; s_i – число литералов переменной x_i в многоуровневом представлении системы функций, соответствующем BDD.

Переменные x_i, характеризующиеся вероятностью p_i близкой к 0,5, вызывают наибольшее число переключений на входах элементов схемы. Следовательно, число появлений литералов таких переменных в функциональном представлении BDD желательно минимизировать. Если же вероятность p_i близка к 0 либо 1, то такие переменные будут вызывать меньшее число переключений сигналов в схеме.

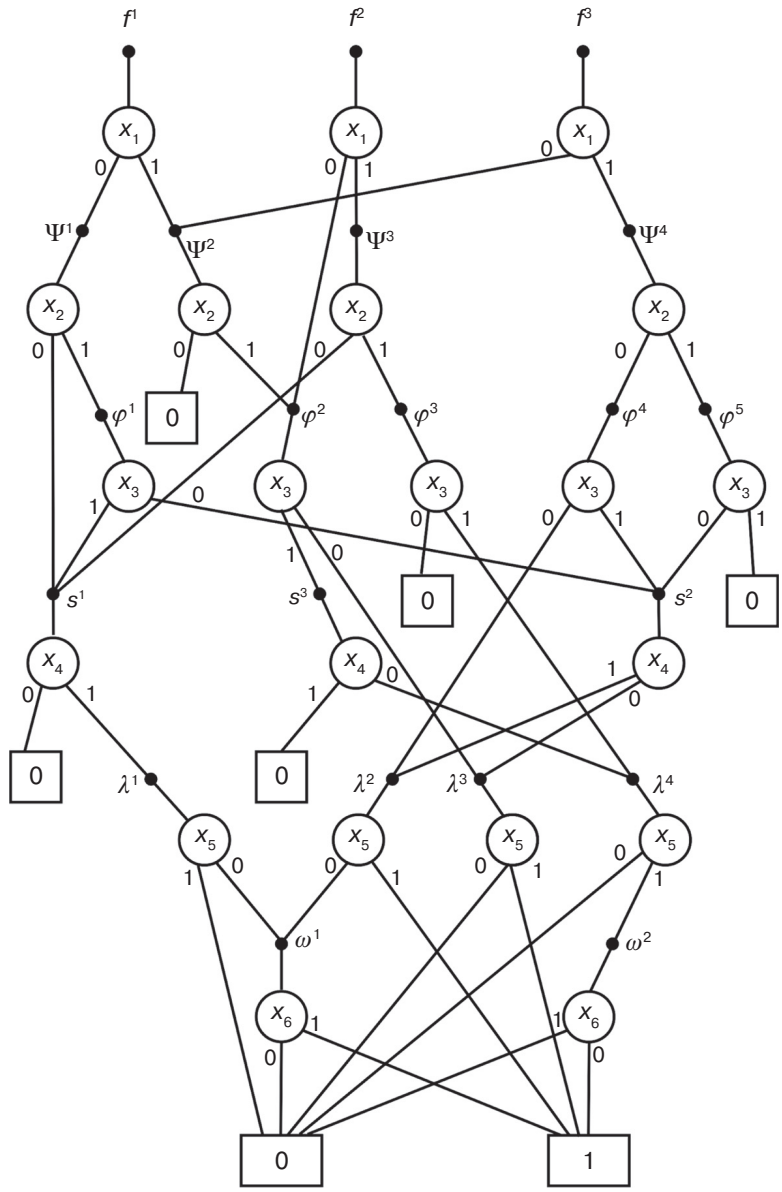


Рис. 5.16. Бинарная диаграмма решений (BDD)

Поэтому переменные, характеризуемые низким значением величины K_i, желательно располагать в середине последовательности переменных, по которой строится BDD.

Следует заметить, что программы оптимизации многоуровневых представлений логические схемы из двухвходовых вентилей И и ИЛИ могут обрабатывать как системы полностью определенных, так и системы частичных булевых функций, заданных наборами значений аргументов, либо в интервальной форме.

5.4.10. Технологическое отображение

На этапе технологического отображения используется структурный метод покрытия (наиболее эффективный в практике проектирования сложных схем) многоуровневой схемы из вентилей И, ИЛИ библиотечными элементами. В процессе покрытия структурные схемы библиотечных элементов сравниваются с фрагментами покрываемой схемы и в случае полного совпадения заменяют их. Соответственно каждый библиотечный элемент должен быть представлен разными структурами, реализующими его функцию.

Покрываемая многоуровневая многовыходная логическая сеть из вентилей представляется ориентированным ациклическим графом $G = (V, U)$, называемым далее объектным. Вершины графа соответствуют базовым вентилям и входным полюсам схемы. Структурное описание библиотечного элемента представляет собой одновыходную многоуровневую логическую сеть из тех же базовых вентилей, что и покрываемая объектная сеть. Каждый библиотечный элемент представляется древообразным ориентированным графом, называемым далее модельным.

Метод покрытия основан на последовательном выделении подграфов G_k графа G, сравнении каждого из них на предмет покрытия его графами H_i и замене его графом H_l, дающим наибольшее значение выбранных критериев оптимизации [60]. Таким образом, метод обеспечивает локальную оптимизацию и является приближенным. В процессе покрытия граф G сжимается за счет исключения из него покрытых подграфов. Одновременно наращивается (начиная с пустого) результирующий граф E, представляющий логическую сеть из библиотечных элементов, которая функционально эквивалентна исходной объектной сети.

Критерии оптимизации покрытия. В процессе покрытия необходимо получить такой вариант схемы из библиотечных элементов, который обеспечивал бы минимум площади и рассеивания мощности. В предлагаемом методе в качестве первого критерия оптимизации принимается площадь полученной в результате покрытия схемы, которая измеряется суммарным числом транзисторов всех библиотечных элементов и оценивается суммой стоимостей модельных графов, входящих в покрытие объектного графа. Соответственно, в качестве стоимостной оценки варианта покрытия подграфа графа $G = (V, U)$ принимается относительная стоимость покрытия одного полюса объектной сети, которая измеряется отношением числа покрытых полюсов фрагмента сети к стоимости покрывающего библиотечного элемента (которая измеряется числом транзисторов) – чем больше это число, тем более желателен вариант покрытия.

Энергопотребление схемы, полученной в результате покрытия, оценивается суммой переключательных активностей всех полюсов схемы. Соответственно в качестве энергосберегающей оценки варианта покрытия подграфа графа $G = (V, U)$ принимается сумма переключательных активностей вентилей, покрытых библиотечным элементом.

Если пренебречь задержкой сигналов в логических элементах, то при оценке рассеивания мощности можно пренебречь также и интенсивностью переключений сигналов на внутренних полюсах библиотечных элементов. Это допущение обосновывается тем, что наиболее существенный вклад в паразитную емкость схемы

вносят соединительные линии, и на перезарядку этой емкости в процессе переключений сигналов тратится основная доля расходуемой мощности источника питания. Отсюда, схему, реализуемую по КМОП технологии, нужно покрывать библиотечными элементами так, чтобы как можно больше узлов схемы с наибольшей переключательной активностью оказались внутри библиотечных элементов. Соответственно, за значение критерия энергоэффективности варианта покрытия принимается сумма переключательных активностей элементов, которые соответствуют покрытым вершинам, ставшим внутренними вершинами покрывающего образца.

Повышение быстродействия алгоритма покрытия. Основной перебор при выполнении покрытия сосредоточен в процедуре выборы пары: покрываемый подграф G_k графа G и покрывающий модельный граф H_j библиотечного элемента. Следующие процедуры позволяют существенно сократить этот перебор.

1. **Поиск и покрытие подграфов G_k объектного графа**, допускающих покрытие единственным образом (единственным модельным графом). В простейшем случае такими подграфами являются вершины с большими степенями захода (соответствующие элементам с большим числом входных полюсов), для которых существует единственный вариант покрытия (например, для многих серий КМОП библиотек это число больше трех).

2. **Упорядочение модельных графов.** Если упорядочить модельные графы H_j по убыванию их эффективности (измеряемой отношением числа полюсов его структуры к числу транзисторов), то, сравнивая их по порядку с выделяемым на некотором шаге алгоритма покрытия подграфом G_k, можно сократить в ряде случаев перебор: если для некоторого модельного графа H_l значение $H_l/G_k = \varnothing$, то можно не производить сравнение подграфа G_k с другими графами H_j, так как они имеют меньшую эффективность и покрывают, следовательно, меньшую часть графа G. Можно ограничиться лишь поиском варианта покрытия подграфа G_k с наибольшим значением критерия энергоэффективности.

3. **Топологическая сортировка объектного и модельных графов.** Сортировка модельного графа H_l (он есть дерево) заключается в упорядочении ветвей дерева слева направо по убыванию их сложности. Ветвь P помещается левее ветви R, если P длиннее ветви R, или (если они равны по длине) при просмотре вершин от корня в ветви P раньше встретится вершина с большей полустепенью захода, чем в ветви R. Аналогично производится и частичная сортировка графа G. Сортировка позволит быстрее давать ответ на вопрос, возможно ли покрыть фрагмент объектного графа заданным модельным графом.

5.4.11. Оценка энергопотребления спроектированных КМОП БИС на логическом и схемотехническом уровнях

Кроме вероятностных оценок энергопотребления, в программном комплексе ЭЛС имеются средства, позволяющие оценить энергопотребление спроектированных комбинационных блоков заказных СБИС путем подсчета общего числа переключений транзисторов элементов схемы на заданных тестовых последовательностях входных наборов (тестах) с помощью быстродействующего VHDL-моделирования (либо SF-моделирования) [61].

Применение логического VHDL/SF моделирования для оценки энергопотребления позволяет на несколько порядков сократить время оценки при приемлемой (10–15%) погрешности такой оценки. Тесты для моделирования схемы могут быть заданы в виде текстового файла определенного формата или сгенерированы автоматически. В автоматическом режиме генерируются тесты четырех типов:

1) псевдослучайные тесты заданной длины с учетом сигнальных вероятностей входных полюсов;
2) упорядоченные по возрастанию десятичного эквивалента последовательности из 2^n наборов булева пространства размерности n;
3) упорядоченные по убыванию десятичного эквивалента последовательности из 2^n наборов булева пространства размерности n;
4) последовательности 2^n (2^n–1) упорядоченных пар всех наборов булева пространства [62].

Тесты строятся в двух форматах, а именно: для VHDL-моделирования и для SPICE-моделирования.

Нахождение энергоемкого теста T сводится к анализу всех пар наборов значений входных сигналов и соответствующих им чисел переключений транзисторов элементов схемы в предположении, что максимальному числу переключений (в заданном такте) соответствует максимальное потребление тока. Если же паре наборов значений входных сигналов поставлено в соответствие значение потребляемого тока, то найденный тест обеспечит не приближенное, а реальное (с точки зрения схемотехнического моделирования) потребление тока. Величина значения потребляемого тока определяет минимальную ширину проводников в сетях питания и заземления СБИС, правильная ширина таких проводников важна для предотвращения эффектов электромиграции, приводящих к разрыву проводников и сбоям при функционировании СБИС.

Пусть задано множество чисел $V = \{0, 1, 2, ..., 2^n - 1\}$, каждое из которых представляет собой десятичный эквивалент тестирующего вектора – набора значений входных сигналов схемы. Рассматривается множество L всех 2^n ($2^n - 1$) упорядоченных пар $<i, j>$ элементов множества V. Перечислить без повторений все такие пары, т.е. получить упорядоченную последовательность L, можно согласно правилу треугольника [62]. Для случая $n = 3$ такой треугольник имеет следующий вид:

7, 5, 7, 4, 7, 3, 7, 2, 7, 1, 7, 0, 7
6, 4, 6, 3, 6, 2, 6, 1, 6, 0, 6,
5, 3, 5, 2, 5, 1, 5, 0, 5,
4, 2, 4, 1, 4, 0, 4,
3, 1, 3, 0, 3,
2, 0, 2,
1
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Расположив строки треугольника в линейном порядке, получим последовательность L. Каждой паре $<i, j>$ ставится в соответствие ее вес $S_{i,j}$, который равен числу переключений транзисторов в схеме, вызываемых сменой тестирующего вектора i на вектор j. Каждой упорядоченной последовательности P

$$P = <i_1, i_2, i_3, i_4, \ldots i_{k-2}, i_{k-1}, i_k> \quad (5.24)$$

элементов (не обязательно различных) множества V соответствует множество

$$<i_1, i_2>, <i_2, i_3>, <i_3, i_4>, \ldots, <i_{k-2}, i_{k-1}>, <i_{k-1}, i_k>$$

упорядоченных пар, составленных из соседних элементов последовательности (5.24). Упорядоченная k-последовательность (5.24) называется правильной, если все входящие в нее упорядоченные пары $<i, j>$ являются различными.

Задача нахождения энергоемкого теста T формулируется следующим образом: для заданного числа k требуется составить из элементов множества L правильную k-последовательность P с максимальной суммой весов

$$S = \sum_{q=2}^{k-1} (S_{i_{q-1}, i_q} + S_{i_q, i_{q+1}}). \quad (5.25)$$

Если каждому элементу множества L поставить в соответствие вершину полного ориентированного графа G, то задача может быть переформулирована в графовой постановке: в полном ориентированном графе G, дуги которого взвешены неотрицательными целыми числами, требуется найти простую цепь, состоящую из k дуг и имеющую максимальную сумму S весов входящих в нее дуг. Данная задача и алгоритмы ее решения известны в теории графов. Алгоритмы решения задачи нахождения теста T для случая, когда число входных переменных комбинационной схемы не превышает двух десятков, предложены в [63].

Разработаны программные средства получения Spice-описаний логических схем и генерации различных тестов. Эти средства позволяют проводить оценку энергопотребления с помощью систем схемотехнического моделирования.

5.4.12. Технология проектирования КМОП БИС с пониженным энергопотреблением с использованием комплекса ЭЛС

Проектирование цифровых блоков СБИС в рамках комплекса представляет собой многоэтапный процесс изменения структурного или функционального описания схемы. Каждое из полученных описаний схемы задает новое состояние проекта и называется проектным решением. Процесс проектирования начинается с исходного описания цифрового блока на одном из входных языков проектирования и заканчивается представлением его схемы в технологическом базисе. Проектные решения могут быть получены как в автоматическом (с использованием программных средств синтеза и оптимизации), так и в полуавтоматическом (путем корректировки решения проектировщиком) режимах. Для того, чтобы избежать распространения ошибок, допущенных на одном из ранних этапов проектирования, в комплекс включены средства верификации проектных решений на всех этапах проектирования [64, 65]. Верификация состоит в проверке, находятся ли полученные решения в отношении эквивалентности (если оба описания полностью определены) или реализации (если исходное не полностью определено).

Процесс проектирования с использованием программного комплекса ЭЛС включает следующие стадии (каждая из которых реализуется набором альтернативных проектных операций):

– разработка функционального описания проектируемой схемы;
– оптимизация функциональных описаний двухуровневых и многоуровневых схем с учетом сложности и энергопотребления;
– синтез и оптимизация схем в заданной библиотеке КМОП элементов с учетом сложности и энергопотребления;
– верификация проектных решений на всех стадиях проектирования;
– генерация тестовых последовательностей и оценка энергопотребления на логическом и схемотехническом уровнях.

Общая структурная схема преобразования данных в экспериментальном программном комплексе ЭЛС автоматизированного проектирования логических схем из элементов КМОП библиотеки с минимизацией энергопотребления показана на рис. 5.17.

Технология проектирования при использовании программного комплекса ЭЛС основывается на последовательном преобразовании описания проектируемой схемы, представленного на языке SF [9]. Язык SF, являясь также и внутренним языком системы, ориентирован на иерархические структурно-функциональные описания логических схем. Комбинационные блоки, либо элементы на языке SF задаются либо в виде логических уравнений, либо в матричном виде (парой матриц, описывающих систему ДНФ булевых функций). Исходное функционально-структурное описание проектируемой схемы может быть представлено на языке VHDL.

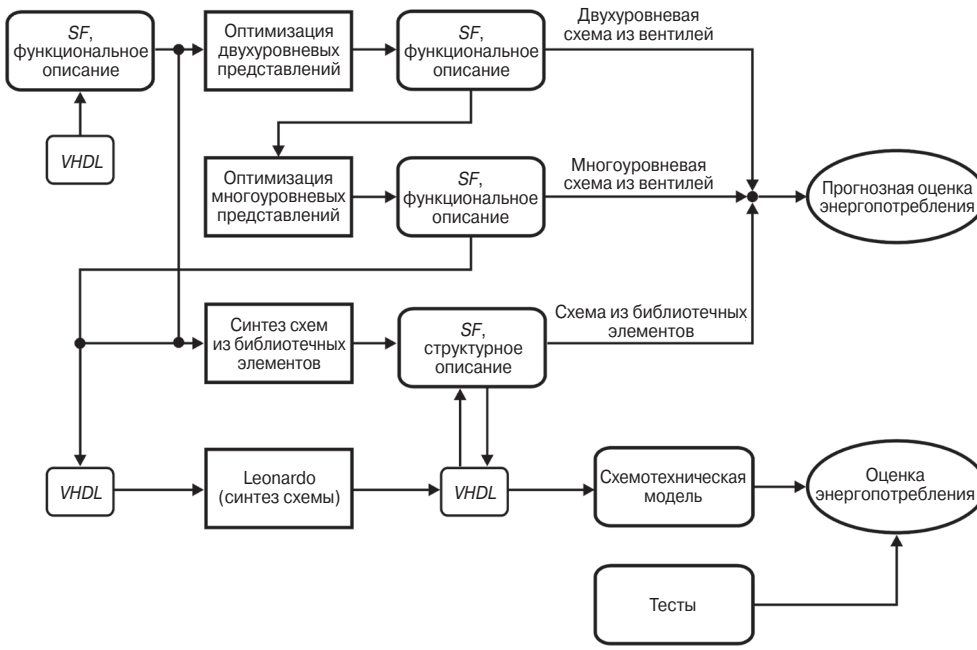


Рис. 5.17. Синтез логических схем в рамках комплекса программ ЭЛС

Комплекс ЭЛС обеспечивает конвертацию описания схемы с VHDL на язык SF [66]. Обеспечивается и обратная конвертация полученного структурного описания схемы из элементов библиотеки КМОП СБИС в описание на языке VHDL. Конвертированным в VHDL может быть и любое промежуточное описание логической схемы, проектируемой в ЭЛС. Такое согласование данных позволяет использовать программный комплекс ЭЛС совместно с другими существующими средствами проектирования схем, например, с синтезатором логических схем LeonardoSpectrum [67]. Многочисленные эксперименты подтвердили эффективность такого подхода к проектированию. В этом случае предварительная оптимизация выполняется с помощью программ, отсутствующих в LeonardoSpectrum, а заключительный этап, связанный с покрытием оптимизированных представлений функциональными описаниями элементов целевой библиотеки, выполняет промышленный синтезатор LeonardoSpectrum.

5.4.13. Архитектура программного комплекса ЭЛС

Программная оболочка комплекса ЭЛС имеет средства информационной и языковой поддержки процессов проектирования. Такие средства включают: справочную подсистему и выдачу экспресс-оценок результатов выполнения проектных операций; реализацию альтернативных технологических маршрутов проектирования и проектных операций. Программный комплекс ЭЛС состоит из четырех подсистем: формирования проекта; оптимизации проекта; верификации; оценки энергопотребления.

Первая подсистема обеспечивает поддержку создания, редактирования, преобразования форм исходного задания проекта. Вторая – сопровождает выполнение проектных процедур оптимизации и синтеза. Третья подсистема осуществляет контроль преобразований описания проекта. Четвертая – поддерживает механизмы генерации тестов и оценки энергопотребления на сгенерированных или заданных тестах.

Все данные о текущем состоянии проектируемой схемы образуют проект. Кроме SF-описания схемы в проекте определен ряд дополнительных данных, часть из которых представлена атрибутами и отражает некоторые свойства текущего описания схемы. К их числу, например, относятся: текущий формат описания; параметры выполняемой проектной операции; имя последней выполненной проектной операции; возможные последующие действия; история выполнения проектных операций (например, выполнялась или нет минимизация схемы) и пр.

В соответствии с назначением программного комплекса в качестве используемых входных данных для проектирования могут выступать:

- функциональное описание проектируемых схем комбинационной логики на языках VHDL и SF;
- функционально-структурное описание проектируемых схем комбинационной логики на языках VHDL и SF;
- распределение сигнальных вероятностей появления значения 1 на входах проектируемой схемы;

– наборы тестовых последовательностей, которые используются для моделирования поведения проектируемой схемы на предмет построения оценок их энергопотребления;
– рабочие модели для проведения моделирования схем в системе SPICE.

Программная оболочка представляет собой набор инструментальных и сервисных средств для наблюдения за ходом проектирования и управления им. Она включает в себя совокупность следующих подсистем:

– развертывания сеанса;
– формирования или настройки проекта;
– импорта и экспорта VHDL-описаний;
– обслуживания используемых в проекте данных;
– организации выполнения проектных операций;
– верификации полученных проектных решений;
– оценки переключательной активности схемной реализации проектного решения на всех этапах оптимизации и синтеза логической схемы;
– оценки энергопотребления проектируемой схемы.

Весь процесс проектирования ориентирован на использование интерактивного, диалогового режима с поддержкой и подсказками системной части комплекса. Комплекс снабжен развитой справочной системой. Все программы комплекса ЭЛС написаны на языке C++ с использованием разработанных авторами структур данных и протестированы в рамках программы тестовых испытаний под управлением операционной системы WindowsXP.

5.4.14. Функциональные возможности программного комплекса ЭЛС

Программный комплекс ЭЛС включает в себя шесть групп (классов) программ, поддерживающих полный цикл проектирования логических схем из библиотечных элементов. Эти программы обеспечивают синтез схем и их оптимизацию по площади и энергопотреблению на всех стадиях проектирования.

1. Двухуровневая оптимизация включает набор программ минимизации систем полностью и частично определенных булевых функций в классе ДНФ. Основным критерием оптимизации в данном случае является минимум интегральной оценки. Эта оценка учитывает сложность получаемых ДНФ и суммарную переключательную активность реализующих их двухуровневых схем.

Разработанный пакет программ двухуровневой оптимизации включает в себя программы, реализующие приближенные методы. Точные методы минимизации в комплекс не были включены. Причина в том, что для булевых функций реальной размерности получение минимальных ДНФ в приемлемое для практического применения время представляет большие сложности. Текущая версия программного комплекса ЭЛС включает в себя программы двухуровневой оптимизации [53] (рис. 5.18), реализующие следующие методы:

– параметрически настраиваемая минимизация;
– минимизация путем группирования по классам;
– минимизация Espresso.

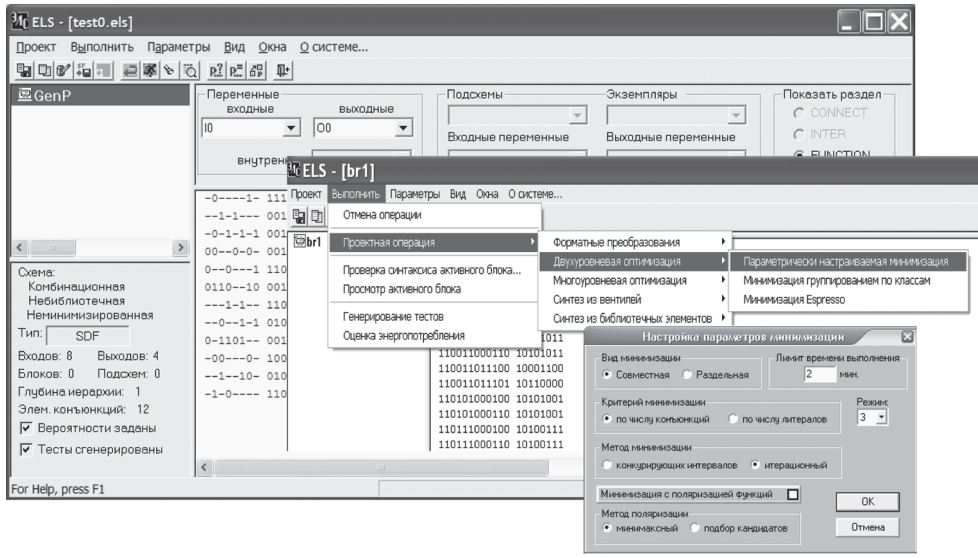


Рис. 5.18. Окна программного комплекса в режиме проектирования

Эти программы обеспечивают минимизацию при следующих потенциально возможных требованиях:

а) требования к объекту оптимизации:
- одной полностью определенной булевой функции или системы таких функций,
- одной частично определенной булевой функции или системы таких функций;

б) требования к методу решения:
- итеративный метод минимизации [53],
- метод конкурирующих интервалов [53, 68],
- модифицированный метод минимизации ESPRESSO [51];
- метод группирования по классам [69];

в) требования к способу учета совместности минимизации системы ДНФ:
- раздельная минимизация функций системы ДНФ,
- совместная минимизация функций системы ДНФ;

г) требования к критерию оптимизации по энергопотреблению:
- без учета энергопотребления,
- с учетом энергопотребления;

д) требования к учету дополнительных настроек, включающих:
- получение парафазных реализаций ДНФ [68];
- минимизацию числа конъюнкций результирующей системы ДНФ,
- минимизацию числа литералов конъюнкций результирующей системы ДНФ,
- лимит времени минимизации,
- режим работы алгоритма (для метода конкурирующих интервалов).

2. Многоуровневая оптимизация включает набор программ построения и оптимизации многоуровневых представлений систем полностью определенных буле-

вых функций. Многоуровневые представления задаются системами факторизованных форм, конъюнкции и дизъюнкции которых имеют ограниченные ранги [49]. Такой подход приближает соответствие многоуровневого представления ограничениям целевого библиотечного базиса. Текущая версия комплекса ЭЛС включает в себя программы, реализующие приближенные методы совместной и раздельной факторизации с учетом энергопотребления. Исходными данными для программ многоуровневой оптимизации являются:

– функциональное описание системы булевых функций, заданное на языке SF;
– сигнальные вероятности для входных полюсов схемы, если требуется учет энергопотребления;
– ограничение на ранги конъюнкций;
– ограничение на ранги дизъюнкций.

3. Синтез логических сетей из вентилей включает набор программ синтеза и оптимизации многоуровневых сетей из вентилей И, ИЛИ (с использованием инверторов на входах) с ограниченным числом входных полюсов. Основным критерием качества многоуровневой схемы является минимум интегральной оценки, которая учитывает сложность схемы (измеряемой числом входных полюсов всех ее вентилей) и суммарную переключательную активность всех ее полюсов (включая входные, внутренние и выходные полюсы).

Текущая версия комплекса ЭЛС включает в себя программы синтеза логических сетей из: двухвходовых вентилей; двухвходовых вентилей от частичных функций; многовходовых вентилей.

Первые две из этих программ реализуют методы синтеза многоуровневых логических схем из двухвходовых вентилей И, ИЛИ (с использованием инверторов) для полностью и частично определенных булевых функций [59]. Методы основаны на построении и оптимизации BDD. Третья программа реализует метод синтеза многоуровневых логических схем из вентилей И и ИЛИ с ограниченным числом входов (числа входов определяются технологическим базисом). Метод основан на сочетании алгоритмов совместной и раздельной факторизации систем ДНФ булевых функций с учетом энергопотребления [57].

Исходными данными для алгоритмов многоуровневой оптимизации являются:

– функциональное описание системы булевых функций, заданное системой ДНФ в формате SDF или LOG языка SF;
– сигнальные вероятности для входных переменных, если требуется учет энергопотребления;
– ограничение на число входных полюсов вентилей И;
– ограничение на число входных полюсов вентилей ИЛИ.

4. Синтез из библиотечных элементов включает набор программ технологического отображения многоуровневых сетей из вентилей И, ИЛИ в базис элементов заданной библиотеки КМОП СБИС. Основным критерием качества многоуровневой схемы из библиотечных элементов является минимум интегральной оценки, которая учитывает сложность схемы (измеряется числом транзисторов всех элементов) и суммарную переключательную активность всех ее полюсов (входные, внутренние и выходные полюсы).

Текущая версия комплекса ЭЛС включает в себя программы синтеза схем из библиотечных элементов, которые реализуют приближенные методы покрытия многоуровневых логических схем из вентилей И, ИЛИ:

- упрощенный метод технологического отображения схемы из вентилей в библиотечный базис;
- метод технологического отображения схемы из вентилей в библиотечный базис с оптимизацией [60];
- комбинированный метод технологического отображения системы полностью или частично определенных булевых функций в схему из библиотечных элементов.

Комбинированный метод синтеза схем из библиотечных элементов включает выполнение сразу нескольких операций, реализованных в известной системе SIS [56]: минимизация систем булевых функций, построение многоуровневой схемы из двухвходовых вентилей И-НЕ или ИЛИ-НЕ, покрытие этой схемы элементами заданной библиотеки.

5. Верификация состояний проекта включает набор программ, позволяющих осуществить верификацию заданной пары проектных решений [65]. Верификация работает для любых пар проектных решений одного и того же проекта (или разных проектов). Единственное ограничение: второе состояние не должно предшествовать первому (в цепочке выполняемых проектных операций), т.е. первый из сравниваемых объектов не может быть более определенным, чем второй, если хотя бы одно из описаний содержит неопределенность поведения (например, в случае, минимизации или схемной реализации систем частично определенных булевых функций).

Когда оба сравниваемых описания функционально полностью определены (например, в случае, комбинационных схем или систем ДНФ), при верификации проверяется, имеет ли место эквивалентность этих описаний. Если хотя бы одно из описаний содержит неопределенность поведения, при верификации проверяется, имеет ли место отношение реализации между этими описаниями, то есть реализуется ли первое описание вторым. В случае, когда первое описание не реализуется вторым, программный модуль верификации позволяет выявить причину нереализуемости, а именно: определяет интервал (или набор) и функцию исходного описания или элемент схемы, которые являются причиной нарушения реализуемости.

6. Оценку энергопотребления выполняют с помощью программ генерации тестов и оценки уровня энергопотребления схемы по результатам анализа выполнения заданного теста. Такой подход позволяет оценить эффективность проектного решения в процессе проектирования схемы после выполнения очередной операции оптимизации или синтеза, когда ее реализация на кристалле СБИС еще не получена. Оценка энергопотребления в рамках комплекса ЭЛС осуществляется путем:

- оценки переключательной активности схемы на основе подсчета сигнальных вероятностей для полюсов схемной реализации объекта проектирования, осуществляемой автоматически после каждой проектной операции, изменяющей его состояние;
- подсчета числа переключений транзисторов для схемы из библиотечных элементов на основе логического (VHDL либо SF) моделирования для заданного теста и оценки величины среднего тока, потребляемого в одном такте [61];

– оценки энергопотребления схемы из библиотечных элементов на схемотехническом уровне [70] на основе прогона тестов и измерения потребляемого тока путем SPICE-моделирования.

5.5. Особенности организации режима пониженного энергопотребления в современных интерфейсных БИС

5.5.1. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-485

Интерфейсные БИС последовательной передачи данных стандарта RS-485 широко используются в локально распределенных индустриальных сетях сбора и обработки информации с количеством приемников и передатчиков, подключенных к шине данных, равным 32, 64 или 128 в зависимости от входного сопротивления используемых приемников. В процессе контроля и обработки центральным процессором данных, поступающих от удаленных объектов, из всей совокупности микросхем распределенной сети в активном режиме в один момент времени находятся только две (одна микросхема работает на прием информации, другая – на передачу), остальные не принимают участия в процессе обмена. В связи с этим, для снижения рассеиваемой мощности такой сети, не используемые микросхемы переводятся в режим пониженного энергопотребления, иначе говоря, в режим ожидания. На первый взгляд, решение очевидное, однако, если отследить эволюцию рассматриваемого класса микросхем, его реализация проводилась в несколько этапов.

Для семейства первых ИС интерфейса RS-485 с напряжением питания 5 В специальный режим пониженного энергопотребления был реализован только на одной микросхеме (типа MAX483) [2] с низкой скоростью передачи данных (250 Кбит/с). На данной микросхеме времена задержек распространения данных и перехода БИС в режим пониженного энергопотребления и выхода из этого режима имеют сравнимые значения и не требуют от потребителя значительной переработки конструкции устройства. В семействе микросхем интерфейсных приемопередатчиков стандарта RS-485 нового поколения, которые используют пониженное до 3 В напряжение питания, переход в режим ожидания с минимальным током потребления (до 0,1 мкА) предусмотрен как в микросхемах с низкой скоростью передачи информации, так и с высокой [18]. Данный факт говорит о том, что режим пониженного потребления принят потребителем, несмотря на необходимость определенной модернизации системы обработки данных.

Рассмотрим основные особенности работы интерфейсных БИС стандарта RS-485 с режимом пониженного энергопотребления на примере наиболее часто применяемой микросхемы типа 5559ИН3Т (аналог MAX483).

Графическое обозначение микросхемы с блок-схемой приведено на рис. 5.19, функциональное назначение выводов – в табл. 5.2, рабочие состояния микросхемы – в табл. 5.3, 5.4. С целью уменьшения количества выводов дифференциальные входы приемника и дифференциальные выходы передатчика объединены.

Таблица 5.2. Назначение выводов разрабатываемой микросхемы

Номер вывода	Наименование вывода	Обозначение
01	Выход приемника	RO
02	Вход разрешения выхода приемника	RE
03	Вход разрешения выхода передатчика	DE
04	Вход передатчика	DI
05	Общий вывод	GND
06	Неинверсный вход (выход) приемника (передатчика)	A
07	Инверсный вход (выход) приемника (передатчика)	B
08	Вывод питания от источника напряжения	VCC

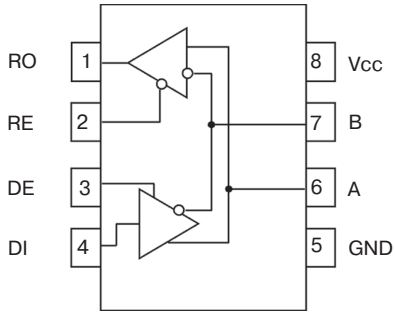


Рис. 5.19. Графическое обозначение микросхемы приемопередатчика

Таблица 5.3. Таблица истинности передатчика

Входы			Выходы	
RE	**DE**	**DI**	**B**	**A**
X	1	1	0	1
X	1	0	1	0
0	0	X	Z	Z
1	0	X	Z	Z

Таблица 5.4. Таблица истинности приемника

Входы			Выходы
RE	**DE**	**A, B**	**RO**
0	0	> + 0,2 В	1
0	0	< – 0,2 В	0
0	0	ВН	1
1	0	X	Z

Примечания:
ВН – входы не задействованы;
X – безразличное состояние;
Z – третье состояние.

Микросхема состоит из одного приемника и одного передатчика, расположенных на одном кристалле. Рассмотрим особенности ее работы.

Сигналы с уровнями КМОП/ТТЛ с материнской платы поступают на вход передатчика DI, расщепляются внутри ИС на прямой и инверсный, транслируются в уров-

ни стандарта RS-485, после чего происходит передача в длинную линию через выходные порты микросхемы с высокой нагрузочной способностью. В случае обратного преобразования сигнал с длинной линии (по стандарту до 1,2 км) поступает на дифференциальные входы приемника, который обеспечивает обратное преобразование в уровни КМОП/ТТЛ. Дифференциальный сигнал обладает высоким уровнем помехоустойчивости на фоне синфазной помехи, что обеспечивает высокую надежность в режиме передачи сигнала в длинную линию. Выходы приемника и передатчика могут быть переведены в высокоимпедансное третье состояние по входам управления RE, DE.

Режим перевода ИС в состояние с пониженным энергопотреблением реализуется только при одновременном переключении приемника и передатчика в третье состояние через определенное время удержания, оговоренное спецификацией. Наличие времени задержки включения режима пониженного энергопотребления связано с необходимостью увеличения динамической помехоустойчивости микросхемы в случае, когда или выход приемника, или выход передатчика находятся в третьем состоянии, а такая ситуация характерна для современных локально распределенных информационных сетей.

Блок-схема приемопередатчика приведена на рис. 5.20. К потребляющим элементам схемы относятся: двухкаскадный дифференциальный усилитель приемника, генераторы тока, датчик температуры на основе температурно-независимого источника опорного напряжения для защиты микросхемы от чрезмерного перегрева в режиме токовой перегрузки выхода передатчика. Цифровая часть микросхемы (выходной каскад передатчика) с целью снижения рассеиваемой мощности реализована на основе КМОП, здесь мы не будем ее обсуждать. В режиме пониженного энергопотребления токи аналоговых блоков выключаются, статический ток потребления микросхемы находится на уровне суммарного тока утечки обратно смещенных p-n-переходов с типовым значением 300–400 нА.

На рис. 5.20 приведена электрическая принципиальная схема дифференциального усилителя приемника с режимом пониженного энергопотребления, а на рис. 5.21 – логика управления режимами работы микросхемы с блоком защиты выходного каскада от значительного перегрева [2].

Как следует из рис. 5.20, первый каскад дифференциального усилителя построен на основе p-n-p транзисторов с целью уменьшения зависимости задержки распространения сигнала приемника от логического размаха, который может изменяться от 19 В до 100 мВ. Принцип работы дифференциального усилителя основан на балансе токов верхних генераторов, которые построены на основе p-n-p транзисторов и нижних генераторов тока на основе n-канальных транзисторов. Для исключения режима насыщения биполярных транзисторов усилителя величина тока нижних генераторов выбрана на 1–1,5 мкА больше, чем верхних. Устойчивость работы ИС в случае поступления с линии на вход приемника сигналов с пологими фронтами обеспечивается гистерезисом на уровне 40–70 мВ. Гистерезис реализован путем введения небольшого разбаланса в симметрию плеч дифференциального усилителя. С целью согласования входного диапазона по напряжению, который в предельном режиме может быть равен 21 В (от –8,5 В до +12,5 В), с потенциалами внутренних узлов между входами усилителя A, B и шиной нулевого потенциала V_0 подключены два идентичных по конструкции резистивных делителя с коэффициентом деления 8 : 1.

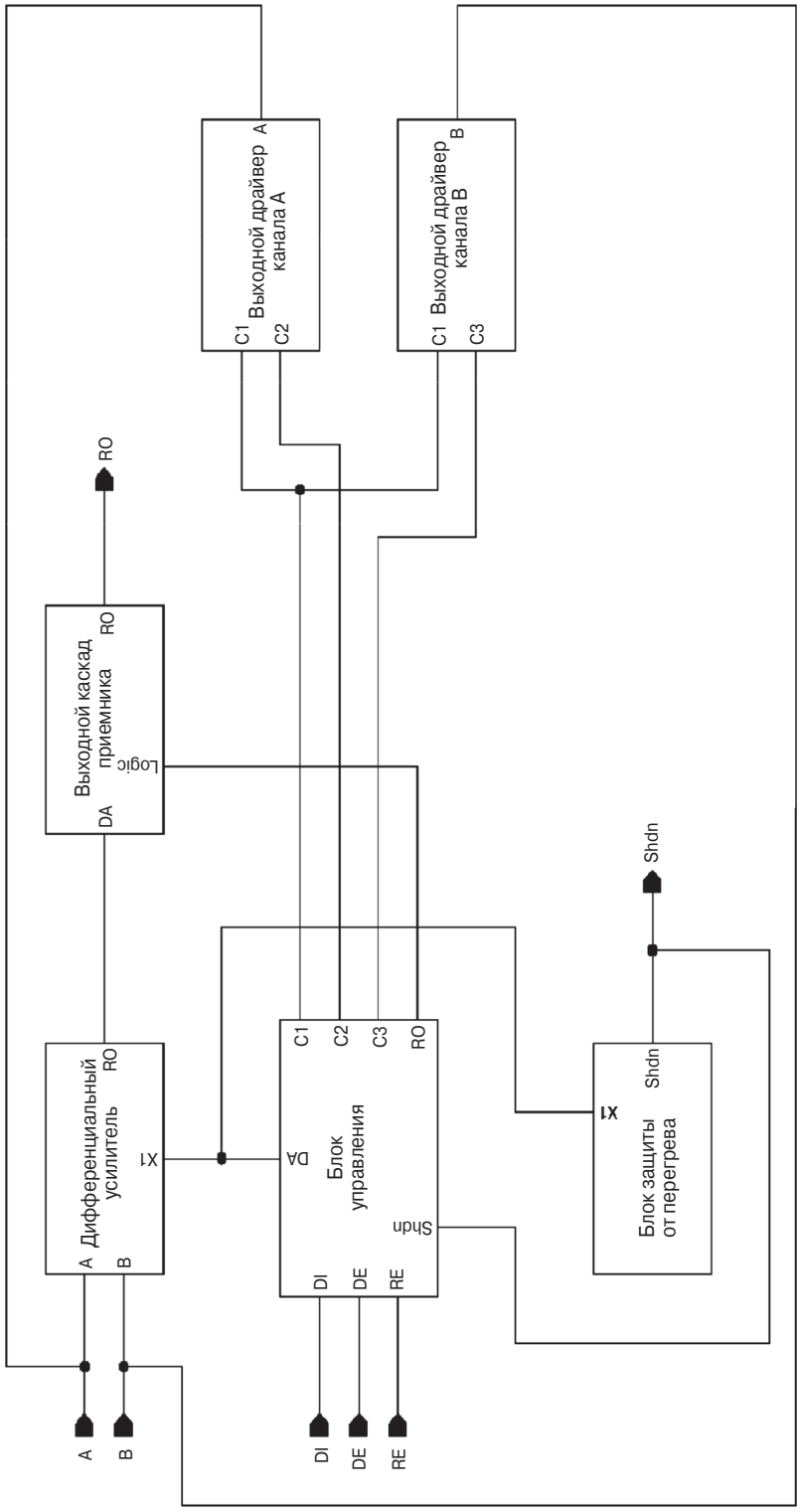


Рис. 5.20. Блок-схема приемопередатчика

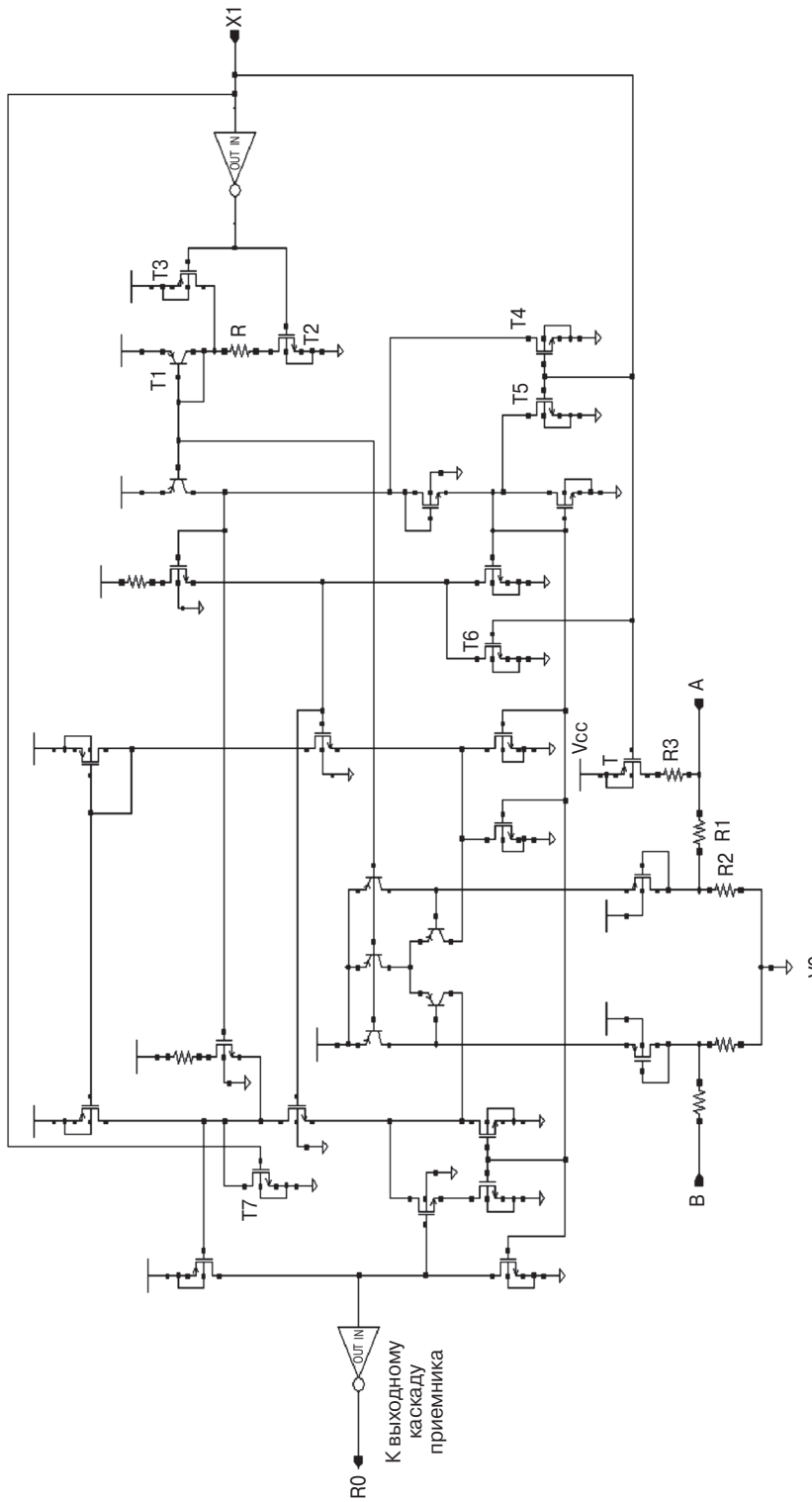


Рис. 5.21. Электрическая принципиальная схема дифференциального усилителя приемника с режимом пониженного энергопотребления

Сопротивление этих резисторов в соответствии со стандартом интерфейса RS-485 не должно быть меньше 12 кОм. На входе А относительно входа В введена незначительная токовая асимметрия путем подключения дополнительного высокоомного резистора R между входом А и шиной питания V_{CC}. Сопротивление резистора находится в пределах 480–620 кОм. Небольшой разбаланс на входе усилителя приемника позволяет при отсутствии сигнала в линии иметь на выходе R_0 определенное состояние, соответствующее уровню логической единицы. В случае использования режима пониженного энергопотребления между высокоомным резистором R и шиной питания V_{CC} включается p-канальный транзистор Т, благодаря которому можно отключить ток через резисторы R1, R2, R3 входа А на шину нулевого потенциала V_0.

На рис. 5.21 цепь смещения генератора тока реализована на высокоомном резисторе R с возможностью его отключения. В активном режиме один конец резистора R подключается к коллектору p-n-p транзистор Т1 токового «зеркала» в диодном включении, другой конец – через n-канальный транзистор Т2 к шине нулевого потенциала V_0 (рис. 5.20). В режиме пониженного энергопотребления n-канальный транзистор Т2 выключается, после чего схема переходит в режим с низким током потребления. Для снижения суммарного тока утечки в режиме пониженного энергопотребления служит p-канальный транзистор цепи смещения Т3, который используется для быстрого и надежного запирания транзистора Т1 токового «зеркала».

Сигнал управления режимом пониженного энергопотребления X1 формируется в блоке управления режимами работы микросхемы (рис. 5.21). К стокам нижних транзисторов генератора тока подключаются дополнительные n-канальные транзисторы Т4–Т7 (рис. 5.20). В рабочем режиме эти транзисторы заперты и не оказывают влияния на работу схемы, а в режиме пониженного энергопотребления – включены, что позволяет подключить цепи нижнего генератора тока к шине нулевого потенциала. Размеры транзисторов, которые определяют токовую способность блока выключения, выбираются с учетом обеспечения необходимой длительности и времени перехода БИС в режим пониженного тока и выхода в активный режим работы.

Предположим, что отключается только резистор R цепи смещения и транзистор Т1 в диодном включении токового «зеркала». Таким способом микросхему можно перевести в режим с малым током потребления. В конце концов, потенциалы в узлах за счет токов утечки уменьшатся до нуля, но в этом случае динамические параметры микросхемы будут иметь значительный разброс и большие значения.

Аналогичным образом работает электрическая цепь режима обеспечения пониженного энергопотребления в блоке температурно-независимого источника опорного напряжения температурного датчика на основе запрещенной зоны. Как следует из рис. 5.22, при подаче на вход управления третьим состоянием приемника RE уровня логической «1», а на вход управления третьим состоянием передатчика DE уровня логического «0» на шине управления режимом пониженного энергопотребления X1 формируется высокий логический уровень, который выключает «потребляющие» блоки микросхемы. Время предустановки включения режима определяется нагрузочной емкостью на основе n-канального транзистора T_C (в данном случае ее значение равно 0,8 пФ), включенной после логического элемента 2И-НЕ, а также токовой способностью (размерами) транзисторов элемента.

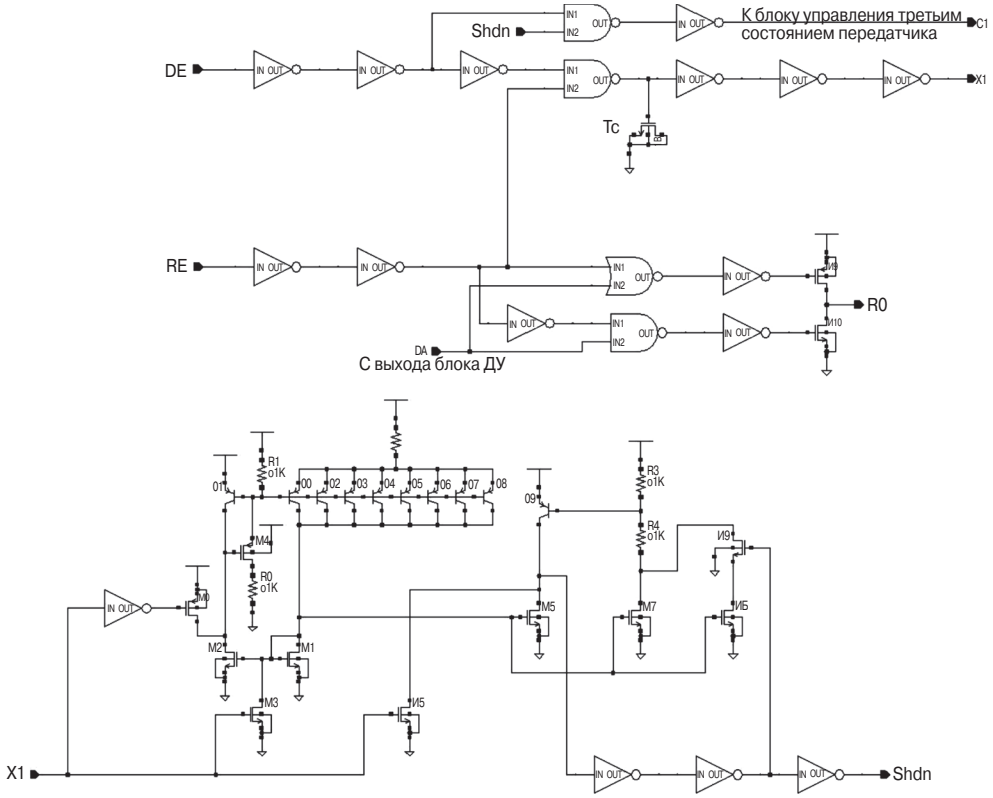


Рис. 5.22. Схема электрическая блока управления режимами работы микросхемы с защитой выходного каскада от перегрева

Если хотя бы один блок микросхемы – либо приемник, либо передатчик – переходит в активное состояние, потенциал на шине управления X1 падает до нуля, после чего «потребляющие» блоки включаются.

5.5.2. Микросхемы приемопередатчиков интерфейса RS-232

К особенности интерфейсных приемопередатчиков последовательных данных стандарта RS-232 следует отнести соединение выхода одного передатчика со входом одного приемника (так называемый режим point-to-point). Стандартом допускается управление несколькими входами приемников, но при этом выходы передатчиков необходимо объединять. При этом надежная передача сигнала в длинную линию обеспечивается путем увеличения амплитуды передаваемого сигнала [71].

Сигналы с уровнями ТТЛ/КМОП поступают на вход блока передатчика, преобразуются внутри микросхемы в уровни RS-232 (минимум от –5,0 В до +5,0 В) и поступают в длинную однопроводную линию. На входе приемника сигналы стандарта RS-232 детектируются, а затем происходит обратное преобразование в уровни ТТЛ/КМОП. Для формирования сигналов стандарта RS-232, часто по абсолютному значению амплитуды превышающих напряжение питания, требуется

использование двух дополнительных источников напряжения питания. Использование трех источников питания приводит к значительному увеличению стоимости, размеров радиоэлектронной системы, повышению трудоемкости на этапе разработки изделия. В последнее время широкое распространение получили микросхемы приемопередатчиков последовательных данных стандарта RS-232 с одним источником напряжения питания. В этом случае высокие уровни напряжения, соответствующие требованиям стандарта RS-232, формируются в блоке умножения напряжения на четырех внешних емкостях номиналом 0,1 мкФ.

В настоящее время одновременно существует ряд изделий интерфейса RS-232 как с напряжением питания 5 В, так и с пониженным напряжением питания с одним источником. Режим пониженного энергопотребления широко используется в изделиях с пониженным напряжением питания [2, 71–74].

Целесообразность введения пониженного энергопотребления в данных изделиях обусловлена особенностью их применения. Микросхемы с пониженным напряжением питания чаще всего могут использоваться с батарейным источником питания. В этом случае режим снижения энергии потребления особенно актуален для увеличения ресурса источника энергии. В большей мере данное утверждение относится к случаю, когда микросхемы продолжительное время находятся в пассивном режиме. Например, когда «мышь» ноутбука не используется, внешнее приемное устройство отключено от последовательного порта RS-232 компьютера и т.д.

В настоящее время на рынке интерфейсных приемопередатчиков последовательных данных стандарта RS-232 с пониженным напряжением питания присутствует целый спектр изделий [75–79]. Прежде всего, следует выделить такие как ILX3232 [3] без функции пониженного энергопотребления, ILX3221, ILX3226 [4, 5] – с различными режимами перехода в режим пониженной мощности (Autoshutdown). Остановимся более подробно на особенностях организации режимов пониженного энергопотребления в микросхемах ILX3221, ILX3226.

На рис. 5.23 приведена блок-схема ИС 3221, в табл. 5.5 – функциональное назначение ее выводов.

Как следует из рис. 5.23, микросхема состоит из одного приемника и одного передатчика. По сравнению с ILX3232 появились дополнительные входы управления. Так, по входу 01 возможен перевод приемника в «третье» состояние. На выходе 10 с задержкой около 30 мкс после переключения сигнала на входе приемника из любого логического состояния к потенциалу земли вырабатывается уровень логического нуля, который дальше поступает в управляющий контроллер и информирует его о переходе ИС в режим пониженного энергопотребления. Входы 12, 16 служат для управления режимами пониженного потребления: если на входах 12, 16 – высокий уровень, то микросхема находится в обычном рабочем режиме без функции пониженного энергопотребления; если же на входе 16 низкий уровень независимо от состояния на остальных входах, микросхема выключается («принудительный» режим пониженного энергопотребления); если на входе 12 низкий уровень, на входе 16 – высокий, а сигнал на входе приемника находится на уровне ниже, чем 0,3 В или выше, чем –0,3 В, то через 30 мкс после переключения входного сигнала в эту область микросхема автоматически переходит в режим пониженного энергопотребления.

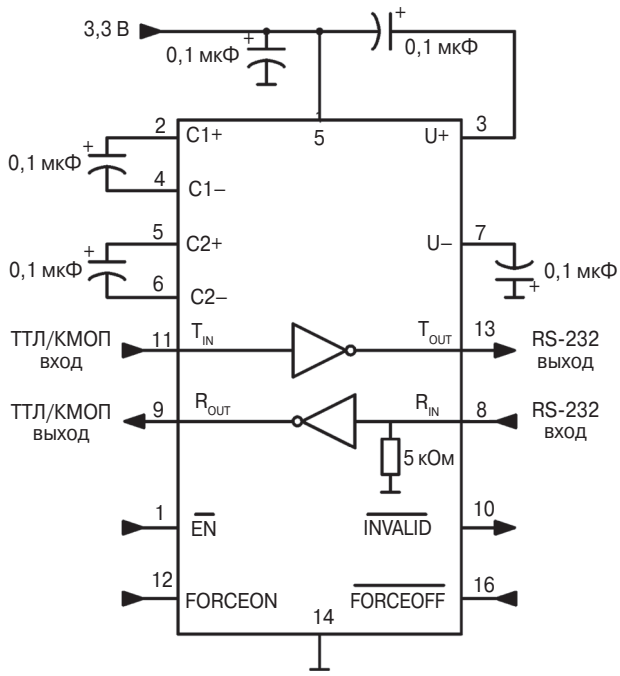


Рис. 5.23. Условно-графическое изображение микросхемы ILX3221

Таблица 5.5. Назначение выводов микросхемы MAX3221

Номер вывода	Наименование вывода	Обозначение
01	Вход разрешения выхода приемника	$\overline{\text{EN}}$
02	Вывод внешней емкости блока умножения положительного напряжения	C1+
03	Выход положительного напряжения блока умножения	V+
04	Вывод внешней емкости блока умножения положительного напряжения	C1–
05	Вывод внешней емкости блока умножения отрицательного напряжения	C2+
06	Вывод внешней емкости блока умножения отрицательного напряжения	C2–
07	Выход отрицательного напряжения блока умножения	V–
08	Вход данных приемника (уровни RS-232)	RIN
09	Выход данных приемника (уровни ТТЛ/КМОП)	ROUT
10	Выход детектора активного уровня входа приемника	$\overline{\text{INVALID}}$
11	Вход данных передатчика (уровни ТТЛ/КМОП)	TIN
12	Вход управления режимом AutoShutdown (разрешает работу ИС)	FORCEON
13	Выход данных передатчика (уровни RS-232)	TOUT
14	Общий вывод	GND
15	Вывод питания от источника напряжения	Vcc
16	Вход управления режимом AutoShutdown (переводит ИС в режим пониженного энергопотребления – Shutdown)	$\overline{\text{FORCEOFF}}$

Таблица 5.6. Таблица истинности ИМС ILX3221

Режим работы	Входы					Выходы	
	FORCEON	FORCEOFF	EN	RIN	TIN	ROUT	TOUT
Пониженное энергопотребления (без функции автовыключения)	X	L	L	L	X	H	Z
	X	L	L	H	X	L	Z
	X	L	H	X	X	Z	Z
Передача информации (без функции автовыключения)	H	H	L	L	L	H	H
	H	H	L	L	H	H	L
	H	H	L	H	L	L	H
	H	H	L	H	H	L	L
	H	H	H	X	L	Z	H
	H	H	H	X	H	Z	L
Передача информации (с функцией автовыключения)	L	H	L	L	L	H	H
	L	H	L	L	H	H	L
	L	H	L	H	L	L	H
	L	H	L	H	H	L	L
	L	H	H	X	H	Z	L
	L	H	H	X	L	Z	H
Пониженное энергопотребление (с функцией автовыключения	L	H	L	L30u	X	H	Z
	L	H	H	L30u	X	Z	Z

Примечания:
H – высокий уровень;
L – низкий уровень;
L30u – низкий уровень сигнала не менее –0,3 В и не более 0,3 В продолжительностью не менее 30 мкс.

Все рабочие состояния микросхемы ILX3221 приведены в табл. 5.6.

Используемые конструктивно-схемотехнические решения ИС позволяют обеспечить рабочий диапазон напряжения питания от 3 до 5,5 В, а использование оригинального блока генераторов опорных напряжений, выходные уровни которых поддерживаются в заданных пределах независимо от значения температуры и величины напряжения питания, позволяет снизить ток потребления в активном режиме работы по сравнению ILX232 (напряжение питания 5 В ± 10%) больше чем в 30 раз.

Для сравнения – типовое значение тока ИС ILX232 в активном режиме равно 7,2 мА, а типовое значение тока ILX3221 – 0,2 мА. Снижение величины тока потребления в активном режиме обеспечивается следующим образом: при достижении на положительном выводе блока умножения величины напряжения V^+, равного 5,3 В, а на отрицательном выводе блока умножения V, равного минус 5,3, во всем диапазоне напряжения питания 2,97÷5,5 В, генератор напряжения блока умножения выключается. Если значение напряжений на вышеперечисленных выводах блока умножения снижается, генератор снова включается и увеличивает напряжение на внешних емкостях. Отключение генератора после достижения требуемых напряжений на выводах блока умножения эквивалентно снижению частоты генератора тока и, как следствие, приводит к снижению величины тока потребления.

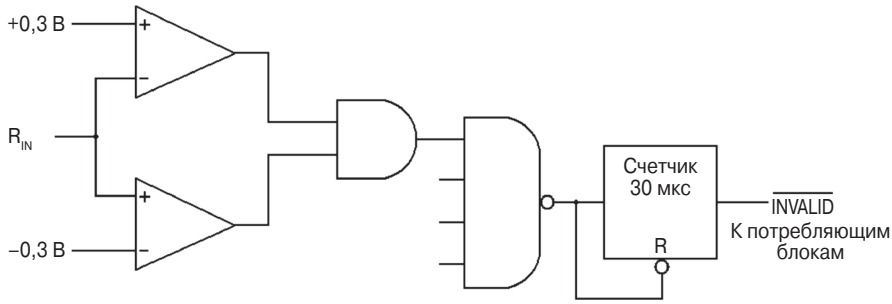


Рис. 5.24. Упрощенная функциональная схема блока управления режимом пониженного энергопотребления

Упрощенная функциональная схема блока переключения ИС в режим пониженного энергопотребления (ожидания) приведена на рис. 5.24. Любое изменение сигнала на входе приемника выше, чем 2,7 В, или ниже, чем –2,7 В, приводит к переходу микросхемы в активный режим. Уровни напряжения –0,3 В и +0,3 В, –2,7 В и +2,7 В являются пороговыми и должны при проектировании обеспечиваться с технологическими запасами. Напряжение переключения приемника для положительного сигнала будет равно (1,4÷1,6) В, для отрицательного сигнала – (–1,4÷–1,6) В.

Конкретная реализация схемы приемника с режимом пониженного энергопотребления приведена на рис. 5.25*а*, схема детектора уровня, который входит в его состав, – на рис. 5.26. Между входом приемника RIN и шиной нулевого потенциала подключается резистор RPOL с типовым значением сопротивления, равным 5 кОм в соответствии со стандартом. В случае отсутствия сигнала на линии на входе приемника устанавливается потенциал, равный 0 В. В этом случае цепь смещения на основе транзисторов Т1чТ3 выключена, на затвор транзистора Т4 подается запирающий потенциал, после чего на его стоке начинает повышаться напряжение. Поскольку время задержки сигнала, соизмеримое с 30 мкс, можно получить без использования счетчика на основе линии задержки, состоящей в конкретном случае из р-канального транзистора Т5 с большой длиной канала и МОП-конденсатора, были использованы новые технические решения. Параметры элементов такой линии задержки обычно выбираются из условия достижения напряжения переключения вентиля на выходе линии задержки транзисторов Т6, Т7 за 30 мкс после снижения уровня сигнала на входе приемника до 0 В, после чего выход INVALID переключается в состояние «высокого» уровня, а глобальной шиной режима выключения тока, связанной «потребляющими» блоками микросхемы, переключаются в состояние низкого уровня.

При появлении сигнала на входе приемника с уровнем, превышающим величину напряжения переключения входного вентиля (для ТТЛ – 1,6 В), включается транзистор Т4 с высокой токовой способностью, переключая выход INVALID в состояние, соответствующее активному режиму схемы. При появлении сигнала на входе приемника ниже, чем –1,6 В, несмотря на то, что транзистор Т4 выключен, выход линии задержки переключается в состояние низкого уровня через транзисторы Т1, Т2, Т3 в диодном включении, после чего микросхема также переводится в активный режим.

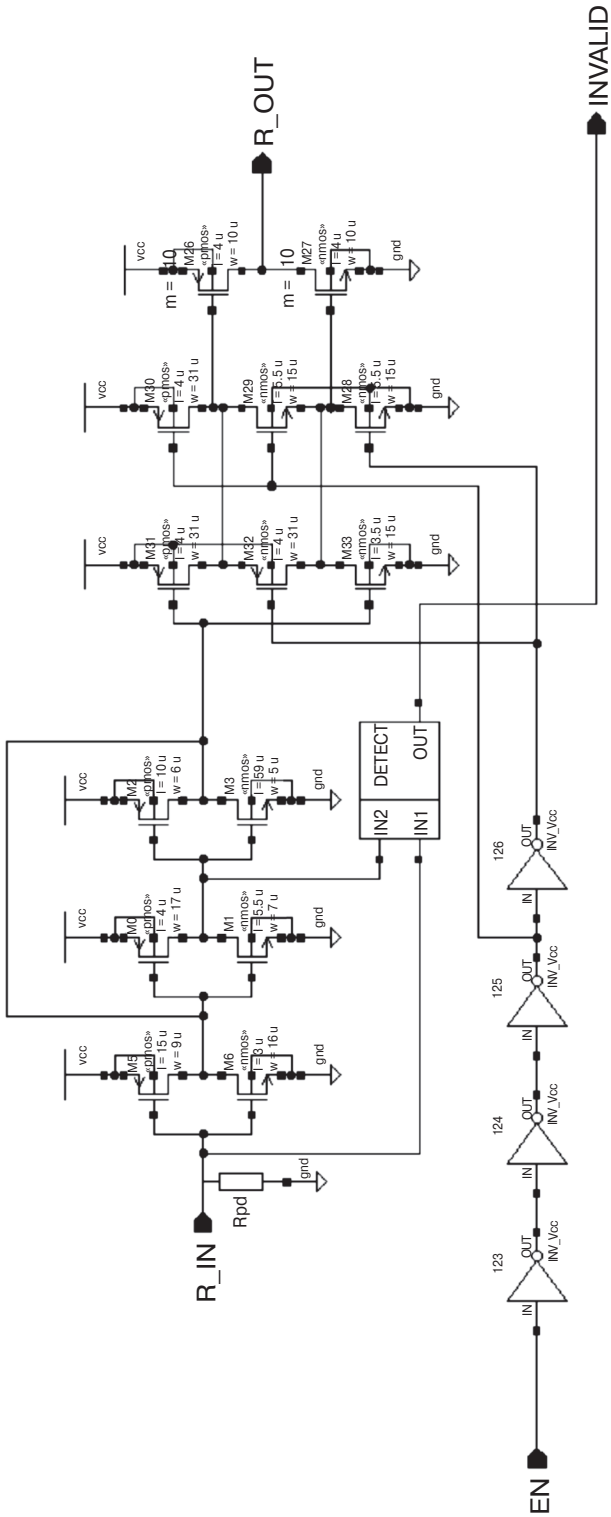


Рис. 5.25. Электрическая схема приемника

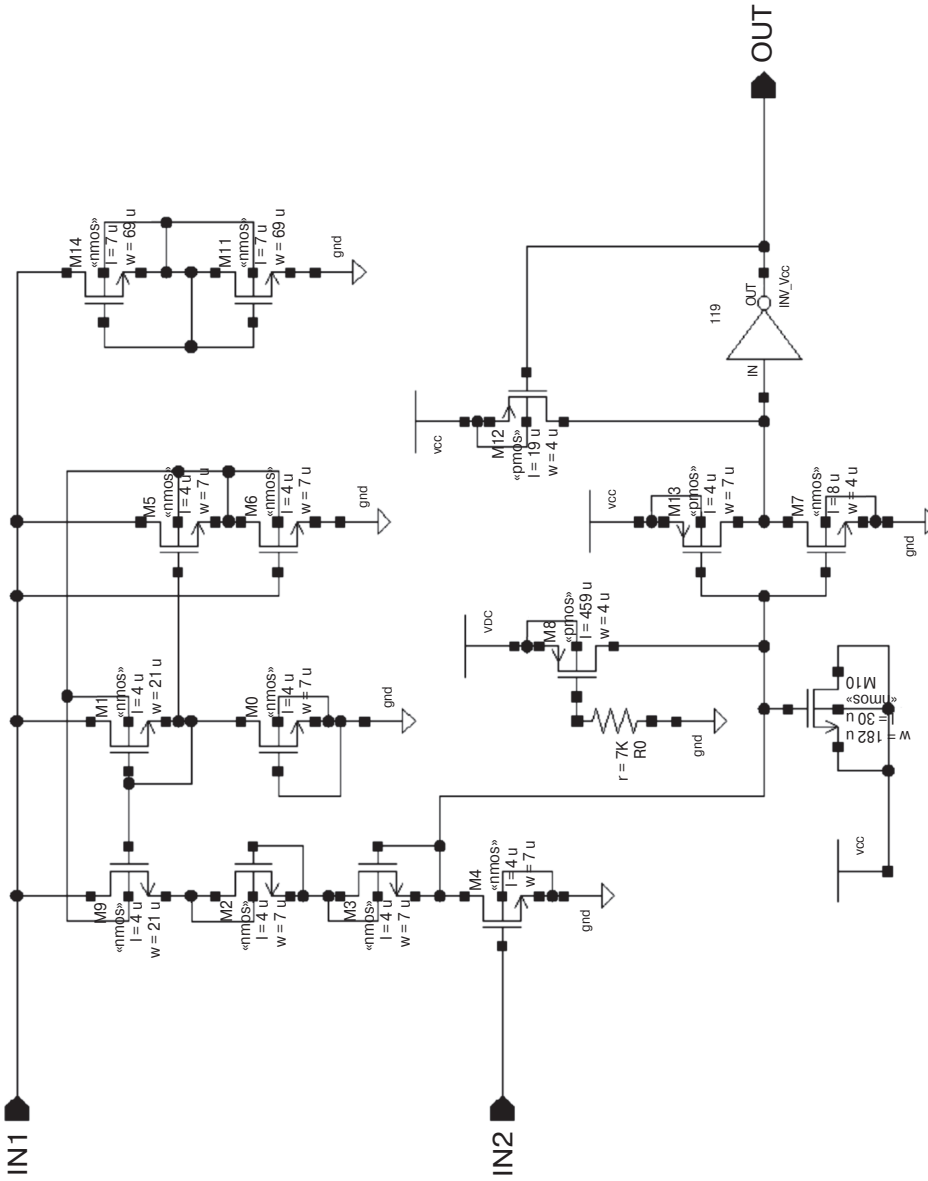


Рис. 5.26. Электрическая схема детектора уровня сигнала

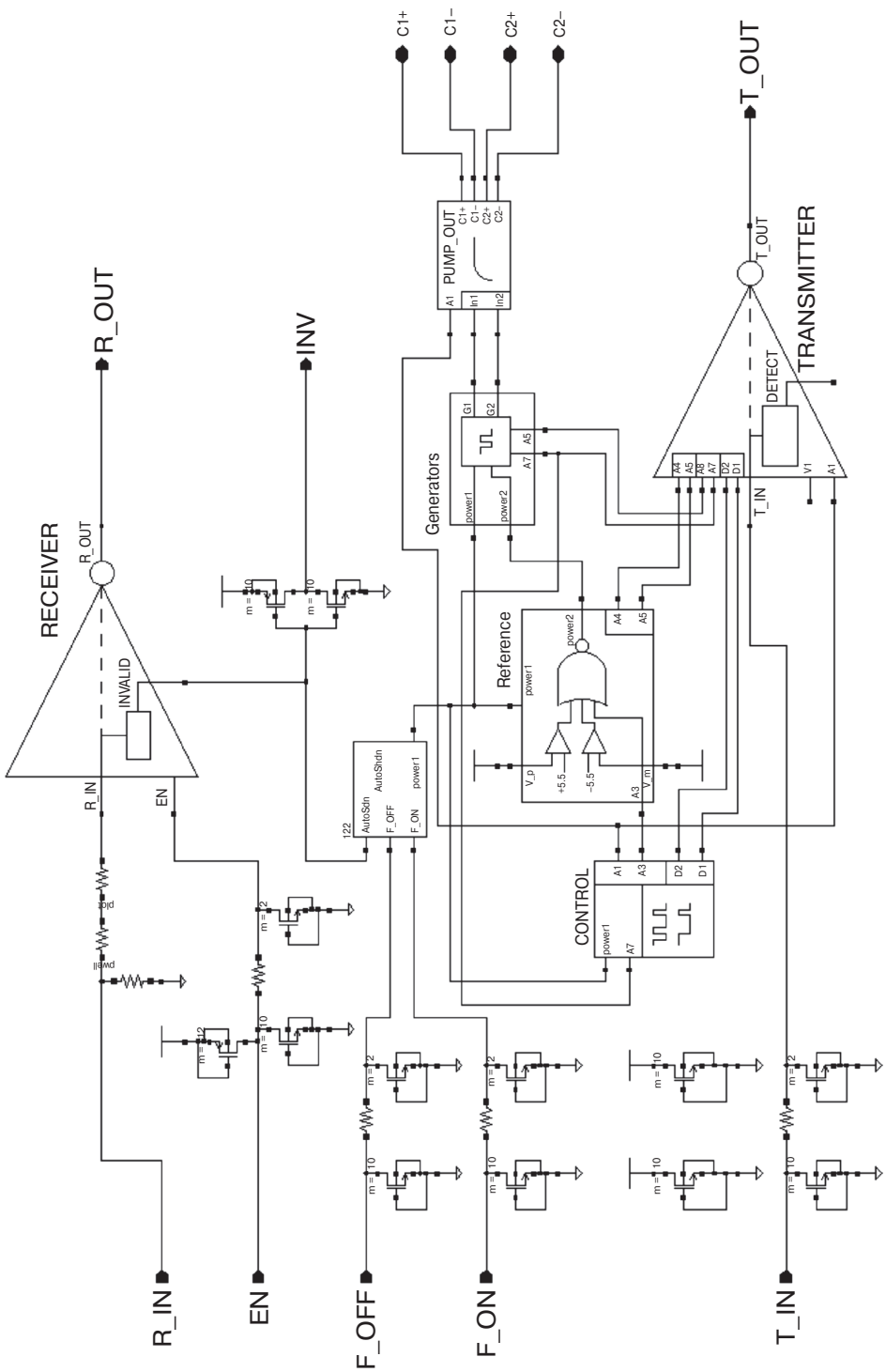


Рис. 5.27. Структурная схема микросхемы ILX3221 с режимом пониженного энергопотребления

Таким образом, реализована функция переключения ИС ILX3221 в режим пониженного энергопотребления.

Структурная схема ИМС приемопередатчика ILX3221 приведена на рис. 5.27 [2]. К основным «потребляющим» узлам микросхемы ILX3221 можно отнести генератор блока умножения, цепи управления работой мощных предвыходных драйверов, передатчик. В режиме пониженного энергопотребления генератор блока умножения выключается, передатчик переключается в третье состояние, выход положительного потенциала блока умножения V^+ разряжается до напряжения питания, выход отрицательного потенциала блока умножения V^- – до напряжения 0 В. В ходе проектирования радиоэлектронной системы потребитель должен учитывать, что при переходе микросхемы в активный режим после режима пониженного энергопотребления требуется некоторое время t_{WU} для установления рабочих уровней напряжения на внешних емкостях, после чего становится возможной нормальная работа микросхемы. Временная диаграмма работы ИС ILX3221 в режиме пониженного энергопотребления приведена на рис. 5.28.

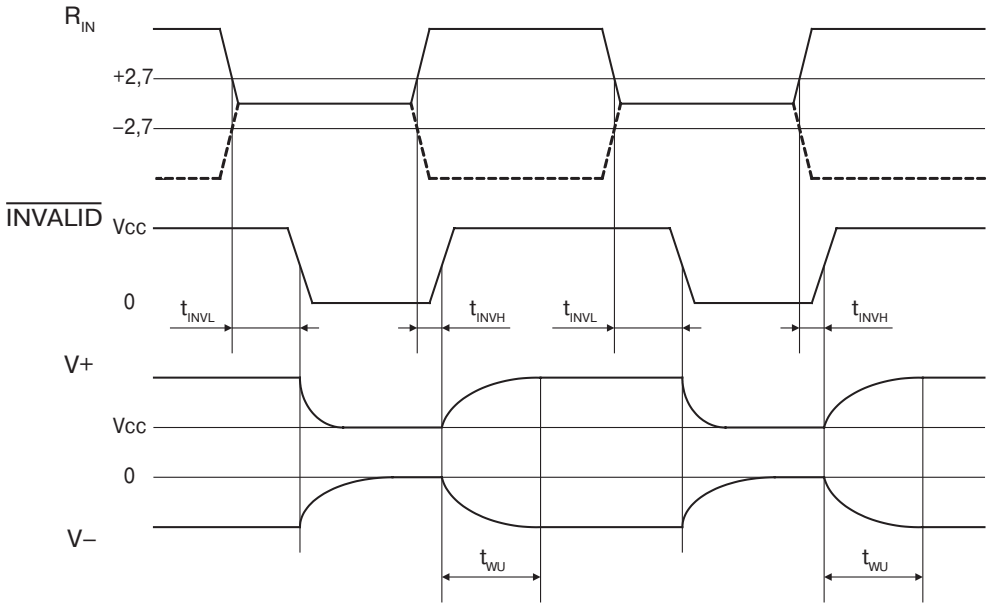


Рис. 5.28. Временная диаграмма работы ИС ILX3221 в режиме пониженного энергопотребления

Микросхема ILX3226 имеет более широкие возможности с точки зрения реализации режима пониженного энергопотребления. Здесь предусмотрен нормальный режим работы (как для ILX3232), режим перехода в состояние с низким током потребления, если уровень сигнала на входе приемника больше 30 мкс находится между –0,3 В и +0,3 В (как для ILX3221), режим перехода в состояние с низким током потребления, если данные на входе приемника или передатчика не изменялись более чем 30 с.

В отличие от ILX3221 (рис. 5.29), в структурной схеме присутствуют дополнительные блоки: генератор тактовых импульсов асинхронного счетчика, 20-разрядный асинхронный счетчик, блоки детекторов изменения фронта в приемнике и передатчике, дополнительный каскад управления выходом READY для автоматического контроля состояния ИС. С целью сохранения количества выводов по отношению к ИС ILX3221 исключен режим третьего состояния приемника. В связи с относительно большим временем перехода в режим пониженного энергопотребления нецелесообразно использовать линию задержки на основе RC-цепи. Более оптимальным с точки зрения площади кристалла и точности задания временного интервала является использование многоразрядного счетчика. Схема отсчета времени реализована таким образом, что при каждой смене данных на входах либо приемника, либо передатчика вырабатывается импульс сброса счетчика в нулевое состояние, после чего производится подсчет тактовых импульсов с самого начала. Если частота следования импульсов на входах приемника, передатчика высокая, счетчик постоянно обнуляется, если же смена данных не происходила больше 30 с, на выходе двадцатого разряда счетчика вырабатывается импульс перевода ИС в состояние с пониженным энергопотреблением. В случае прихода сигнала на входы либо приемника, либо передатчика микросхема переключается в активный режим.

Если объединить входы 12, 16 (FORCEON, FORCEOFF, соответственно) и подключить их к выходу INVALID, то реализуется временная диаграмма перехода в режим с низким энергопотреблением, как для микросхемы ILX3221.

На рис. 5.29 [2] приведена принципиальная электрическая схема приемника с блоками перевода в режим пониженного энергопотребления через 30 мкс и дополнительным блоком детектора смены входного сигнала, электрическая схема которого приведена на рис. 5.30. В блоке детектора смены входного сигнала путем включения линии задержки в инверсных цепях управления входами логического элемента «2ИЛИ-НЕ» вырабатывается импульс сброса счетчика. Длительность импульса сброса можно регулировать значениями емкостей на основе МОП-конденсаторов и крутизной транзисторов вентилей. Длительность импульса сброса должна обеспечивать надежное переключение всех разрядов счетчика в состояние логического нуля. Выходы детектора реализованы на n-канальных транзисторах с открытым стоком для соединения способом «монтажное ИЛИ», который позволяет легко наращивать количество приемников и передатчиков. Временная диаграмма режима работы ИС в режимах пониженного энергопотребления приведена на рис. 5.31. Как следует из диаграммы, микросхема переходит в режим пониженного энергопотребления через время E с типовым значением 30 с после последнего изменения фронта сигнала на входах приемника или передатчика, на выходе READY происходит переключение в состояние низкого уровня, передатчик переключается в третье состояние, выключаются блок умножения напряжения, генераторы импульсов, все потребляющие узлы и блоки микросхемы.

Кроме наличия режима пониженного энергопотребления отличительной особенностью семейства интерфейсных микросхем ILX3232, ILX3221, ILX3226 является низкий ток потребления в активном режиме. Типовое значение тока в актив-

ном режиме в широком диапазоне температур от –40 °С до +85 °С и напряжения питания от –2,97 до +5,5 В не превышает 250 мкА. Для сравнения: статический ток потребления микросхем интерфейсных приемопередатчиков стандарта RS-232 предыдущего поколения с напряжением питания 5 В ± 10% (ILX232, ILX207, ILX208) изменяется в диапазоне от 8 до 19 мА.

Снижение тока потребления на интерфейсных ИМС с пониженным напряжением питания минимум в 30 раз по сравнению с отечественными микросхемами предыдущего поколения на фоне проблем по обеспечению высокой крутизны транзисторов стало возможным благодаря использованию новых конструктивно-схемотехнических решений.

К наихудшим условиям с точки зрения обеспечения параметров одного из основных блоков ИМС – блока умножения в соответствии с требованиями стандарта RS-232 относится нижнее значение диапазона напряжения питания, при котором крутизна транзисторов снижается почти в три раза по сравнению с напряжением питания 4,5 В. Для обеспечения требований стандарта крутизна транзисторов была изменена при переходе на технологию изготовления с более тонким подзатворным окислом (с 950 до 450 ангстрем) и увеличении геометрических размеров транзисторов.

Каждый из вариантов увеличения крутизны транзисторов приводит к увеличению паразитной емкости активных элементов блока умножения, что еще больше усложняет решение задачи по снижению тока потребления ИС с пониженным напряжением питания.

Очевидно, что обеспечение требуемых значений электрических параметров изделий невозможно без использования новых оригинальных конструктивных и схемотехнических решений, в том числе – в блоке умножения.

В ходе выполнения исследования было замечено, что при отключении блока умножения ток потребления значительно снижается, что объясняется следующим: транзисторы блока с суммарной шириной канала около 20 мм в статическом режиме переключаются в определенное состояние, сквозные токи вентилей, токи заряда паразитных емкостей при этом становятся равными нулю.

Данная особенность микросхем использовалась при разработке новых микросхем для снижения тока потребления путем введения в схему двух температурно-независимых источников опорного напряжения (ТНИОН) с выходными значениями потенциалов, соответствующих выходным напряжениям передатчиков (5,3 В и –5,3 В).

Снижение величины тока потребления обеспечивается тем, что при достижении напряжения на положительном выводе блока умножения V^+, равного 5,3 В, а на отрицательном выводе блока умножения V^- –5,3 В в диапазоне напряжения питания 2,97÷5,5 В, генератор блока умножения выключается, предвыходные вентили и мощные выходные драйверы блока умножения переключаются в статический режим. Если напряжение на вышеперечисленных выводах блока умножения снижается, генератор снова включается, затем происходит увеличение напряжения на внешних емкостях. Отключение генератора после достижения заданных напряжений на выводах блока умножения эквивалентно снижению частоты генератора тока и тока потребления.

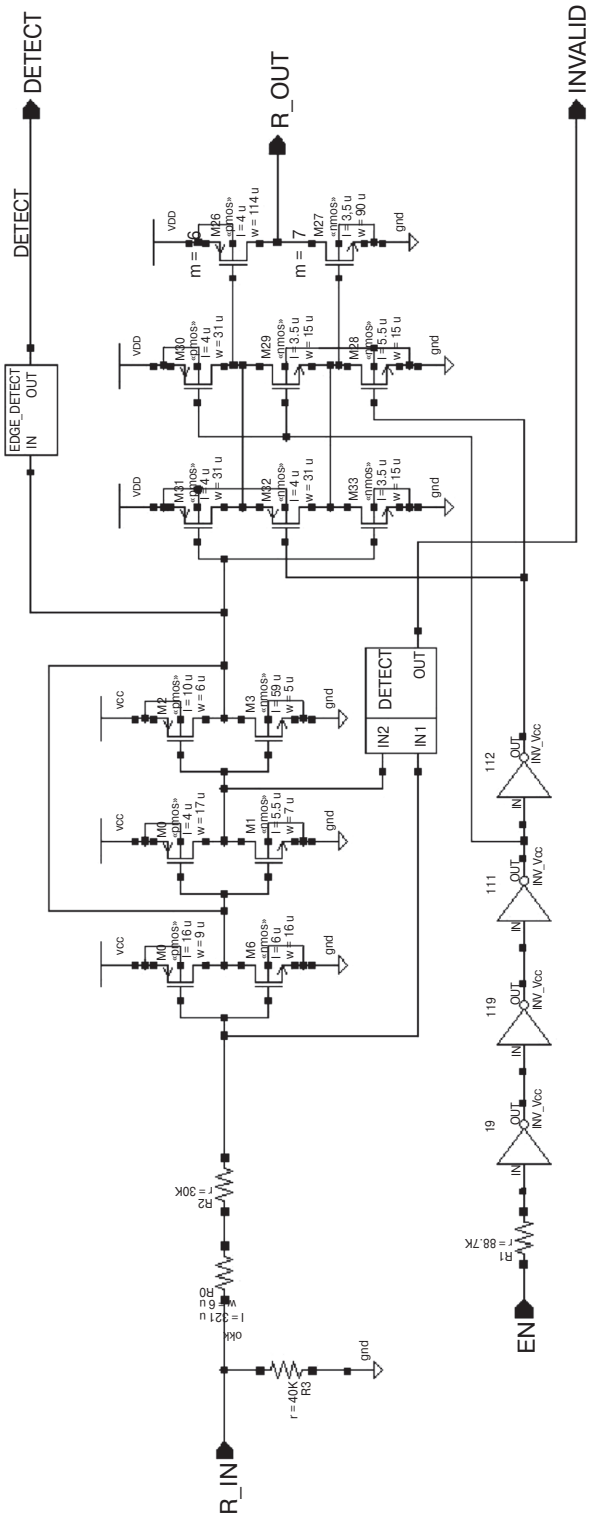


Рис. 5.29. Принципиальная схема приемника с дополнительным блоком детектора

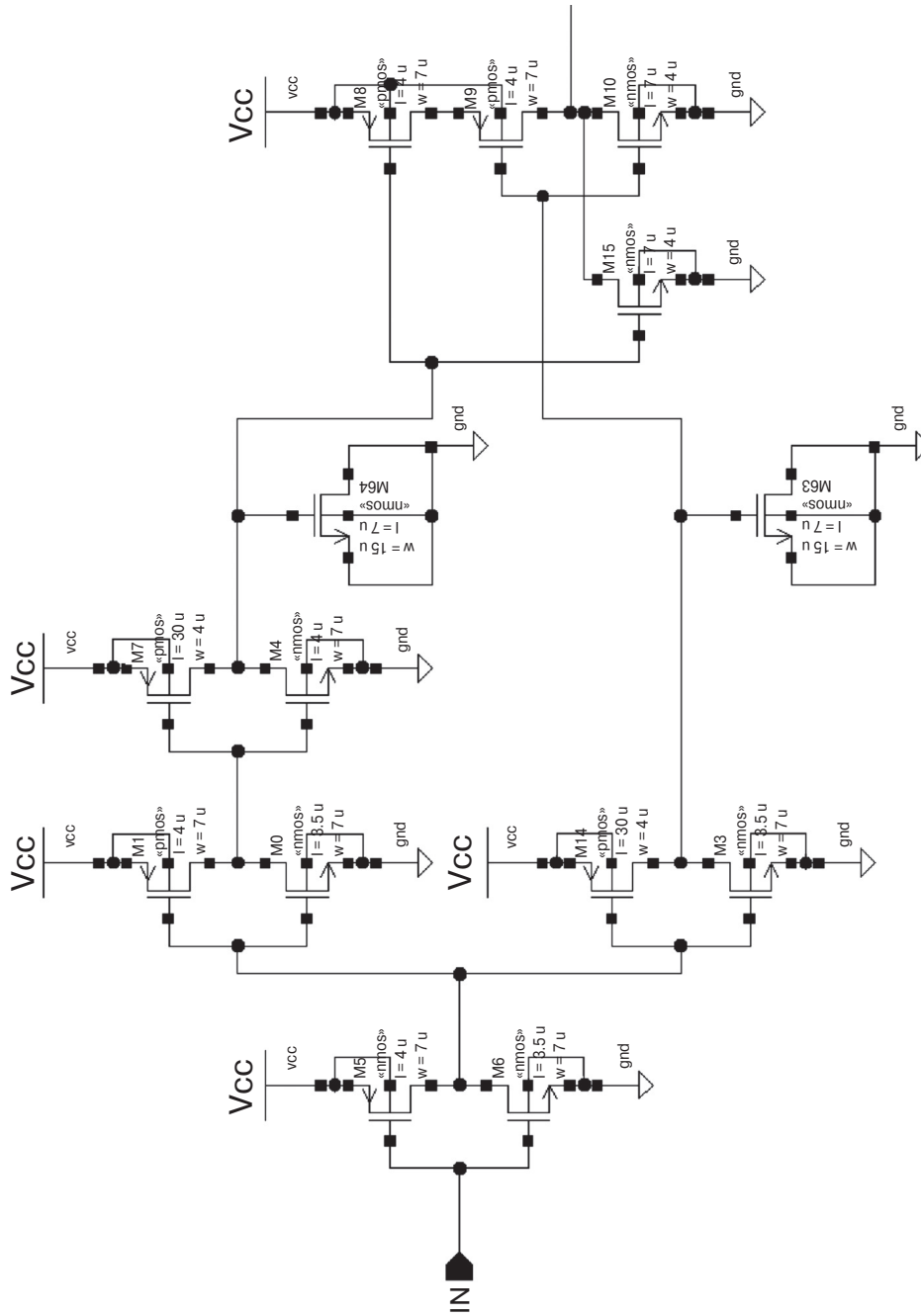


Рис. 5.30. Принципиальная электрическая схема блока детектора смены данных

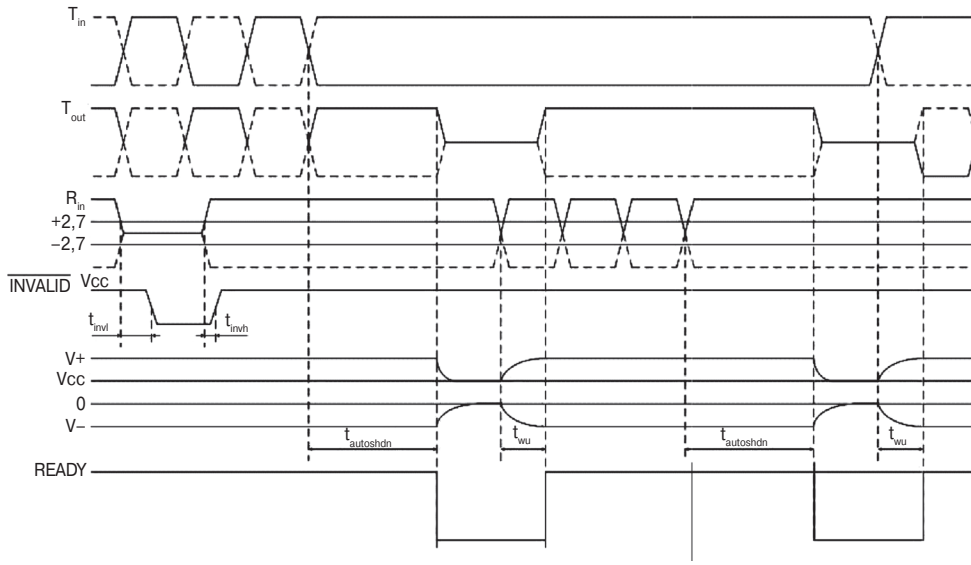


Рис. 5.31. Временная диаграмма режима работы ИС

Принципиальная электрическая схема блока опорных напряжений приведена на рис. 5.32. Результаты моделирования блока умножения со схемой отключения показывают, что после включения напряжения питания выходные напряжения блока умножения поддерживаются на заданном уровне одиночными импульсами, в паузе между импульсами генератор и драйверы выключены.

Следует отметить, что биполярные n-p-n транзисторы блока ТНИОН выполнены без применения дополнительных слоев и усложнения технологического процесса. В качестве эмиттера биполярного транзистора служит область стока n-канального транзистора, в качестве коллектора – область истока, в качестве базы – карман p-типа. Для точного задания ширины базы используется затвор, который при формировании областей коллектора и эмиттера служит маской. Таким образом, биполярный n-p-n транзистор формируется так же, как и n-канальный транзистор. На рис. 5.33 приведен эскиз конструкции биполярного n-p-n транзистора и его эквивалентная электрическая схема. Для исключения влияния n-канального транзистора на нормальную работу биполярного транзистора на затвор подается самый низкий потенциал блока отключения генератора.

К недостатку такого использования n-канального транзистора следует отнести наличие паразитной составляющей тока в подложку (транзистор Т3 на рис. 5.36*б*), которым можно пренебречь в режиме работы ТНИОН с низкими уровнями тока и большими коэффициентами усиления. Преимуществом подобной реализации биполярного транзистора в КМОП базисе является то, что его можно использовать в цепях с промежуточными потенциалами.

Блок выключения генератора работает следующим образом: после включения питания генератор блока умножения формирует импульс с максимальной частой (400–450 кГц) для быстрого формирования требуемого потенциала на выводах блока V^+, V^-, которые через резистивные делители высокоомных цепей блока

выключения генератора (около 1 МОм для снижения тока потребления) сравниваются с потенциалами ТНИОН. В случае равенства потенциалов на выходах каждого ТНИОН формируется низкий уровень напряжения и генератор выключается. Как следует из схемы (рис. 5.32), для выключения генератора требуется достижение установленного потенциала и по ТНИОН, связанному с выходом V^+, и по ТНИОН, связанному с выходом V^-.

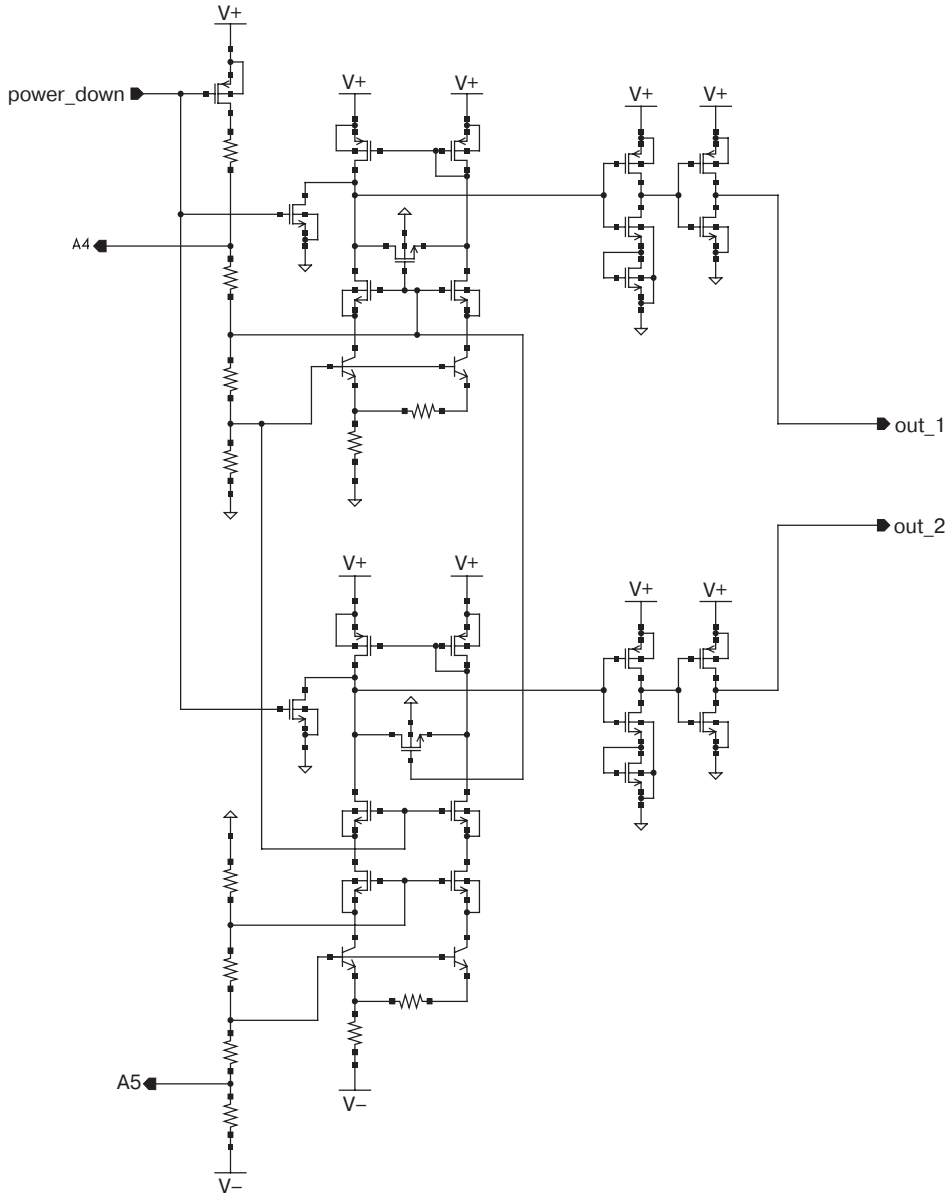
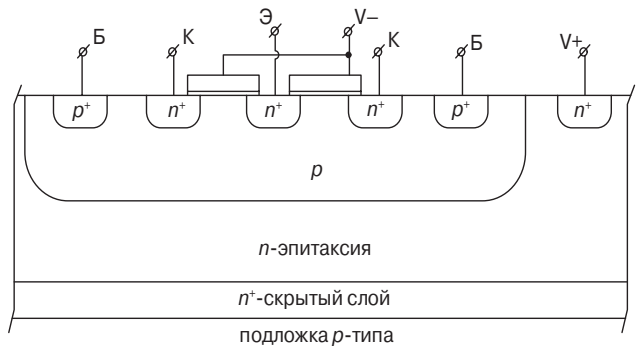
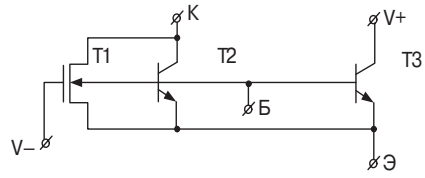


Рис. 5.32. Схема электрическая принципиальная температурно-независимого источника опорного напряжения (ТНИОН) в блоке выключения генератора



а)



б)

Рис. 5.33. Биполярный n-p-n-транзистор ТНИОН, разработанный на основе технологии КМОП без введения дополнительных слоев: структура (*а*); электрическая схема (*б*)

Значение необходимых потенциалов на выходах ТНИОН при проектировании микросхемы выбираются таким образом, чтобы:

1) обеспечивались уровни выходного напряжения передатчика в заданных диапазонах температур и напряжения питания в соответствии с требованиями стандарта RS-232 (для логической «1» – не менее 5,0 В, для логического «0» – не более –5,0 В) с учетом погрешности измерительного оборудования;
2) при низком напряжении питания (2,97 В) блок умножения должен обеспечить уровень напряжения, необходимый для отключения генератора.

Если последнее условие не будет выполнено, сложится парадоксальная ситуация – при низком напряжении питания микросхема будет потреблять максимальный ток из-за того, что генератор блока умножения не будет выключен.

Таким образом, если задать потенциал выключения генератора низким, то при изготовлении в серийном производстве микросхемы уйдут в брак по выходному напряжению передатчика, если высоким – по току потребления при низком напряжении питания. Как показали расчеты с учетом погрешности измерительного оборудования и того, что коэффициент умножения напряжения питания из-за потерь заряда внешних емкостей в паразитных структурах блока умножения и цепях нагрузки меньше двух, значение напряжения отключения генератора должно соответствовать напряжению на выводах V^+, V^- в интервале 5,2÷5,4 В по абсолютному значению.

Из вышеприведенных рассуждений следует, что выходные напряжения ТНИОН необходимо получать в реальном изделии с достаточно высокой точностью и минимальными разбросами.

Схемотехнические решения ТНИОН исключают влияние изменения напряжения питания, уход опорного потенциала в заданном диапазоне температур (−40 °С÷+85 °С) для наихудших условий не превышает 25 мВ.

Учитывая, что потенциал ТНИОН рассчитывается с некоторой погрешностью, а затем для обеспечения требуемой точности подгоняется, в практическом плане используются несколько вариантов такой подгонки. Методы подгонки на основе плавких перемычек или использования лазера для пережигания перемычек не всегда экономически оправданы из-за увеличения трудоемкости на этапе контроля параметров и увеличения размера кристалла.

Наиболее предпочтительным является способ подгонки потенциала ТНИОН, который можно использовать на этапе экспериментальных образцов, путем опробования нескольких вариантов источника опорного напряжения с вариацией соотношения коэффициента деления высокоомного резистивного делителя, причем каждый кристалл «смноженного» модуля может иметь свою индивидуальную модификацию. Кроме того, конструкция резистивного делителя должна обеспечивать модификацию с использованием последних слоев топологии, к которым можно отнести металлизацию, что позволяет выводить пластины мелкими партиями с различными МПО слоя «металлизация» и в кратчайшие сроки получить оптимальное значение опорного потенциала на экспериментальных образцах.

Как следует из вышеперечисленных рассуждений, оптимальное значение выходных потенциалов ТНИОН должно соответствовать выходным напряжениям передатчика 5,3 В и −5,3 В.

Если исключить предложенный подход на основе ТНИОН, снижение тока потребления ИМС интерфейсных приемопередатчиков стандарта RS-232 с напряжением питания 2,97÷5,5 В до уровня 0,25 мА явилось бы проблематичным. Использование мощного блока умножения напряжения для обеспечения параметров при напряжении 2,97 В без режима отключения генератора и стабилизации напряжения на выводах V^+, V^- привело бы к значительному увеличению тока потребления при напряжении питания 5,5 В, превышающему ток отечественных ИМС типа ILX232 предыдущего поколения.

Кроме того, снижение тока потребления ИС стало возможным благодаря использованию новых схемотехнических решений входных блоков приемника и передатчика. Ранее входные блоки приемников и передатчиков ИС ILX232 с напряжением питания 5 В были реализованы на дифференциальных усилителях с источниками опорного потенциала, подключенными в одно из плеч, соответствующего уровням ТТЛ/КМОП. Дифференциальные усилители, источники опорного напряжения относятся к потребляющим цепям независимо от используемой технологии. Причем ток потребления источника напряжения нельзя минимизировать до сколь угодно малой величины: в случае низких уровней тока возможна «просадка» потенциала в режиме переключении за счет перезаряда емкости р-канальных транзисторов дифференциальной пары между каналом и затвором. Ток потребления дифференциального усилителя выбирается из условия обеспечения требуемого быстродействия схемы.

Блоки входов приемника и передатчика ИС ILX3232 были реализованы на основе КМОП-вентилей с низкой рассеиваемой мощностью. Соответствие уров-

ням ТТЛ/КМОП обеспечивается путем увеличения крутизны n-канального транзистора и снижения p-канального или введения так называемого перекоса. На входных блоках ИС с уровнями КМОП используются симметричные вентили: соотношение ширины p-канального транзистора к ширине n-канального транзистора выдерживается приблизительно равным двум, что позволяет получить напряжение переключения на уровне, равном половине напряжения питания, и обеспечить максимальную помехоустойчивость. При использовании КМОП-вентилей для обеспечения уровней ТТЛ в микросхемах с напряжением питания 5 В транзисторы необходимо очень сильно «перекашивать». Для ИС с напряжением питания 3 В проблема обеспечения требований уровней ТТЛ на основе КМОП решается путем использования симметричного вентиля: при типовом напряжении питания 3,3 В напряжение переключения симметричного вентиля будет равно 1,65 В, в то время как максимальная помехоустойчивость достигается при напряжении переключения, равном 1,4 В.

Использование КМОП-вентилей позволило исключить не только потребляющие дифференциальные усилители, но и источники опорного напряжения. Использование вентилей на входах передатчика потребовало нового решения схемы транслятора уровня, так как к одному из преимуществ дифференциального усилителя можно отнести простую реализацию на его основе схемы транслятора уровня. Особенности схемы транслятора уровня ИС ILX3232 будут рассмотрены ниже.

5.5.3. Конструктивно-схемотехнические особенности проектирования интерфейсных ИМС КН с пониженным напряжением питания

Как уже отмечалось выше, микросхема ILX3232 является типовым представителем семейства современных интерфейсных микросхем последовательной передачи данных стандарта RS-232 с пониженным напряжением питания. Блок передатчика этой ИС предназначен для преобразования сигналов с уровнями КМОП/ТТЛ, поступающих на входы микросхемы с платы радиоэлектронного устройства, в сигналы стандарта RS-232 для последующей передачи в длинную линию. Надежная передача сигнала в длинную линию обеспечивается увеличением амплитуды передаваемого сигнала в два раза и более по отношению к напряжению питания.

Электрическая схема передатчика микросхемы ILX3232 приведена на рис. 5.34. Блок защиты входа передатчика от статического электричества разработан на основании требований соответствующей спецификации по обеспечению режима защиты от превышения напряжения. С этой целью диоды, подключенные между входом и шиной питания в первой и второй ступени защиты, которые, как правило, используются в большинстве ИС [80–82] на основе КМОП технологии, исключены. Благодаря этому возможно сопряжение микросхем различных стандартов, работающих от источников напряжения питания с разными значениями, а также повышение надежности ИС в случае аварийного отключения питания: путь тока в шину питания отсутствует.

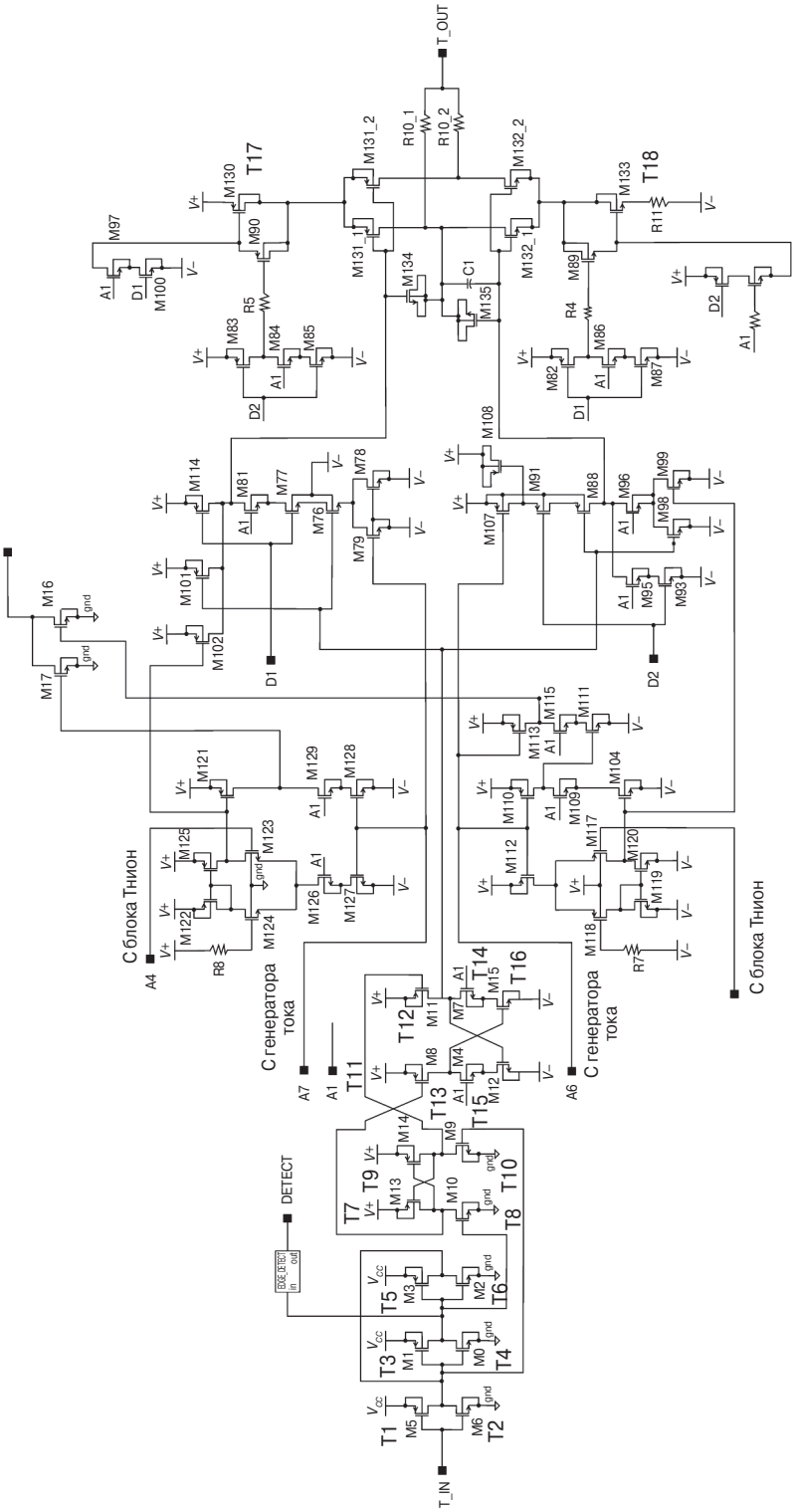


Рис. 5.34. Схема электрическая принципиальная блока передатчика

Однако, исключение мощных верхних диодов или p-канальных транзисторов в диодном включении усложняет разработку ИС с высоким уровнем устойчивости к статическому электричеству. В случае наличия верхних диодов в любой из возможных комбинаций режима статического электричества один из диодов открыт и через него протекает весь избыточный заряд без значительного увеличения рассеиваемой мощности. При отсутствии верхних диодов для двух комбинаций: на входе высокий уровень напряжения, а на общей шине низкий; на входе высокий уровень напряжения, а на шине питания низкий, элементы защиты работают в режиме пробоя с высоким уровнем рассеиваемой мощности. В случае с верхними диодами переходы можно считать холодными, без верхних диодов – горячими. Поэтому режим пробоя на высоких уровнях тока, которые характерны для статического электричества, является достаточно жестким. Размер и быстродействие элементов защиты без верхних диодов должны выбираться из условия обеспечения работы блока в режиме лавинного пробоя, который является обратимым. В противном случае лавинный пробой может перерасти в тепловой, после чего микросхема выйдет из строя.

В качестве элемента защиты первой ступени рекомендуется использовать мощный n-канальный транзистор в запертом состоянии [82] с затвором и истоком, подключенными к общей шине. По сравнению с p-канальным транзистором n-канальный транзистор обладает более высоким быстродействием в связи с тем, что подвижность электронов в два раза больше, чем подвижность дырок. Кроме того, по отношению к обычному диоду n-канальный транзистор в режиме пробоя характеризуется наличием отрицательного участка ВАХ (характерен для «тиристорного» эффекта), связанного с включением паразитной биполярной структуры, который позволяет снизить рассеиваемую мощность. При одинаковой занимаемой площади на кристалле элемент защиты на основе n-канального транзистора имеет значительно меньшее сопротивление, чем диод, что также приводит к дополнительному снижению рассеиваемой мощности. Вторая ступень защиты также должна быть выполнена на n-канальном транзисторе в выключенном режиме с размером на порядок меньшим, чем мощный транзистор. Между стоками транзисторов первой и второй ступени защиты необходимо включать резистор, на котором падает часть напряжения в режиме разряда статического электричества, что способствует повышению уровня устойчивости. Сопротивление резистора задается с учетом обеспечения требуемого значения величин задержек распространения сигнала.

Чем больше сопротивление резистора, тем выше устойчивость к статическому электричеству, но и больше задержка распространения сигнала.

На этапе разработки топологии ИС с режимом превышения на входах для повышения устойчивости к статическому электричеству между силовыми шинами необходимо подключить запертые мощные n-канальные транзисторы, идентичные по структуре транзисторам защиты на входах передатчика. При отсутствии подобных транзисторов в режиме статического разряда весь ток может потечь через какие-то маленькие внутренние активные элементы схемы и привести к необратимым процессам разрушения структуры.

Выход элемента защиты обычно подключен к затворам транзисторов первого вентиля. Как уже отмечалось, использование входных вентилей на основе КМОП вместо дифференциальных усилителей позволяет снизить ток потребления мик-

росхемы. Для повышения помехоустойчивости ИС, особенно в случае поступления на вход передатчика сигналов с пологими фронтами, к входному вентилю целесообразно подключать триггер Шмитта на основе двух вентилей (достаточно простая и распространенная реализация) с небольшим гистерезисом на уровне 0,3÷0,5 В (транзистор Т3–Т6).

Исключение из конструкции блока дифференциального усилителя, на котором достаточно просто производится трансляция уровня, требует разработки новых схемотехнических решений. Транслятор уровня на основе КМОП может быть реализован на двух каскадах с использованием перекрестных связей между транзисторами. За счет подключения истоков p-канальных транзисторов первого каскада транслятора к выводу умноженного положительного напряжения V^+ амплитуда входного сигнала удваивается (транзисторы Т8–Т10). Второй каскад транслятора уровня (транзисторы Т11–Т16) отличается от первого тем, что истоки n-канальных транзисторов вместо общей шины подключаются к выводу умноженного отрицательного напряжения V^-. Таким образом, происходит дополнительное удвоение амплитуды входного сигнала.

Ввиду того, что в предельном режиме разность потенциалов между выводами V^+ и V^- может достигать 13 В, с целью повышения надежности вентилей необходимо исключить влияние горячих носителей на режим работы n-канальных транзисторов, если они будут находиться в предпробойной области, между p-канальными и n-канальными транзисторами второго каскада транслятора дополнительно подключены n-канальные транзисторы, на затвор которых подается напряжение питания или промежуточный уровень A1. При высоких напряжениях на выводах блока умножения часть напряжения падает на дополнительных транзисторах, исключая перенапряжение нижних транзисторов транслятора. Подобное схемотехническое решение вентиля используется и в других блоках с максимальной разностью потенциалов, например, в управлении предвыходными драйверами схемы умножения напряжения.

Силовые шины последующих после транслятора уровня блоков подключены только к выводам умноженного напряжения V^+, V^-. Предвыходные блоки передатчика служат для управления режимами работы мощных выходных транзисторов. Относительно обычных логических элементов КМОП в аналогичном включении они имеют отличительные особенности. С целью формирования пологих симметричных фронтов нарастания, спада, линейно изменяющихся между максимальным и минимальным напряжением, логические элементы предвыходных каскадов подключены к генераторам тока на основе токового «зеркала» со значением токов на уровне 20 мкА. Ввиду того, что размеры выходных n-канальных транзисторов в два раза меньше, чем p-канальных, а значит, приблизительно во столько же раз меньше их паразитная емкость, для обеспечения симметрии ток генератора нижнего элемента в два раза ниже. В процессе оптимизации и моделирования электрической схемы токи генераторов задаются достаточно точно.

Очень важной особенностью предвыходных блоков является возможность переключения выхода передатчика в третье состояние по напряжению питания, что позволяет минимизировать рассеиваемую мощность в случае снижения напряжения питания или сильной перегрузки выхода передатчика. Для микросхемы ILX3232 не предусмотрен внешний вывод перевода микросхемы в третье состояние [2].

Предположим, что у микросхемы отсутствует такая возможность. Рассмотрим наиболее вероятную ситуацию в режиме включения напряжения питания. В случае нарастания напряжения питания рабочий режим микросхемы еще не установился, мощные выходные транзисторы могут оказаться одновременно во включенном состоянии, и в этот момент времени может включиться генератор блока умножения. В связи с тем, что источники напряжения на внешних емкостях не являются идеальными и обладают достаточно высоким сопротивлением (на уровне 5–10 Ом), в момент включения генератора от вывода V^+ к выводу V^- через открытые транзисторы выхода, а также в нагрузку (максимальная емкость нагрузки 2500 пФ) потечет большой сквозной ток, препятствуя достижению полного размаха на данных выводах. Если не предпринять специальных мер, микросхема может войти в равновесное состояние с высоким током потребления и генератор при этом не выключится.

Для исключения подобной ситуации в состав рассматриваемой ИС был введен блок контроля уровня отрицательного напряжения на выводе V^-, опорный потенциал которого отслеживается от общей шины через цепочку транзисторов в диодном включении. Выходной каскад сигналами на входах Д1, Д2 переводится в активное состояние только при достижении потенциала на выводе V^-, равного минус 2,4–2,8 В. К этому моменту во всех узлах микросхемы устанавливаются нормальные рабочие потенциалы, исключающие опасный паразитный режим с высоким током потребления.

Необходимо отметить, что блок контроля уровня позволяет отключать выходной каскад также и в случае сильной токовой перегрузки после подсадки напряжения на выводах V^+, V^-, предотвращая выход из строя микросхемы.

Для защиты выходного каскада от помехи с крутыми фронтами используются дополнительные дифференциальные усилители, подключенные параллельно предвыходным блокам. В нормальном режиме дифференциальные усилитель закрыты, не оказывая никакого влияния на работу микросхемы.

В случае появления помехи на выходе с резким фронтом происходит подсадка потенциала на выводе V^+ или нарастание потенциала на выводе V^-, которые подключены в качестве опорных в одно из плеч дифференциальных усилителей, связанных с затворами верхнего p-канального и нижнего n-канального транзисторов выхода, соответственно, усилители включаются, снижая токовую способность выходного каскада и риск аварийной ситуации.

В режиме работы на длинную несогласованную однопроводную линию на фоне высокого уровня помех возможно увеличение напряжения на выходе передатчика выше напряжения питания или ниже уровня потенциала общей шины. Для стандартных выходных каскадов, выполненных с использованием технологии КМОП, в этом случае под большим прямым смещением окажутся p-n-переходы мощных выходных транзисторов, что может привести к протеканию больших токов и выходу микросхемы из строя. В связи с этим надежная эксплуатация микросхемы ILX3232 в достаточно жестких условиях будет невозможна без использования блоков на выходе, обеспечивающих режимы превышения.

В микросхеме предыдущего поколения ILX232 с напряжением питания 5 В уровень логической «1» формируется биполярным n-p-n-транзистором, выполненном с использованием слоев стандартного КМОП процесса, который автома-

тически исключает протекание тока в шину питания при напряжении на выходе выше напряжения питания. Несмотря на то, что данный подход является достаточно простым и не требует применения большого количества элементов, в микросхеме ILX3232 с режимом пониженного энергопотребления его использовать нельзя. На p-n-переходе база – эмиттер выходного биполярного транзистора происходит снижение уровня источника положительного умноженного напряжения V^+ на 0,8 В. Чтобы обеспечить выходное напряжение высокого уровня передатчика равным 5,3 В, напряжение на выводе V^+ должно быть 6,1 В. Даже в идеальном случае, когда коэффициент умножения напряжения будет равным 2, при напряжении питания 2,97 В, для которого установлены нормы на параметры в соответствии с требованиями ТЗ, такой уровень напряжения не будет достигнут, не говоря уже о том, что генератор блока умножения не выключится: напряжение на выводах V^+, V^- будет ниже опорного потенциала ТНИОН, микросхема будет постоянно находиться в режиме повышенного тока потребления.

С целью обеспечения режима пониженного энергопотребления в области минимальных напряжений питания разность потенциалов между уровнем напряжения на выводе V^+ и выходным напряжением высокого уровня на выходе передатчика, а также между уровнем напряжения на выводе V^- и выходным напряжением низкого уровня передатчика должна быть минимальной, но не более 100 мВ. Именно с этой целью, в первую очередь, размеры выходных транзисторов были увеличены несмотря на то, что для обеспечения нагрузочной способности на уровне 2 мА большие размеры транзисторов не требуются.

Как видно из рис. 5.34, для обеспечения режима превышения мощные выходные каскады высокого и низкого уровней выполнены в виде двух последовательных транзисторов на основе p-канальных и n-канальных транзисторов. Такое включение приводит к увеличению площади выходного блока почти в два раза. С другой стороны, при прочих равных условиях увеличение размеров выходных транзисторов повышает уровень устойчивости ИС к статическому электричеству.

Одним из первых условий проектирования блока превышения напряжения, реализованного на полевых транзисторах, является полная изоляция карманов. Электрическая связь между истоками транзисторов и карманами не допускается. Если n-канальные транзисторы на эпитаксиальной пленке n-типа находятся в изолированном кармане p-типа и эта проблема решается просто, то для изоляции p-канальных транзисторов необходимо использовать дополнительный слой глубокого разделения, который в технологическом процессе изделия ILX3232 присутствует. Необходимость его введения обсуждалась ранее при рассмотрении работы транзисторов блока умножения.

Управление выходными транзисторами последовательной пары, связанными с выводом, ничем не отличается от управления без режима превышения. Режим превышения реализован на выходных транзисторах последовательных пар, связанных с силовой шиной (p-канальный транзистор Т17) и общей шиной (n-канальный транзистор Т18).

В режиме превышения при напряжении на выходе выше напряжения питания потенциал в кармане p-канальных транзисторов, а также на затворе и стоке верхнего p-канального транзистора через открытый пропускающий транзистор,

подключенный между карманом и затвором, повышается и становится равным выходному, отслеживая его дальнейшее изменение. Эквивалентную электрическую схему p-канального транзистора с изолированным карманом можно представить в виде двух включенных встречно диодов, из которых хотя бы один всегда будет находиться в запертом состоянии, препятствуя протеканию тока. Если использовать только изолированные карманы, проблему превышения не решить. При напряжении на выходе больше напряжения питания на значение порогового напряжения откроется p-канальный транзистор в обратном направлении и ток с выхода потечет в шину питания. Если же потенциал на затворе будет нарастать в соответствии с выходным напряжением через элементы блока превышения, p-канальный транзистор будет закрыт.

Аналогично работает схема защиты от превышения для выходных n-канальных транзисторов, только в данном случае в кармане и на затворе нижнего n-канального транзистора происходит отслеживание понижающегося потенциала на выходе ниже уровня напряжения общей шины.

В связи с необходимостью выполнения требований превышения напряжения на выходе элементы защиты должны быть электрически изолированы от источников напряжения питания, выводов V^+, V^-, от общей шины. Ввиду того, что для входа приемника условия более жесткие по напряжению (по спецификации микросхема должна быть работоспособна в диапазоне напряжений на входе приемника от –30 В до +30 В), на выходе передатчика используется аналогичный библиотечный компонент схемы защиты. В качестве элемента защиты в условиях значительного перенапряжения используется тиристор, расположенный в кольце глубокого разделения. В ходе разработки ИС рассматривались также варианты схемы защиты на основе биполярных транзисторов с оборванной базой в отдельном колодце глубокого разделения, обеспечивающих режимы полной изоляции от силовых шин питания. Однако от этих вариантов пришлось отказаться по причине необходимости снижения рассеиваемой мощности. В нормальных режимах работы ИС с высокими напряжениями на входах, выходах портов интерфейса RS-232 альтернативы тиристору в качестве элемента защиты нет.

Рассмотрим вариант схемы защиты на основе n-p-n-транзистора с оборванной базой. В качестве эмиттера и коллектора слой n^+-стоки использовать нельзя из-за низких пробивных напряжений. Пробивное напряжение областей такого элемента должно находиться на уровне 42–46 В, чтобы с определенным запасом выполнить требования по диапазону входного напряжения приемника. Возникает необходимость во введении дополнительного более высокоомного слоя n-типа и усложнении технологического процесса. В случае использования p-n-p-транзистора с оборванной базой в качестве коллектора и эмиттера можно использовать карманы p-типа, которые в технологическом процессе ИС ILX3232 уже используется. Кроме того, что быстродействие такого элемента защиты в два раза ниже, пробивное напряжение карман – эпитаксиальная пленка выше и равно более 60 В.

Проведем простые оценочные расчеты для трех вышерассмотренных вариантов элементов защиты в режиме статического электричества с учетом устойчивости на уровне 8 кВ, что для данного класса схем не является жестким. Обычно требова-

ние устойчивости к статическому электричеству портов интерфейса RS-232 соответствует уровню 15 кВ. Для 8 кВ максимальный импульсный ток в режиме статического разряда будет равен приблизительно 8,3 А. Рассеиваемая мощность в импульсе элемента защиты на основе n-p-n-транзистора с оборванной базой без учета падения напряжения на сопротивлении в области коллектора и эмиттера будет равна 8,3 А × 46 В = 382 Вт, рассеиваемая мощность элемента защиты на основе n-p-n-транзистора с оборванной базой – 8,3 А × 60 В = 498 Вт. Необходимо учитывать, что колоссальная рассеиваемая мощность в импульсном режиме локализована в области элемента защиты, занимающего небольшую площадь кремния (около 300 × 300 мкм). Для обеспечения данного требования необходимо обеспечить высочайшую равномерность растекания тока, низкий уровень дефектности кремния, чтобы обратимый лавинный пробой не трансформировался в тепловой с необратимым разрушением структуры.

К преимуществу элемента защиты на основе тиристора можно отнести обеспечение высокого уровня пробивного напряжения без использования дополнительных слоев (около 80 В), а значит большого технологического запаса относительно рабочего входного напряжения приемника, низкую рассеиваемую мощность. После достижения пробивного напряжения тиристор переключится в область низких напряжений, сравнимых с напряжением диода, включенного в прямом направлении. Рассеиваемая мощность тиристора при этом будет приблизительно равна 8,3 А × 2 В = 16,6 Вт или в 23 раза меньше, чем для n-p-n-транзистора с оборванной базой и в 30 раз меньше, чем для p-n-p-транзистора с оборванной базой.

Основной задачей в случае использования тиристора в качестве элемента защиты будет оптимизация значения тока запуска, а также обеспечение высокого быстродействия при переключении из участка запуска тиристора. На данном участке ВАХ тиристора при неверном проектировании может выделиться значительная мощность, снижающая преимущества тиристора относительно других вариантов элементов защиты и его надежность.

Таким образом, в этой главе мы рассмотрели основные конструктивно-схемотехнические проблемы, возникающие при проектировании современных интерфейсных микросхем с пониженным энергопотреблением, и показали типовые пути их решения.

5.5.4. Особенности проектирования электрических схем блоков передатчика интерфейсных БИС с пониженным напряжением питания

К одному из основных блоков интерфейсных приемопередатчиков стандарта RS-232 с одним источником напряжения питания относится, в частности, решение мощного выходного каскада схемы умножения напряжения [2, 73]. Благодаря использованию схемы умножения напряжения стал возможным переход к одному источнику напряжения питания микросхемы вместо трех, что позволило значительно упростить радиоэлектронную систему, уменьшить ее массогабариты и стоимость.

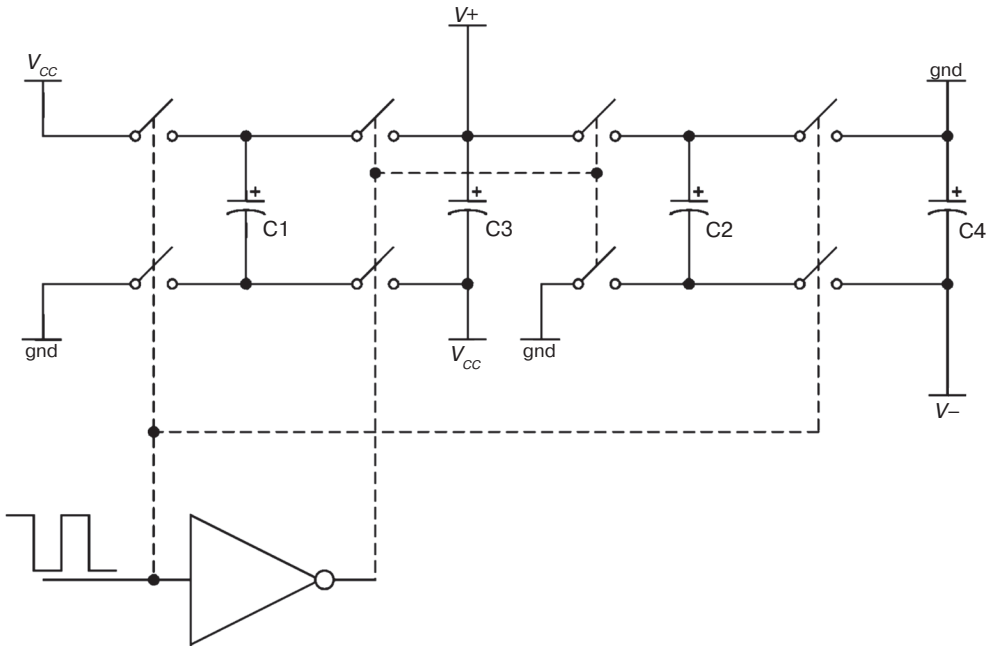


Рис. 5.35. Эквивалентная электрическая схема блока умножения напряжения

Для работы блока умножения напряжения необходимо использование четырех внешних емкостей с номиналом не менее 0,1 мкФ. Чем выше номинал емкостей, тем ниже выходной импеданс блока умножения напряжения и тем ближе он к идеальному источнику напряжения. Однако применение внешних емкостей с номиналом большим, чем 0,1 мкФ, может привести к ухудшению технико-экономических параметров изделия. В связи с тем, что внешние емкости блока умножения имеют большой номинал, их невозможно реализовать на кристалле по причине большой занимаемой площади. Одним из популярных в настоящее время решений является гибридная сборка в одном корпусе кристалла и 4-х емкостей, но стоимость такой ИС является высокой.

На рис. 5.35 представлена эквивалентная электрическая схема блока умножения напряжения, построенная на «идеальных» переключателях и четырех внешних емкостях, которая поясняет принцип его работы. Работа блока умножения невозможна без использования внутреннего генератора. В начальный момент времени (включение питания) переключатели, связанные с выводами микросхемы $C1^-$ и $C1^+$, подсоединяют нижний вывод внешней емкости C1 к шине нулевого потенциала, а верхний вывод – к источнику напряжения питания. На этом этапе происходит заряд емкости C1. Через половину периода сигнала внутреннего генератора после выключения переключателей первой группы заряд емкости C1 прекращается и происходит подключение нижней обкладки конденсатора C1 к шине источника напряжения питания, верхней – к выводу положительного потенциала блока умножения V^+ через переключатели второй группы. В связи с тем, что в данном случае для конденсатора C1 отсутствует цепь разряда, он остается заря-

женным, а напряжение питания, прикладываемое к нижней обкладке, увеличивает на такое же значение потенциал на верхней обкладке. Таким образом, происходит умножение напряжения питания в два раза. Но это для идеального случая без внешней емкости C3, которая предназначена для хранения заряда в ситуации, когда переключатели второй группы выключены, и определяет нагрузочную способность вывода V^+. При подключении внешней емкости хранения в первый момент времени около половины заряда конденсатора C1 перераспределится на конденсатор C3, и, так как номиналы конденсаторов одинаковы, напряжение на выводе V^+ увеличится лишь на половину напряжения питания. На такое же значение уменьшится напряжение на конденсаторе C1. В следующем такте генератора заряд на емкости C3 увеличится еще на четверть питания. Таким образом, за несколько тактов генератора внешняя емкость C3 будет полностью заряжена.

Отрицательное напряжение на выводе V^- формируется в результате инверсии умноженного напряжения вывода V^+. Инверсия напряжения происходит на переключателях и внешних емкостях C2, C4, связанных с выводами микросхемы $C2^+$, $C2^-$ по аналогичному принципу, описанному выше. В начальный момент времени вывод положительного потенциала V^+ подключается к верхней обкладке конденсатора C2, вывод нулевого потенциала («земли») – к нижней обкладке. В этом случае конденсатор C2 заряжается до напряжения, равного удвоенному напряжению питания. За последующую половину такта верхняя обкладка конденсатора C2 подключается к шине нулевого потенциала, нижняя – к отрицательному выводу блока умножения V^-, и так как цепь разряда конденсатора выключена, происходит инверсия сигнала. При подключении внешней емкости хранения C4 заряд емкости C2 перераспределится. Полный заряд внешних емкостей происходит за несколько тактов.

На рис. 5.36 приведена принципиальная электрическая схема исследуемого блока умножения. Как следует из рисунка, вместо идеальных переключателей используются мощные n-канальные и p-канальные транзисторы. Размеры транзисторов выбираются из условия обеспечения нагрузочной способности блока умножения в соответствии с требованиями стандарта RS-232. Включение или отключение транзисторов происходит при подаче управляющих импульсов внутреннего генератора на затворы этих транзисторов.

В отличие от идеальных переключателей, для полевых транзисторов блока умножения напряжения необходимо учитывать паразитную биполярную составляющую тока, которая может быть причиной снижения коэффициента умножения напряжения, особенно это относится к p-канальному транзистору T3 и к n-канальному транзистору T7 (рис. 5.35). Поясним сказанное на примере работы p-канального транзистора T3. В момент включения напряжения питания потенциал на подложке n-типа будет отслеживать напряжение питания за вычетом падения напряжения на p-n-переходе до тех пор, пока не включится генератор блока умножения. Как только начнет работать генератор после заряда конденсатора C1, транзистор T3 выключится и на верхней обкладке конденсатора возрастет потенциал, превышающий потенциал напряжения питания в полтора раза, что окажется достаточным для сильного смещения большого по площади p-n-перехода сток p-канального транзистора T3 – подложка n-типа в прямом направлении.

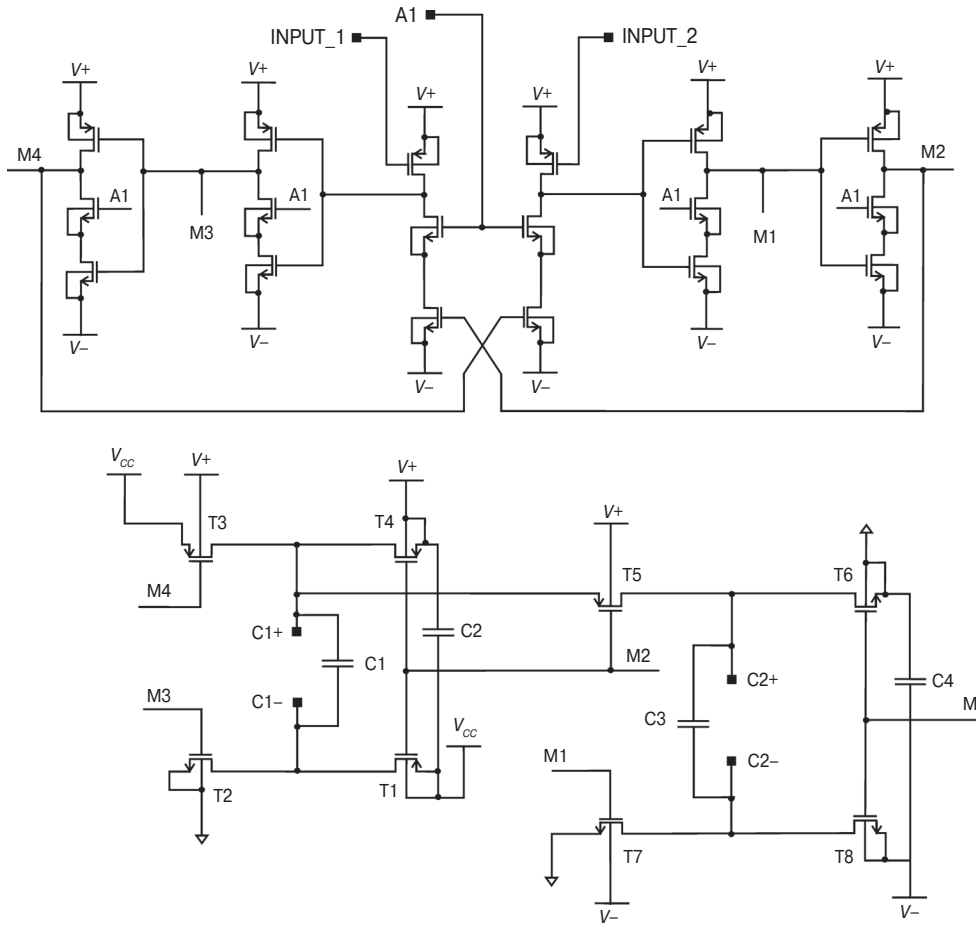


Рис. 5.36. Схема электрическая принципиальная блока умножения напряжения [2]

В высокоомную подложку начнет инжектироваться ток, что противоречит идеологии разработки ИС на основе КМОП и в классическом применении не допускается, согласно которой сток-истоковые переходы униполярных транзисторов должны быть надежно заперты.

В связи с тем, что схемы блока умножения имеют такую особенность, необходимо минимизировать влияние паразитной составляющей тока на нормальную работу схемы, исключить возможность перехода микросхемы в режим «защелкивания».

Попробуем приблизительно оценить уровень тока через транзисторы Т3, Т4 при заряде внешней емкости С1 с минимальным значением 0,1 мкФ, подключенной к выводу V^+, на половину напряжения питания в начальный момент, используя известное равенство:

$$I = C\frac{dU}{dt} = 0{,}1\cdot 10^{-6}\frac{1{,}5}{100\cdot 10^{-9}} = 1{,}5\text{A}, \tag{5.26}$$

где C – внешняя емкость; dU – изменение напряжения на внешней емкости; dt – время заряда внешней емкости до напряжения 1,5 В.

Как следует из выражения (5.26), в первой фазе умножения напряжения на половину питания ток заряда может достигать 1,5 А. В последующих фазах заряда ток будет уменьшаться в связи с уменьшением амплитуды заряда. Если учесть, что ток заряда протекает не только через канал транзистора блока умножения Т4, но и через p-n-переходы транзисторов Т3, Т4, необходимо предпринимать дополнительные меры по отношению к структурам, реализованным на обычном КМОП процессе, для минимизации влияния мощных паразитных биполярных транзисторов с высоким уровнем тока с целью исключения режима «защелкивания». Использование дополнительных охранных колец проблему не решит, увеличение расстояния до других активных элементов схемы приведет к потере конкурентоспособности из-за увеличения размера кристалла и не будет достаточно эффективным.

Для обеспечения нормальной работы ИС, особенно в области высоких температур, когда коэффициенты паразитных биполярных транзисторов возрастают при одновременном снижении эффективности охранных колец из-за увеличения сопротивления, необходимо использовать новые конструктивные решения.

Так, для эффективного снижения влияния паразитной биполярной структуры целесообразно использовать полную изоляцию транзисторов блока умножения глубоким разделением p-типа с низким омическим сопротивлением, формируемым в процессе изготовления после длительной разгонки, обеспечивающей смыкание с подложкой. При таком решении значительная часть дырок паразитной составляющей тока улавливается низкоомными областями глубокого разделения и полностью в них рекомбинирует.

Паразитная составляющая тока направлена также в высокоомную подложку. С целью снижения коэффициента усиления паразитной биполярной структуры «сток p-канального транзистора – эпитаксиальная пленка – подложка p-типа» толщина эпитаксиальной пленки должна быть увеличена, и необходимо ввести дополнительный n^+-скрытый слой. Таким образом, использование двух дополнительных слоев по отношению к стандартному процессу КМОП позволяет полностью исключить влияние паразитной биполярной структуры, которая характерна для любой схемы умножения напряжения, на работу схемы без существенного изменения размера кристалла.

Дополнительный n^+-скрытый слой особенно эффективен для подавления тиристорного эффекта в области мощных n-канальных транзисторов, так как электроны обладают более высокой подвижностью по отношению к дыркам. Несмотря на то, что эпитаксиальная пленка в изолированных глубоким разделением областях под карманами n-канальных транзисторов находится под самым высоким потенциалом, этого может оказаться недостаточно для надежного запирания p-n-перехода «карман – эпитаксиальная пленка n-типа» в режиме умножения напряжения.

Особое внимание следует обратить на схемотехническое решение n-канального транзистора Т. Как уже отмечалось, в режиме заряда емкости С3 через него нижняя обкладка подключается к шине нулевого потенциала, в следующей половине периода к ней будет приложено отрицательное напряжение –5 В. Если использовать обычное включение транзистора, когда исток и карман p-типа объе-

динены и находятся под одним потенциалом, инверсия напряжения будет невозможна. Мощная паразитная биполярная структура транзистора Т7 ограничит отрицательное напряжение на уровне минус 0,7÷0,8 В, что приведет к сильной инжекции тока в подложку, увеличению тока потребления ИС на несколько порядков из-за отсутствия возможности выхода блока умножения на установившийся режим. Блок умножения будет работать в режиме сильной токовой перегрузки. Разумеется, что такое подключение использовать нельзя.

Есть несколько подходов к решению проблемы. Рассмотрим два из них. В первом случае карман и исток электрически развязаны, т.е. транзистор находится в изолированном кармане p-типа. Чтобы в режиме формирования отрицательного напряжения на нижней обкладке конденсатора С3 на переходном процессе p-n-переход «исток-карман» оставался закрытым, необходимо понижать потенциал кармана с той же скоростью или быстрее, что неизбежно приведет к усложнению ИС из-за использования дополнительного блока управления. Кроме того, транзистор необходимо хорошо «секционировать» для снижения сопротивления контакта к карману, при этом площадь, занимаемая транзистором, увеличится. На практике было применено более простое решение без использования дополнительных схемотехнических цепей – изолированный карман n-канального транзистора Т7 подключен к самому низкому потенциалу ИС на выводе V^-. Несмотря на то, что при прочих равных условиях крутизна транзистора из-за влияния потенциала подложки при этом снижается, вероятность отпирания перехода в динамическом режиме можно свести к нулю. Для компенсации снижения крутизны транзистора Т7 при таком включении его размер необходимо увеличить приблизительно на 20%.

Для исключения возможности включения паразитной биполярной структуры на переходном процессе должна быть проведена оптимизация длительности фронтов сигналов управления режимами работы транзисторов блока умножения. В случае использования крутых фронтов тяжело решать задачу сохранения переходов транзисторов в запертом состоянии. Здесь необходимо принимать во внимание то, что в отличие от биполярных КМОП ИС изготавливаются на высокоомных слоях. При использовании чрезмерно пологих фронтов снижается эффективность работы блока умножения. Из опыта проектирования авторов известно, что хорошие результаты можно получить, если длительности фронтов нарастания/спада соответствуют 80÷100 нс.

5.5.5. Термонезависимый источник опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника

Получение опорного напряжения, не зависящего от изменений температуры, напряжения питания и прочих факторов, очень важно для ИМС стабилизаторов напряжения. Кроме того, источники опорного напряжения используются во всех аналоговых ИМС для стабилизации внутреннего напряжения питания аналоговых блоков.

Схемотехнические варианты построения простейших источников опорного напряжения, представленные на рис. 5.37, могут быть выполнены на диодах в прямом включении (*а*), МОП-транзисторах в диодном включении (*б*) или на стабилитроне (*в*).

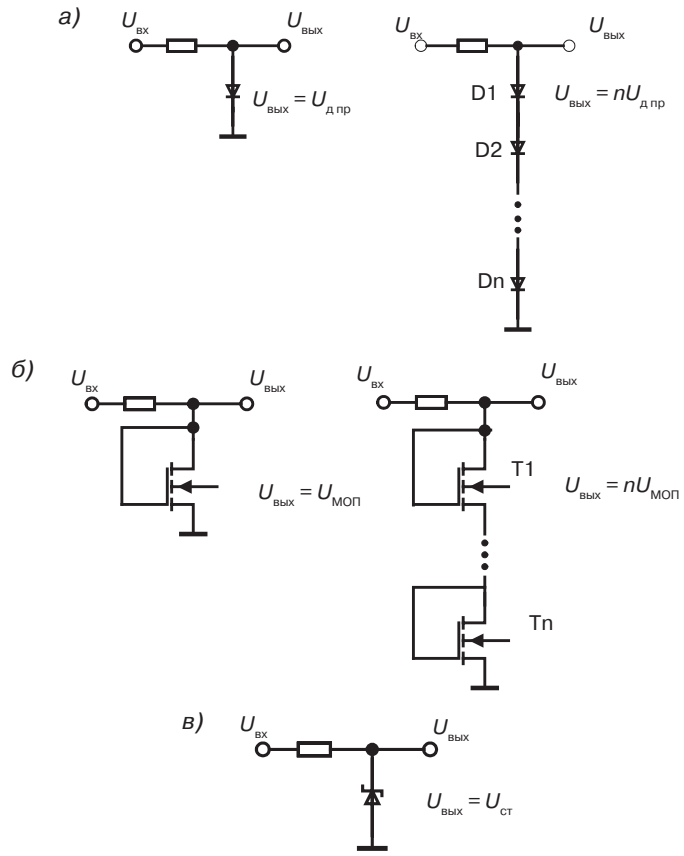


Рис. 5.37. Эквивалентные электрические схемы простейших источников опорного напряжения на диодах в прямом включении (*а*), МОП-транзисторах в диодном включении (*б*) и на стабилитроне (*в*)

Поскольку эти простейшие ИОН не обладают удовлетворительной температурной стабильностью, они в основном и предназначены для применения в электрических цепях формирования статического смещения.

Если стандартный ИОН на диоде в прямом включении имеет температурный дрейф от минус 1,5 до минус 2,2 мВ/°С, то схема рис. 5.37*б* на стабилитроне обеспечивает значение температурного дрейфа уже от 1,5 до 5 мВ/°С. В настоящее время в современных ИМС стабилизаторов напряжения данные ИОН используются достаточно редко, их заменили более прогрессивные схемотехнические решения, которые рассмотрены ниже.

5.5.6. Варианты построения термонезависимых источников опорного напряжения

Наиболее широкое распространение в ИМС стабилизаторов напряжения и других аналоговых ИМС в настоящее время получили источники опорного напряжения, равного ширине запрещенной зоны полупроводника [2].

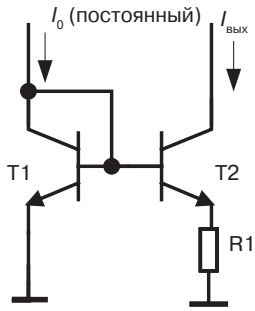


Рис. 5.38. Эквивалентная электрическая схема токового зеркала с двумя транзисторами, работающими с разной плотностью тока

В основе принципа работы такой схемы лежит идея генерации напряжения с положительным температурным коэффициентом, равным по абсолютной величине отрицательному температурному коэффициенту напряжения $U_{БЭ}$ (или диода). В таком случае при сложении этого напряжения с напряжением $U_{БЭ}$ получается напряжение с нулевым температурным коэффициентом. Рассмотрим работу такого элемента, называемого токовым зеркалом, с двумя транзисторами, работающими с разной плотностью эмиттерного тока (обычное отношение плотности 1 : 10). Эквивалентная электрическая схема токового зеркала представлена на рис. 5.38.

Для такого схемотехнического решения известная формула Эберса–Молла для транзисторов T1, T2 будет выглядеть следующим образом:

$$I_к = I_{к\,нас}\left(\exp\frac{U_{БЭ}}{\phi_т} - 1\right) \approx I_{к\,нас}\cdot\left(\exp\frac{U_{БЭ}}{\phi_т}\right),\ \text{где}\ \phi_т = \frac{KT}{q}, \tag{5.27}$$

где $\phi_т = \dfrac{KT}{q}$ – температурный потенциал.

Откуда получаем интересующие нас выражения для расчета численных значений основных электрических параметров ИОН:

$$U_{БЭ} \approx \phi_т \ln\frac{I_к}{I_{к\,нас}},$$

$$U_{R1} = U_{БЭТ1} - U_{БЭТ2} = \phi_т \ln\frac{I_{кТ1}}{I_{к\,нас}} - \phi_т \ln\frac{I_{кТ2}}{I_{к\,нас}} = \phi_т \ln\frac{I_{кТ1}}{I_{кТ2}} = \frac{KT}{q}\cdot\ln\frac{I_{кТ1}}{I_{кТ2}}, \tag{5.28}$$

$$I_{ЭТ2} \approx I_{R1} = I_{кТ2} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{KT}{qR1}\cdot\ln\frac{I_{кТ1}}{I_{кТ2}} = I_{вых}.$$

Как следует из анализа полученных результатов вычислений, численное значение напряжения на резисторе R1 и величина выходного тока пропорциональны значению абсолютной температуры T. Далее нам остается только преобразовать выходной ток в напряжение и сложить его с напряжением $U_{БЭ}$. Классическая схема такого ИОН с напряжением запрещенной зоны полупроводника приведена на рис. 5.39.

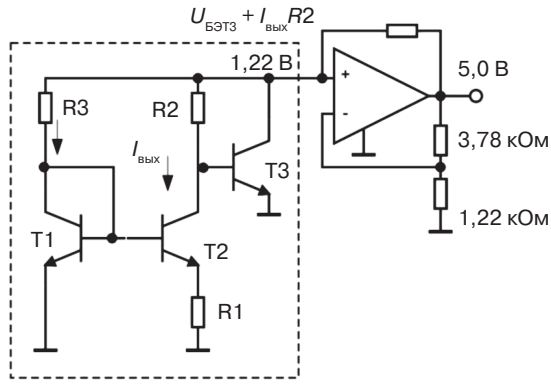


Рис. 5.39. Классическая схема ИОН с напряжением запрещенной зоны полупроводника

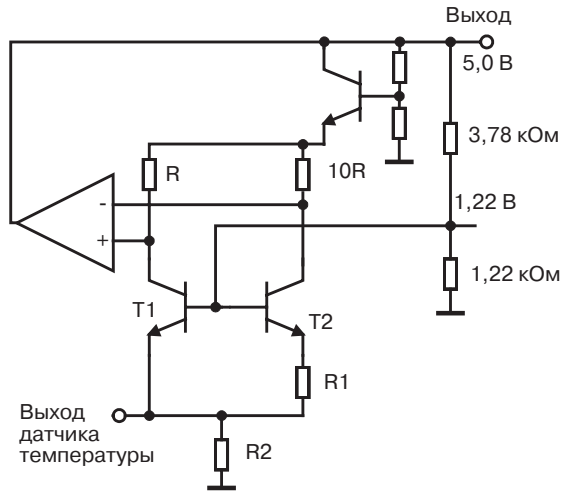


Рис. 5.40. Эквивалентная электрическая схема модернизированного ИОН

Здесь величина резистора R2 определяет (задает) величину напряжения, которое складывается с $U_{БЭ}$ и имеет положительный температурный коэффициент. Оказывается, что температурный коэффициент этого напряжения будет нулевым, когда суммарное напряжение равно напряжению запрещенной зоны кремния при температуре абсолютного нуля, т.е. примерно 1,22 В. Часть схемы, обведенная пунктиром, выполняет функцию стабилитрона.

На рис. 5.40 представлена модернизированная эквивалентная электрическая схема ИОН с напряжением запрещенной зоны, где используется другая конструкция встроенного стабилизатора напряжения.

Здесь заменена часть схемы, обведенная пунктиром в схеме рис. 5.39. Согласованная пара транзисторов T1 и T2 вынуждена работать при соотношении токов коллекторов 10:1. Разность напряжений $U_{БЭ}$, равная $\frac{KT}{q} \cdot \ln 10$, делает численное

значение тока эмиттера транзистора Т2 пропорциональным численному значению температуры (разность напряжений приложена к резистору R1). Но так как коллекторный ток Т1 всегда как минимум в 10 раз больше этой величины, то он также пропорционален температуре (благодаря работе ОУ напряжение на коллекторах Т1 и Т2 одинаковое). Поэтому суммарный эмиттерный ток всегда будет прямо пропорционален температуре и создает на резисторе R2 падение напряжение, имеющее положительный температурный коэффициент. Напряжение, снимаемое с резистора R2, складывается с напряжением $U_{БЭ}$ транзистора Т1 для получения численного значения стабильного опорного напряжения с нулевым температурным коэффициентом, которое образуется на базах транзисторов Т1 и Т2.

Схемотехнические решения «опорных источников запрещенной зоны» существуют в самых различных вариантах, но для всех них характерно сложение напряжения $U_{БЭ}$ с напряжением, созданным связанной парой транзисторов, работающих с некоторым заданным соотношением плотностей токов и имеющих положительный температурный коэффициент напряжения.

5.5.7. Анализ схемотехнических особенностей организации и применения триггеров Д-типа

При проектировании современных ИМС КН широко используется различные элементы памяти. Как правило, это триггера Д-типа, на основе которых строятся большинство регистров общего и специального назначения, встроенные элементы памяти, различные элементы, ИМС, сочетающие обработку и сохранение данных и результатов. Остальные разновидности триггеров (RS, JK и др.) проектируются на основе известных методов и не так часто используются в схемотехнике ИМС КН в силу их относительно более низкой надежности и устойчивости к различного рода внешним и внутренним помехам, возникающим на борту КА в процессе его эксплуатации.

Функциональные возможности и технические характеристики используемых элементов памяти в значительной степени определяют важнейшие технические параметры проектируемых ИМС – быстродействие, потребляемую мощность, надежность функционирования, площадь кристалла.

Поэтому проблема выбора наиболее приемлемых схемотехнических решений базовых элементов памяти проектируемых КМОП БИС является весьма актуальной.

В зависимости от типа используемых схемотехнических решений и от принятого способа записи информации все используемые в КМОП ИМС Д-триггеры можно разделить на три группы – статические, динамические и комбинированные (статико-динамические) [2].

Если состояние триггера изменяется по наступлению фронта синхросигнала, то такие триггеры относятся к синхронным Д-триггерам. Эти триггеры наиболее широко применяются в БИС. В асинхронных Д-тригерах переключение происходит после поступления на управляющие входы коммутации входных сигналов.

В статических триггерах записанная информация может храниться сколь угодно долго. Основой такого триггера является бистабильная ячейка, образованная перекрестным соединением инвертирующих базовых логических элементов.

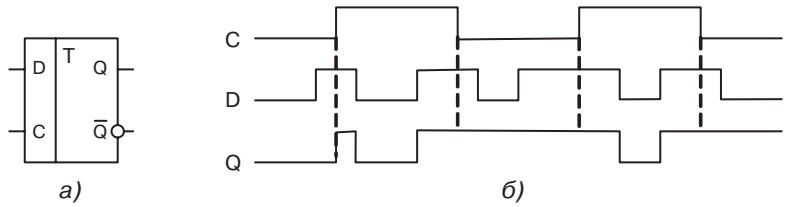


Рис. 5.41. Обозначение (*а*) и временные диаграммы работы (*б*) D-триггера, тактируемого уровнем сигнала

Динамические триггеры обычно содержат только один логический элемент и ряд дополнительных элементов для накопления заряда с цепями управления.

Синхронные Д-триггеры могут изменять свое состояние только в период воздействия тактового импульса при поступлении на вход Д информационного сигнала. На рис. 5.41*а* показано обозначение синхронного Д-триггера, а на рис. 5.41*б* – временная диаграмма работы. Иногда такие типы триггеров в литературе называют однотактными, или защелками (latch).

Синхронизируемый по уровню Д-триггер строится на основе мультиплексора (MUX) и бистабильных ячеек логических элементов (рис. 5.42*а*). Триггеры, синхронизируемые фронтом синхросигнала С, изменяют свое состояние только по положительному либо отрицательному уровню С, а при статических уровнях синхросигнала не зависят от входных воздействий, как показано на временной диаграмме рис. 5.42*в*. В отечественной литературе эти триггеры называют двухтактными и обозначают на схеме двумя буквами (ТТ) (рис. 5.43*а*), зарубежное обозначение показано на рис. 5.43*б*, где треугольник по синхровходу показывает, что триггер работает по переднему фронту синхросигнала.

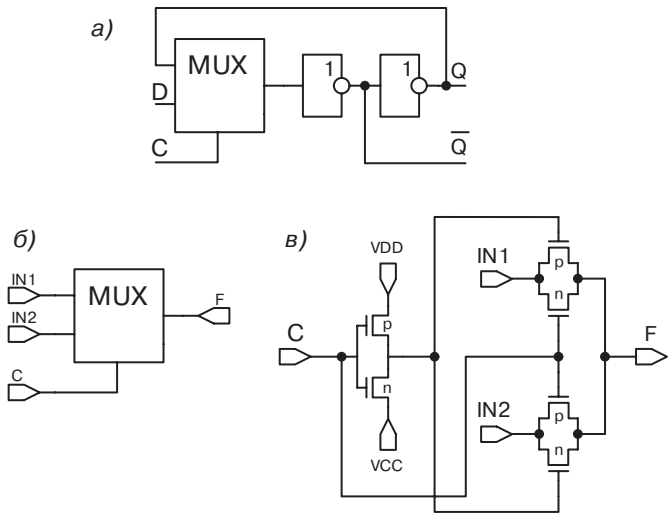


Рис. 5.42. Одноступенчатый D-триггер, синхронизируемый уровнем: вентильная реализация одноступенчатого D-триггера (*а*); обозначение мультиплексора на логическом уровне (*б*); мультиплексор на проходных ключах (*в*)

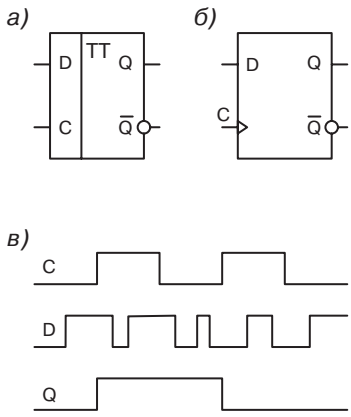


Рис. 5.43. Обозначение D-триггера, тактируемого фронтом синхросигнала, принятое в отечественной (*а*) и зарубежной литературе (*б*), временные диаграммы работы (*в*)

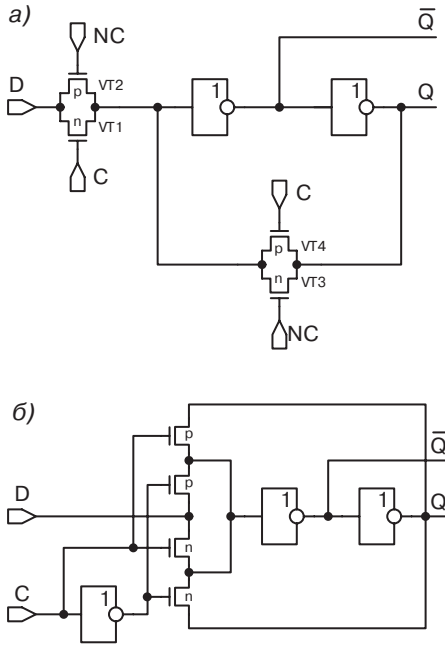


Рис. 5.44. D-триггер, тактируемый уровнем на основе двух коммутируемых проходных ключей: двухфазное тактирование (*а*); однофазное тактирование (*б*)

Рассмотрим особенности схемотехники усовершенствованных вариантов электрических схем, тактируемых уровнями Д-триггеров, наиболее широко используемых в КМОП БИС [85, 86].

Так, на рис. 5.44*а* представлена схема тактируемого уровня Д-триггера на основе двух коммутируемых проходных ключей, где первый ключ построен на транзисторах VT1, VT2, второй – на транзисторах VT3, VT4. Инверторы Д1 и Д2 образуют, соответственно, бистабильную ячейку памяти, а VT1–VT4 – мультиплексор.

Для синхронизации этих триггеров необходимо использовать двухфазную синхронизацию (C, NC). Если на вход C подан высокий уровень сигнала, на вход NC – низкий, то выходной ключ будет открыт и передаст сигнал с информационного входа Д1 на инверсный выход Q, а далее – через Д2 на прямой выход Q. Ключ обратной

связи при этом заперт и отключает инвертор Д2 от узла А, разрывая таким образом цепь обратной связи в бистабильной ячейке Д1–Д2. (Это режим прямой передачи сигнала.) При изменении фазы синхросигналов С, NC на противоположную входной ключ закрывается и изолирует узел А от Д-вход. На паразитной емкости узла А сохраняется последнее значение сигнала, зафиксированного на информационном входе Д.

В этом же процессе происходит отпирание ключа обратной связи и инверторы Д1–Д2 восстанавливают бистабильную статическую ячейку памяти, в которой запоминается уровень сигнала узла А. Триггер автоматически переходит в режим хранения информации. На рис. 5.44*б* представлена упрощенная структура тактируемого уровнем Д-триггера, реализованного на проходных транзисторах.

На рис. 5.45*а* представлена схема Д-триггера на основе динамических ключей-инверторов с двухфазной синхронизацией. Здесь динамические ключи образуются на транзисторах VT1–VT4 (входной динамический ключ) и VT5–VT8 (второй обратной связи). Схема работает следующим образом: на синхровход С поступает вначале по NC – низкий уровень, происходит отпирание транзисторов VT2 и VT3.

Первый ключ функционирует как обычный логический инвертор, и входной сигнал со входа Д передается на прямой выход Q через логический элемент Д1. При этом VT6, VT7 закрыты и изолируют транзисторы VT5–VT8 ключа обратной связи от заряда узла А. При изменении фазы синхросигналов (С – на низкий, NC – на высокий) транзисторы VT2, VT3 запираются и отключают входной ключ от входа Д, а на паразитной емкости узла А сохраняется последнее значение информационного сигнала. Транзисторы VT6, VT7 включаются, и тогда ключ обратной связи вместе с Д1 образует бистабильную статическую ячейку памяти, в которой запоминается уровень сигнала в узле А, Д-триггер переходит в режим хранения информации.

С целью уменьшения площади кристалла в качестве инвертора цепи обратной связи возможно использовать статические инверторы (транзисторы VT5, VT6), как показано на рис. 5.45*б*.

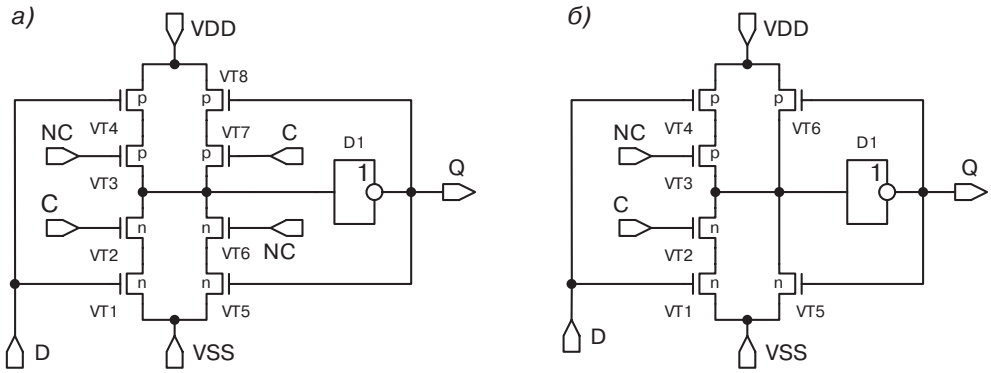


Рис. 5.45. Схема D-триггера на основе динамических ключей (*а*) и его модернизация с использованием одного статического инвертора (*б*)

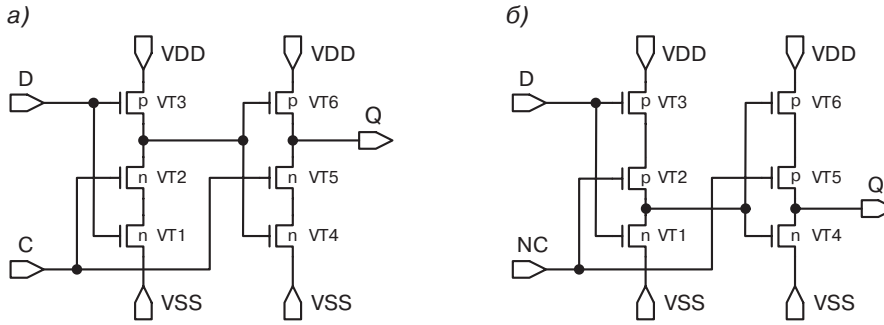


Рис. 5.46. Схемы динамических D-триггеров с одним синхровходом: прозрачная для логической единицы (*а*); прозрачная для логического нуля (*б*)

Однако такая схема имеет один существенный недостаток. В режиме переключения из высокого в низкий уровень сигнала на выходе Д-триггера транзисторы VT1 и VT2 должны быть способны переключить ток включенного транзистора VT6, для чего размеры VT1–VT4 должны быть больше, чем размеры VT5, VT6.

На рис. 5.46 представлены схемы динамических триггеров с однофазной синхронизацией и использованием синхронизирующих транзисторов одного типа проводимости [87]. Схема рис. 5.46*а* использует цепь из двух последовательно соединенных динамических инверторов n-типа. При высоком уровне синхросигнала на входе С транзисторы VT2, VT5 открыты и информация в прямом виде приходит на выход Q со входа Д. При изменении фазы на противоположную VT2 VT5 заперты, а триггер хранит предыдущую информацию.

Триггер рис. 5.46*б* построен на основе динамических инверторов p-типа и функционирует аналогично вышеописанному. Здесь информация проходит на выход триггера на низком уровне синхросигнала. На входе Д схема содержит проходной ключ на транзисторах VT1, VT2, а в цепи обратной связи – динамический ключ на транзисторах VT3, VT6. Допустим, на вход С подан сигнал высокого уровня, а вход NC – сигнал низкого. Тогда входной ключ открыт, и сигнал с входа Д в инверсной форме через инвертор Д1 передается на выход Q в инверсной форме. При этом транзисторы VT4, VT5 выключены и изолируют транзисторы VT3, VT6 ключа обратной связи от узла А. При изменении фазы синхросигналов С, NC на противоположную входной ключ закрывается и изолирует узел А от входа Д. При этом на паразитной емкости узла А сохраняется последний уровень сигнала входа Д. Одновременно открываются транзисторы VT4, VT5, и включенный ключ обратной связи вместе с инвертором Д1 образует бистабильную ячейку памяти. Д-триггер переходит в режим хранения. Иногда используют иное расположение ключевых транзисторов (рис. 5.48*б*).

На рис. 5.47 представлена схема D-триггера на основе ключей комбинированного типа. С целью упрощения схемы в ключе обратной связи можно исключить один из синхронизирующих транзисторов (рис. 5.47*в*).

Упростить решение задачи обеспечения синхронизации блоков ИМС позволяют Д-триггеры, использующие один синхровход С (NC). Схема такого типа, синхронизируемая прямым сигналом, показана на рис. 5.48. При подаче высоко-

го уровня сихросигнала C транзистор VT1 открыт и обеспечивает передачу сигнала со входа D на выход Q через инвертор D1. Транзистор VT2 при этом закрыт и отключает транзистор обратной связи VT3. Транзистор VT4 способствует регенеративному включению элемента D1 и повышает уровень напряжения в узле A до уровня VDD, пониженный входным транзистором VT1.

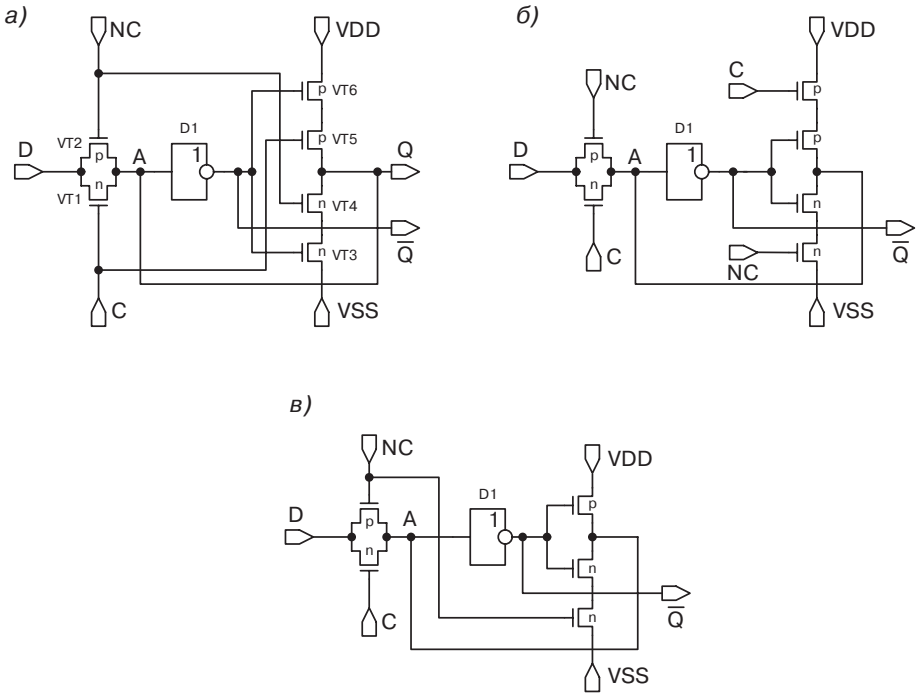


Рис. 5.47. D-триггер, тактируемый уровнем на основе комбинации ключей двух типов

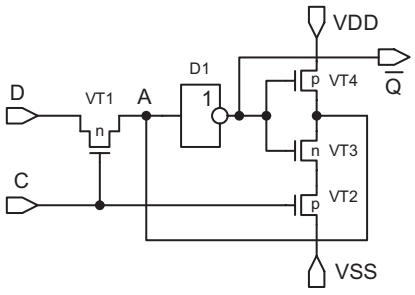


Рис. 5.48. Схема D-триггера комбинированного типа с одним прямым синхросигналом

Электрическая схема Д-триггера с дифференциальным входным каскадом может быть рекомендована для использования в ИМС КН конвейерного типа как обеспечивающая максимальное быстродействие. Схема содержит бистабильную ячейку на инверторах D1, D2, синхронизируемый дифференциальный входной каскад на транзисторах VT1–VT3 (рис. 5.49) и работает следующим образом.

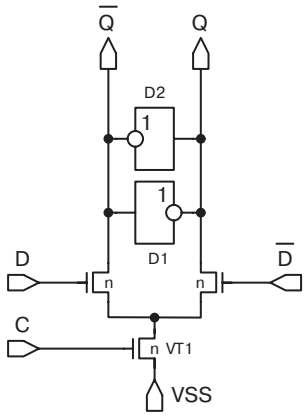


Рис. 5.49. Схема D-триггера с дифференциальным входным каскадом

При высоком уровне сигнала на синхровходе C синхронизирующий транзистор VT1 открыт, и сигналы со входов D и D передаются на выходы Q и Q. Параллельно с передачей осуществляется запись сигнала в бистабильную ячейку D1, D2. Для устойчивой работы ЭП топологические размеры транзисторов и инверторов D1, D2 должны быть меньше топологических размеров транзисторов VT1–VT3. При подаче низкого уровня сигнала на вход C транзистор VT1 закрывает входные транзисторы VT1, VT2 и блокирует передачу сигналов со входов D, D. Триггер переходит в режим хранения, и на выходы Q, Q поступают уровни сигналов, записанные в бистабильной ячейке D1, D2.

5.5.8. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП БИС

Помехозащищенность цифровых КМОП БИС является одной из основных характеристик, определяющих надежность работы любой проектируемой системы. Для современных быстродействующих цифровых БИС решение проблемы усложняется в связи с тем, что времена переключения базовых элементов, определяющих быстродействие БИС в целом, становятся соизмеримыми с временами распространения сигналов во внутренних и внешних линиях связи систем. Импульс такой помехи в линии может быть воспринят БИС как истинный сигнал, вследствие чего работоспособность системы может быть нарушена. Некоторые аспекты проблемы помехозащищенности рассмотрены в [88], однако в них, например, не отражены вопросы генерации внутренних помех, генерируемых помех в цепях БИС и схемотехнические приемы и методы повышения их помехозащищенности.

Здесь следует различать два класса задач:

- повышение помехоустойчивости входных каскадов, выходных каскадов и цепей питания цифровых БИС к воздействию *внешних* помех;
- повышение помехоустойчивости входных и выходных элементов, внутренних логических элементов (ЛЭ) и их цепей питания к воздействию *внутренних* помех;
- подавление способности генерации внутренних помех базовыми и согласующими элементами БИС.

Важность обеспечения помехозащищенности цифровых БИС к внутренним помехам связана с невысоким логическим перепадом напряжений в цепях ЛЭ и способностью быстродействующих ЛЭ, входных и выходных каскадов к генерации высокоуровневых помех на паразитных емкостях и индуктивностях компонентов БИС. Особенно сильно эффекты генерации помех проявляются в быстродействующих выходных каскадах, управляющих большими емкостными нагрузками и коммутирующих большие выходные токи.

Известны следующие основные типы внутренних помех [88]:

- генерируемые в сигнальных шинах из-за их перекрестного паразитного взаимодействия;
- генерируемые в сигнальных шинах в силу эффектов, связанных с рассогласованием выходов элементов с нагрузкой, наличием *L*, *C*-компонентов в нагрузке;
- генерируемые в сигнальных шинах из-за известного эффекта состязания сигналов.

Перечисленные типы помех имеют различные физические механизмы генерации и по-разному воздействуют на БИС, однако их существование в цепях БИС может оказывать влияние на устойчивость функционирования и характеристики БИС.

Помехоустойчивость цифровых БИС к воздействию внешних помех

Под *помехоустойчивостью* входного каскада обычно понимают его способность сохранять свое установившееся статическое состояние при воздействии помехи. Статический *запас помехоустойчивости* характеризуется параметрами:

$$\Delta U_T^+ = U_{TL} - U_{IL};\ \Delta U_T^- = U_{IH} - U_{TH}. \qquad (5.29)$$

Данные параметры иллюстрируются рис. 5.50*а*, на котором приведена передаточная характеристика входного инвертирующего каскада (кривая *1*), управляемая устройством с передаточной характеристикой аналогичного типа (кривая *2*). Значения пороговых напряжений высокого и низкого уровней U_{TH}, U_{TL} определяются на передаточной характеристике в точках *A*, *B*, в которых $dU_O/dU_I = -1$. Значения входных напряжений высокого и низкого уровней U_{IH}, U_{IL}, соответствуют точкам *C* и *D*, в которых $U_{IH} = U_{OH}$, а $U_{IL} = U_{OL}$ управляющего устройства.

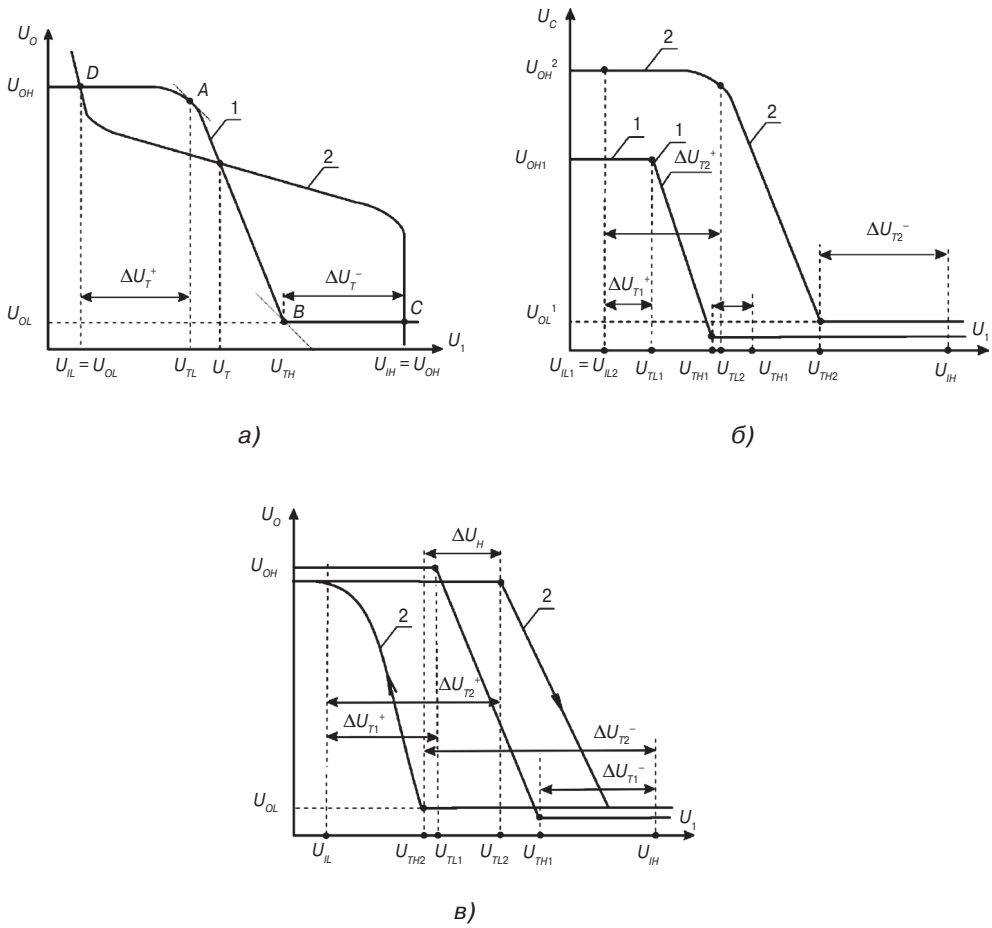
Однако наличие статического запаса помехоустойчивости и входного каскада является необходимым, но недостаточным условием для обеспечения помехозащищенности БИС, поскольку здесь важное значение имеет длительность импульса помехи. При этом в зависимости от длительности импульса помехи и величины собственной задержки переключения входного каскада возможны случаи, когда входной каскад не изменит своего состояния даже при превышении сигналом помех статического запаса, помехоустойчивости. Поэтому входные каскады цифровых БИС обычно характеризуются *импульсной помехоустойчивостью*, которую определяют допустимой длительностью импульса помехи $t_п$, амплитуда которой равна логическому перепаду напряжений на входе $\Delta U_T = U_{IH} - U_{TL}$.

Влияние внешних помех на входы цифровых БИС заключается в их воздействии на входы БИС, приводящих к изменению их логического состояния. При этом на выходе входного каскада будет сформирован ложный короткий сигнал,

который, распространяясь по цепям цифровых БИС, будет изменять состояния функциональных блоков цифровых БИС, включая элементы памяти, и формировать на выходах цифровых БИС ложные сигналы, что эквивалентно сбою (отказу) функционирования БИС.

Известны общие методы борьбы с внешними помехами на входах цифровых БИС [88]. Повышение помехозащищенности цифровых БИС по входам достигают как за счет повышения статической, так и динамической помехоустойчивости входных каскадов. Среди методов повышения *статической помехоустойчивости* входных каскадов можно выделить следующие:

- увеличение значений входных пороговых напряжений переключения U_{TH}, U_{TL} и логического перепада входных напряжений $U_T = U_{OH} - U_{OL}$ (рис. 5.50*б*, кривая 2). Недостатком этого метода является необходимость увеличения напряжения питания U_{cc} и ухудшение быстродействия входного каскада;



а) *б)*

в)

Рис. 5.50. Передаточная характеристика входного каскада цифровой БИС: инвертирующая (*а*), с повышенным порогом переключения (*б*) и «гистерезисного» типа (*в*)

- формирование во входном каскаде передаточной характеристики, симметричной по отношению к логическому перепаду входных напряжений LU_T;
- использование во входном каскаде внутренних обратных связей для формирования передаточной характеристики гистерезисного типа с шириной петли ΔU_H (кривая 2 на рис. 5.50*в*).

Среди методов повышения *динамической помехоустойчивости* можно выделить следующие:

- ограничение минимального времени задержки переключения и длительностей фронтов входного каскада, позволяющее ухудшить чувствительность входного каскада к длительности динамических помех;
- использование специальных встроенных схем ограничения динамических помех (емкостных цепочек и др.);
- использование в БИС парафазных входных каскадов для двухпроводных линий связи, принимающих одновременно прямой и инверсный входные сигналы и нечувствительных к динамической помехе, возникающей в этом случае одновременно на прямом и инверсном входах.

Устойчивость цепей питания цифровых БИС к воздействию внешних помех

Помимо входов цифровых БИС внешние помехи могут появляться и в цепях питания БИС и влиять на их функционирование. Устойчивость цепей питания цифровых БИС к воздействию внешних помех можно характеризовать допустимым отклонением напряжения питания цифровых БИС от номинального $\pm\Delta U_{cc}$, при котором устойчивость функционирования, динамические и электрические параметры цифровых БИС не изменяются. Специального параметра, характеризующего устойчивость цифровых БИС к воздействию динамических помех по цепям питания, в литературе не встречается, поскольку динамическая помехоустойчивость к воздействию этого типа помех в значительной степени определяется как функциональным составом БИС, так и условиями ее подключения (источником питания, нагрузкой и т.д.).

Влияние внешних помех на цепи питания цифровых БИС заключается в их воздействии на цепи питания внутренних элементов и изменении логических уровней на выходах логических элементов БИС. При воздействии на комбинационные цепи это изменение напряжения питания, не снижающее уровни напряжения на выходах ниже пороговых, будет в основном изменять скорость прохождения сигналов по логическим цепям, не изменяя их достоверности. При дальнейшем снижении уровня логических напряжений на выходе элементов ниже пороговых значений возможно изменение логического состояния элементов памяти, ложная синхронизация элементов памяти и потеря достоверности прохождения информации по цепям БИС.

Основными методами защиты от внешних помех в цепях питания цифровых БИС являются специальные методы проектирования межсоединений цепей питания БИС в устройстве, оптимальный выбор мощности и выходного сопротивления источников питания БИС, а также электрическая развязка цепей питания друг от друга. Другая группа методов предполагает использование специальных схем ограничения или сглаживания помех (емкостных цепочек и др.), которые могут быть как внешними для БИС, так и встраиваться в БИС.

Влияние внешних помех на выходные каскады заключается в основном в их переходе в состояние, близкое к перегрузке, которое может привести к отказу. Влияние помех этого типа на функционирование цифровых БИС слабо, если с выхода отсутствуют связи с внутренними компонентами БИС.

Анализ устойчивости цифровых БИС к воздействию внутренних помех

Помехи, генерируемые в шинах питания цифровых БИС, являются основным типом внутренних помех.

Механизм генерации помех в шинах питания поясняется на примере КМОП БИС, упрощенная схема которой приведения на рис. 5.51*а* [88]. Здесь: U_{cc} и *0V* – обозначения выводов питания и общей шины БИС, к которым подключается внешний источник питания; U'_{cc} и *0V′* – внутренние шины питания и общая шина БИС; L_S, R_S – эквивалентные паразитные индуктивность и сопротивление внутренней шины питания (включая индуктивность и сопротивления вывода); L_G, R_G, – паразитные индуктивность и сопротивление общей шины (включая индуктивность и сопротивление вывода). Внешняя емкость нагрузки C_L подключена между выходным выводом U_O и выводом *0V*. Допустим, понижающий выходной транзистор *VT21* выходного элемента согласования *DO1* находился в закрытом состоянии, а повышающий *VT11* – в открытом. Тогда емкость нагрузки C_L заряжена до высокого уровня напряжения U_{OH}. При отпирании понижающего транзистора *VT21* емкость C_L разряжается (рис. 5.51*б*), и через открытый транзистор *VT21* протекает изменяющийся во времени ток:

$$I_{OL} = C_L dU_O^{HL}/dt. \tag{5.30}$$

Этот ток на паразитных сопротивлении R_G и индуктивности L_G общей шины *0V* создает падение напряжения:

$$\Delta U_G = L_G\, di_{OL}/dt + i_{OL}R_G. \tag{5.31}$$

Это напряжение воздействует в момент переключения на внутреннюю общую шину *0V′* и изменяет ее потенциал относительно потенциала внешнего вывода *0V*, как показано на рис. 5.51*б*.

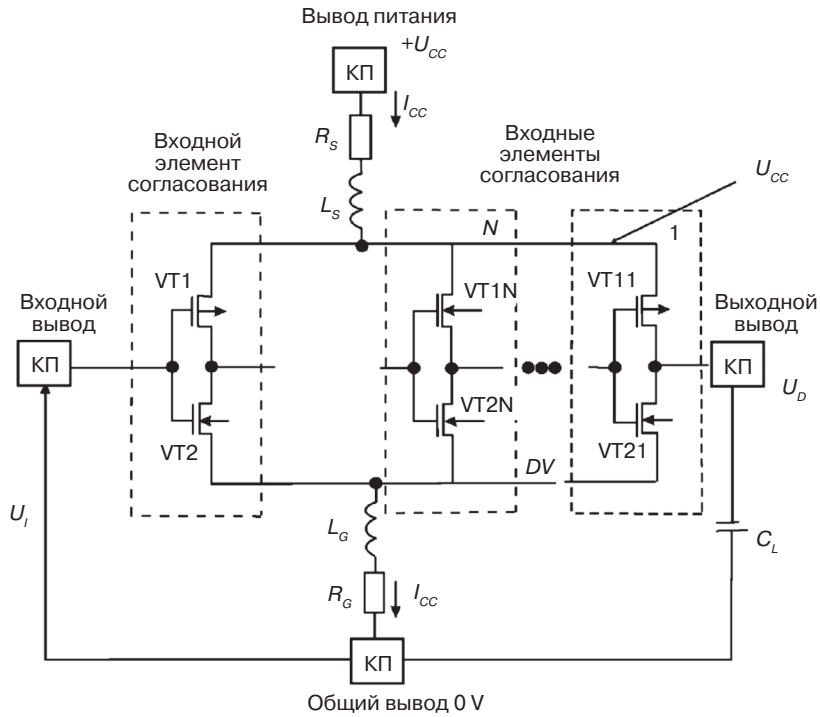
При включении повышающего выходного транзистора *VT11* и выключении понижающего транзистора *VT21* емкость нагрузки C_L заряжается током стока р-МОП транзистора *VT11*

$$i_{OH} = C_L dU_O^{LH}/dt, \tag{5.32}$$

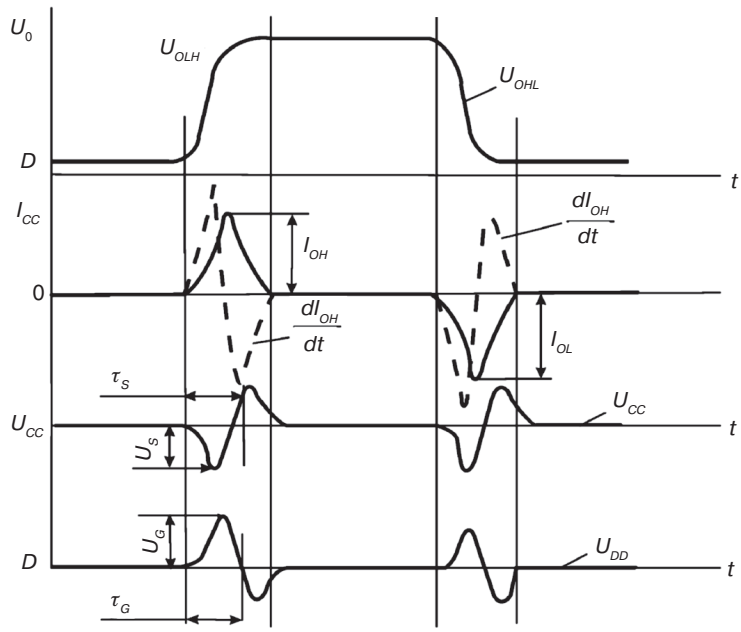
Этот ток, протекая по паразитным индуктивности L_S и сопротивлению R_S шины питания U_{cc}, создает на них падение напряжения

$$\Delta U_S = L_S di_{OH}/dt + i_{OH}R_S, \tag{5.33}$$

Напряжение ΔU_S воздействует в момент переключения на внутреннюю шину питания U'_{cc} и изменяет ее потенциал относительно потенциала внешнего вывода U_{cc} (рис. 5.51*б*).



а)



б)

Рис. 5.51. Схема цифровой БИС, поясняющая механизм генерации помех в цепях питания КМОП БИС (*а*), и временные диаграммы сигналов (*б*)

Например, при емкости нагрузки C_L = 50 пФ и перепаде выходного напряжения L_O = 5 В в течение 2 нс величина тока перезаряда = 50 × 5/2 = 125 мА. Допуская, что индуктивность шины (питания или общей шины) составляет $L_{G,S}$ = 10 нГн, а сопротивление $R_{G,S}$ = 2 Ом, значение всплеска напряжения $\Delta U_{G,S}$ составит 0,875 В.

При одновременном переключении нескольких выходных каскадов, что практически всегда имеет место, значение напряжения помех ΔU_S, ΔU_G увеличивается пропорционально числу переключающихся в одно состояние каскадов.

Следует отметить, что в действительности же значение напряжения помехи ΔU_S, ΔU_G может быть и выше, чем показано. Это связано с наличием в выходных элементах согласования сквозных токов потребления, возникающих при переключении в состояния, когда оба МОП-транзистора *VT11* и *VT21* находятся в открытом состоянии. Эти токи, суммируясь с токами перезаряда емкости нагрузки i_{OH}, i_{OL}, значительно увеличивают значения токов, протекающих через паразитные индуктивности L_G, L_S и сопротивления R_G, R_S, и еще больше увеличивают напряжения помех ΔU_G и ΔU_S.

Оценочный расчет численных значений напряжения внутренних помех

Для оценочного расчета значений напряжений помех ΔU_S, ΔU_G используем эквивалентные схемы разряда (заряда) емкости нагрузки на основе МОП-транзисторов, приведенные на рис. 5.52, в которых влияние сквозных токов потребления не учитывается.

Допустим, при разряде эквивалентной емкости нагрузки напряжение на затворе транзистора *VT2* (рис. 5.52*а*) изменяется в течение времени таким образом, что ток разряда I_{OL} предварительно заряженной до напряжения U_{OH} нагрузки имеет линейный характер (рис. 5.53*а*), тогда величина напряжения помехи ΔU_G имеет постоянное значение. Заряд, накопленный емкостью нагрузки C_L, определяется выражением: $Q = C_L U_O$, где $U_O = U_{OH} - U_{OL}$ – логический перепад напряжений на выходе.

Этот заряд может быть разряжен в течение времени T_z выходным током I_{OL} = $= 2Q/\tau_r = 2C_L U_{OL}/\tau_r$ [88].

Тогда с учетом линейной зависимости тока разряда i_{OL} напряжение помехи в общей шине будет иметь вид:

$$\Delta U_O = L_O di_{OL}/dt = L_G 2I_{OL}\tau_r = \Delta L_G C_L U_O/\tau_r^2. \quad (5.34)$$

С учетом того, что одновременно могут переключаться в одно состояние N выходных каскадов, получим:

$$\Delta U_G = 4N\mathrm{D}L_G C_L U_O/\tau_r^2. \quad (5.35)$$

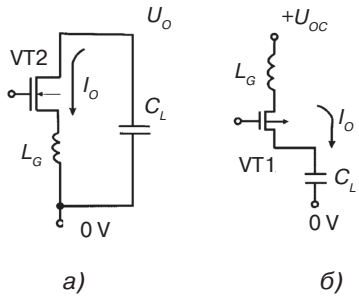


Рис. 5.52. Эквивалентные схемы разряда (*а*) и заряда (*б*) емкости нагрузки на основе МОП-транзистора

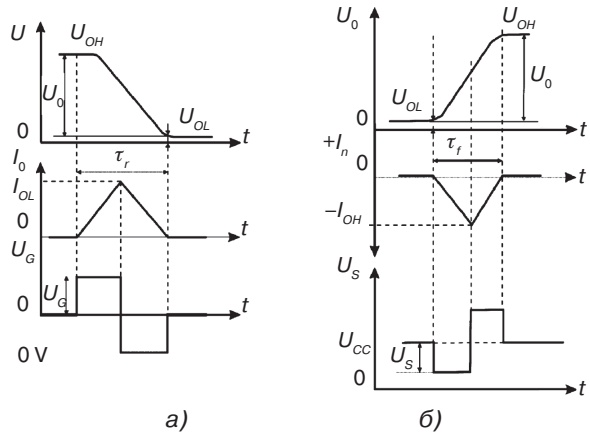


Рис. 5.53. Временные диаграммы сигналов (*а*, *б*) для определения уровня помех в общей шине *0V* в шине питания U_{cc}

При изменении напряжения на затворе транзистора VT1 (рис. 5.52*б*) в течение времени τ_f таким образом, что ток заряда i_{OH} емкости нагрузки C_L имеет линейный характер, напряжение помехи ΔU_S в шине питания также будет иметь постоянное значение.

Аналогично, при заряде емкости нагрузки величина накапливаемого в емкости C_L при напряжении U_O заряда определяется простой формулой $-Q = C_L U_O$. Этот заряд может быть сформирован в течение времени T_f выходным током $I_{OH} = 2Q/\tau_r 2C_L U_O/\tau_f$. Тогда с учетом линейной зависимости тока заряда I_{OH} напряжение помехи в шине питания можно определить из выражения:

$$\Delta U_S = L_S di_{OH}/dt = L_S 2I_{OH}/\tau_r = 4L_S C_L U_O/\tau_r^2. \quad (5.36)$$

А с учетом того, что одновременно могут переключаться в одно состояние N выходных элементов согласования, получаем:

$$\Delta U_S = 4N\mathrm{D}L_S C_L U_O/\tau_r^2. \quad (5.37)$$

Как следует из полученных выражений, наиболее существенное влияние на величину напряжения помех в шине питания и общей шине оказывают длительности заряда (разряда) емкости τ_f, τ_r, т.е. длительности фронтов выходного сигнала.

Особый интерес представляет исследование механизма влияния помех, возникающих в шинах питания, на состояние входных и выходных каскадов БИС, непосредственно связанных с выводами корпуса БИС или микросборки.

Влияние помех в шинах питания на входы БИС

Рассмотрим влияние помех в шинах питания на входы БИС на примере КМОП БИС; эквивалентная схема входного каскада приведена на рис. 5.51*а*. Входное напряжение U_I, подаваемое на входы БИС, обычно относят к общему внешнему выводу. При этом входной элемент согласования обычно характеризуется входными пороговыми напряжениями высокого U_{TH} и низкого U_{TL} уровней, при которых БИС сохраняет свое состояние. Разность между входными напряжениями и входными по-

роговыми напряжениями характеризует запас помехоустойчивости ΔU_T^+ входного элемента согласования низкого $\Delta U_T^+ = U_{TL} - U_{OL}$ и высокого $\Delta U_T^- = U_{OH} - U_{TH}$ уровней.

Появление помехи ΔU_G в общей шине приводит к кратковременному увеличению потенциала внутренней общей шины *0V'* БИС и вследствие этого к изменению величин пороговых напряжений и запаса помехозащищенности [88]:

$$\Delta U_T^+ = U_{TL} + \Delta U_G - U_{IL} = \Delta U_{TO} + \Delta U_G, \tag{5.38}$$

$$\Delta U_T^- = \Delta U_{IH} - \Delta U_{TH} - \Delta U_G = \Delta U_{TO} - \Delta U_G. \tag{5.39}$$

Как следует из приведенных выражений, помеха в общей шине U_G ухудшает помехозащищенность при высоком уровне сигнала на входе U_{IH}. При напряжении помехи в общей шине $U_G > U_{IH} - U_{TH}$ и ее длительности T_G, сравнимой с задержкой переключения входного элемента согласования, возможно ложное срабатывание входного каскада и БИС в целом.

Появление помехи U_S в шине питания приводит к снижению потенциала внутренней шины питания U'_{cc} БИС и, вследствие этого, также к изменению пороговых напряжений:

$$\Delta U_T'' = U_{TL} - U_S, \Delta U_{TH} = U_{TL} - U_s. \tag{5.40}$$

Изменение запаса помехоустойчивости выглядит следующим образом [88]:

$$\Delta U_T^+ = U_{TL} - \Delta U_S - U_{IL} = \Delta U_{TO}{}^+ - \Delta U_S, \tag{5.41}$$

$$\Delta U_T^- = U_{IH} - \Delta U_S - U_{TH} = \Delta U_{TO}{}^- - \Delta U_S. \tag{5.42}$$

Из вышеприведенных выражений следует, что помеха в шине питания U_S ухудшает помехозащищенность БИС при низком уровне сигнала на входе U_{IL}.

При напряжении помехи в шине питания $U_S > U_{TL} - U_{IL}$ и ее длительности τ_s, сравнимой с задержкой переключения входного каскада, также возможны его ложное срабатывание и сбой функционирования БИС.

Влияние помех в шинах питания на выходы БИС

Влияние помех, генерируемых в шинах питания, на выходы БИС заключается в кратковременном изменении значений выходных напряжений низкого U_{OL} и высокого U_{OH} уровней.

Эти изменения напряжения, воздействуя на входы нагрузочных (управляемых) БИС (при определенной длительности и амплитуде помех) могут вызвать их ложное срабатывание. Кроме того, эти помехи, воздействуя на внутренние компоненты выходного элемента согласования, могут приводить к отпиранию внутренних изолирующих переходов, взаимодействию компонентов друг с другом, их катастрофическим отказам (защелкивание и др.). Другой механизм воздействия на выходы БИС связан с понижением значения напряжения питания на внутренних шинах БИС U'_{cc}, *OV* (при отрицательной помехе ΔU_S, положительной помехе ΔU_G) и снижением вследствие этого нагрузочной способности выходного элемента согласования, т.е. выходных токов низкого I_{OL} и высокого I_{OH} уровней. Снижение выходных токов, в свою очередь, приводит к увеличению длительностей заряда (разряда) емкости нагрузки и затягиванию фронтов выходных сигналов в момент появления помех.

Как видим, существует многообразие различных ситуаций, и все они не лучшим образом влияют на эксплуатационную надежность современных микросхем, используемых в качестве элементной базы различных электронных блоков и систем.

Рекомендуемые схемотехнические методы борьбы с помехами в шинах питания БИС

Для снижения влияния помех в шинах питания на работоспособность цифровых БИС рекомендуется принимать соответствующие меры, в частности [88]:

- разделение шин питания входных и выходных элементов согласования, внутренних функциональных блоков БИС и подключение их к отдельным электрически изолированным выводам (рис. 5.54). Такая схема построения цепей питания БИС не позволяет устранить генерацию помех в шинах питания элементов согласования при их переключении, однако уменьшает их величину за счет уменьшения значения паразитной индуктивности шин питания и устраняет их влияние на входы и внутренние функциональные блоки БИС;
- использование встроенной в блок управления выходного элемента согласования специальной схемы управления скоростью нарастания выходного напряжения. Такая схема позволяет эффективно управлять отношением di_o/dt выходного элемента и уменьшать помехи в шинах питания БИС;
- использование встроенной в блок управления выходного элемента согласования схемы задержки включения (выключения) выходных формирователей. Поскольку в выходном элементе при переключении существует состояние, когда оба выходных транзистора *VT11*, *VT21* формирователей открыты (рис. 5.51*а*), в этом состоянии в цепи питания протекает большой сквозной ток потребления, генерирующий помехи. С целью снижения уровня помех при переключении из низкого состояния в высокое схема задержки задерживает включение повышающего транзистора *VT11* до тех пор, пока понижающий *VT21* не перейдет в закрытое состояние. При переключении из высокого уровня в состояние низкого уровня эта схема задерживает включение понижающего транзистора *VT21* до тех пор, пока повышающий транзистор *VT11* не перейдет в закрытое состояние. Тем самым обеспечивается *уменьшение сквозных токов потребления*.

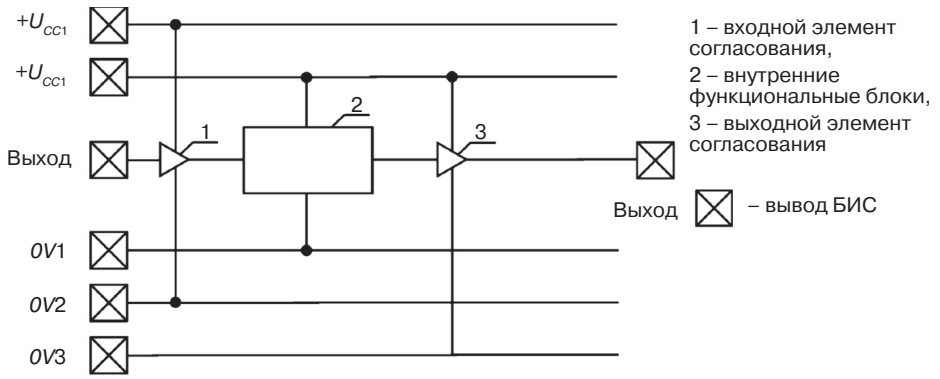


Рис. 5.54. Схема организации цепей питания цифровых БИС с пониженным уровнем помех

Некоторые технические решения перечисленных схем для конкретных схемотехнических базисов приводятся в [88].

Помехи, генерируемые в сигнальных шинах из-за перекрестного взаимодействия

Перекрестные помехи обусловлены воздействием друг на друга соседних сигнальных линий, расположенных на кристалле в непосредственной близости друг от друга, при наличии емкостной связи между выходами двух выходных элементов согласования.

Известны два основных типа перекрестных помех [88]: *емкостные* и *индуктивные*, причем *емкостные* помехи существенны при больших перепадах выходного напряжения и больших емкостях. *Индуктивные* помехи характерны для больших перепадов выходного тока в сигнальных линиях с большими индуктивностями и малыми емкостями. Например, для микроконтроллеров из-за сравнительно невысоких значений коммутируемых токов характерными являются емкостные помехи в сигнальных линиях. Механизм их возникновения поясняется схемой, приведенной на рис. 5.55*а* и *б*, в которой *D*1, *D*2 – выходные элементы согласования БИС; *C*x – емкость связи двух системных линий. При отрицательном перепаде напряжения в одной активной линии, например, в *B*2 в другой, *B*1, находящейся в пассивном состоянии низкого уровня, генерируется отрицательная помеха – ΔU_G. При положительном перепаде напряжения в линии *B*1 в другой, *B*2, находящейся в пассивном состоянии низкого уровня, генерируется положительная помеха $+\Delta U_G$.

Расчет параметров перекрестных помех может быть проведен по методике, описанной в [88]. Амплитуда напряжения помехи определяется из выражения:

$$\Delta U_G = \left|\frac{\tau A}{\tau_{f,r}}\right|\left[1-\exp\frac{\tau_{f,r}}{\tau}\right]. \qquad (5.43)$$

Здесь: $A = C_X \Delta U/C$ – некоторая постоянная величина; C_X – емкость связи; $C = C_X + C_O + C_L$; ΔU – разность перепада напряжений между шинами; C_O – выходная емкость элемента согласования; C_L – емкость нагрузки; $\tau = CR_OR_L/(R_O + R_L)$; R_O – выходное сопротивление элемента согласования; R_L – сопротивление нагрузки.

Длительность помехи можно определить из выражения [88]:

$$t_G = \tau_{f,r} + \tau \ln\frac{\left|\tau A/\tau_{f,r} - U_{OL}\right|}{U_{OL}}\left[1-\exp\frac{\tau_{f,r}}{\tau}\right]. \qquad (5.44)$$

Влияние перекрестных помех заключается в прямом изменении уровней выходных сигналов БИС, которые воздействуют на входы нагрузочных БИС и при определенной амплитуде и длительности способны вызывать их ложное срабатывание. Кроме того, эти помехи, в первую очередь, отрицательные, воздействуя на компоненты выходного элемента согласования, могут привести к отпиранию изолирующих переходов компонентов, катастрофическим отказам БИС.

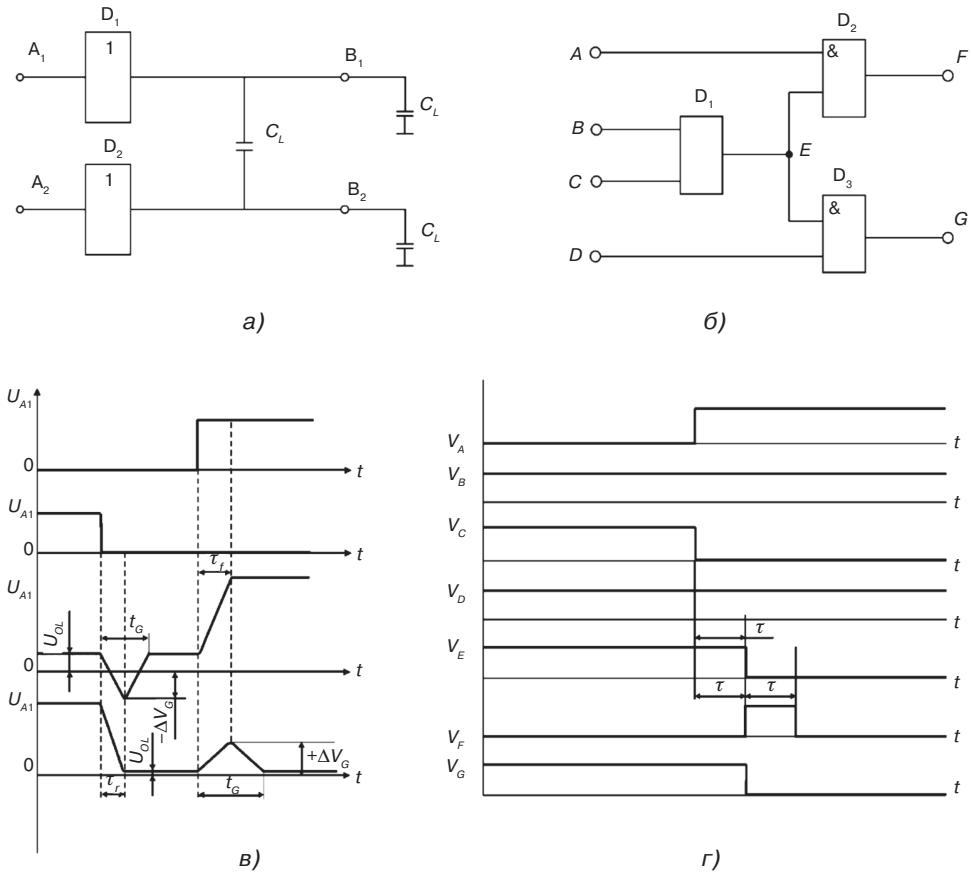


Рис. 5.55. Схемы, поясняющие механизм генерации помех перекрестного типа (*а*), вызванных состязаниями сигналов (*в*), и временные диаграммы сигналов (*б* и *г*)

Основным методом снижения уровня перекрестных помех является уменьшение паразитных перекрестных емкостных и индуктивных связей в аппаратуре, в которой используются цифровые БИС. Однако с целью повышения надежности цифровых БИС в выходные элементы согласования могут вводиться специальные схемы ограничения помех, уменьшающие помехи на выходах до уровней, не влияющих на изоляцию компонентов БИС.

Еще один тип помех генерируется в сигнальных шинах в случае рассогласования линии связи – выхода БИС с нагрузкой. Помехи данного типа в сигнальных шинах связаны с наличием в нагрузке *L*, *C* компонентов, вызывающих наличие многократных отражений между выходом и нагрузкой, ухудшающих форму выходного сигнала. Генерация помех данного типа практически полностью определяется условиями применения, поэтому механизм их формирования и расчет параметров помех здесь не рассматриваются.

Влияние *помех рассогласования* на входы и выходы БИС аналогично воздействию перекрестных помех. Методы борьбы с помехами рассогласования объединяют ме-

тоды конструирования межсоединений, монтажа и компоновки цифровых БИС в аппаратуре, обеспечивающие малые отражения сигналов от несогласованных нагрузок и неоднородностей, малое затухание сигналов в линиях. В основе этих методов конструирования межсоединений и монтажа лежит рациональная разводка печатных плат с учетом помехоустойчивости применяемых ИМС. Другая группа методов связана с введением в выходные каскады специальных схем, отслеживающих выходной сигнал при переключении, сравнивающих его с эталонными и автоматически изменяющих коэффициент усиления выходного каскада при наличии разности. Тем самым обеспечивается условие динамического согласования выхода с нагрузкой.

Третья группа методов связана с введением на выходах БИС встроенных схем ограничения помех до уровней, не влияющих на надежность работы цифровых БИС и их нагрузочных схем.

Помехи в сигнальных шинах, вызванные состязаниями сигналов

Рассмотрим механизм генерации этих помех. В реальных БИС времена задержки распространения сигналов логических элементов имеют конечное значение, зависящее от конкретных условий применения (емкости и индуктивности нагрузки, напряжения питания). При этом значения времен задержек переключения носят статистический характер и могут изменяться для разных БИС. Конечные значения времен задержек переключения и их технологический разброс приводят к ситуации, когда сигналы по различным цепям могут распространяться с разной скоростью и вызывать состязания сигналов, приводящие к помехам в сигнальных шинах. Механизм генерации указанного типа помех в цифровых БИС поясняется рис. 5.56*в* и *г* на которых приведены фрагмент функциональной схемы цифровых БИС в произвольной логике и временные диаграммы работы. Допустим, входы [A, B, C, D] (рис. 5.56*в*) находились в исходном состоянии [0111]. При изменении исходного состояния входов на [A, B, C, D] = [0111] в соответствии с функциональной схемой состояние выходов [F, G] должно изменяться с [01] на [00]. Однако, поскольку логические элементы имеют определенное значение времени переключения, прямое изменение сигнала на входе A вызовет переход выхода элемента в состояние высокого уровня [1] с задержкой 1τ.

Изменение сигнала на входе C приведет к появлению задержанного на 1T сигнала на втором входе логического элемента D2 и обратному переключению его выхода F в состояние низкого уровня [0] через время 2τ, т.е. из-за различного времени прохождения сигналов по цепям: вход A – выход F и вход C – выход F и конечных времен задержки логических элементов на выходе F вместо сохранения сигнала низкого уровня будет сформирован короткий (с длительностью $\approx 1\tau$) сигнал низкого уровня или «выброс» (glitch). Этот сигнал, распространяясь по цепям, может приводить к появлению ложных сигналов на выходах цифровых БИС и потере информации в элементах памяти (при появлении таких помех в цепи синхронизации). Образование сигналов помех и их длительность зависят от длин логических цепей и значений задержки. Помехи этого типа могут возникать также при воздействии других факторов: внешних электромагнитных воздействий или ионизирующей радиации и могут быть положительными – как формирование сигнала высокого уровня на фоне сигнала низкого уровня [0], так и отрицательными – сигнал низкого уровня на фоне сигнала высокого уровня [1].

5.5.9. Схемотехнические методы повышения устойчивости микросхем к эффекту горячих электронов

Ниже рассмотрено оригинальное схемотехническое решение базового элемента – ивертора интегральных микросхем с полевым эффектом (МОП ИС), которое может быть эффективно использовано при проектировании и изготовлении электронных устройств и систем с повышенной надежностью, в том числе и для космических применений.

Уменьшение геометрических размеров транзисторов является магистральной тенденцией развития микроэлектроники, поскольку позволяет улучшать технико-экономические параметры интегральных микросхем (ИС) в процессе их производства (уменьшать стоимость, увеличивать быстродействие, уменьшать величину потребляемой мощности и т.д.). Однако при уменьшении геометрических размеров транзисторов проявляется действие различного рода паразитных эффектов, приводящих к снижению процента выхода и надежности ИС. В частности, при уменьшении длины канала полевого транзистора (далее МОП транзистор) возникает известный эффект горячих электронов. Происходящее при уменьшении (масштабировании) геометрических размеров увеличение напряженности электрического поля обуславливает увеличенную энергию носителей (электронов и дырок), проходящих через канал транзистора вплоть до образования лавинного процесса, при котором часть дополнительно генерируемых избыточных носителей попадает в ловушки в области подзатворного окисла, создавая так называемые быстрые состояния, отрицательно влияющие на надежность и эксплуатационные свойства ИС [89]. В частности, эти состояния ответственны за уменьшение коэффициента усиления транзистора, появление токов утечки, снижение выходных напряжений.

Известный способ решения этой проблемы [90] – снижение величины питающего напряжения ИС – не решает проблему в целом и не всегда применим в реальных случаях (например, не всегда можно использовать напряжение питания 3,3 В вместо 5,0 В и т.д.).

Недостатком известных схемотехнических решений МОП-микросхем является снижение надежности их функционирования при уменьшении (масштабировании) геометрических размеров транзисторов, поскольку n-канальные МОП транзисторы более критичны к эффекту увеличения критической напряженности электрического поля в канале транзистора, чем p-канальные МОП транзисторы в силу физического механизма образования ловушек и быстрых состояний.

Рассматриваемое ниже схемотехническое решение позволяет создавать интегральные микросхемы повышенной надежности, устойчивые к воздействию паразитных эффектов, обусловленных этими быстрыми состояниями.

Задача решается путем введения в конструкции интегральной схемы дополнительных защитных МОП-транзисторов, компенсирующих нежелательные изменения электрических характеристик основных транзисторов, обусловленных быстрыми состояниями, а также возникающих при уменьшении (масштабировании) геометрических размеров при переходе на более жесткие (минимальные) проектные нормы при проектировании и изготовлении интегральных микросхем в серийном производстве.

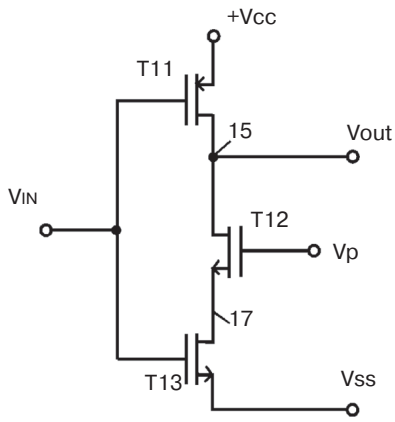


Рис. 5.56. Схема простейшего логического инвертора

На рис. 5.56 представлена схема простейшего логического инвертора, поясняющего сущность технического решения. В этой схеме исток защитного транзистора Т12 соединен со стоком транзистора Т11 типа, сток транзистора Т12 соединен с истоком второго транзистора Т13, а на затвор защитного транзистора Т12 подается постоянное защитное напряжение V_p.

Как видно из рисунка, транзисторы Т11 и Т12 представляют собой обычную комплементарную пару, известную как КМОП транзистор. Напряжение входного логического сигнала V_{IN} подается от общего входа 14 устройства на затворы транзисторов Т11 и Т13, а напряжение выходного логического сигнала V_{out} передается от стока p-канального транзистора Т11 и истока n-канального транзистора Т12 на общий выход I5 интегральной схемы. Поскольку n-канальные транзисторы более критичны к воздействию эффекта горячих носителей, чем p-канальные, дополнительный защитный транзистор Т12 в соответствии с предложенным техническим решением обеспечивает условия, при которых потенциал стока n-канального транзистора Т13 ограничен настолько, чтобы не превысить заданное значение V_p даже в случае несанкционированного превышения допустимого уровня положительного напряжения внешнего источника питания $+V_{cc}$ микросхемы.

Величина напряжения относительно уровня нулевой шины V_{ss} в узле 17 определяется из выражения: $V_{17} = V_p - V_h$, где V_h является порогом открывания защитного транзистора Т12.

Так, для большинства известных областей применения такого устройства используется напряжение питания V_{cc} в диапазонах (4,5÷5,5) В, (3,0÷3,5) В.

В стандартном инверторе транзистор Т12 имеет обычно значение порогового напряжения в диапазоне (1,0÷2,0) В, для рассматриваемого устройства – около 1,6 В, а напряжение питания защитного транзистора Т12 (узел 17) не превышает уровень 3,9 В.

Численное значение величины напряжения на истоке Т13 стандартного инвертора, при котором избыточное напряжение снижает надежностные характеристики транзистора Т13 со временем, зависит от многих факторов – геометрии транзистора, технологических особенностей его реализации (уровней легирования областей стока, истока и т.д.), но в целом подчиняется экспоненциальному

закону – небольшое снижение напряжения (на 20%) обычно вызывает относительно большое (на 100% или в два раза) снижение фактического срока эксплуатации (надежности) транзистора.

Введение дополнительного защитного транзистора Т13 позволяет обеспечить защиту базового инвертора от негативных эффектов, влияющих на надежность микросхемы.

Следует отметить, что абсолютная величина напряжения в узле 15, как и у стандартного инвертора, также достигает величины питающего напряжения V_{cc}. Следовательно, когда на вход 14 поступает входное напряжение логической единицы, p-канальный транзистор Т11 переходит в непроводящее состояние, а n-канальный транзистор Т13 открывается и обеспечивает на выходе инвертора (узел 15) напряжение логического нуля, стремящееся к потенциалу общей шины. При этом напряжение на затворе защитного транзистора Т12 обеспечивает ого отпирание и создание низкоомной цепи протекания тока между узлом 15 и общей шиной V_{ss}, что и требуется. И наоборот, при поступлении на вход 14 низкого уровня напряжения (логический ноль) p-канальный транзистор Т11 открывается, а n- канальный транзистор Т13 закрывается, напряжение на выходе инвертора (узел 15) повышается до уровня потенциала напряжения питания V_{cc}.

Следовательно, получая на выходе полный размах напряжения (от 0 В до 5,0 В при V_{cc} = 5,0 В и от 0 В до 3,0 В в случае V_{cc} = 3,0 В), мы одновременно достигаем и второй цели– ограничиваем значение напряжения, падающего на поперечном сечении тела канала транзистора Т13 (до значительно более низкого, чем $+V_{cc}$), ухудшая условия для возникновения паразитного эффекта накопления в ловушках неосновных носителей – горячих электронов и повышая тем самым надежность интегральной схемы.

Это техническое решение, проиллюстрированное на примере простейшего инвертора, выполняющего только логическую операцию «НЕ», легко использовать при построении более сложных интегральных микросхем, с повышенной плотностью упаковки, вплоть до больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных микросхем.

Ниже представлены примеры применения рассмотренного технического решения для проектирования второго уровня сложности библиотеки логических интегральных микросхем, реализующих логические операции типа «И-НЕ» (рис. 5.57) и «ИЛИ-НЕ» (рис. 5.58).

Так, на рис. 5.57 представлена стандартная интегральная схема, реализующая логическую операцию «2И-НЕ». Первый входной логический сигнал (V_{in1}) поступает на затвор p-канального транзистора Т21 и n-канального транзистора Т24, второй логический сигнал (V_{in2}) поступает на затворы p-канального транзистора Т22 и n-канального транзистора Т25. P-канальные транзисторы Т21 и Т22 подключены параллельно между выводом питания $+V_{cc}$ и выходом 25 микросхемы, а дополнительный транзистор Т23 включен последовательно в цепь транзисторов Т24 и Т25. На затвор транзистора Т23 подается защитное напряжение V_p, которое может иметь приведенные выше значения. Поэтому напряжения на истоках транзистора Т24 и Т25 ограничены до величины, меньшей величины $+V_{cc}$, в то время как на выходе 25 обеспечивается значение V_{out}, полностью соответствующее прото-

типам (от 0 В до V_{cc}). Расширение функциональных возможностей схемы рис. 5.57, например, до уровня «3И-НЕ» легко осуществляется путем организации дополнительных входов за счет параллельного включения дополнительного p-канального транзистора и последовательного n-канального.

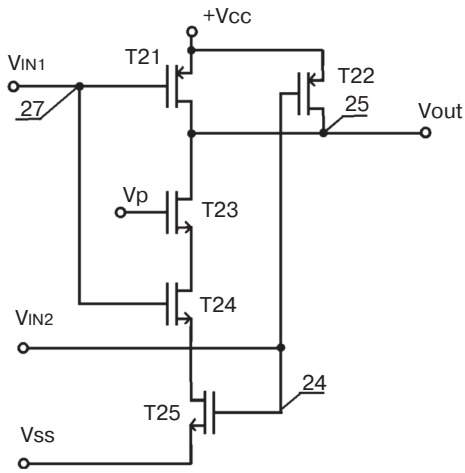


Рис. 5.57. Стандартная интегральная схема, реализующая логическую операцию «2И-НЕ»

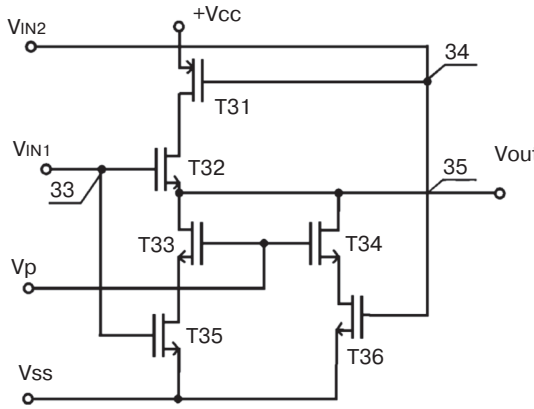


Рис. 5.58. Интегральная схема с повышенной надежностью, которая обеспечивает реализацию логической операции «2 ИЛИ-НЕ»

На рис. 5.58 представлена интегральная схема с повышенной надежностью, реализованная в соответствии с сущностью рассмотренного схемотехнического решения, которая обеспечивает реализацию логической операции «2 ИЛИ-НЕ». Здесь один из логических входных сигналов (V_{in1}) поступает на общее соединение затворов p-канального транзистора T32 и n-канального транзистора T35 (узел 33). Второй входной сигнал (V_{in2}) поступает на соединенные затворы узла 34 транзисторов T31 и T36. Здесь функцию защитных транзисторов выполняют транзисторы T33 и T34, имеющие общий затвор, на который подается защитное напряжение V_p, при этом защитный транзистор T33 ограничивает напряжение на логическом

транзисторе Т35, в то время как защитный транзистор Т34 ограничивает напряжение на логическом транзисторе Т35. Использование такого включения двух защитных транзисторов обеспечивает высокий уровень гальванической развязки между логическими транзисторами Т35 и Т36. Однако если необходимо в конкретных случаях (например, для сокращения площади кристалла), для защиты истока Т35 можно использовать только один защитный транзистор Т36.

Для питания затворов всех защитных транзисторов на кристалле интегральной микросхемы можно использовать одну общую шину V_p. Источник формирования напряжения V_p может размещаться как за пределами ИС, так и непосредственно в составе микросхемы. В качестве демонстрации на рис. 5.59 представлен давно известный и широко используемый в интегральных микросхемах простейший вариант схемотехнической реализации источника формирования напряжения V_p, подаваемого на затворы защитных транзисторов, который работает следующим образом. Положительное напряжение питания $+V_{cc}$ приложено к выводу питания (узел 40) и за вычетом величины падения напряжения на резисторе R ограничивается величиной (V_p) в узле 41. Ограничение снизу величины V_p определяется количеством последовательно включенных диодов (42÷44) в цепи «питание–земля» ($V_{cc} - V_{ss}$). Так, при использовании кремниевых диодов с величиной прямого напряжения $U_g = 0{,}65$ В в цепи из $n = 7$ диодов можно получить напряжение стабилизации $U = 4{,}55$. Также для формирования сигнала V_p могут быть использованы и другие хорошо проверенные на практике решения – стабилитроны или лавинные диоды (один лавинный диод может заменить всю цепочку диодов Д на рис. 5.59), а также более сложные устройства: с термокомпенсацией уровня напряжения и др.

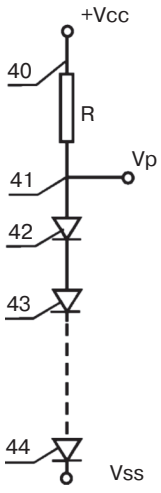


Рис. 5.59. Простейший вариант схемотехнической реализации источника формирования напряжения V_p

Конечно, введение дополнительного транзистора и цепей формирования и доставки защитного потенциала приводит к увеличению общего количества элементов БИС и СБИС и, соответственно, к увеличению площади кристаллов (в зависимости от сложности БИС увеличение площади составляет от 7 до 15%), однако изготовленные по настоящему изобретению интегральные схемы обеспе-

чивают более высокую надежность в процессе эксплуатации и более высокий процент выхода годных в производстве. Особенно эффективно применение предложенного изобретения при решении задачи повышения технико-экономических характеристик интегральных схем путем перехода от используемого техпроцесса изготовления с минимальными технологическими размерами 1,2–0,8 мкм к размерам 0,5–0,35 и менее.

Таким образом, данное схемотехническое решение интегральной микросхемы позволяет повысить надежность ее функционирования за счет введения дополнительного защитного транзистора, компенсирующего негативные изменения электрических характеристик базовых транзисторов, обусловленных известным эффектом «горячих» электронов.

Дополнительным преимуществом такой интегральной микросхемы по сравнению с известным стандартным схемотехническим решением является тот факт, что хотя на выходе этой ИС обеспечивается изменение напряжения в полном диапазоне от 0 В до $V_{cc\,max}$ (максимальный допустимый уровень питающего напряжения), на значительной части внутренних транзисторов (от 10 до 40% в зависимости от уровня сложности БИС) максимальное рабочее напряжение ограничено величиной V_p, что также способствует повышению надежности и процента выхода годных.

Литература к главе 5

1. Ultra Low-power electronics and design / Edited by Macii E. – Dorarecht: Kluwer Academic Publisher, 2004.
2. Белоус А.И., Емельянов В.А., Турцевич А.С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств. – М.: Техносфера, 2012. – 472 с.
3. Yarmolik V., Murashko I. A peak-power estimation for digital circuit design / Fifth Int. Conf. «New Information Technologies» // Minsk: BSEU. – 2002. – P. 34–38.
4. Мурашко И.А., Ярмолик В.Н. Методика проектирования отказоустойчивых ОЗУ с пониженным энергопотреблением / Сб. Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления / Под ред. В.И. Махнача, Б.В. Владимирова. – Минск: ОИПИ НАН РБ, 2003. – С. 240–245.
5. Yeap G. P. Practical low power digital VLSI design // Kluwer Academic Publisher. – 1998.
6. Tosik G., Gaffiot F., Lisik Z.et al. Power dissipation in optical and metallic clock distribution networks in new VLSI Technologies // Electronics Letters. – 2004. – Vol. 4. – № 3. – P. 198–200.
7. Белоус А.И., Мурашко И.А., Сякерский В.С. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 4. – С. 39–44.
8. H. K. Bakoglu Circuits, Interconnections and Packaging for VLSI // Addison-Wesley, Readin, MA. – 1990.
9. R. B. Merrill et al, Effect of Substrate Material on Crosstalk in Mixed Analog/'Digital Circuits // IEDM Dig.Tech. Papers. – 1994. – P. 433–436.
10. J-M. C. Stork Technology Leverage for Ultra-Low Power Information Systems // Proc. IEEE. – 1995.– Vol. 83. – № 4.
11. T. Bell Incredible Shrinking Computers // IEEE Spectrum. – 1991. – P. 37–43.
12. A.P. Chamdrakashan Low Power CMOS Digital Design // IEEE. J. Solid state Circuits. – 1992. – Vol. 27. – № 4. – P. 473–483.

13. Белоус А.И., Пономарь В.Н., Силин А.В. Системотехника биполярных микросхем для высокоскоростных систем обработки информации. – Минск: Полифакт, 1998. – 162 с.
14. D. Singh Prospects for how-Power Microprocessor Design // IWLPD'94 Workshop Proceedings. – P. 1.
15. L. Mennier Sub. half-m fab evolution: A European Company's View // Solid State Technology. – March 1995. – P. 136.
16. M.W. Powell Production lithography down to 150 nm // Solid State Technology. – March 1995. – P. 56.
17. A.P. Chandrakasan, S. Sheng and R.W. Brodersen Low-Power CMOS Digital Design // IEEE Journal of Solid State Circuits. – 1992. – Vol. 27. – № 4.
18. Белоус А.И., Емельянов В.А., Сякерский В.С. Проектирование интегральных микросхем с пониженным энергопотреблением. – Минск: Интегралполиграф, 2009. – 320 с.
19. Кремлев В.М. Энергопотребление КМОП СБИС: пути решения проблемы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 2. – С. 87–90.
20. System-Design Considerations Low. Larger As The Quest For Lower-Power CMOS Continues, Electronic Design. – November 7. – 1994. – P. 36.
21. Белоус А.И., Яржембицкий В.Б. Схемотехника цифровых микросхем для систем обработки и передачи информации. – Минск: Технопринт, 2001. – 116 с.
22. Белоус А.И., Блинков О.Е., Силин А.В. Микросхемы для интерфейсов систем автоматического управления. – Л.: Машиностроение, 1990. – 282 с.
23. Емельянов А.В., Сякерский В.С., Чигирь Г.Г. Моделирование выхода годных кристаллов микросхем по результатам тестового контроля / 5st International Conference «Ntw Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation // 12–15 June, 2007. – Zakopane, Poland. – P. 23.
24. Мурашко И.Л. Методы минимизации энергопотребления при самотестировании цифровых устройств. – Минск: Бестпринт, 2004.
25. Sakurai T., Newton A. R. Alpha-power law MOSFET model and its applications to CMOS inverter delay and other formulas // IEEE J. Solid-State Circuits. –1990. – Vol. 25. – P. 584–594.
26. Turgis S., Azemard N., Auvergne D. Explicit evalution of short circuit power dissipation for CMOS logic structures // Proc. ISLPD. – 1995. – P. 129–134.
27. Ефименко С.А., Сякерский В.С., Шведов С.В. Микросхемы для источников питания // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 3. – С. 48–55.
28. Алиева Н.А., Сякерский В.С., Усов Г.И., Шведов С.В. Сравнительные исследования КМОП БИС, изготовленных в КНИ и КРС структурах / Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». – Минск, 23–26 октября, 2007. – С. 5–6.
29. C.G.B. Garett and W.H. Brattain Physical Theory of Semiconductor Surfaces // Phys.Rev. – 1955. – Vol. 99. – P. 376.
30. K. Roy, Sh.C. Prasad Low-power CMOS VLSI Circuits Design // New York, Hilton books. – 1995. – P. 348.
31. H. Veendrick Short Circuit Dissipation of Static CMOS Circuitry and its Impact on the Design of Buffer Circuits // IEEE J. Solid State Circuits. – Aug. 1984. – Vol. 19. – № 4.
32. Емельянов В.А. Схемотехника серии быстродействующих КМОП логических ИС, устойчивых к специальным внешним воздействиям / В.А. Емельянов, Э.П. Калошкин, А.В. Силин, С.В. Шведов // www.bms.by/ENG/GENERAL/news/schemotechnics.pdf

33. Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912 с.
34. Benini, L. Logic Synthesis for Low Power / L. Benini, G. De Micheli // Logic Synthesis and Verification; eds. S. Hassoun, T. Sasao, R.K. Brayton. – Boston, Dardrecht, London : Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 197–223.
35. Taking a bite out of power: techniques for low-power-ASIC design. – Mode of access: http://www.edn.com/article/460106-Taking_a_bite_out_of_power_ techniques_for_low_power_ASIC_design.php. – Date of access: 2013
36. Уэйкерли Дж. Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
37. Power Compiler. Automatic Power Management within Galaxy™ Implementation Platform: http://www.synopsys.com/Tools/Implementation/ RTLSynthesis/Documents/powercompiler_ds.pdf.
38. Бибило П.Н. и др. Автоматизация логического синтеза КМОП схем с пониженным энергопотреблением // Программная инженерия. – 2013. – № 8. – С. 35–41.
39. R. Zimmermann, W. Fichtner, «Low-power logic styles: CMOS versus pass-transistor logic», IEEE Journal of Solid-State Circuits, July 1997. – Vol. 32(7). – P. 1079–1090.
40. Бибило П.Н., Романов В.И. Логическое проектирование дискретных устройств с использованием продукционно-фреймовой модели представления знаний. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 279 с.
41. Roy, K. Low Power CMOS VLSI Circuit Design / K. Roy, S.C. Prasad. – N.Y. : John Wiley and Sons Inc., 2000. – 376 p.
42. Pedram, M. Power Minimization in IC Design: Principles and Applications / M. Pedram // ACM Transactions Design Automation Electronic Systems. – 1996. – Vol. 1. – P. 3–56.
43. Roy, K. Low-Power Digital VLSI Design: Circuits and Systems / K. Roy, A.B. Bellaouar, M.I. Elmasry, J. Allen. – USA, Norwell : Kluwer Academic Publishers, Fourth Printing, 1999. – 530 p.
44. Черемисинова Л.Д. Оценка энергопотребления КМОП схем на логическом уровне // Информационные технологии. – 2010. – № 8. – С. 27–35.
45. Najm, F.N. A survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits / F.N. Najm // IEEE Trans. on VLSI. – 1994. – № 12. – P. 446–455.
46. Dresig, F. Simulation and reduction of CMOS power dissipation at logic level / F. Dresig, P. Lanches, O. Rettig, U. Baitinger // European Design Automation Conf. – 22–25 Feb. 1993, Paris, France. – P. 341–346.
47. Лукошко Г., Коннов Е. КМОП базовые матричные кристаллы серии К1574 // Радиолюбитель. – 1997. – № 9. – С. 39–40.
48. Черемисинова Л.Д. Синтез комбинационных КМОП схем с учетом энергосбережения // Информатика. – 2010. – № 4. – С. 112–122.
49. Черемисинова Л.Д. Синтез и оптимизация комбинационных структур СБИС. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 236 с.
50. Торопов Н.Р. Минимизация систем булевых функций в классе ДНФ / Под ред. А.А. Закревского. – Минск, 1999. – С. 4–19.
51. Brayton, R.K., Logic minimization algorithms for VLSI synthesis / R.K. Brayton, G.D. Hachtel, C. McMullen, A.L. Sangiovanni-Vincentelli. – Boston, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1984. – 193 p.
52. Черемисинова Л.Д. Оценка энергопотребления при оптимизации двухуровневых КМОП схем // Информатика. – 2010. – № 2(26). – С. 105–115.
53. Черемисинов Д.И., Черемисинова Л.Д. Минимизация двухуровневых КМОП схем с учетом энергопотребления // Информационные технологии. – 2011. – № 5. – С. 17–23.

54. Stok, L. Technology mapping / L. Stok, Tiwari V. // Logic Synthesis and Verification / Eds. S. Hassoun, T. Sasao, R.K. Brayton. – Boston, Dardrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 115–140.
55. Detjens, E. Technology mapping in MIS / E. Detjens [et al.] // Proc. IEEE Int. Conf. on CAD (ICCAD). – Santa Clara, CA, USA, 1987. – P. 116–119.
56. Sentovich, E.M. SIS : A System for Sequential Circuit Synthesis / E.M. Sentovich [et al.] // University of California, Berkeley, Technical Report No. UCB/ERL M92/41, [Electronic resource]. – 1992 – Mode of access: http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1992/ERL-92-41.pdf. – Date of access: 12.06.2013.
57. Черемисинова Л.Д., Кириенко Н.А. Синтез многоуровневых логических схем с учетом энергопотребления // Информационные технологии. – 2013. – № 3. – С. 8–14.
58. Черемисинова Л.Д., Кириенко Н.А. Оптимизация скобочных представлений булевых функций с учетом энергопотребления // Информатика. – 2011. – № 3. – С. 77 – 87.
59. Бибило П.Н., Леончик П.В. Декомпозиция систем булевых функций, заданных диаграммами двоичного выбора // Известия РАН: Теория и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 86–101.
60. Черемисинов Д.И., Черемисинова Л.Д. Синтез комбинационных схем в базисе библиотечных элементов КМОП СБИС с учетом энергопотребления // Информатика. – 2013. – № 4. – С. 91–102.
61. Бибило П.Н., Кириенко Н.А. Оценка энергопотребления логических КМОП-схем по их переключательной активности // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41. – № 1. – С. 65–67.
62. Закревский А.Д. Организация перебора ориентированных пар // Танаевские чтения: Доклады IV Междунар. науч. конф. Минск, 29–30 марта 2010. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – С. 58–62.
63. Бибило П.Н. Нахождение теста для режима максимального энергопотребления комбинационной логической схемы // Управляющие системы и машины. – 2010. – № 5. – С. 39–45.
64. Черемисинова Л.Д., Новиков Д.Я. Формальная верификация описаний с функциональной неопределенностью на основе проверки выполнимости конъюнктивной нормальной формы // Автоматика и вычислительная техника. – 2010. – № 1. – С. 5–16.
65. Черемисинова Л.Д., Новиков Д.Я. Программные средства верификации описаний комбинационных устройств в процессе логического проектирования // Программная инженерия. – 2013. – № 7. – С. 8–15.
66. Черемисинов Д.И. Анализ и преобразование структурных описаний СБИС. – Минск: Бел. наука, 2006. – 275 с.
67. Бибило П.Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 384 с.
68. Торопов Н. Р. Минимизация системы булевых функций с поляризацией их значений // Автоматизация проектирования дискретных систем: материалы IV Междунар. конф. CAD DD'2001. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – С. 92–104.
69. Леончик П.В. Минимизация систем булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм // Информатика. – 2006. – № 1. – С. 88–96.
70. Бибило П.Н. Оценка энергопотребления комбинационных блоков заказных КМОП СБИС на основе логического моделирования // Современная электроника. – 2010. – № 2. – С. 54–59.

71. Белоус А.И., Яржембицкий В.Б. Схемотехника цифровых микросхем для систем обработки и передачи информации. – Минск: УП Технопринт, 2001. – 116 с.
72. Белоус А.И., Мурашко И.А., Сякерский В.С. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 2. – С. 39–44.
73. Белоус А.И., Блинков О.В., Силин А.В. Биполярные микросхемы для интерфейсов систем автоматического управления. – Л.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
74. Белоус А.И., Подрубный О.В., Журба В.М. Микропроцессорный комплект цифровой обработки сигналов К1815: Справочник. – М.: Радио и связь, 1995. – 320 с.
75. Спецификация ф.Maxim Integrated Products, USA 19-0122, Rev.8, 10/03.
76. Спецификация ф.Maxim Integrated Products, USA 19-1474, Rev.0, 4/99.
77. Спецификация ф.Maxim Integrated Products, USA 19-0273, Rev.8, 10/03.
78. Спецификация ф.Maxim Integrated Products, USA 19-1283, Rev.5, 10/03.
79. Спецификация ф.Maxim Integrated Products, USA 19-1289, Rev.5, 10/03.
80. Волков С., Ефишин А., Морозов С., Соколов С. Проблема электростатического разряда и современные методы защиты интегральных схем от него / ChipNews. – 2003. – № 7–9; 2004. –№ 1–2.
81. Ajith Amerasekera, Charvaka Duvvury ESD in Silicon Integrated Circuits / 2nd Edition. – 2002.
82. Sanjay Dabral, Timothy Maloney Basic ESD And I/O Design. Intel Corporation.
83. Белоус А.И., Подрубный О.В., Яковлев М.Н. Инжекционный триггер DV-типа с внутренней задержкой для интегральных цифровых схем / А. с. 1355083, СССР, 09.04.86.
84. Белоус А.И., Вайнилович О.С., Вечер Д.В. Инжекционный триггер (ДСП) / А. с. 1422934, СССР, 19.12.86.
85. Белоус А.И., Силин А.В., Горовой В.В. Устройство памяти / Патент РБ №1842, 25.04.97.
86. Белоус А.И., Силин А.В., Емельянов В.А., Кавриго Н.Ф. Интегральная схема / Патент РБ № 2817, 27.05.98.
87. Белоус А.И., Силин А.В., Прибыльский А.В. Буферное устройство с функцией повторения и тремя состояниями выхода / Патент РБ № 8720, 2006.09.07.
88. Дрозд С., Листопадов А., Белоус В. Схемотехнические методы повышения помехоустойчивости цифровых КМОП БИС // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4.
89. Ingels M., Steyaert M.S.J., Design Strategies and Decoupling Techniques for Reducing the Effects of Electrical Interference in Mixed-Mode IC's // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – July 1997. – Vol. 32. – № 7.
90. Geiger R., Allen P., and Strader N. VLSI: Design Techniques for Analog and Digital Circuits. Mc Craw-Hill, New York, 1990. – P. 125–140.
91. David Johns, Ken Martin. Analog Integrated Circuit Design, University of Toronto, Wiley, USA, 1997. – P. 18, 102.
92. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика / Под ред. В.И. Эннса. – Горячая линия – Телеком, 2005. – С. 226.

ГЛАВА 6

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И БАЗОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУБМИКРОННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ ШОТТКИ

6.1. О терминологии субмикронной микроэлектроники

Переход проектных норм через границу 130 нм в рамках традиционной конструкции наталкивается на физические ограничения. Таким образом, транзисторы XXI века должны иметь иную структуру и использовать новые материалы, в частности, для подзатворного диэлектрика.

С уменьшением геометрических размеров транзисторов снижается площадь кристалла, уменьшаются паразитные емкости, улучшается быстродействие и снижается энергопотребление СБИС. За последние 30 лет длина затвора МОП-транзистора уменьшилась в 200 раз (с 10 мкм в начале 70-х годов до 60 нм в наши дни) [1]. В настоящее время коммерчески доступной является технология с минимальными горизонтальными размерами элементов 0,13 мкм, позволившая реализовать массовое производство микропроцессоров Intel Pentium 4 с тактовой частотой более 2,5 ГГц на МОП-транзисторах с длиной канала 60 нм и толщиной подзатворного окисла 1,5 нм. В соответствии с прогнозами Ассоциации предприятий полупроводниковой индустрии NTRS, минимальные размеры элементов будут продолжать быстро уменьшаться и к 2012 году достигнут 50 нм.

Каждый технологический шаг в направлении уменьшения размеров сопряжен с ростом проблем конструирования и производства, которые приходится решать для обеспечения теоретически прогнозируемых характеристик транзистора. Любое улучшение одних параметров приводит к ухудшению других, причем с уменьшением размеров взаимное влияние параметров становится все более сильным.

С ростом степени интеграции СБИС и систем на кристалле увеличивается доля чипов, содержащих аналоговые блоки, которые обеспечивают взаимодействие с окружающим миром, необходимое для крупных и функционально законченных систем. К транзисторам для аналоговых и цифровых применений предъявляются противоречивые требования. Для цифровых СБИС пороговое напряжение нельзя снижать неограниченно, поскольку при этом увеличивается подпороговый ток, который определяет потребление энергии СБИС в неактивном состоянии. Верхний предел порогового напряжения ограничивается одной четвертой от величины напряжения питания [2], которое стараются снизить для уменьшения потребляемой мощности. Однако для аналоговых схем идеальным является нулевое порого-

вое напряжение $V_t = 0$, что увеличивает динамический диапазон аналоговой схемы, определяемый разностью между напряжением на затворе и V_t, то есть $(V_{gs} - V_t)$.

Особыми требованиями к аналоговым транзисторам являются также повышенная нагрузочная способность (ток стока в режиме насыщения), линейность и малые нелинейные искажения на малом сигнале. Для дифференциальных каскадов и токового зеркала важна согласованность характеристик транзисторов.

Основными проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов являются туннелирование через затвор, инжекция горячих носителей в окисел, прокол между истоком и стоком, утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком, обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания. Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление, малое сопротивление областей истока и стока и большую нагрузочную способность. Емкости затвора и p-n-переходов должны быть минимальны. Разброс параметров техпроцесса, который растет с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать процент выхода годных кристаллов.

Что означает, когда говорят, например, о 45 или 65 нм технологическом процессе изготовления ИМС? Какой при этом подразумевается физический смысл? Что значит технологическая норма?

Иногда на прямой вопрос отсутствует определенный ответ. Это один из таких случаев, как отмечено в работе [3].

Изначально процессы изготовления ИМС ранжировались по длине самой узкой линии, которая могла быть получена с помощью имеющегося литографического оборудования. Затем эта мера была перенесена в качестве элемента структуры на поверхность пластины. На практике этим наименьшим элементом была линия, которая формировала электрод к затвору в МОП-транзисторе. Таким образом, название процесса стало идентифицироваться с размером электрода к затвору.

С целью более комплексного определения проектировщики переименовали этот критерий в «длину затвора». Если проанализировать, как в транзисторе протекает ток, то ширина электрода к затвору определяет длину пути тока, который протекает через область канала. Длина затвора является приближенной мерой быстродействия транзистора, а также мерой плотности размещения транзистора, т.е. топологией.

Маркетинговые отделы приняли этот термин за меру совершенства и быстро перевернули то, что было мерой физического измерения, в меру маркетингового преимущества. Результатом этого стало то, что 350 нм технология (называемая в те годы 0,35 мкм технология) стала просто названием процесса, а не мерой какого-либо физического измерения. Этот рассматриваемый в качестве примера технологический процесс имел разрешение 380 нм по ширине линии, но с использованием различных уловок инженеры-технологи смогла заставить транзисторы вести себя так, как будто длина канала составляла 350 нм!

Сегодня это число возвращает свой смысл как мера физической точности технологии. Так, 65-нм технологический процесс – это обычно технология, обеспе-

чивающая ширину контакта к затвору приблизительно 65 нм. Однако есть и исключения. Например, компания может разработать процесс, который, в конечном счете, будет в состоянии обеспечивать 65-нм линии, но по экономическим причинам она может не учесть некоторые характеристики критических частей оборудования, которые необходимо использовать для обеспечения наименьших линий. Эта компания будет, как принято, объявлять об этом процессе как о 65 нм технологии, хотя на самом деле они не могут формировать элементы прибора с размерами 65 нм.

Важно отметить, что сегодня физически невозможно с использованием фотолитографического оборудования, которое работает с длиной волны 193 нм, точно спроецировать 65 нм линию от маски на поверхность пластины. Проектировщики и инженеры-технологи совершают невероятно сложные ухищрения, чтобы имеющиеся в их распоряжении маски обеспечили в конечном итоге ширину линий, равную 65 нм, вследствие их дифракционной размытости и искажений в процессе печати. Эти приемы включают декорирование по всей маске, использование небольших бакенбард по краям, которые заставляют прямоугольник больше походить на чернильное пятно.

Таким образом, сегодняшние 65 нм или 45 нм технологии не отражают точную ширину линии, обеспечиваемую современной литографией, а лишь указывают, как близко можно разместить транзисторы относительно друг друга. В конце концов, это число – просто название технологии, а не абсолютный показатель конкретных особенностей процесса.

6.2. Тенденции и перспективы развития современной технологии в микроэлектронике

Бурное развитие микроэлектронных технологий, необходимость налаживания обратных связей между поставщиками и потребителями изделий микроэлектроники привели к необходимости организации анализа современного положения и перспектив развития этой отрасли в виде так называемой «дорожной карты» (roadmap).

С особой остротой этот вопрос стоит перед разработчиками электронных систем и блоков ракетно-космической техники – от ракет-носителей, космических аппаратов, орбитальных станций до наземных технических комплексов. Разработчики должны понимать как текущее состояние, так и перспективы развития технологии, чтобы аргументировано выбирать технологические базисы тех электронных компонентов, которые они закладывают в документацию проектируемого космического аппарата.

В течение последних лет в США эту миссию в виде американского стиля дорожной карты (The National Technology Roadmap for Semiconductors, NTRS) берет на себя Ассоциация полупроводниковой промышленности (Semiconductor Industry Association, SIA). С 1998 года, в связи с присоединением к SIA корпораций из Европы, Японии, Кореи и Тайваня, NTRS трансформировалось в глобальный информационно-аналитический консорциум – The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) [30], объединяющий в 2014 году более тысячи компаний.

Ежегодно ITRS выпускает комплект аналитических документов, авторами которых являются крупнейшие эксперты в области полупроводниковой промышленности. Эти документы представляют собой наиболее авторитетное мнение о текущем состоянии и направлениях развития в области технологии микроэлектроники и содержит анализ ее долговременной (до 15 лет) перспективы в следующих областях (проектирование систем, тестирование и оборудование для тестирования): Test & Test Equipment, Front End Processes (сквозная технология), Photolithography (фотолитография), IC Interconnects (межсоединения в ИС), Factory Integration (интеграция промышленности), Assembly & Packaging (сборка и упаковка), Yield Enhancement (повышение выхода годных), Metrology (метрология), Modeling & Simulation (моделирование и проектирование), Emerging Research Devices (результаты исследования современных приборов), Emerging Research Materials (результаты исследования современных материалов).

На рис. 6.1 в графическом виде представлен анализ состояния и перспектив развития технологических характеристик микроэлектронной технологии с привязкой к тематическим проектным нормам и перспективам развития новых микроэлектронных сверхъинтегрированных систем.

Подчеркнута возможность дальнейшего развития таких систем с гетерогенной интеграцией, включающих в себя системы на кристалле (System on Chip, SOC) и системы в упаковке (System in Package, SIP), содержащие аналоговые и радиочастотные компоненты, высоковольтные и мощные изделия, сенсоры, датчики и биочипы только с использованием технологии 130 нм и ниже. На рис. 6.2 представлены две области элементов микроэлектронных систем, которые объясняются степенью их соответствия известному закону Мура.

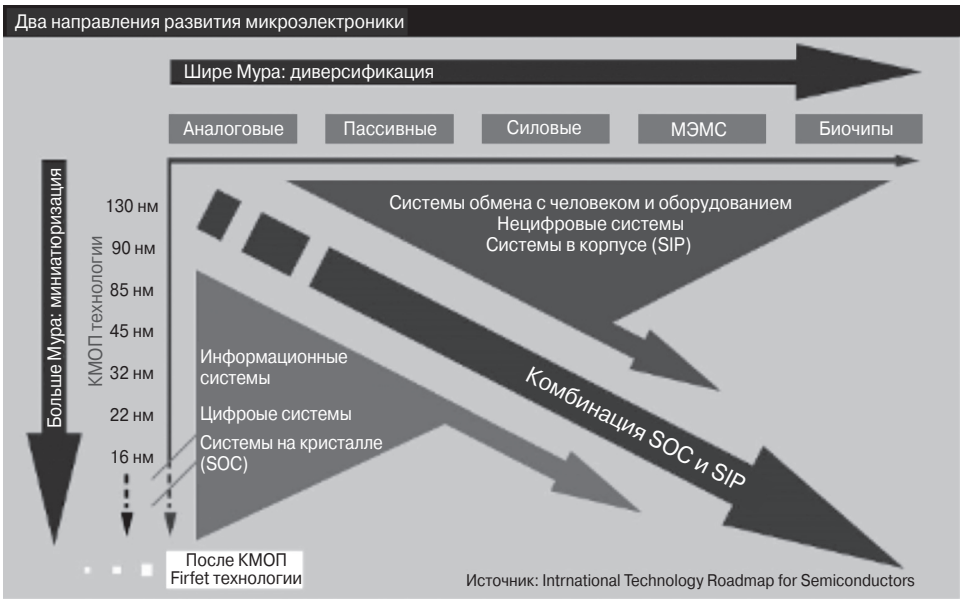


Рис. 6.1. Развитие технологии микроэлектроники и выполнение закона Мура [5] по ORTC-2007

Рис. 6.2. Две области элементов систем микроэлектроники, отличающиеся степенью выполнения для них закона Мура: «More Moore» – область, непосредственно примыкающая к нормальному закону Мура (≤ 0,13 мкм) и «More than Moore» – область, следующая за «More Moore» (≤ 65 нм)

Необходимость повышения плотности упаковки и соответствующее уменьшение технологических норм вплоть до 22 нм ставят проблемы создания элементной базы на основе новых конструкций и новых материалов с параллельным решением проблемы масштабирования.

На рис. 6.3 представлена временная зависимость количества транзисторов в микропроцессорных чипах, которая в определенной степени отражает выполнение «нормального» закона Мура.

Производство интегральных схем с использованием различных технологий иллюстрируется рис. 6.4. Можно видеть, что новое поколение технологии появляется регулярно каждые два года с замедлением этого темпа до трех лет в последние годы. Как видим, эволюция технологий носит волнообразный характер, который объясняется действием двух взаимосвязанных факторов – непосредственным прогрессом технологии (технический фактор) и законами конкурентной борьбы изготовителей ЭКБ за рынки сбыта (экономический фактор).

Например, в начале 2000 г. наибольшее количество всех ИМС в мире изготавливалось по проектным нормам 0,25 мкм. С целью снижения себестоимости наиболее передовые фирмы-изготовители переводили свои технологические линии на процессы с 0,18 мкм проектными нормами, и к концу года их объемы производства практически сравнялись с изготовителями, работающими на технологии с 0,25 мкм нормами; они могли позволить себе снизить цену, имея при этом достаточный объем прибыли. Чтобы не быть вытесненными с рынка, проигрывающие изготовители 0,25 мкм приборов вынуждены вкладывать средства в создание новых технологий и оборудования, позволяющих им производить ИМС следующего уровня – в данном случае – 0,13 мкм, что мы и видим в конце 2000 г.

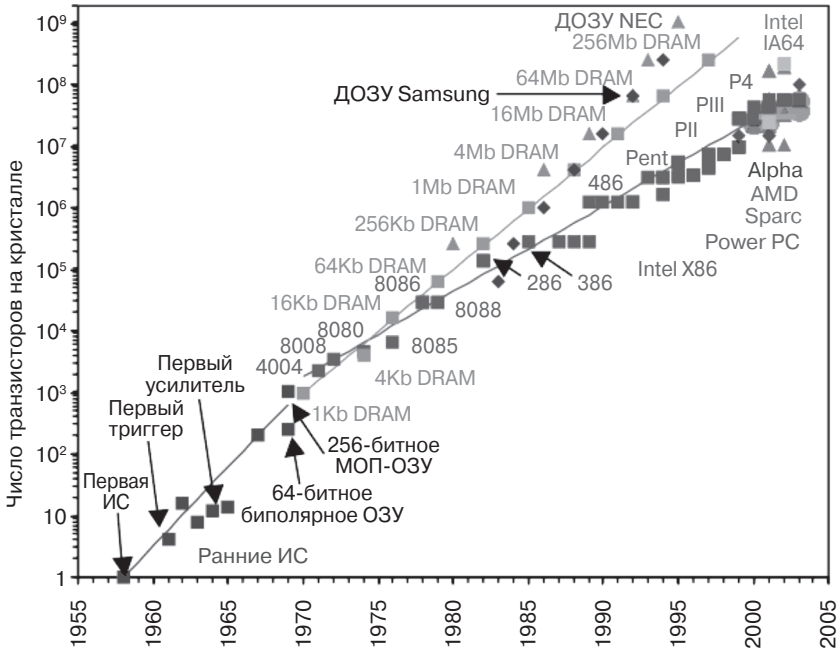


Рис. 6.3. Зависимость количества транзисторов в микропроцессорных чипах от года выпуска

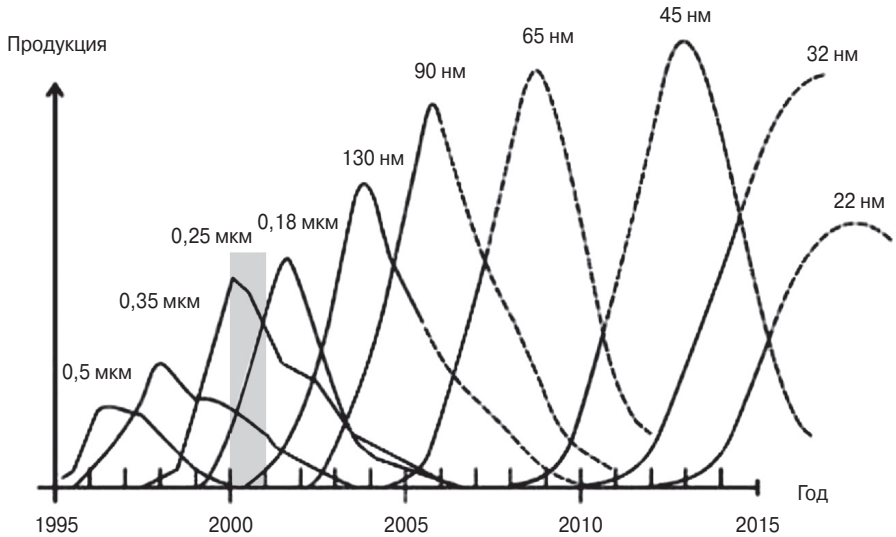


Рис. 6.4. Продукция с новыми минимальными проектными нормами появляется на рынке каждые два года

С точки зрения конструкции транзистора для выполнения закона Мура физическая длина затвора этого МОП транзистора L_g должна уменьшаться с каждым последующим поколением примерно на ~30%, что мы и видим на рис. 6.5.

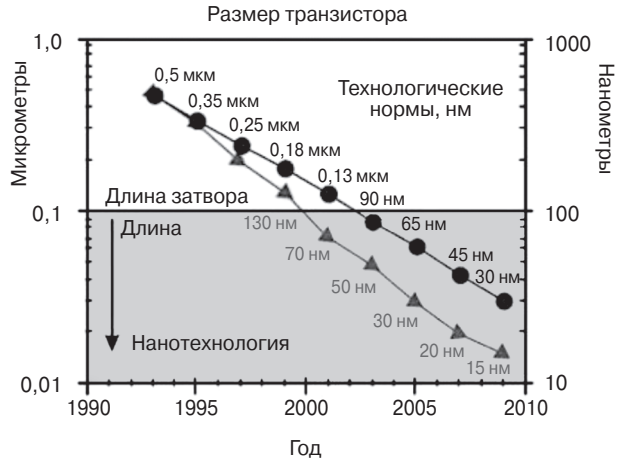


Рис. 6.5. Масштабирование физического размера МОП транзистора (длина затвора L_g) для удовлетворения закону Мура

Конкретно – 90 нм технология обеспечивает L_g~50 нм, а 65 нм технология обеспечивает L_g~10 нм для КМОП технологии.

Использование новых кремниевых технологий на основе high-*k*-диэлектриков с металлическим затвором (рис. 6.6 и 6.7) [7–9], неаксиально деформированных кремниевых каналов [10–11], биаксиально деформированных Si и SiGe каналов [12–13], непланарных полностью обедненных трехзатворных (Tri-gate) КМОП транзисторных архитектур [14] обеспечит КМОП транзисторное масштабирование [15] и выполнение закона Мура по крайней мере в ближайшем будущем.

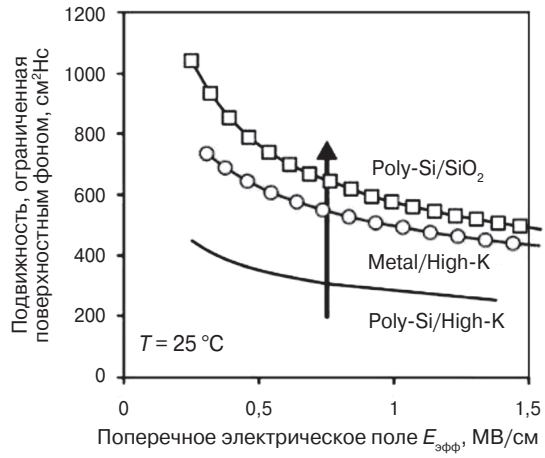


Рис. 6.6. Использование металлических затворов МОП транзисторов является эффективным средством экранирования взаимодействия фононов с носителями зарядов в канале и улучшения подвижности носителей заряда в канале МОП транзистора

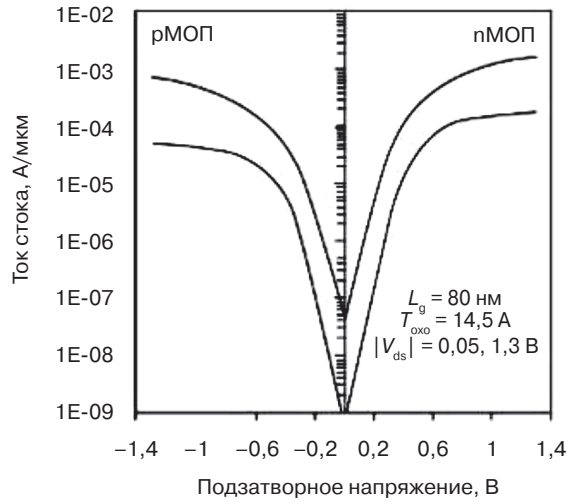


Рис. 6.7. I_d/V_g характеристики КМОП транзисторов с high-k подзатворным диэлектриком/металлическим затвором с $L_g = 80$ нм

В последнее время существенный прогресс наблюдается в исследовании передовых приборов наноэлектроники, таких как FETs на углеродных нанотрубках [16–17], FETs на кремниевых нанопроводах (Si-nanowire) [18–19] и FETs на $A^{III}B^{V}$ сложных полупроводниках типа $A^{III}B^{V}$ [20–21]. Эти прогрессивные приборы обеспечивают будущие приложения наноэлектроники [22]. Посредством комбинирования инноваций в кремниевой технологии с передовыми нанотехнологиями на традиционной кремниевой платформе следует ожидать существенного увеличения функциональных возможностей микроэлектроники [23–29].

6.2.1. Проблема масштабирования

Специалисты различают два типа масштабирования: 1) геометрическое масштабирование (сокращение горизонтальных и вертикальных физических размеров структуры с целью повышения степени интеграции (снижение отношения стоимости к функциональным возможностям/характеристикам) и уровня надежности и 2) эквивалентное (или интегральное) масштабирование (equivalent scaling), сопровождающее геометрическое масштабирование и относящееся к улучшению трехмерной структуры прибора (Design Factor), плюс другие негеометрические приемы, в том числе использование новых материалов, которые влияют на электрические характеристики кристалла в целом [32].

Часто такой подход к проблеме масштабирования называют «More Moore», то есть такой принцип, который удовлетворяет условиям выполнения закона Мура на других, нежели традиционные, основах (при технологии < 0,13 мкм). Другой подход «More than Moore» («Больше, чем Мур») позволяет нецифровым характеристикам (RF коммуникациям, контролю мощности, пассивным компонентам, сенсорам, датчикам) переходить от обычных систем к частным решениям на уровне SOC или SIP.

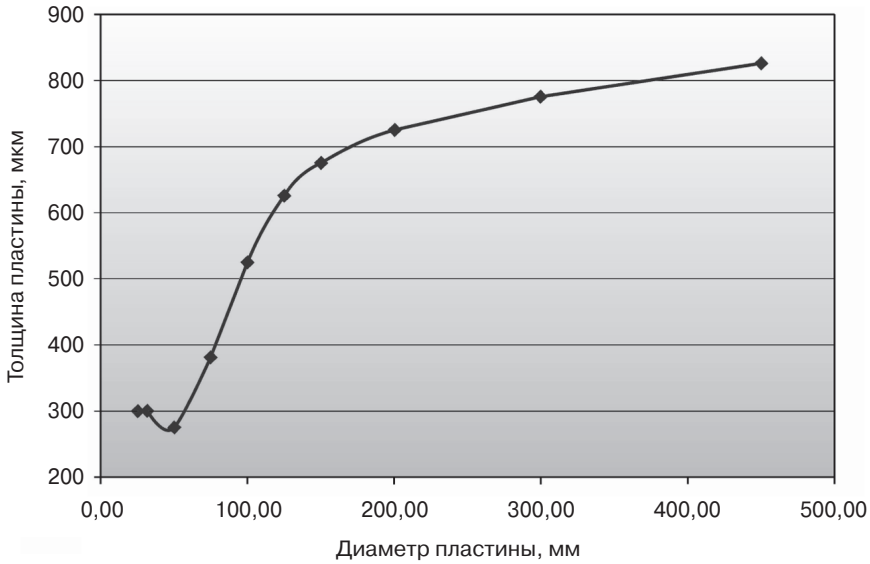


Рис. 6.8. Соотношение между диаметром пластины (в мм) и ее толщиной (в мкм)

Следует отметить еще одну технологическую особенность изготовления кристаллов – неуклонный рост как размеров исходной пластины, так и ее толщины (рис. 6.8).

Если в начале микроэлектронной эры производство первых ИМС было организовано с использованием пластин диаметром 50 мм с толщиной 270–300 нм, то сегодня пластина диаметром 300 мм имеет толщину более 700 мкм, что создает свои проблемы при последующем скрайбировании кристаллов и их сборке.

6.2.2. Современная субмикронная технология – пример ее реализации при изготовлении микропроцессоров

Разработчики электронных систем и блоков должны хорошо представлять возможности современных микроэлектронных технологий, чтобы при выборе архитектуры процессорных интерфейсных микросхем и схем памяти, необходимых им для создания своего конкретного устройства, понимать как достоинства, так и недостатки микросхем, выполняющих аналогичные функции, но, возможно, реализованных по разным технологиям (или одной, но с разными проектными нормами).

Исторически прослеживается неразрывная связь архитектуры сложнофункционального микроэлектронного устройства (например, микропроцессора) и технологии его изготовления (минимальной проектной нормой).

Иногда разработанная архитектура процессора опережает реальные возможности существующей технологии (и это является стимулом для ее развития – есть реальная задача и, как правило, новая ниша рынка), в ряде случаев разработанная архитектура может быть разработана под вчерашнюю технологию (а это приведет к неоправданному росту цены такого микропроцессора на рынке).

При этом также необходимо учитывать и тот немаловажный факт, что каждому новому поколению микроэлектронных технологий соответствуют свои механизмы отказов, свои реакции на воздействие различных видов ионизирующих воздействий, другие уровни помехоустойчивости помехозащищенности ИМС, которые изготовлены по этим технологиям и т.п.

Это обусловлено тем, что, как показано выше, переход на очередной рубеж субмикронных проектных норм, с очевидным изменением физико-химических свойств базовых комплектов схем требует от инженеров-технологов применения совершенно новых, ранее не исследовавшихся материалов и реагентов для достижения меньших токов утечек и обеспечения более экономичной работы чипа без снижения производительности на затраченный ватт энергии.

Иногда это приводит даже к изменению архитектуры ИМС.

Тем не мене, глобальная тенденция очевидна – новым поколениям микроэлектронных технологий соответствуют и новые поколения архитектур.

Так, в январе 2007 года компания Intel [35–36] впервые в истории полупроводниковой индустрии официально представила процессоры, выполненные с соблюдением норм 45 нм технологии. Это были процессоры с рабочим именем Penryn, состоящие из сотен миллионов транзисторных вентилей, выполненные по сложному 45 нм технологическому процессу, где ширина затвора каждого транзистора составляет всего 35 нм (рис. 6.9).

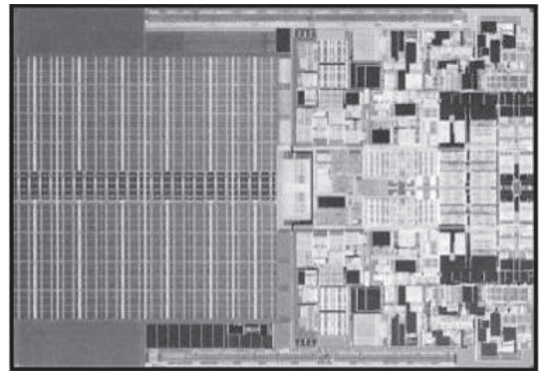


Рис. 6.9. Процессор Intel Penryn, изготовленный по 45 нм технологии (январь 2007 г.)

Переход на субмикронные прецизионные нормы производства с очевидным изменением физико-химических свойств компонентов схемы потребовал от инженеров применения совершенно новых материалов и технологий для достижения меньших токов утечек и более экономной работы чипа без снижения производительности на ватт затраченной энергии. При этом изменилась архитектура ядра процессоров, хотя они по-прежнему являются представителями микроархитектуры Core (Merom).

Рассмотрим подробнее связь эволюций технологий и архитектур на примере этой фирмы, безусловного мирового лидера. Следует отметить, что поколения микроархитектур процессоров сменяют друг друга реже, чем различные дизайны ядер (и даже реже, чем новые техпроцессы). Например, микроархитектура NetBurst, при-

шедшая в 2000 году на замену микроархитектуре P6 (последние представители P6 – 0,18 мкм Coppermine и финальный 0,13 мкм Tualatin в 2001 году), в разное время была представлена рядом разных архитектур дизайнов ядра: Willamette (2000 год, 0,18 мкм, 0,13 мкм), Northwood (2002 год, 0,13 мкм), Prescott/Smithfield (2004 год, 90 нм) и Cedar Mill/Presler (2006 год, 65 нм) – четыре поколения дизайна ядра и шесть лет на одной микроархитектуре! В то же время представленная в 2003 году и параллельно развивавшаяся микроархитектура Banias также вместила в себя несколько поколений архитектур ядер – Banias (2003 год, 0,13 мкм), Dothan (2004 год, 90 нм) и Yonah (2006 год, 65 нм).

Фактически появление новых дизайнов ядра процессора можно рассматривать как постепенный процесс усовершенствования в рамках одной микроархитектуры с добавлением новых функций, редизайном и масштабированием на новый техпроцесс. В отличие от других крупных фирм-разработчиков микропроцессоров, у Intel благодаря наличию двух основных научно-исследовательских центров по разработке процессоров – в Орегоне и Израиле одновременно и параллельно развивается и совершенствуется как минимум две микроархитектуры, вбирая в себя весь лучший опыт коллег и избавляя от повторения ошибок.

Современная микроархитектура Core, пришедшая в 2006 году на смену NetBurst и Banias, наряду с совершенно новыми инженерными идеями и технологиями, унаследовала от каждой из предшественников самое лучшее. В результате первый же дизайн ядра с рабочим названием Merom (2006 год, 65 нм) на базе микроархитектуры Core оказался очень удачным с точки зрения производительности и экономичности.

Дизайн ядра Penryn – не что иное, как усовершенствованный дизайн Merom с одновременным переходом на 45-нм нормы производства. Семейство 45 нм чипов Penryn станет основой для новых Core 2-ядерных чипов Wolfdale и 4-ядерных чипов Yorkfield, идущих на замену сегодняшним 65 нм процессорам Core 2 Duo и Core 2 Quad соответственно. Соответственно, процессоры семейства Penryn являются основой нового поколения мобильной платформы Intel Centrino с кодовым названием Montevina. Новая мобильная платформа Montevina, вышедшая на рынок в 2008 г., заменила версию Santa Rosa.

Дизайн Penryn с микроархитектурой Core продержался на рынке достаточно долго (до 2013 года), а процессоры с ядром Penryn выпускаются с использованием норм следующего, 32 нм техпроцесса до настоящего времени.

В 2008 году была представлена новая микроархитектура процессоров Intel – Nehalem на базе 45 нм технологии, в 2012 году получены первые прототипы чипов с совершенно новой микроархитектурой Gesher, изготовляемых по 25 нм технологии (рис. 6.10).

В архитектуре процессоров Penryn содержится более 410 млн транзисторов для двухъядерного дизайна (291 млн транзисторов у 65 нм 2-ядерного Conroe) и более 820 млн для четырехъядерного Yorkfield при уменьшившейся до 110 мм^2 площади кристалла (у Conroe – 143 ммI). Именно здесь просматривается сохранение закона Мура, согласно которому по-прежнему с периодичностью примерно раз в два года удваивается количество транзисторов, снижается удельная цена изготовления одного транзистора, увеличивается производительность, а в недалеком будущем с большой вероятностью удвоится количество процессорных ядер на кристалле.

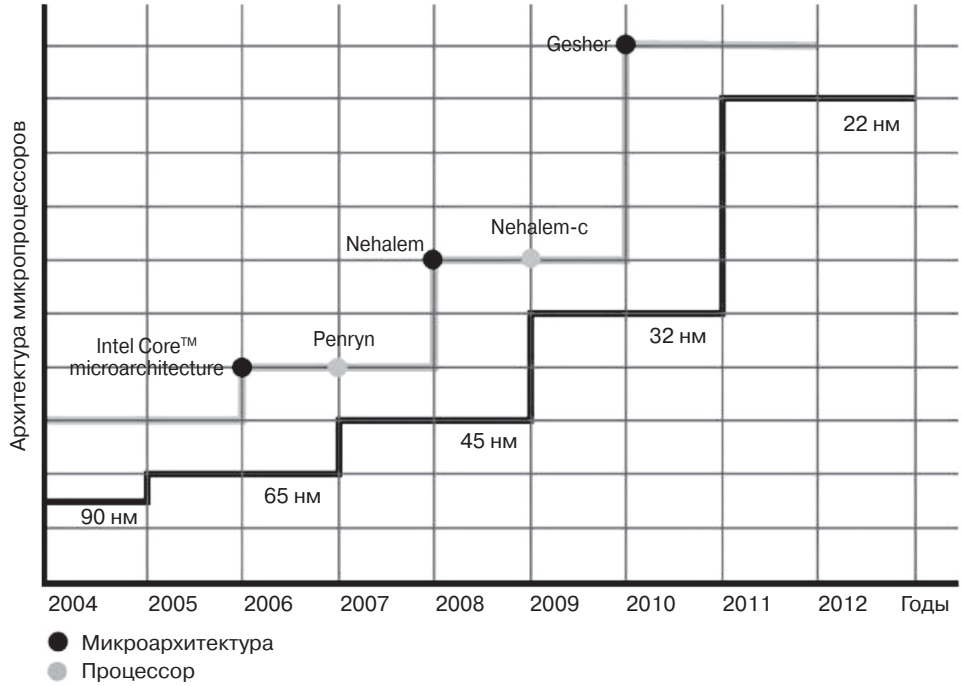


Рис. 6.10. Этапы развития архитектуры микропроцессоров компании Intel за 2004–2012 гг.

Среди новых чипов также присутствуют варианты с объемом кэша L2 до 12 Мб, а в целом все семейство отличается повышенной производительностью и расширенными возможностями управления режимами энергопотребления. По поводу энергопотребления новых 45 нм процессоров Core 2 Duo, Core 2 Extreme, Core 2 Quad и Xeon с ядром Penryn следует отметить, что в целом TDP примерно соответствует – около 35 Вт у чипов для ноутбуков, порядка 65 Вт у mainstream-чипов для настольных ПК, около 80 Вт – у 4-ядерных серверных процессоров и чипов при увеличенной производительности.

Гордон Мур, сооснователь компании Intel, писал: «Использование high-*k* и металлических материалов в новых поколениях транзисторов приведет к революционным изменениям в транзисторной технологии, сравнимой с началом использования поликремниевого затвора в МОП транзисторах в конце 60-х годов».

Компания Intel, еще в 2007 году объявившая о запуске первого в электронной индустрии 45-нм технологии производства микропроцессоров, использует новое поколение транзисторов с металлическим затвором и high-*k* подзатворным диэлектриком на основе гафния, что дает:

– ~ двукратное увеличение плотности транзисторов,
– >20% улучшение скорости переключения транзисторов,
– ~30% снижение энергии переключения транзисторов.

Тенденции развития современной технологии показывают, что все больше некремниевых элементов добавляются в кремниевые транзисторы для повышения

их масштабируемости и характеристик. В частности, компания Intel завершает исследования транзисторов с квантовыми проводами (quantum-well transistors) на основе InSb (рис. 6.11).

Рис. 6.11. Введение некремниевых элементов в кремниевые транзисторы повышает их масштабируемость и улучшает рабочие характеристики

Эффективность использования некремниевых элементов в кремниевых транзисторах иллюстрируется рис. 6.12. Из всех $A^{III}B^{V}$ соединений, используемых в качестве квантовых проводников как элементов полевых кремниевых транзисторов, InSb обладает наилучшими свойствами, обеспечивающими величину [(энергопотребление × задержка)/ширина канала] транзистора [35–36].

Еще в 2008 году компания Intel расширила линейку своих 45-нм процессоров Core 2 Duo и Core 2 Quad пятью новыми архитектурами. На вершине списка стоял 4-ядерный мобильный чип Q9000, работающий на частоте 2 ГГц и системной шине 1066 МГц и имеющий энергопотребление 45 Вт. Первым ноутбуком, использовавшим новый процессор, станет известный Aspire 8930G от Acer.

В начале 2010 года Intel выпустила на рынок свои процессоры с интегрированной графикой, которые известны под кодовыми именами Clarksdale и Arrandale и представляют собой объединенные в один пакет 32 нм CPU и 45 нм GPU [37].

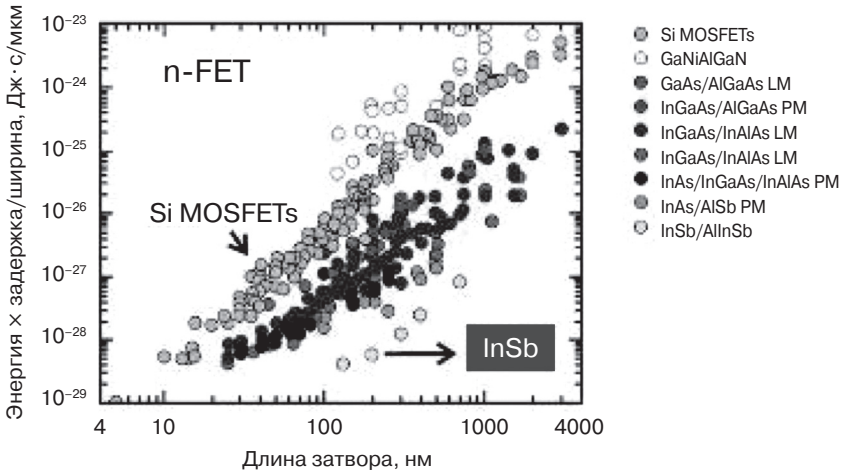


Рис. 6.12. InSb обладает наилучшими физическими свойствами, обеспечивающими критические характеристики полевого транзистора

На рис. 6.13 в масштабе, близком к реальному, представлена диаграмма, показывающая распределение процессоров Intel, изготовленных по 45 нм технологии, от больших серверных процессоров до миниатюрных моделей Atom, предназначенных для ноутбуков, в зависимости от площади чипа (на 2010 г.).

Самым маленьким по площади и производительности здесь является процессор Atom с площадью 24,2 мм^2. Площадь двухъядерного Atom ровно вдвое больше, 24,2 мм^2 × 2. Площадь 45 нм процессора Core 2 Duo с 3 Мб кэша L3 составляет 81 мм^2. Площадь 45 нм процессора Core 2 Duo с 6 Мб кэшем равна 107 мм^2. Четырехъядерный 45 нм процессор Core 2 Quad имеет размер 81 мм^2 × 2, высокопроизводительные Core i7 занимают 263 мм^2, а площадь серверных процессоров Xeon 7400 составляет 503 мм^2.

Аналогичные интегрированные решения AMD [38] получили название Fusion. Ранее предполагалось, что процессоры AMD Fusion дебютируют во второй половине 2009 года и будут построены по нормам 45 нм. Однако в AMD посчитали, что данная технология на тот момент уже начинает морально устаревать и прекратили дальнейшую разработку этих чипов. Логично было бы предположить, что AMD вслед за Intel переведет свои систему CPU + IGP на 32 нм технологию. Однако AMD анонсировала, что процессоры Fusion появятся лишь во второй половине 2012 года, когда специалисты AMD должны окончательно отработать еще более тонкую 22 нм технологию производства.

Тем не менее, в середине 2009 года в продаже появились два новых двухъядерных и один четырехядерный процессоры от компании AMD. Четырехядерный процессор AMD Phenom II X4 945 имеет тактовою частоту 3 ГГц и 8 МБ кэша. Уровень TDP данного процессора не превышает 95 Вт, что на 30 меньше предыдущих моделей. Двухъядерные процессоры AMD Athlon II X2 245 и 240 имеют 2 МБ кэша L2, а уровень их TDP не превышает 65 Вт. Частота процессоров равна 2,9 и 2,8 ГГц соответственно [39].

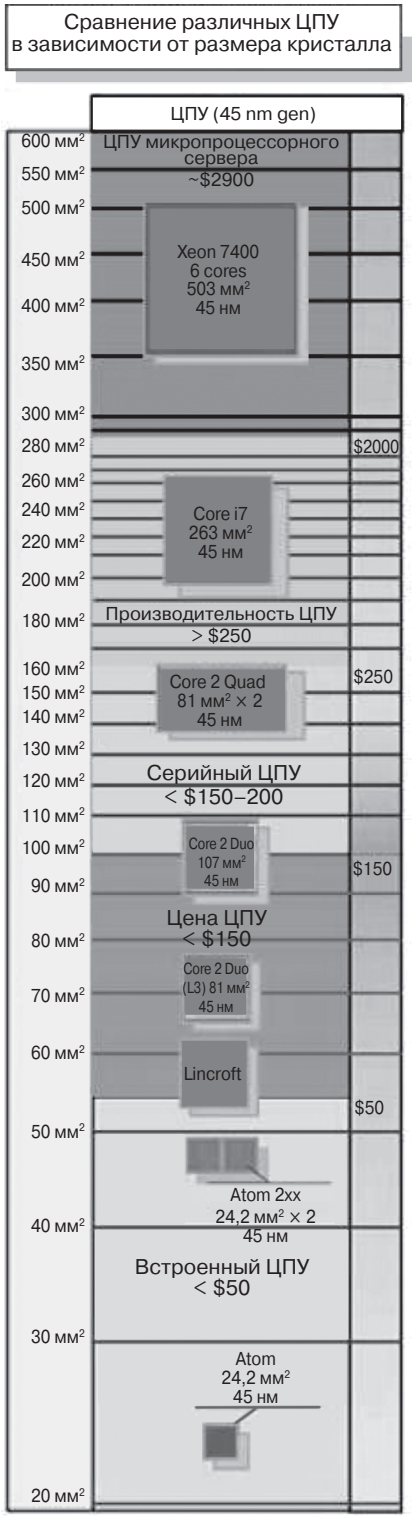


Рис. 6.13. Эволюция площади чипов микропроцессоров компании Intel

6.3. Особенности субмикронных МОП-транзисторов

Общеизвестно, что с уменьшением геометрических размеров транзисторов снижается общая площадь кристалла, уменьшаются паразитные емкости, повышается быстродействие и снижается энергопотребление СБИС. За последние 30 лет длина затвора МОП-транзистора уменьшилась в 300 раз (с 10 мкм в начале 70-х годов до 30 нм в наши дни) [40, 41]. В настоящее время доступной для любого заказчика БИС является технология с минимальными горизонтальными размерами элементов 0,13 мкм, позволившая еще в 2009 г. реализовать массовое производство микропроцессоров Intel Pentium 4 с тактовой частотой более 2,5 ГГц на МОП-транзисторах с длиной канала 60 нм и толщиной подзатворного окисла 1,5 нм [41].

Каждый технологический шаг в направлении уменьшения размеров кроме огромных финансовых затрат сопряжен с увеличением ранее неизвестных проблем конструирования и производства, которые приходится решать инженерам-практикам для обеспечения теоретически прогнозируемых характеристик транзистора. При этом им приходится решать задачи, вытекающие из классического закона сохранения энергии. Любое улучшение одних параметров приводит к ухудшению других, причем с уменьшением геометрических размеров взаимное влияние параметров становится все более сильным.

Сложность задачи усугубляется тем, что с ростом степени интеграции СБИС и систем на кристалле увеличивается доля чипов, содержащих аналоговые блоки, которые обеспечивают взаимодействие с окружающим миром, необходимое для создания современных интегрированных и функционально законченных систем. Известно было и ранее, что к транзисторам для аналоговых и цифровых применений предъявляются противоречивые требования. Так, для цифровых СБИС пороговое напряжение нельзя снижать неограниченно, поскольку при этом увеличивается значение подпорогового тока, который определяет основное потребление энергии СБИС в неактивном (выключенном) состоянии. Верхний предел порогового напряжения теоретически ограничивается четвертью от величины напряжения питания [42], которое, в свою очередь, стараются снизить для уменьшения потребляемой мощности. Однако для аналоговых схем идеальным является как раз нулевое пороговое напряжение $V_t = 0$, что существенно увеличивает динамический диапазон работы аналоговой схемы, определяемый разностью между напряжением на затворе и V_t, то есть $(V_{gs} - V_t)$.

Особыми требованиями к аналоговым транзисторам являются также необходимость обеспечения повышенной нагрузочной способности (тока стока в режиме насыщения), высокая линейность при малых нелинейных искажениях в режиме малого сигнала. А ведь еще надо учитывать, что для дифференциальных каскадов и токового зеркала важна согласованность характеристик транзисторов.

Основными конструктивно-технологическими проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов являются следующие – туннелирование носителей через затвор, инжекция горячих носителей в окисел, эффект «прокол» между истоком и стоком, значительные токовые утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного омического сопротивления в цепи между истоком и стоком, обеспечение требуемого минималь-

ного запаса между пороговым напряжением и напряжением питания. Кроме того транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление и в то же время малое сопротивления областей истока и стока, обеспечивая при этом большую нагрузочную способность. Это только основные технологические и конструктивно-схемотехнические проблемы. Но надо понимать, что для этих субмикронных транзисторов существует еще целый ряд ограничений, например, емкости затвора и p-n-переходов должны быть минимальны. Разброс параметров техпроцесса, который исходя из физических ограничений растет с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать существенно процент выхода годных кристаллов.

А ведь это только основные «цветочки» того букета проблем, которые должны решить создатели нового технологического процесса.

Надо понимать, что эти проблемы приходится решать каждый раз, когда одна волна проектных норм сменяет другую – как при переходе от 180 нм к 90 нм, так и при переходе от 90 нм к 65 нм и т.д. Очевидно, что для каждой волны имеют место свои, ранее неизвестные физические механизмы отказов, новые транзисторы по-новому реагируют на воздействие дестабилизирующих факторов (ионизирующих воздействий и пр.)

6.3.1. Конструкции МОП-транзисторов в СБИС

Наиболее распространенной конструкцией МОП-транзистора, используемой более 10 лет в полупроводниковой промышленности, является LDD (Lightly Doped Drain) структура (рис. 6.14, 6.15) [43–44].

Ее особенностью является наличие мелких слаболегированных областей, которые удлиняют области истока и стока в сторону канала. Концентрацию легирующей примеси в этих областях (фосфор и бор) и режим ее разгонки выбирают таким образом, чтобы получить плавный p-n-переход. Обычно концентрация примеси составляет от $4 \cdot 10^{18}$ до $8 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, в то время как в n^+-областях она достигает $5 \cdot 10^{19}$–$1 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$. Полученное таким способом снижение напряженности электрического поля в канале на границе со стоком уменьшает энергию горячих электронов, которые, как известно, вызывают долговременную деградацию параметров транзистора. Слаболегированные LDD-области также повышают и напряжение прокола, инжекционного и лавинного пробоя транзистора, уменьшают DIBL-эффект и эффект модуляции длины канала.

Глубина LDD-областей истока и стока составляет обычно 50–100 нм для транзисторов с длиной канала 0,25 мкм (рис. 6.16, табл. 6.1). Уменьшение глубины p-n-переходов до 10 нм неизбежно приводит к увеличению сопротивления слоев истока и стока до 10 кОм/квадрат, что является недостатком, поскольку ограничивает нагрузочную способность транзистора. С помощью приборно-технологического моделирования и серии экспериментов установлено, что перекрытие LDD-областей затвором должно быть не менее 15–20 нм, чтобы предотвратить резкое снижение нагрузочной способности транзистора [42]. Толщина поликремниевого затвора составляет порядка 300 нм.

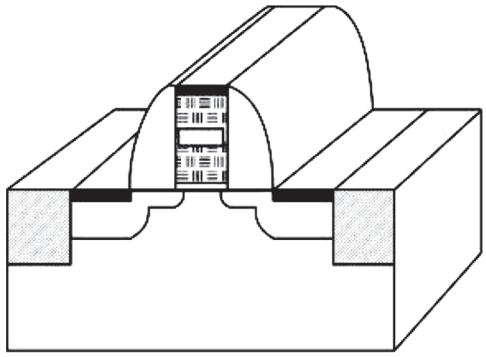


Рис. 6.14. Типичная структура МОП-транзистора. Пунктиром показан ореол (halo), охватывающий LDD-области истока и стока

Рис. 6.15. Внешний вид топологии субмикронного МОП-транзистора [5]

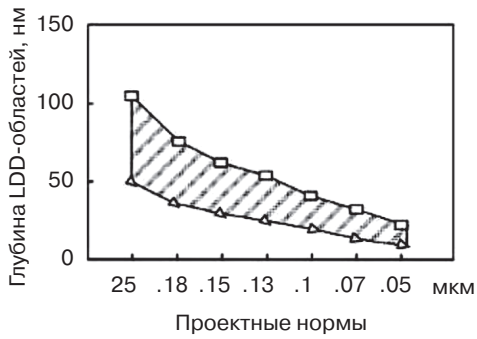


Рис. 6.16. Уменьшение глубины залегания p-n-переходов LDD-областей истока и стока с развитием технологии

Таблица 6.1. Масштабирование МОП-транзисторов согласно NTRS [28]

Проектные нормы, нм	**250**	**180**	**130**	**100**	**70**
Толщина окисла, нм	4–5	3–4	2–3	1,5–2	< 1,5
Глубина p-n-переходов, нм	50–100	36–72	26–52	20–40	15–30
Напряжение питания, В	1,8–2,5	1,5–1,8	1,2–1,5	0,9–1,2	0,6–0,9
Ток утечки, нА/мкм	1	1	3	3	10
Нагруз. способн., мА/мкм	600/280	600/280	600/280	600/280	600/280
Мощность/кристалл, Вт	70	93	121	120	114

Для снижения величин емкостей субмикронного транзистора обычно выбирают слаболегированную подложку, а для обеспечения необходимого порогового напряжения и снижения напряжения прокола применяют легирование канала примесью того же типа, что и в подложке. Легирование выполняют примерно на глубину области пространственного заряда под затвором.

Контакты к областям истока, стока и к поликремниевому затвору выполняют с промежуточным формированием слоя $TiSi_2$ или $CoSi_2$ толщиной порядка 40 нм, что обеспечивает удельное сопротивление около 5 Ом на квадрат [43]. Изоляция между поликремниевым затвором и контактами к истоку и стоку выполняется в виде так называемого спейсера (разграничителя) (рис. 6.17) из Si_3N_4.

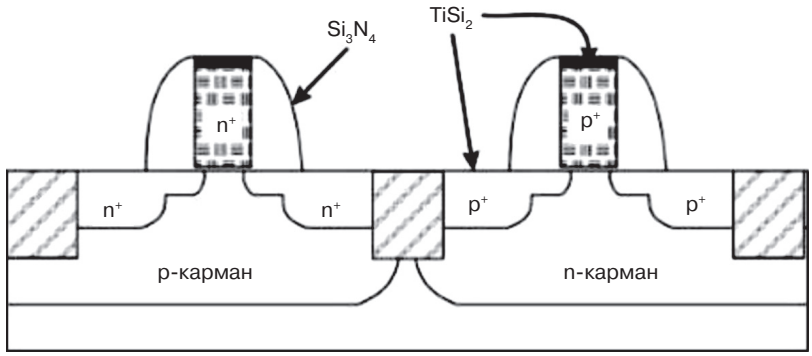


Рис. 6.17. Комплиментарная пара транзисторов, использованная при производстве микропроцессоров Intel® Celeron и Pentium® II по 0,25-мкм технологии [43]

Концентрация примеси в канале составляет $5 \cdot 10^{17}$–$1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ [44], поскольку увеличение концентрации примеси свыше этого значения для транзисторов с длиной канала менее 100 нм ведет к появлению эффекта туннелирования электронов через p-n-переходы истока и стока.

Такой параметр, как толщина окисла t_{ox} для транзисторов с длиной канала 0,1 мкм составляет 3–4 нм. Между толщиной окисла t_{ox} и длиной канала L МОП-транзисторов, изготавливаемых фирмой Intel в течение последних 20 лет, существует эмпирическая зависимость $L = 45 \cdot t_{ox}$ [2].

Для формирования карманов МОП-транзисторов разного типа проводимости (рис. 6.17) используют фосфор и бор. Изоляцию между карманами выполняют обычно мелкими канавками, стенки которых окисляют, а внутренность заполняют поликремнием. Эта технология изоляции стала доминирующей в транзисторах, выполненных по 0,25-микронной технологии, и пришла на смену изоляции локальным окислением кремния (LOCOS) [45].

Показанная на рис. 6.17 структура транзистора обеспечила снижение длины затвора от 10 мкм в 70-х годах до 0,03 мкм в настоящее время путем простого геометрического масштабирования (табл. 6.1), то есть уменьшением длины затвора, толщины диэлектрика и глубины залегания p-n-переходов. Однако переход проектных норм через границу 130 нм в рамках традиционной структуры транзистора наталкивается на существенные физические ограничения (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Ограничения дальнейшей миниатюризации [42]

Характеристики	Предел	Причина ограничения
Толщина окисла	2,3 нм	Туннелирование через окисел
Глубина p-n-переходов	30 нм	Сопротивление областей истока и стока
Легирование канала	V_t = 0,25 В*	Подпороговый ток
Мелкие области истока и стока	15 нм	Сопротивление
Длина канала	60 нм	Подпороговый ток
Длина затвора	100 нм	Подпороговый ток

* V_t – пороговое напряжение.

Так, уменьшение толщины окисла приводит к росту туннельного тока утечки затвора, а уменьшение глубины залегания p-n-переходов – к росту последовательного сопротивления областей транзистора, причем при уменьшении длины канала и порогового напряжения растет подпороговый ток. Таким образом, транзисторы для современных технологий должны иметь уже иную структуру и использовать новые материалы для подзатворного диэлектрика.

6.3.2. Методы улучшения характеристик МОП-транзисторов

Уменьшение порогового напряжения при снижении длины канала является индикатором появления короткоканальных эффектов при разработке новых технологий и одновременно существенным препятствием на пути сокращения размеров транзисторных структур. Для борьбы с эффектами короткого канала обычно используется изменение профиля легирующей примеси как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. В горизонтальном направлении (вдоль канала) создают так называемый «ореол» (halo) вокруг слаболегированных областей истока и стока [46–47], выполняют ионную имплантацию в кармашки (pockets) [48]. В вертикальном направлении создают неоднородное (ретроградное) распределение примеси [42, 49], экстремально мелкие области истока и стока, применяют новые материалы с большей, чем у окиси кремния, диэлектрической проницаемостью [42], а также применяют другие ноу-хау.

Проникновение области обеднения стока в канал является основной причиной появления короткоканальных эффектов. Однако их нельзя устранить путем простого повышения концентрации легирующей примеси в подложке, поскольку при этом растет подпороговый ток и уменьшается подвижность носителей в канале, вызывающая деградацию нагрузочной способности транзистора. Наиболее распространенным решением этой проблемы является реализация так называемого обратного эффекта короткого канала, когда с уменьшением длины канала пороговое напряжение возрастает. Этого также можно достичь применением ореола (halo) вокруг областей истока и стока (рис. 6.18).

Ореол создается ионным легированием примеси того же типа проводимости, что и карман (бор или индий для n-канального транзистора и мышьяк для p-канального). Индий, по сравнению с бором, снижает крутизну падения порогового напряжения в зависимости от длины канала и уменьшает разброс наклона подпороговой характеристики [46]. Ионное легирование может выполняться вертикально, но чаще выполняется под углом, для чего кремниевую пластину наклоняют на угол от 20–30 до 90° по отношению к ионному пучку, чтобы направить его под затвор. Кстати, для этого необходимо использовать специальные конструкторские применения соответствующего технологического оборудования, что тоже обычно является ноу-хау фирмы изготовителя оборудования. Ореол делают обычно на том же этапе литографии, что и мелкие слаболегированные области истока и стока, при этом энергию имплантации выбирают достаточно большую, чтобы увеличить глубину залегания ореола. После формирования спейсера, во время отжига областей истока и стока, имплантант диффундирует за LDD-области, обеспечивая показанный на рис. 6.18 профиль распределения примеси.

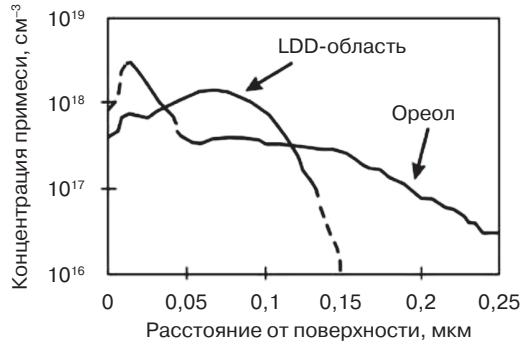


Рис. 6.18. Профиль примеси в области ореола и слаболегированной (LDD) области истока или стока для 0,25-мкм технологии [42]

Принцип действия ореола основан на том общеизвестном факте, что пороговое напряжение МОП-транзистора зависит от средней концентрации примеси под затвором, а не от ее горизонтального распределения. Поэтому введение ореола увеличивает пороговое напряжение, однако практически не влияет на среднюю подвижность носителей в канале.

Ионное легирование в кармашек (pocket) [48] отличается от ореола только тем, что охватывает не всю LDD-область, а только ее часть у поверхности или снизу (рис. 6.19) [48].

Крутое ретроградное распределение примеси (Super Steep Retrograde Well, SSRW) [42, 49] (рис. 6.19) создается путем медленной диффузии мышьяка или сурьмы для p-канальных приборов и индия для n-канальных транзисторов. Благодаря возможности устанавливать поверхностную концентрацию легирующей примеси независимо от объемной, у технологов появляется дополнительная степень свободы для независимой регулировки порогового напряжения и концентрации примеси в подложке, влияющей на величину области пространственного заряда и, соответственно, короткоканальные эффекты. Правильное применение идеи SSRW позволяет существенно ослабить влияние короткоканальных эффектов и увеличить поверхностную подвижность носителей, однако при этом несколько увеличивается подпороговый ток [49].

Рис. 6.19. Крутое ретроградное распределение примеси в кармане (SSRW) [2]

Сравнение структур с однородным и ретроградным распределением примеси достаточно неоднозначно из-за сложности выбора условий сравнения и иногда дает противоречивые результаты [49]. Разновидностью крутого ретроградного распределения примеси является так называемое дельта-легирование подложки, имеющее аналогичные свойства.

Одним из классических путей увеличения передаточной проводимости и нагрузочной способности МОП-транзистора является уменьшение толщины подзатворного окисла [50]. Толщина окисла ограничивается появлением паразитного туннельного тока, который увеличивает энергопотребление микросхемы, и нестабильностью напряжения пробоя окисла, снижающей надежность.

Экспериментально была показана возможность уменьшения толщины подзатворного диэлектрика до 1,5 нм [44]. В эксперименте длина канала составляла около 0,1 мкм, при этом нагрузочная способность транзистора была равна 1 мА/мкм, передаточная проводимость – 1000 мСим/мм при комнатной температуре.

Рост туннельного тока через окисел является не единственной преградой на пути уменьшения его толщины. В экспериментах с приборами, имеющими толщину затвора 1,2–2,8 нм, было показано, что с ростом туннельного тока увеличивается статистический разброс порогового напряжения. Это объясняется тем, что пороговое напряжение начинает зависеть от падения напряжения на омическом сопротивлении затвора; падение напряжения вызывается прохождением туннельного тока. При этом в разброс порогового напряжения вносится компонента, связанная с разбросом сопротивления затвора.

Еще одной физической причиной, мешающей дальнейшему уменьшению размеров субмикронных транзисторов, является квантово-механическая природа инверсионного слоя, которая не позволяет электронам располагаться непосредственно у поверхности кремния. Максимум пространственного распределения электронов находится на расстоянии около 1 нм от поверхности. Это увеличивает эффективную толщину окисла примерно на 0,3 нм [43]. Кроме того, вследствие ограниченной концентрации примеси в поликремниевом затворе в нем наступает режим обеднения, из-за которого увеличивается эффективная толщина подзатворного слоя диэлектрика. Общее увеличение эффективной толщины составляет около 0,7 нм [43], что уменьшает ток стока и нагрузочную способность транзистора.

В известных экспериментах с приборами, имеющими толщину окисла 1,3–1,5 нм [50], было обнаружено, что туннельный ток через подзатворный диэлектрик может быть существенно уменьшен путем повышения однородности пленки окисла. Так, для получения однородной пленки в работе [50] было использовано селективное эпитаксиальное наращивание нелегированного кремния для получения канала МОП-транзистора, поскольку пленка окисла на эпитаксиально выращенном кремнии получается более однородной. Для получения канала сначала была выполнена ионная имплантация бора в область канала для n-канального транзистора и фосфора для p-канального. Затем из газовой фазы был выращен эпитаксиальный слой нелегированного кремния толщиной от 5 до 20 нм. Благодаря предварительному легированию кремния был получен практически идеальный ретроградный профиль примеси в эпитаксиальном слое. После этого была получена тонкая (1,5 нм) пленка окисла путем окисления эпитаксиального

слоя в сухом кислороде. Затвор был выполнен не из поликремния, как обычно, а из TiN. Зернистость TiN примерно в три раза меньше, чем у поликремния, что улучшило однородность диэлектрика под затвором.

Ключевым моментом разработки техпроцесса для длин канала менее 100 нм является получение мелких (менее 20 нм) p-n-переходов. К сожалению, они дают неприемлемо высокое сопротивление областей истока и стока и для его снижения обычно используют промежуточный слой из $TiSi_2$ или $CoSi_2$. Оригинальное решение этой проблемы было предложено в [51], рис. 6.20. После формирования слоя подзатворного окисла толщиной 4,6 нм формируется поликремниевый затвор с помощью электронно-лучевой литографии. Между затвором и областями локального окисления оставляется пространство 0,35 мкм для формирования областей истока и стока. Боковые стенки поликремниевого затвора защищаются тонким (10–20 нм) слоем Si_3N_4 для отделения затвора от контактов к истоку и стоку. После этого выполняется селективное эпитаксиальное наращивание слоя SiGe толщиной 50 нм, легированного фосфором. Далее формируют второй защитный слой на боковых стенках поликремниевого затвора, который является маской для последующей имплантации областей истока и стока. При последующей диффузии фосфора из нанесенного ранее слоя SiGe формируются мелкие слаболегированные области истока и стока. Контакты к истоку, стоку и затвору выполняют селективным наращиванием вольфрама. Полученная таким образом структура показана на рис. 6.20 и 6.21. Часть эпитаксиального слоя, находящаяся поверх мелких областей истока и стока, понижает их омическое сопротивление.

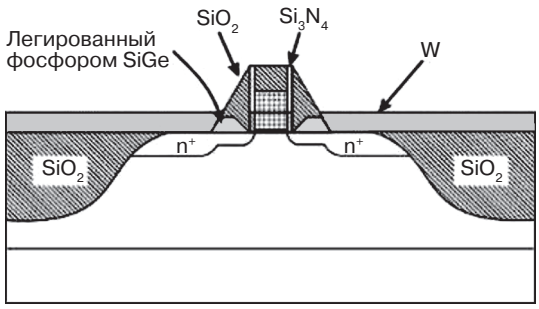


Рис. 6.20. МОП-структура, в которой мелкие области истока и стока получены диффузией из легированного фосфором SiGe

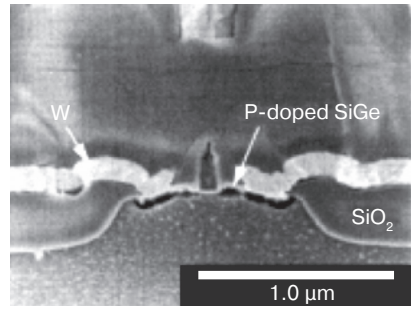


Рис. 6.21. Фотография МОП-транзистора, структура которого показана на рис. 38 [11]

6.3.3. МОП-транзисторы со структурой «кремний на изоляторе»

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ), являются весьма перспективными для создания микромощных и высокоскоростных СБИС КН с напряжением питания до 1,2 В и менее [48], поскольку наличие толстого окисла вместо кремния под областями истока и стока существенно уменьшает величину емкости на подложку. Вторым преимуществом является относительная простота процесса изоляции компонентов и высокая плотность интеграции благодаря отсутствию изолирующих карманов.

КНИ-структуры отличаются высокой радиационной стойкостью и повышенной надежностью при высоких температурах. Короткоканальные эффекты в КНИ-приборах могут быть подавлены простым уменьшением толщины кремниевого слоя. Наклон подпороговой характеристики у КНИ-транзисторов получается практически идеальным. Транзисторы высокого качества получаются на пленках кремния толщиной 8–10 нм.

Однако перспективность КНИ-структур не является бесспорной [42]. Основная проблема состоит в том, что КНИ-транзисторы имеют увеличенный подпороговый ток вследствие эффекта плавающей подложки, который устанавливает предел понижению потребляемой мощности в выключенном состоянии транзисторного ключа. Попытка понизить этот ток приводит к увеличению порогового напряжения, которое не позволяет уменьшить напряжение питания для уменьшения потребляемой мощности. Вторым принципиальным аргументом является то, что малая собственная емкость КНИ-транзистора перестает быть его преимуществом при дальнейшем сокращении размеров, поскольку уже в современных СБИС задержка в межсоединениях превышает задержку в вентилях.

Для КНИ-структур используют три способа изоляции: локальное окисление кремния (LOCOS), изоляцию мелкими канавками (STI) [45] и меза-изоляцию [48]. LOCOS-изоляцию трудно использовать при нормах проектирования менее 0,25 мкм из-за «птичьего клюва», который ограничивает возможности получения изолирующих областей малой площади. STI-изоляция является сравнительно дорогостоящим процессом.

Примеры транзистора со структурой КНИ показаны на рис. 6.22 и 6.23 [48].

Толщина слоя заглубленного окисла в структуре, изображенной на рис. 6.22, составляет 390 нм, толщина слоя кремния на окисле равна 190 нм. Подзатворный окисел имеет толщину 4,7 нм, ширина канала равна 9,1 мкм, толщина поликремниевого затвора – 300 нм. Легирование канала выполняется таким образом, чтобы получить нужное пороговое напряжение. Кармашки, легированные бором для n-канальных транзисторов и фосфором – для p-канальных, необходимы для предохранения от смыкания истока и стока и подавления эффекта снижения порогового напряжения с уменьшением длины канала. На области истока, стока и затвора осажден слой силицида $TiSi_2$ толщиной 50 нм для уменьшения сопротивления контактов. Контакты к областям транзистора выполнены вольфрамом, а разводка электрических цепей между транзисторами – алюминием. Изоляция между транзисторами на кристалле выполняется разграничительной прослойкой (спейсером, рис. 6.22) из окисла кремния.

Одной из проблем изготовления транзисторов на тонких пленках кремния является высокое последовательное сопротивление областей истока и стока. Для его уменьшения используют самосовмещенный силицидный процесс, использующий силицид титана или кобальта. Однако если толщина используемой пленки кремния менее 20 нм, то такой тонкий слой может быть полностью поглощен формирующимся слоем силицида, и тогда площадь контакта между кремнием и силицидом резко уменьшается, что приводит к возрастанию сопротивления контакта. Очень малое поглощение кремния происходит при выполнении контакта из вольфрама, однако при контакте к сильнолегированному кремнию p-типа проводимости вольфрам образует контакты с очень плохой стабильностью характеристик.

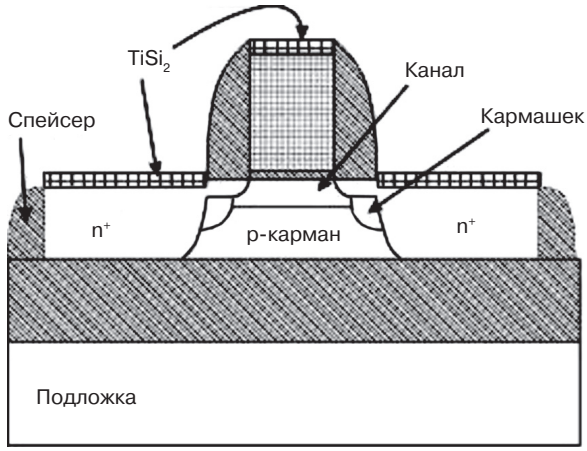


Рис. 6.22. КНИ-структура с длиной канала 0,28 мкм и шириной 9,1 мкм

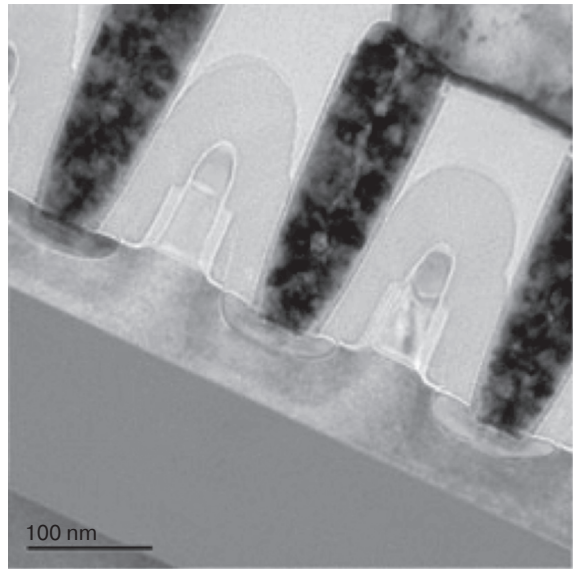


Рис. 6.23. pFET транзистор, изготовленный по КНИ 45 нм технологии в компании IBM

Для решения проблемы контактов может потребоваться эпитаксиальное наращивание пленки кремния сверху областей истока и стока или, наоборот, стравливание той области кремния, где должен быть сформирован канал транзистора.

Один из вариантов реализации этой идеи представлен на рис. 6.24 [66]. Транзистор имеет длину канала 40 нм, изготовлен по технологии КНИ на экстремально тонком слое кремния (было изготовлено три варианта транзисторов с толщиной кремния 4, 11 и 18 нм).

Слой исходного кремния на изоляторе имел удельное сопротивление 3 Ом·см. Толщина слоя заглубленного окисла составляла 100 нм, и он был выращен на под-

ложке n-типа с удельным сопротивлением 0,02 Ом·см. Пленка кремния для формирования областей истока и стока имела толщину 80 нм. В ней селективным травлением была получена область толщиной от 4 до 18 нм, в которой впоследствии был сформирован канал транзистора. Таким образом, при тонком слое кремния для области канала области истока и стока оказались достаточно толстыми (рис. 6.24), что обеспечило их низкое омическое сопротивление. Подзатворный окисел толщиной 4,7 нм был выращен в сухом кислороде.

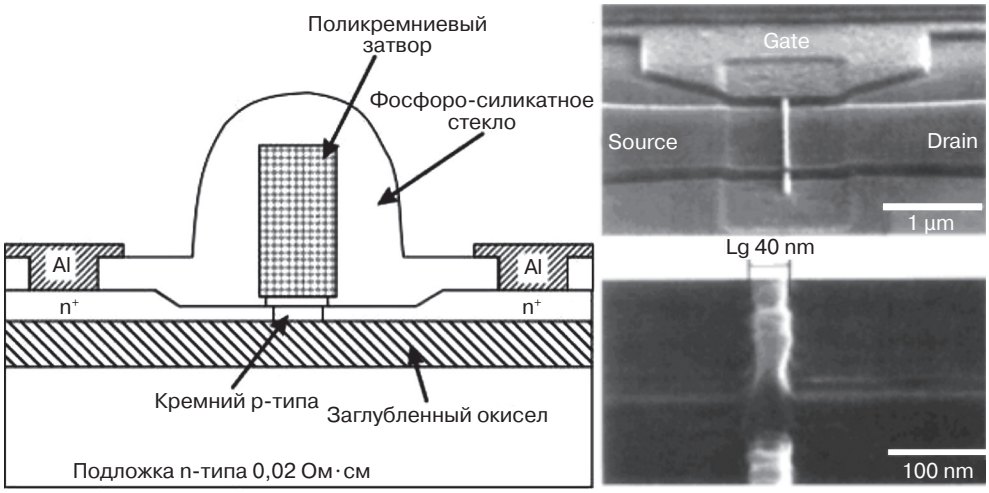


Рис. 6.24. Структура КНИ с ультратонким слоем кремния (4–18 нм) и длиной канала 40 нм (слева) и ее фотография сверху. Справа внизу показан затвор транзистора в увеличенном масштабе

Несколько поликремниевых затворов длиной от 40 до 135 нм были сформированы электронно-лучевой литографией со сверхвысокой разрешающей способностью. Для формирования областей истока и стока n-типа в сверхтонком слое кремния p-типа была использована диффузия фосфора из фосфоро-силикатного стекла, нанесенного на сформированную ранее структуру (рис. 6.24).

Контакты к истоку, стоку и затвору были выполнены из алюминия. Фотография структуры, полученная сканирующим электронным микроскопом, показана на рис. 6.24. Транзистор с толщиной канала 4 нм имеет наклон подпороговой характеристики 75 мВ на декаду, что свидетельствует о сильном подавлении короткоканальных эффектов.

Проблема плохой стабильности вольфрамового контакта к областям p-типа может быть решена путем дезактивации атомов бора в кремнии атомами водорода при водородном плазменном травлении кремния. Подготовленная таким образом поверхность кремния позволяет получить более стабильный контакт с вольфрамом [52]. На рис. 6.25 показана фотография МОП-транзистора с длиной канала 0,18 мкм, выполненного на кремниевой пленке толщиной 21 нм, с толщиной подзатворного окисла 3,6 нм и толщиной поликремниевого затвора 150 нм.

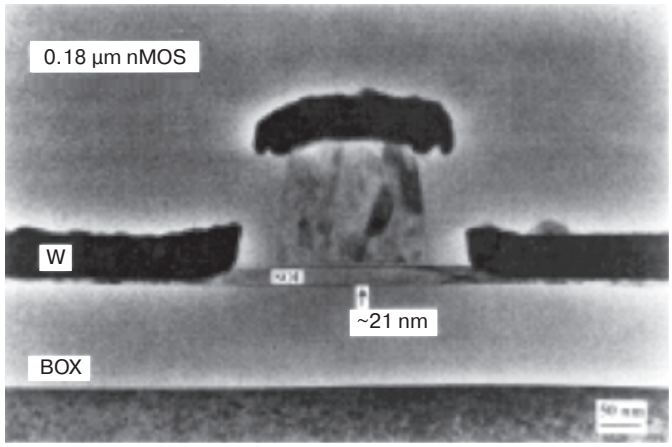


Рис. 6.25. МОП-транзистор с длиной канала 0,18 мкм, выполненный на пленке кремния толщиной 21 нм без наращивания областей истока-стока

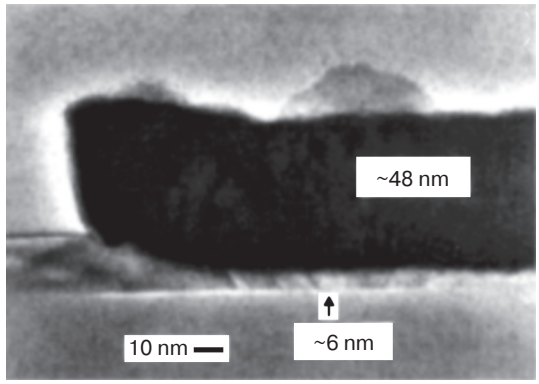


Рис. 6.26. Вольфрамовый контакт к стоку. Толщина слоя кремния уменьшилась на 15 нм для n-канального транзистора

Слой вольфрама составил 48 нм, слой кремния под контактом – 6 нм (рис. 6.26). Сопротивление полученного контакта равно 10 Ом/квадрат, что при том же поглощении кремния меньше, чем у силицида кобальта и титана [52]. Наклон подпороговой характеристики составил 70 мВ/дек. для n-канального транзистора и 75 В/дек. для p-канального.

Оригинальная КНИ-структура предложена в работе [53] (рис. 6.27). В качестве изолятора в ней использован воздух, что позволило назвать эту технологию «кремний ни на чем» (Silicon-on-Nothing, SON) [53]. Эта технология объединяет положительные качества обычной структуры транзисторов на кремнии с достоинствами КНИ.

Принцип изготовления такого прибора состоит в следующем. На кремниевую пластину наносят эпитаксиальный слой SiGe толщиной 10–30 нм, сверху которого наносят слой кремния толщиной 5–20 мм. Слой SiGe впоследствии будет стравлен, и таким образом под слоем кремния получится пустота (воздух),

которую можно заполнить окислом кремния, но можно и не заполнять ничем. После формирования слоя подзатворного окисла, поликремниевого затвора и спейсера на том месте, где должны быть области истока и стока (рис. 6.28), с помощью анизотропного плазменного травления делают канавки. Таким образом получается доступ к ранее нанесенному слою SiGe, который теперь вытравливается полностью с помощью селективного плазменного травления. Таким способом под слоем кремния получается воздушный тоннель высотой около 20 нм. После получения воздушного тоннеля его стенки пассивируют тонким слоем окисла. Фотография структуры на этом этапе техпроцесса показана на рис. 6.26, справа.

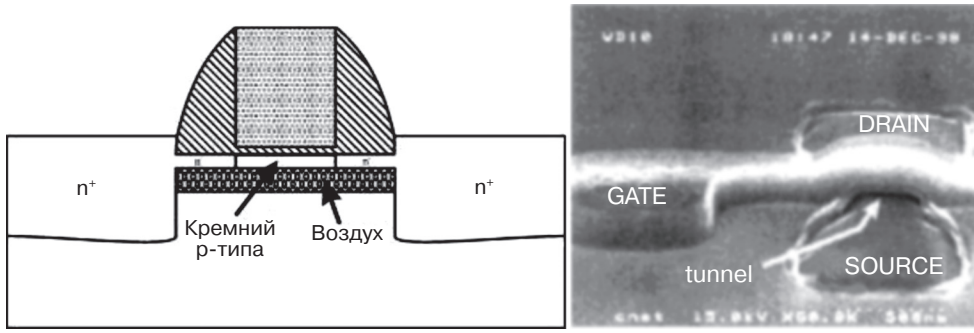


Рис. 6.27. МОП-структура «кремний ни на чем» (слева) и ее фотография на стадии получения воздушного канала (справа). Использована стандартная подложка

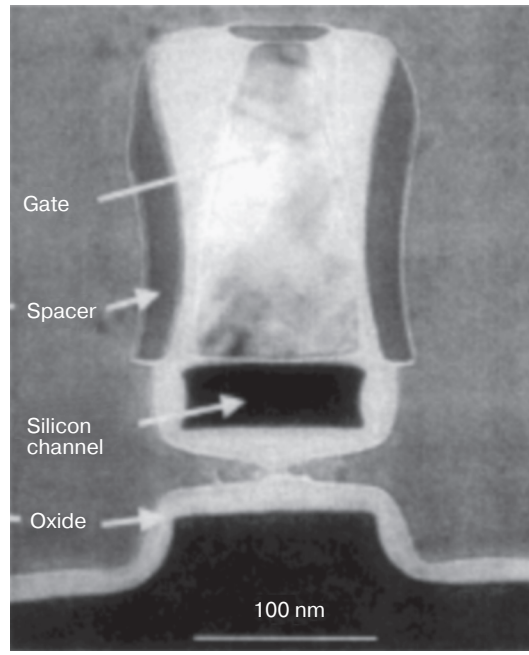


Рис. 6.28. Поперечный разрез структуры «кремний ни на чем»

На рис. 6.28 показана фотография поперечного разреза структуры с высотой канала 30 нм. Глубокие области истока и стока изготавливают селективным эпитаксиальным наращиванием кремния.

Технология «кремний ни на чем» позволяет изготавливать МОП-транзисторы с глубиной p-n-переходов и толщиной канала 5 нм [53]. Эффект модуляции длины канала и DIBL эффект в таких структурах становятся существенными только при длине канала менее 30 нм. При их изготовлении не требуется применение специального оборудования или материалов, все технологические операции являются типовыми.

6.3.4. Транзисторы с двойным, тройным и цилиндрическим затвором

Для разработки МОП-транзисторов с длиной канала менее 100 нм в соответствии с правилами масштабирования необходимо уменьшать глубину залегания p-n-переходов и толщину окисла. Однако для транзисторов с длиной канала менее 100 нм ток туннелирования через затвор становится очень большим и ограничивает мощность, потребляемую СБИС в режиме покоя, а мелкие p-n-переходы приводят к большому сопротивлению контактных областей. Для предотвращения смыкания областей истока и стока неизбежно применение высоколегированного ($> 10^{18}$ см$^{-3}$) стопора. Однако стопор снижает нагрузочную способность транзистора и увеличивает утечки в подпороговой области.

В связи с изложенным у конструкторов СБИС в последнее время появился большой интерес к транзисторам с двойным или окольцовывающим затвором, когда затвор с двух (или со всех) сторон охватывает область канала. Такой подход позволяет эффективно управлять энергетическим барьером между истоком и стоком и существенно ослабить большинство короткоканальных эффектов в транзисторах с проектными нормами менее 50 нм. Уменьшается также емкость p-n-переходов, улучшенная радиационная стойкость. Двойная плотность заряда инверсионного слоя увеличивает нагрузочную способность транзистора.

Принцип действия транзистора DELTA с двойным затвором [54] иллюстрируется рис. 6.29–6.30. На толстом слое окисла создается островок кремния в форме бруска, который служит каналом транзистора. Затвор охватывает область канала с трех сторон. Это обеспечивает большую передаточную проводимость и малые токи утечки в подпороговой области. Канал транзистора получается сильно обедненным. Транзистор работает в режиме объемной инверсии полупроводника. С уменьшением его толщины наблюдается увеличение наклона подпороговой характеристики, то есть уменьшение тока утечки в подпороговой области [54]. Это объясняется уменьшением емкости обедненного слоя и, следовательно, увеличением потенциала поверхностного слоя. В транзисторах с очень тонким каналом (2 нм) становится существенным эффект квантования энергии, который влияет на функцию распределения электронов в полупроводнике и параметры транзистора. Увеличивается также роль рассеяния носителей на шероховатостях границы раздела окисел–кремний, поскольку увеличивается площадь затвора.

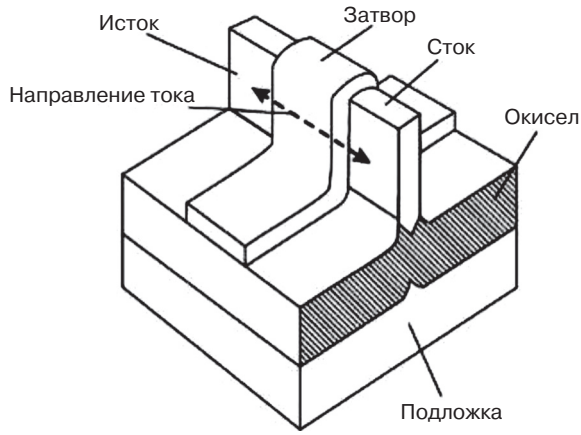


Рис. 6.29. Структура МОП-транзистора с двойным затвором

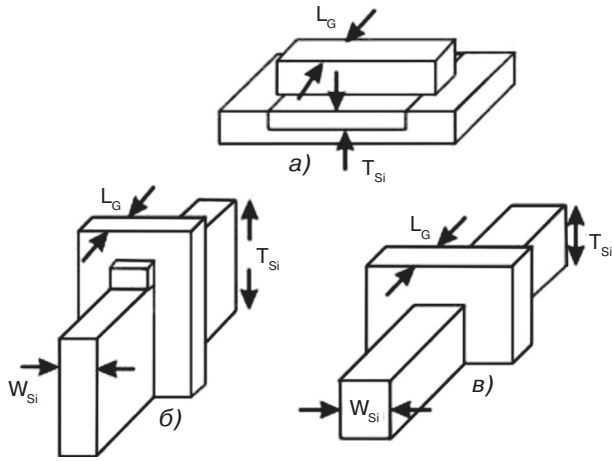


Рис. 6.30. Планарный DST транзистор с одним затвором (*а*), непланарный FINFET транзистор с двумя затворами (*б*) и непланарный транзистор с тремя затворами (*в*)

Структура такого транзистора с двойным затвором в настоящее время существенно модернизирована для обеспечения лучшей технологичности и совместимости с существующими техпроцессами массового производства [55]. Транзистор имеет толщину окисла 2,5 нм и длину канала до 10 нм, высота канала составляет 50 нм, толщина – от 10 до 120 нм [55]. Конструкция транзистора разработана таким образом, что его топология не отличается от обычного интегрального МОП-транзистора. Однако особенностями конструкции является самосовмещенность затворов друг с другом и с областями истока и стока, затвор выполнен из SiGe, низкоомные областям истока и стока выполнены из поликремния или поли-$Si_{0,85}Ge_{0,15}$, легированного фосфором.

Структура трехзатворного МОП транзистора и сравнительные характеристики планарных и непланарных МОП транзисторов представлены на рис. 6.31–6.40.

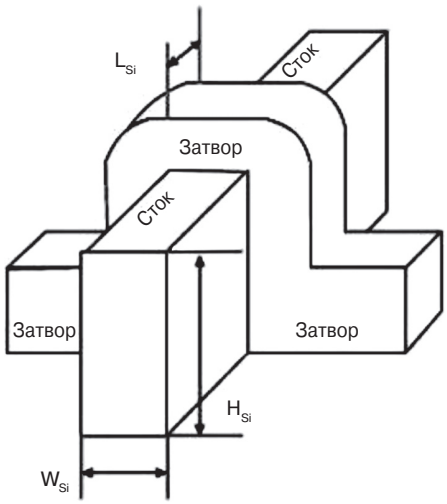


Рис. 6.31. Трехзатворный (tri-gate) транзистор компании Intel. Затворы окружают кремниевый канал с трех (из четырех) сторон

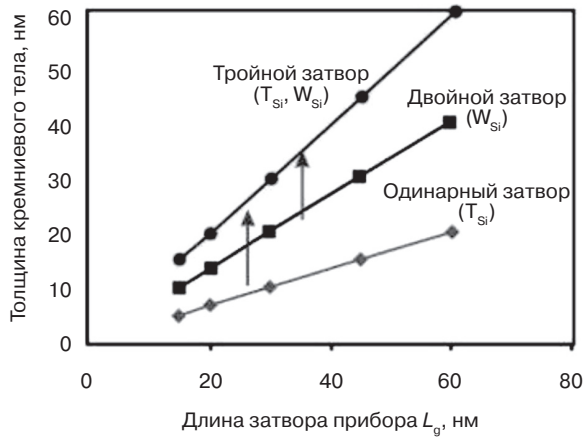


Рис. 6.32. Результаты моделирования, показывающие требования к DST транзистору с одним затвором, непланарному FINFET транзистору с двумя затворами и к непланарному транзистору с тремя затворами

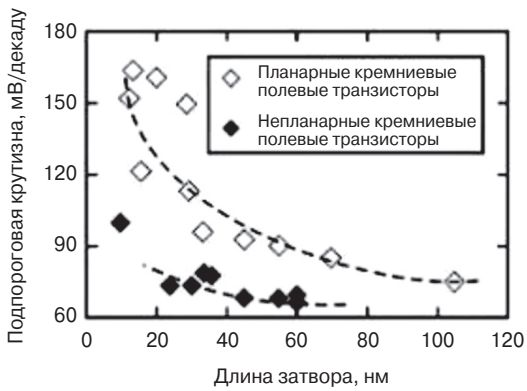


Рис. 6.33. Подпороговый наклон в зависимости от физической длины затвора планарного и непланарного МОП транзисторов

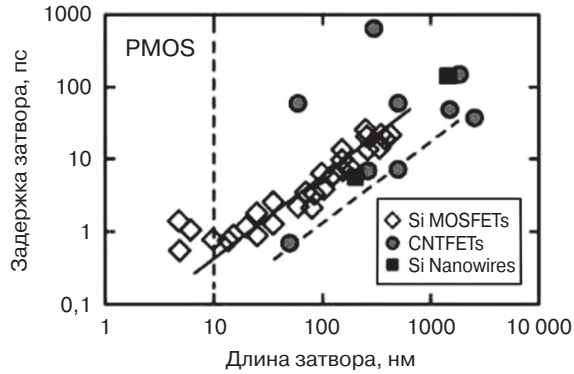


Рис. 6.34. Задержка затвора (собственное быстродействие прибора *CV/I*) в зависимости от физической длины затвора наноэлектронных PMOП транзисторов и МОП транзисторов на полевом эффекте (MOSFET) [17]

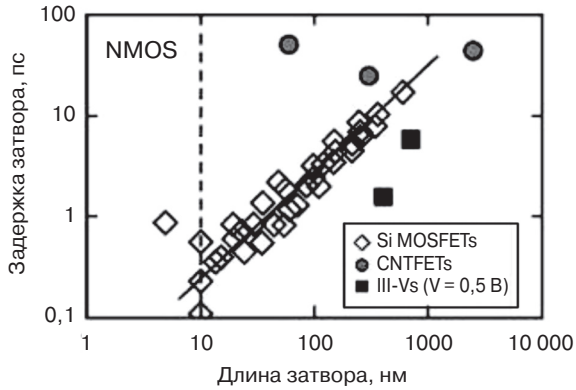


Рис. 6.35. Задержка затвора (собственное быстродействие прибора *CV/I*) в зависимости от физической длины затвора наноэлектронных NMOП транзисторов и МОП транзисторов на полевом эффекте (MOSFET) [17]

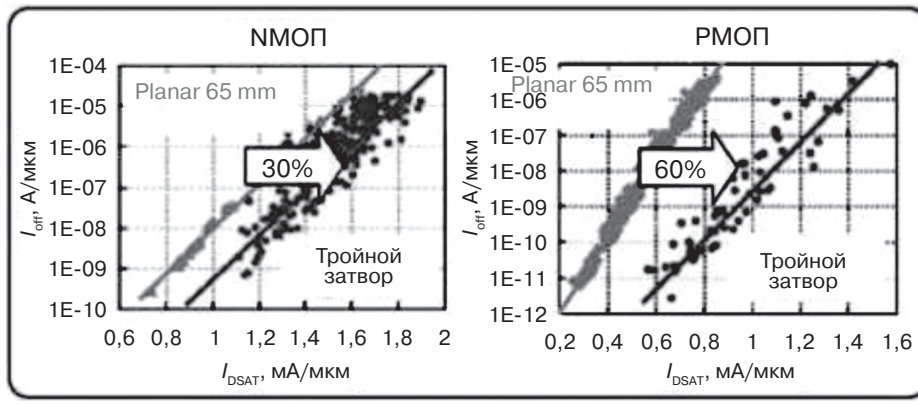


Рис. 6.36. Зависимость выходного тока I_{off} от управляющего тока I_{DSAT} интегрированных трехзатворных (tri-gate NMOП и PMOП) транзисторов

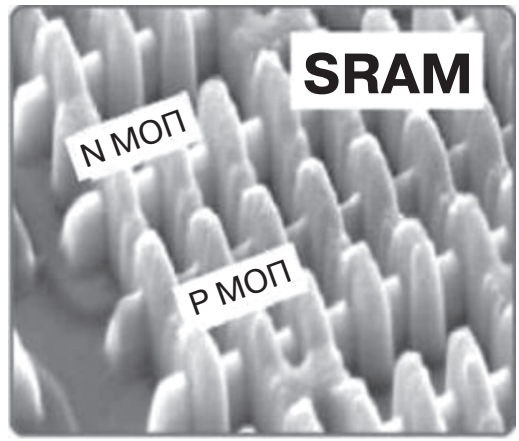


Рис. 6.37. Ячейка статической памяти SRAM на трехзатворных МОП транзисторах

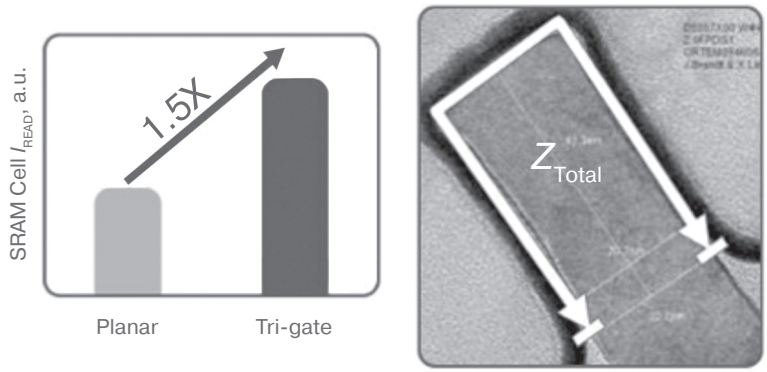


Рис. 6.38. Ячейка статической памяти SRAM на трехзатворных МОП транзисторах обладает в 1,5 раза более высокой памятью по сравнению со стандартной ячейкой эквивалентного размера на планарных МОП транзисторах

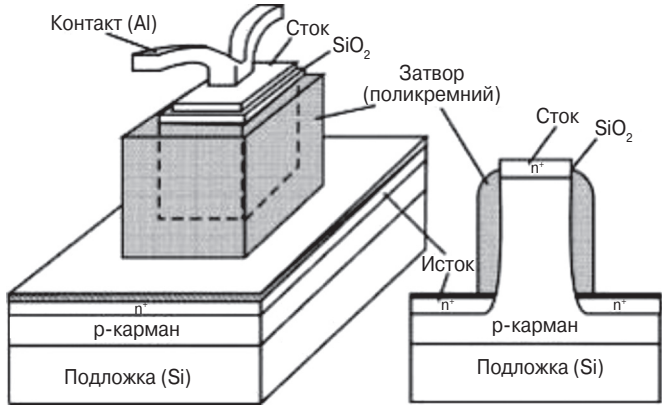


Рис. 6.39. МОП-транзистор с цилиндрическим каналом. Справа показано поперечное сечение структуры

С точки зрения технологичности процесса требования к непланарному транзистору с тремя затворами оказываются наименее жесткими и легко реализуются в массовом производстве.

В транзисторах с окольцовывающим (цилиндрическим) затвором (рис. 6.39) ток канала течет перпендикулярно поверхности кристалла, и затвор со всех сторон окружает канал (Surrounding Gate Transistor, SGT) [56]. Такая структура обеспечивает минимальную емкость обедненного слоя, и поэтому практически весь заряд затвора уравновешивается зарядом носителей в канале и тонком обедненном слое. Поэтому такая структура имеет минимальные подпороговые токи и большую передаточную проводимость. Вертикальное расположение канала обеспечивает высокую степень интеграции. Это позволяет использовать транзисторы с окольцовывающим затвором для построения ячеек памяти статических, динамических и электрически программируемых запоминающих устройств.

Недостатками описанных конструкций являются высокое тепловое сопротивление между каналом и подложкой, которое может вызвать сильный саморазогрев в процессе переключения транзистора и, как следствие, увеличенное рассеяние носителей на фононах, а также увеличенное паразитное последовательное сопротивление областей истока и стока.

6.3.5. Другие типы транзисторных структур

Выше описаны только наиболее перспективные или уже нашедшие широкое применение транзисторные структуры. Однако в литературе описаны и другие варианты, о которых необходимо знать разработчикам современных СБИС.

Так, транзисторы с вертикальным каналом предлагаются в качестве кандидатов на суб100-нм структуры. В работе [57] описан транзистор с вертикальным каналом длиной менее 50 нм, изготовленный на стандартной производственной линии. Изготовление канала в вертикальном направлении снижает площадь кристалла, но позволяет делать канал длинным и избавиться таким образом от короткоканальных эффектов, в частности, уменьшить подпороговый ток, что особенно важно для ячеек памяти. На рис. 6.40 поликремний охватывает область истока, если посмотреть на транзистор сверху, поэтому области поликремния оказываются электрически соединены.

Структура на рис. 6.40 может быть модифицирована для получения вертикального транзистора с двойным затвором и каналом длиной 70 нм [57]. Для этого n^+-область истока делают очень тонкой, тогда вертикально направленный ток канала оказывается заключен между двумя затворами, что снижает влияние короткоканальных эффектов и уменьшает подпороговый ток.

Gate-All-Around (GAT) МОП-транзистор [58] также имеет два затвора: снизу и сверху канала. Его особенностью является изготовление канала из поликремния, который рекристаллизуется оригинальным методом продольной кристаллизации, индуцированной металлом [58]. После рекристаллизации аморфного кремния получают крупнозернистую структуру в активной области канала. Транзистор имеет характеристики, близкие к КНИ-прибору. По сравнению с транзистором, имеющим одиночный затвор, он имеет улучшенный наклон подпороговых характеристик и большую нагрузочную способность.

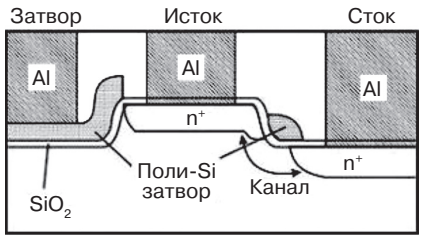


Рис. 6.40. Структура МОП-транзистора с вертикальным затвором, где обе части поликремниевого затвора электрически соединены в плане

Транзистор с тройным затвором (П-образный транзистор) [59] является конструктивной модификацией транзистора с двойным затвором. В нем затвор охватывает канал не с двух сторон и не окольцовывает его, а управляет каналом с прямоугольным сечением с трех сторон, напоминая в сечении греческую букву «П». Эта конструкция более технологична, чем с окольцовывающим затвором.

Для решения проблемы уменьшения подвижности в транзисторах с коротким каналом в настоящее время изучается применение механически напряженного кремния, который выращивается на поверхности SiGe. Вследствие различия в постоянных кристаллической решетки Si и SiGe кремний испытывает механическое растягивающее усилие по двум координатам. Было обнаружено, что подвижность носителей в напряженном кремнии выше, чем в обычном, и при 30%-ном содержании Ge в SiGe подвижность электронов в напряженном кремнии увеличивается примерно на 80% [60].

Для увеличения подвижности носителей в канале p-МОП-транзисторов в работе [61] в качестве материала канала использовался SiGe, в котором подвижность дырок больше, чем в Si. Для улучшения качества поверхности окисла на SiGe был нанесен тонкий (4 нм) слой Si. Между Si и SiGe образуется гетеропереход, который представляет собой потенциальную яму для дырок. Концентрация дырок в ней оказывается больше, чем на границе раздела $Si–SiO_2$. Поэтому ток канала обеспечивается током дырок в SiGe, где их подвижность выше.

Одним из классических путей уменьшения потребляемой мощности ИС является снижение величины напряжения питания. Однако оно не может быть меньше учетверенного порогового напряжения [43]. В то же время пороговое напряжение не может быть уменьшено ниже 0,2 В, поскольку это приводит к увеличению подпорогового тока, который определяет потребляемую мощность в пассивном режиме СБИС. Решить это противоречие позволяют более сложные конструкции МОП-транзисторов с динамически изменяющимся пороговым напряжением (DTMOS [62]). При уменьшении напряжения на затворе (то есть когда транзистор переходит в пассивный режим работы) у таких транзисторов увеличивается пороговое напряжение и, следовательно, уменьшается подпороговый ток. При увеличении напряжения на затворе пороговое напряжение падает, что приводит к росту тока стока и увеличению нагрузочной способности транзистора. Конструктивно DTMOS-транзисторы представляют собой обычный КНИ МОП-транзистор, у которого затвор соединен с подложкой. При этом пороговое напряжение управляется напряжением на подложке, которое автоматически уменьшается с ростом напряжения на затворе. Недостатком такого транзистора является малое напряжение питания (0,6 В), ограниченное напряжением отпирания p-n-переходов истока и стока.

6.3.6. Особенности транзисторов для аналоговых применений

По мере уменьшения геометрических размеров транзисторов их характеристики, особенно важные для аналоговых применений, существенно ухудшаются. К ним относятся дифференциальное сопротивление стока, передаточная проводимость, скорость старения из-за горячих электронов, технологический разброс характеристик, отношение сигнала к шуму и динамический диапазон.

Если ослабление короткоканальных эффектов для цифровых схем при малом напряжении питания можно выполнить достаточно просто – путем увеличения дозы легирования подложки, что уменьшает расширение области обеднения стока в сторону канала, то для аналоговых схем увеличение легирования приводит к росту порогового напряжения и уменьшает подвижность носителей в канале, что снижает нагрузочную способность транзистора.

Основную проблему конструирования транзисторов для аналоговых применений представляет деградация параметров, вызванная горячими электронами. В изготовленных аналоговых устройствах она проявляется в виде долговременной нестабильности параметров (старения), которая является очень важным параметром, особенно для космических и специальных применений.

Одним из методов уменьшения влияния горячих электронов является технология LATID (ионная имплантация под большим углом наклона ионного пучка), позволяющая уменьшить напряженность электрического поля в канале возле стока. При этом снижается как скорость генерации горячих носителей, так и вероятность образования ими поверхностных состояний в окисле. Усиление и сопротивления стока уменьшаются в несколько раз по сравнению с обычными LDD-структурами. Для изучения деградации параметров в [67] была использована дифференциальная пара транзисторов. На сток одного из них подавалось повышенное напряжение (7 В), чтобы увеличить долю горячих электронов, на второй транзистор подавалось обычное рабочее напряжение. Сдвиг нуля дифференциальной пары периодически измерялся, и его величина характеризовала степень заряженности окисла горячими электронами. Оказалось, что LATID-технология позволяет почти в 10 раз уменьшить временную нестабильность напряжения смещения нуля дифференциальной пары, вызванную горячими электронами [67].

Требование малого разброса параметров транзисторов на кристалле является второй особенностью аналоговых схем. Основным критерием оценки разброса параметров является также напряжение смещения нуля дифференциальной пары. Для снижения разброса параметров используют транзисторы с размерами, в 3 и более раз превышающими минимально возможные для используемой технологии. Уменьшенный разброс параметров обеспечивает также крутое ретроградное распределение примеси по сравнению с ореолом или имплантацией в карманы [70].

Следующей проблемой является обеспечение малого порогового напряжения, которое, наряду с напряжением питания, ограничивает динамический диапазон аналоговой схемы. Как уже отмечалось, это требование вступает в противоречие с противоположным требованием со стороны цифровых схем, для которых пороговое напряжение определяет запас помехоустойчивости и подпороговый ток, а следовательно, потребляемую мощность в режиме покоя. Для аналоговых схем

подпороговый ток не влияет на энергопотребление, так как ток покоя в них обычно задается генераторами тока. Кардинальным решением этой проблемы является усложнение техпроцесса, которое позволяет делать МОП-транзисторы с разными пороговыми напряжениями на одном кристалле [63, 71, 72]. Для этого в работе [63] был разработан специальный 0,18-мкм техпроцесс, позволяющий создавать транзисторы с нулевым пороговым напряжением для аналоговых блоков и с $V_t = 0{,}4$ В – для цифровых. Нулевое пороговое напряжение в нем реализуется благодаря добавлению двух технологических операций для аналоговых транзисторов: селективное травление окисла и последующее эпитаксиальное наращивание нелегированного кремния толщиной 30 нм.

Другим, иногда используемым в практической деятельности методом изменения порогового напряжения является применение двух материалов затвора с разными работами выхода для разных транзисторов, например, поли-SiGe и поли-Si [64, 73].

В связи с низкой себестоимостью технологии цифровых СБИС и наличием хорошо отработанной инфраструктуры автоматизированного проектирования и производства, обеспечивающей быстрый выход изделий на рынок, представляет особый интерес применение технологий цифровых СБИС для разработки и производства аналоговых схем [65]. Однако такое применение наталкивается на ряд следующих проблем: количество доступных активных и пассивных элементов довольно ограничено, технология оптимизирована только по двум критериям: быстродействие и потребляемая мощность, активные элементы контролируются только на основе простых тестов, таких как задержка вентиля и нагрузочная способность. Тем не менее, этот подход считается перспективным, и предпринимаются шаги по его развитию [66–69, 74, 75].

Подводя итоги вышеизложенному, можно сказать, что результаты анализа современного состояния, тенденций и перспектив развития микроэлектроники в части конструкционно-технологических решений и материалов, обеспечивающих изготовление субмикронных полупроводниковых приборов с проектными нормами 130 нм, и менее позволяют сделать следующие выводы:

- переход проектных норм изделий микроэлектроники и, в частности, МОП транзисторов, через границу 130 нм в рамках обычных конструкций и технологий сдерживается физическими ограничениями, что не позволяет использовать традиционный подход к решению проблемы масштабируемости приборов и требует применения новых материалов и новых конструктивно-технологических решений;
- основными проблемами субмикронных МОП-транзисторов являются туннелирование через затвор, инжекция горячих носителей в окисел, прокол между истоком и стоком, утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком, обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания, проявление в работе приборов квантово-механических эффектов и пр. Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление, малое сопротивления областей истока и стока и большую нагрузочную способность.

Емкости затвора и p-n-переходов должны быть минимальны. Разброс параметров техпроцесса, который растет с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать процент выхода годных кристаллов;

– объемные (двух-, трехзатворные и цилиндрической формы) конструкции МОП-транзисторов, подлегирование различных элементов транзистора (в частности, halo), использование материалов с повышенной диэлектрической проницаемостью, позволяющее использовать подзатворный диэлектрик разумной» толщины, применение особых приемов литографии, использование транзисторов на КНИ структуре, применение силицидов в качестве областей истока/стока – это далеко не исчерпывающий перечень способов решения «проблемы субмикрона», которые подробно рассмотрены в данной работе в гл. 9.

6.4. Конструктивно-технологические особенности высокотемпературных диодов Шоттки

6.4.1. Физические основы функционирования диодов Шоттки

Когда на полупроводник наносится металл, то на границе раздела возникает потенциальный барьер переноса заряда, называемый барьером Шоттки. Такой потенциальный барьер является результатом разности работ выхода металла и полупроводника. Как показано на рис. 6.41, для полупроводника *n*-типа, если работа выхода металла φ_m больше, чем работа выхода полупроводника φ_s, то контакт металл – полупроводник выпрямляющий. Это следует из того, что когда металл и полупроводник приводятся в контакт, условие совпадения в них уровней Ферми заставляет электроны двигаться от полупроводника n-типа к металлу. В результате в приповерхностной области полупроводника образуется недостаток электронов, что приводит к загибанию уровней границ зоны проводимости. Это обусловливает возникновение контактной разности потенциалов V_{bi}, которая препятствует непрерывному потоку электронов и восстанавливает равновесие, что и приводит к образованию барьера Шоттки [76]. С другой стороны, если φ_m меньше, чем φ_s, то образуется омический контакт, так как на пути движения электронов от полупроводника к металлу нет барьера. Можно представить четыре различных типа барьерных ситуаций для случаев $\varphi_m > \varphi_s$ и $\varphi_m < \varphi_s$ как для полупроводников p-типа, так и для полупроводников *n*-типа [77].

Если на контакт металл–полупроводник не влияют никакие другие эффекты, то высоту барьера определяют как [76]:

$$\varphi_B = \varphi_m - q_x, \tag{6.1}$$

где φ_b – это высота барьера Шоттки, а q_x – электронное сродство полупроводника – разница между уровнем вакуума и верхней границей зоны проводимости, как показано на рис. 6.41.

Вольт-амперная характеристика ВАХ выпрямляющего контакта в рамках общепринятой теории термоэлектронной эмиссии имеет вид:

$$J = A^* T^2 \left[\exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT} \right) \right] \left[\exp\left(-\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right], \tag{6.2}$$

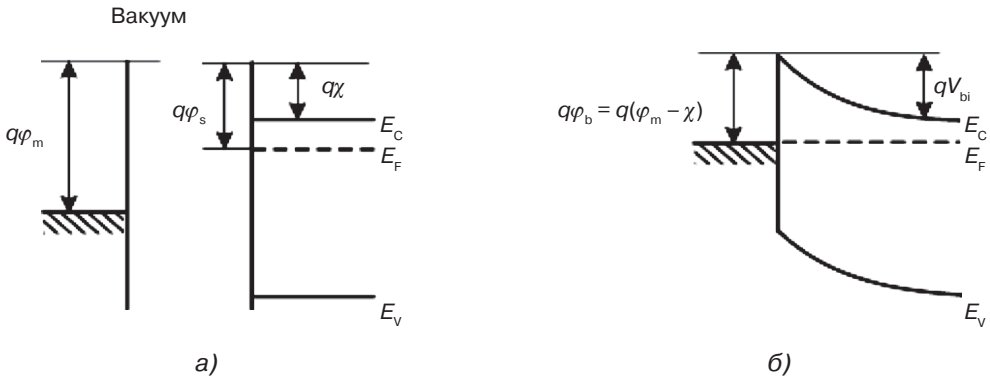


Рис. 6.41. Зонная диаграмма металла и n-полупроводника до и после приведения их в контакт. E_C, E_F E_V – зона проводимости, уровень Ферми, валентная зона, соответственно

где J – плотность тока, A^* – постоянная Ричардсона, T – абсолютная температура, n – коэффициент неидеальности диода, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, V – приложенное к структуре напряжение.

Для реальных барьеров Шоттки на высоту барьера Шоттки оказывают влияние поверхностные состояния полупроводника, дополнительное статическое понижение высоты барьера Шоттки, обусловленное наличием промежуточного слоя между металлом и полупроводником, а также силы зеркального отображения или эффект Шоттки [78].

Дополнительное статическое понижение высоты барьера $\varphi_{CT.}$ обусловлено наличием на границе раздела металл – полупроводник тонкого промежуточного слоя толщиной α, уменьшающего высоту барьера Шоттки на величину, пропорциональную максимуму электрического поля E_m в полупроводнике:

$$\Delta\varphi_{CT} = \alpha E_m. \tag{6.3}$$

Эффект Шоттки – понижение величины потенциального барьера $\Delta\varphi$, обусловленное силами зеркального отображения [77]:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\varepsilon_s}}, \tag{6.4}$$

где E – напряженность электрического поля в полупроводнике, ε_s – диэлектрическая постоянная полупроводника. Максимальная величина электрического поля в полупроводнике достигается на границе раздела с металлом и составляет:

$$E_m = \frac{2\left(V_{bi} - V - kT/q\right)}{W}, \tag{6.5}$$

где W – ширина области обеднения в полупроводнике. В свою очередь, величина W определяется выражением:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D}\left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q}\right)}, \tag{6.6}$$

где N_D – концентрация доноров в полупроводнике.

Типовая структура диода Шоттки представлена на рис. 6.42 [79]. Как правило, диод Шоттки формируют нанесением металлизации анода 5 на слаболегированный эпитаксиальный слой 2 n-типа проводимости, сформированный на сильнолегированной подложке 1 того же типа проводимости. Преимущественное использование полупроводниковых структур n-типа проводимости обусловлено их более низким удельным сопротивлением по сравнению со структурами p-типа проводимости при одних и тех же уровнях легирования. С целью исключения краевых токов утечки металлизация анода формируется в окне защитного слоя 3, по периметру которого сформировано охранное кольцо p-типа проводимости 4. Для обеспечения омического контакта к подложке и возможности монтажа структур в корпус на обратную сторону подложки наносят металлизацию катода. Эквивалентная электрическая схема диода Шоттки представлена на рис. 6.43.

Основными параметрами диодов Шоттки являются: напряжение при прямом смещении V_F, максимальное обратное напряжение V_R и обратный ток I_r. Величина обратного тока диода Шоттки определяется выражением 6.2.

Для определения величины прямого напряжения выражение 6.2 с учетом последовательного сопротивления диодной структуры может быть представлено в следующем виде [79]:

$$V_F = \varphi_{Bn} + \frac{kT}{q}\ln\left(I_F / A^{**}T^2 S\right) + I_F R_{ser}, \tag{6.7}$$

где I_F – прямой ток, S – площадь выпрямляющего контакта металл–полупроводник. В свою очередь, величина максимального обратного напряжения определяется напряжением лавинного пробоя p-n-перехода охранного кольца [78]:

$$V_R = 60\left(\frac{E_g}{1{,}1}\right)^{3/2}\left(\frac{N_D}{10^{22}}\right)^{-3/4}, \tag{6.8}$$

где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника.

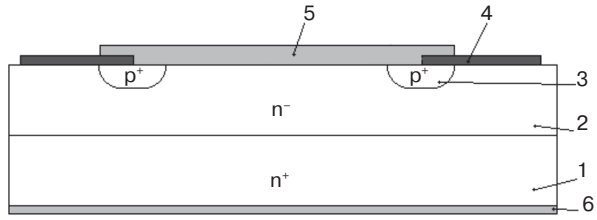


Рис. 6.42. Типовая структура диода Шоттки: 1 – подложка, 2 – эпитаксиальный слой (ЭС), 3 – охранное кольцо (ОК), 4 – защитный слой, 5 – металлизация анода, 6 – металлизация катода

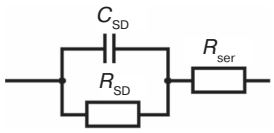


Рис. 6.43. Эквивалентная схема диода Шоттки: C_{SD} – емкость диода, R_{SD} – сопротивление контакта металл-полупроводник, R_{ser} – последовательное сопротивление, состоящее из суммарного сопротивления объема полупроводника и омического контакта [78]

Таким образом, основные параметры диодов Шоттки в соответствии с выражениями 6.2–6.4 определяются как высотой барьера Шоттки, так и конструктивно-технологическими параметрами диодной структуры: ее площадью, толщиной и удельным сопротивлением слоев, входящих в ее состав (концентрацией легирующей примеси).

6.4.2. Конструктивно-технологические особенности формирования высокотемпературных диодов Шоттки

Высокотемпературными диодами Шоттки принято считать структуры с максимальной температурой эксплуатации выше 125 °С [80]. Проблема применения данных структур заключается в характерном для диодов Шоттки высоком уровне обратных токов. Как следует из выражения (6.2), с ростом температуры уровень обратного тока диода Шоттки возрастает на несколько порядков и при температурах более 125 °С может достигать величины нескольких десятков или сотен миллиампер. Это, в свою очередь, обусловливает дополнительную мощность, рассеиваемую структурой при обратном смещении, а значит и дополнительный нагрев. Таким образом, в диодах Шоттки наблюдается положительная обратная связь по температуре, что часто является причиной теплового пробоя структур [80]. Проблема усугубляется при увеличении максимального обратного напряжения диодов Шоттки, поскольку дополнительная рассеиваемая мощность пропорциональна обратному напряжению.

Анализ выражения (6.2) показывает, что обратный ток можно уменьшить либо путем увеличения высоты барьера Шоттки, либо путем уменьшения площади диодной структуры. Поскольку площадь структуры выбирают исходя из максимально допустимой плотности тока при включенном состоянии, то увеличение высоты барьера Шоттки является единственным эффективным путем повышения температурной стабильности диодов Шоттки [79]. Как правило, для высокотемпературных диодов Шоттки применяют контакты высотой барьера более 0,71 В. Однако, как видно из (6.7), данный путь решения проблемы ведет к увеличению прямого напряжения диодов Шоттки.

Кроме того, как следует из (6.8), к аналогичным последствиям приводит увеличение максимального обратного напряжения диода Шоттки. Таким образом, для формирования эффективно работающих высокотемпературных структур диодов Шоттки необходимо обеспечить:

– минимальные обратный ток и прямое напряжение,

– минимальное прямое напряжение и максимальное обратное напряжение.

Для формирования диодов Шоттки с заданными электрофизическими параметрами необходимо определить требуемое конструктивно-технологическое исполнение диодной структуры, а также обеспечить требуемую величину барьера

Шоттки контакта металл–полупроводник. Как правило, задача обеспечения заданной высоты барьера решается выбором соответствующей контактной пары металл–полупроводник. Значения работы выхода и высоты барьера Шоттки некоторых металлов на кремнии представлены в табл. 6.1. Недостатком использования чистых металлов в качестве материала барьера Шоттки является наличие на границе раздела промежуточного слоя с высокой плотностью поверхностных состояний, приводящего к дополнительным утечкам [76]. Кроме того, некоторые металлы склонны к взаимодействию с поверхностью полупроводника с образованием химических соединений (силицидов) либо твердых растворов. Это также является причиной изменения высоты потенциального барьера, а, значит, делает электрофизические параметры диодов Шоттки нестабильными [78, 81].

Кроме чистых металлов в качестве барьера Шоттки широкое распространение нашли их силициды. К преимуществам силицидов относят их лучшую химическую стойкость. Кроме того, силициды могут быть получены путем твердофазной реакции металла с кремнием при отжиге металлических пленок, нанесенных на его поверхность. В этом случае обеспечивается лучшая чистота границы раздела, что ослабляет влияние дополнительного статического понижения высоты барьера. Значения высоты барьера Шоттки для различных силицидов приведены в табл. 6.2 [82].

Как видно из табл. 6.1, 6.2, использование чистых металлов и их силицидов дает лишь ограниченный набор значений высоты барьера Шоттки. Для расширения спектра получаемых значений высоты барьера Шоттки в настоящее время широкое распространение получили следующие конструктивно-технологические приемы:

- легирование поверхности полупроводника (метод Шеннона),
- использование параллельных контактов с различной высотой барьера Шоттки,
- использование сплавов металлов,
- использование смеси силицидов.

Таблица 6.1. Работа выхода некоторых металлов [83] и высота барьера Шоттки [1] на кремнии n-типа проводимости при температуре 300 °C

Материал контакта	Работа выхода, эВ	Высота барьера, эВ
Ag	4,3	0,78
Al	4,25	0,72
Au	4,3	0,80
Cr	4,58	0,61
Cu	4,4	0,58
Hf	3,53	0,58
Mo	4,3	0,68
Ni	4,5	0,61
Pd	4,8	0,81
Pt	5,32	0,9
Ti	3,95	0,5
W	4,54	0,67

Таблица 6.2. Значения высоты барьеров Шоттки различных силицидов на кремнии n-типа [77]

Силицид	Высота барьера, эВ
$TiSi_2$	0,60
VSi_2	0,65
$ZrSi_2$	0,55
$MoSi_2$	0,55
$TaSi_2$	0,59
WSi_2	0,65
$CoSi_2$	0,64
$NiSi_2$	0,70
$RhSi_2$	0,74
Pd_2Si	0,74
PtSi	0,87
$IrSi_3$	0,94

Метод Шеннона. Суть метода Шеннона заключается в легировании тонкого поверхностного слоя полупроводника примесями с помощью ионной имплантации [76]. Для уменьшения высоты барьера используется примесь того же типа проводимости, что и база диода, а для его увеличения – противоположного. Если поверхностный легированный слой будет достаточно тонким, то не будет происходить значительного ухудшения обратной характеристики диода Шоттки, связанного с искажением области обеднения [84]. Однако метод Шеннона характеризуется образованием значительных радиационных повреждений поверхности кремния, что приводит к ухудшению состояния границы раздела. Частично данная проблема решается легированием поверхности кремния ионами низких энергий [85].

Параллельные контакты. При параллельном включении двух контактов с различной потенциального барьера результирующая высота барьера Шоттки φ_{C0} будет определяться выражением:

$$\varphi_{C0} = -\frac{kT}{q}\ln\left\{\frac{S_L}{S}\left[\exp\left(\frac{-q\varphi_{L0}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{-q\varphi_{H0}}{kT}\right)\right] + \exp\left(\frac{-q\varphi_{H0}}{kT}\right)\right\}, \qquad (6.9)$$

где φ_{H0} – большая высота барьера Шоттки, φ_{L0} – меньшая высота барьера Шоттки, S_L – доля площади контакта с меньшей высотой барьера, определяемая содержанием соответствующего компонента в бинарном сплаве.

Простейшая конструкция диода Шоттки с параллельными контактами, границы которых находятся на поверхности эпитаксиального слоя, представлена на рис. 6.44 [86]. Для предотвращения снижения обратного напряжения из-за увеличения обратного тока на границах параллельных контактов предложена конструкция с дополнительными p-n-переходами и использованием смыкания области обеднения, изображенная на рис. 6.45 [87]. Также существуют конструкции диодов Шоттки с параллельными контактами и канавками в кремнии, причем на дне канавки располагается материал с большей высотой барьера (рис. 6.46) [88], либо вся канавка заполняется материалом с большей высотой барьера (рис. 6.47) [89].

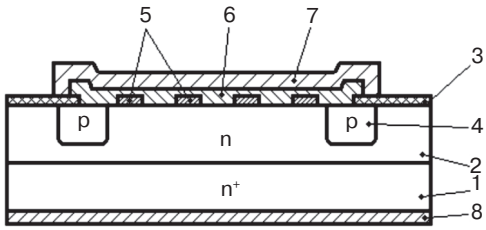


Рис. 6.44. Структура диода Шоттки с параллельными контактами: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – контакт с меньшей высотой барьера; 6 – контакт с большей высотой барьера; 7 – металлизация анода; 8 – металлизация катода

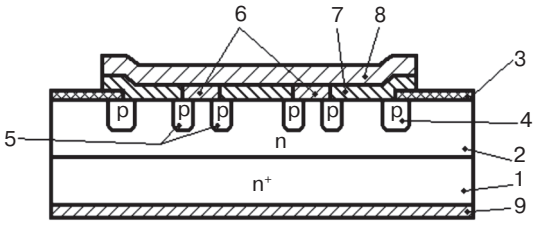


Рис. 6.45. Структура диода Шоттки с параллельными контактами и дополнительными p-n-переходами: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – дополнительные p-n-переходы; 6 – контакт с меньшей высотой барьера; 7 – контакт с большей высотой барьера; 8 – металлизация анода; 9 – металлизация катода

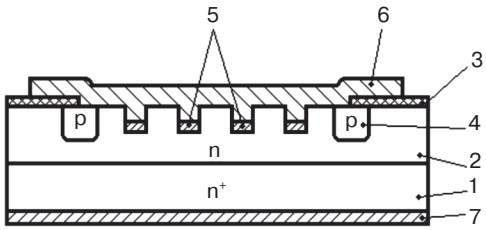


Рис. 6.46. Структура диода Шоттки с параллельными контактами и канавками в кремнии: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – контакт с большей высотой барьера; 6 – контакт с меньшей высотой барьера; 7 – металлизация катода

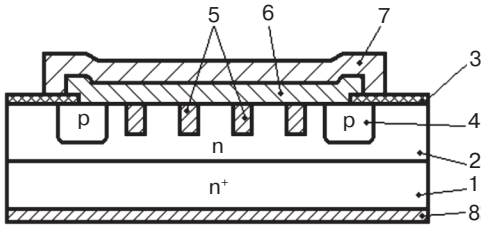


Рис. 6.47. Структура диода Шоттки с параллельными контактами и канавками в кремнии: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – контакт с большей высотой барьера; 6 – контакт с меньшей высотой барьера; 7 – металлизация анода; 8 – металлизация катода

Общим недостатком диодов Шоттки с параллельными контактами является необходимость очистки поверхности полупроводника перед нанесением второго материала контакта. Это приводит к ее загрязнению металлическими примесями первого материала контакта.

Металлические сплавы. Сплав двух металлов с разной высотой барьера, не образующих между собой интерметаллических соединений, как правило, имеет линейную зависимость высоты барьера от состава сплава [76, 90]. В табл. 6.3 приведены справочные данные о возможности образования интерметаллического соединения в двойных металлических сплавах [90].

Смеси силицидов. Аналогичным образом можно управлять высотой барьера Шоттки, формируя силициды из двойного сплава [16, 17]. При этом силициды могут формироваться отжигом пленочной структуры, полученной совместным рас-

пылением бинарного сплава и кремния [16], либо за счет твердофазной реакции бинарного сплава с кремнием ЭС при термической активации [17]. Следует отметить, что формирование слоя смеси силицидов заданного состава представляет собой достаточно сложную технологическую задачу, особенно при необходимости его варьирования. Частично данная проблема решается путем послойного нанесения силицидообразующих металлов с соотношением толщин, соответствующим требуемому составу силицида, с последующим формированием силицида путем твердофазной реакции с кремнием эпитаксиального слоя при отжиге структуры [94, 95]. Кроме того, для некоторых материалов возможно управление преимущественным содержанием требуемой фазы силицида путем ступенчатого отжига структуры [96].

Таблица 6.3. Образование интерметаллических соединений в бинарных металлических сплавах

	Sc	Er	Y	Ti	Mn	Zr	V	Cr	Co	Ni	Ta	Mo	Pt	
Sc		•	•	•	•	•	•	•	×	×	•	•	•	Sc
Er			•	•	×	•	•	?	×	×	•	•	×	Er
Y				•	×	•	•	×	×	×	•	•	×	Y
Ti					×	•	•	•	×	•	•	•	×	Ti
Mn						×	•	×	•	×	•	×	×	Mn
Zr							×	×	×	×	•	×	×	Zr
V								•	×	×	•	•	×	V
Cr									×	•	×	•	×	Cr
Co										×	×	×	×	Co
Ni											×	×	•	Ni
Ta												•	×	Ta
Mo													×	Mo
× – не образуют между собой интерметаллических соединений								• – образуют между собой интерметаллические соединения						

6.4.3. Методы обеспечения минимального обратного тока и минимального прямого напряжения

Анализ выражений (6.2, 6.3, 6.7) показывает, что данная задача может быть решена путем уменьшения дополнительного статического понижения высоты барьера. Из выражения (6.3) видно, что для этого необходимо уменьшать коэффициент α, а также величину максимального электрического поля в контакте металл–полупроводник E_m. На величину коэффициента α оказывает влияние способ формирования контактов. Для этого должна обеспечиваться чистота реактивов, а само травление должно обеспечивать однородность свойств поверхности, а также не должно быть избирательным. При этом рельеф травленой поверхности должен быть минимальным. Требования к чистоте специальных технологических сред изложены в [96]. Перед нанесением контактного слоя, как правило, используется жидкостное химическое травление, поскольку ионное и плазмохимическое травление контактов приводит к образованию дефектов вблизи поверхности кремния. Как правило, используются травители на основе плавиковой кислоты: $HF+H_2O$, $HF+NH_4F+H_2O$, $HF+H_2O+HNO_3+CH_3COOH$ для удаления слоя естественного окисла кремния и удаления дефектного поверхностного слоя непо-

средственно перед нанесением контактного слоя. В работе [22] перед нанесением контактного слоя предлагается обработка в растворе $H_2SO_4+H_2O_2+H_2O$ для создания более шероховатой поверхности.

Эффективным решением проблемы уменьшения $\Delta\varphi_{cm}$ являются также конструктивные приемы, позволяющие управлять величиной E_m. В их основе лежит зависимость величины E_m от глубины обедненного слоя W, описываемая выражением (6.5). Основные конструктивно-технологические приемы решения указанной задачи представлены в табл. 6.4 [88–105].

Таблица 6.4. Конструктивно-технологические способы формирования диодов Шоттки с уменьшенным обратным током и прямым напряжением путем увеличения ширины области обеднения

№ п/п	Особенности конструкции	Особенности технологии	Рисунок	Источник
1	Под металлизацией анода сформирована совокупность областей p-типа	Области p-типа формируются одновременно с ОК	6.48	[23, 24]
2	Двухслойная эпитаксия, совокупность областей p-типа под металлизацией анода	Второй ЭС формируется поверх ОК, области p-типа формируются отдельной литографией	6.49	[25]
3	Двухслойная эпитаксия, совокупность скрытых слоев p-типа	Скрытые слои формируются отдельной литографией	6.50	[26]
4	Двухслойная эпитаксия, совокупность областей p-типа в виде скрытых слоев и под металлизацией анода	Для формирования областей p-типа под металлизацией анода используется отдельная литография	6.51	[27]
5	Трехслойная эпитаксия, совокупность областей p-типа в виде скрытых слоев и под металлизацией анода	Скрытые слои формируются и в первом, и во втором ЭС	6.52	[28]
6	Многослойная эпитаксия со скрытыми слоями p-типа в виде колонн	Скрытые слои p-типа формируются в каждом ЭС, поверх ОК наносится ЭС с уменьшенной концентрацией доноров	6.53	[29, 30]

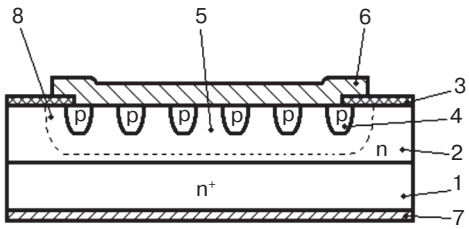


Рис. 6.48. Структура диода Шоттки с областями p-типа: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – области p-типа; 5 – область обеднения; 6 –металлизация анода; 7 – металлизация катода; 8 – область обеднения

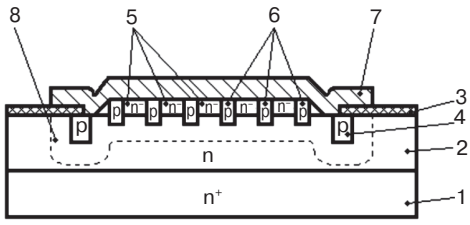


Рис. 6.49. Структура диода Шоттки с двухслойной эпитаксией и областями p-типа: 1 – подложка; 2 – первый эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – второй эпитаксиальный слой; 6 – области p-типа; 7 – металлизация анода; 8 – область обеднения

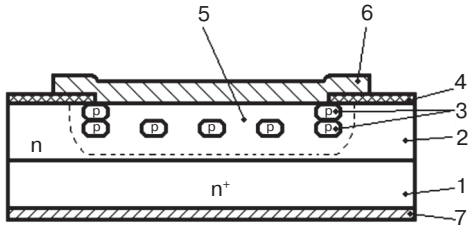


Рис. 6.50. Структура диода Шоттки со скрытыми слоями p-типа: 1 – подложка; 2 – многослойная база; 3 – скрытые слои p-типа; 4 – слой SiO_2; 5 –область обеднения; 6 – металлизация анода; 7 – металлизация катода

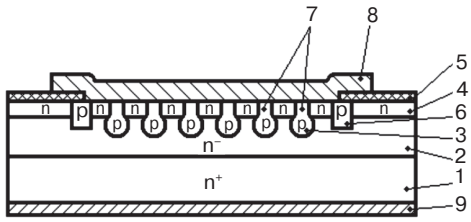


Рис. 6.51. Структура диода Шоттки с двухслойной эпитаксией, областями p-типа и скрытыми слоями p-типа: 1 – подложка; 2 – первый эпитаксиальный слой; 3 – скрытые слои p-типа; 4 – второй эпитаксиальный слой; 5 – слой SiO_2; 6 – охранное кольцо; 7 – области p-типа; 8 – металлизация анода; 9 – металлизация катода

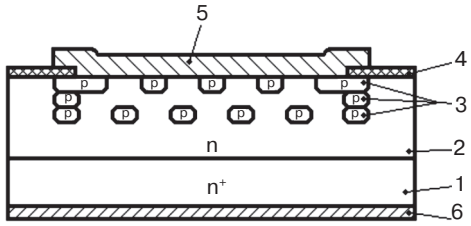
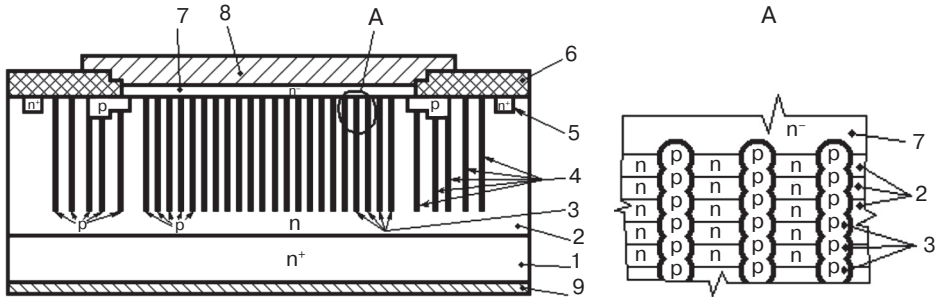


Рис. 6.52. Структура диода Шоттки с трехслойной эпитаксией, скрытыми слоями и областями p-типа: 1 – подложка; 2 – многослойная база; 3 – скрытые слои и области p-типа; 4 – слой SiO_2; 5 – металлизация анода; 6 – металлизация катода



а) *б)*

Рис. 6.53. Структура диода Шоттки с многослойной эпитаксией и скрытыми слоями p-типа в виде колонн: поперечное сечение (*а*); увеличенное изображение фрагмента А (*б*): 1 – подложка; 2 – многослойная база n-типа; 3 – скрытые слои p-типа в виде колонн; 4 – полевые охранные кольца p-типа; 5 – полевое ограничительное кольцо n-типа; 6 – SiO_2; 7 – верхний n^--слой многослойной базы; 8 – металлизация анода; 9 – металлизация катода

Другим способом разрешения компромисса между требованиями минимального обратного тока и минимального обратного напряжения является уменьшение прямого напряжения без изменения площади диодной структуры. Данная задача решается, как правило, увеличением удельной площади перехода металл–кремний, а также уменьшением последовательного сопротивления ЭС. Основ-

ные конструктивно-технологические приемы решения данной задачи перечислены в табл. 6.5 [106–114].

6.4.4. Методы обеспечения минимального прямого напряжения и максимального обратного напряжения

Согласно выражениям (6.7) и (6.8) основная проблема решения данной задачи заключается в увеличении последовательного сопротивления диодной структуры при использовании полупроводников с малой концентрацией легирующей примеси, обеспечивающей высокие уровни обратных напряжений. Поэтому базовая конструкция диодов Шоттки представляет собой двухслойную структуру, содержащую сильнолегированную подложку (1) со сформированным на ее поверхности относительно тонким слаболегированным эпитаксиальным слоем, выполняющим функцию базы диода (2) (рис. 6.54). Для исключения краевых токов утечки и снижения напряжения пробоя по периметру металлизации анода (5) формируют охранное кольцо p-типа проводимости с напряжением пробоя меньшим, чем у перехода металл–полупроводник [115, 116].

Нахождение компромисса между максимальным обратным напряжением и минимальным прямым напряжением сводится к уменьшению последовательного сопротивления диодной структуры без ущерба для обратного напряжения путем уменьшения толщины эпитаксиального слоя, переменного профиля легирования эпитаксиального слоя, использования многослойных эпитаксиальных структур [117–129]. Конструктивно-технологические особенности твердотельных структур данных диодов Шоттки приведены в табл. 6.5.

Особого внимания заслуживают конструктивно-технологические методы обеспечения максимального напряжения в диодных структурах с обратным напряжением более 100 В. Поскольку слои диоксида кремния, сформированные термическим окислением кремния, характеризуются зарядовыми состояниями, то их использование в высоковольтных структурах малоэффективно. В данном случае задача повышения обратного напряжения диодов Шоттки сводится к повышению напряжения пробоя охранного кольца и решается так же, как и для высоковольтных структур на основе p-n-переходов путем введения дополнительных потенциальных колец, ограничительного кольца, резистивных полевых обкладок, многослойных пассивирующих структур [130–134]. Основные примеры конструктивно-технологических решений приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.5. Конструктивно-технологические особенности диодов Шоттки с уменьшенным прямым напряжением и площадью структуры

№ п/п	Особенности конструкции	Особенности технологии	Рисунок	Источник
1	Под металлизацией анода сформирована совокупность канавок	Канавки формируются локальным химическим травлением кремния	6.55	[31]
2		Канавки формируются локальным окислением кремния через маску Si_3N_4 с последующим удалением SiO_2 и Si_3N_4	6.56	[32]
3		П-образные канавки формируются АПХТ кремния	6.57	[33]

Таблица 6.5 (окончание)

№ п/п	Особенности конструкции	Особенности технологии	Рисунок	Источник
4	Под металлизацией анода сформирована совокупность канавок, канавки легированы примесью противоположного типа	U-образные канавки легируются диффузией по всей поверхности	6.58	[34, 35]
5		На поверхности ЭС формируется совокупность областей p-типа, формируются П-образные канавки, дно канавок легируется ионной имплантацией	6.59	[36]
6		Дно П-образных канавок легируется ионной имплантацией	6.60	[37]
7	Двухслойная эпитаксия, верхний ЭС отличается более высокой концентрацией доноров, под металлизацией анода сформирована совокупность канавок	П-образные канавки формируются АПХТ кремния	6.61	[38]
8		Дно П-образных канавок легируется ионной имплан тацией	6.62	[39]

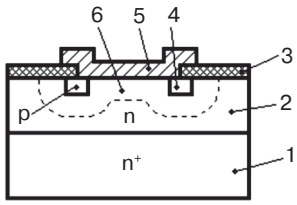


Рис. 6.54. Типовая структура диода Шоттки с охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо p-типа проводимости; 5 – металлизация анода; 6 – область обеднения

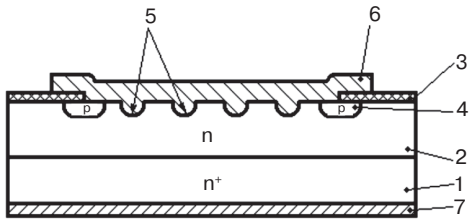


Рис. 6.55. Структура диода Шоттки с увеличенной площадью перехода металл–полупроводник: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – углубления в кремнии; 6 – металлизация анода; 7 –металлизация катода

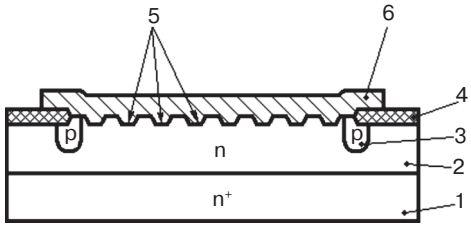


Рис. 6.56. Структура диода Шоттки с увеличенной площадью перехода металл–полупроводник: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – охранное кольцо; 4 – слой SiO_2; 5 – углубление в кремнии; 6 – металлизация анода

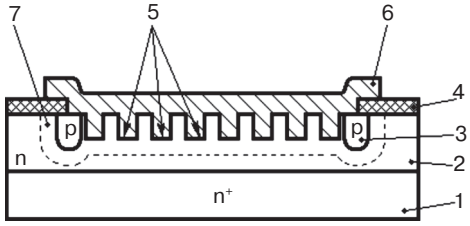


Рис. 6.57. Структура диода Шоттки с канавками в кремнии: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – охранное кольцо; 4 – слой SiO_2; 5 – канавки в кремнии; 6 – металлизация анода; 7 – область обеднения

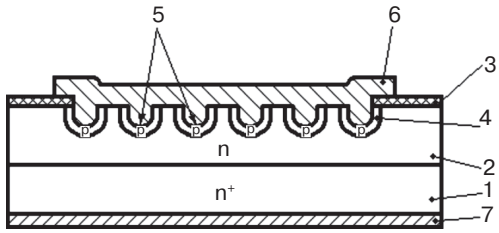


Рис. 6.58. Структура диода Шоттки с канавками в кремнии, легированными акцепторной примесью: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – области p-типа; 5 – канавки в кремнии; 6 – металлизация анода; 7 – металлизация катода

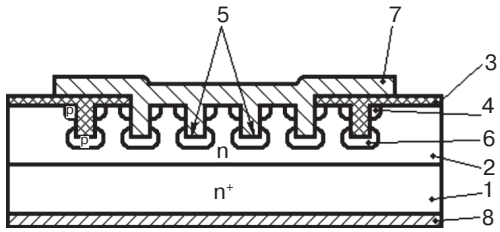


Рис. 6.59. Структура диода Шоттки с канавками в кремнии, локально легированными акцепторной примесью: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – поверхностные области p-типа; 5 – канавки в кремнии; 6 – области p-типа на дне канавок; 7 – металлизация анода; 8 – металлизация катода

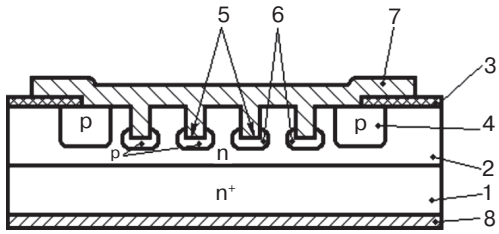


Рис. 6.60. Структура диода Шоттки с легированным дном канавок в кремнии: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – канавки в кремнии; 6 – области p-типа на дне канавок; 7 – металлизация анода; 8 – металлизация катода

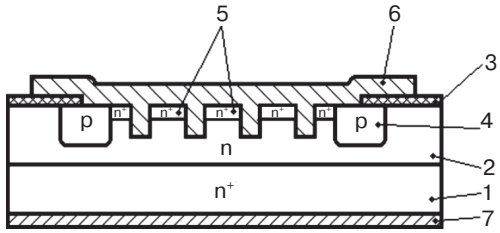


Рис. 6.61. Структура диода Шоттки с канавками в кремнии и подлегированным эпитаксиальным слоем: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – n^+-области; 6 – металлизация анода; 7 – металлизация катода

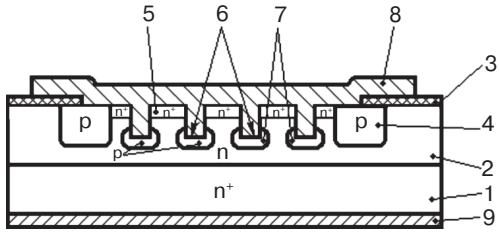


Рис. 6.62. Структура диода Шоттки с легированным дном канавок в кремнии и подлегированным эпитаксиальным слоем: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – n^+-области; 6 – канавки в кремнии; 7 – области p-типа на дне канавок; 8 – металлизация анода; 9 – металлизация катода

Таблица 6.6. Конструктивно-технологические особенности диодов Шоттки с уменьшенным прямым напряжением и увеличенным максимальным обратным напряжением

№ п/п	Способ реализации	Особенности конструкции	Особенности технологии	Рисунок	Источник
1	Увеличение напряжения пробоя охранного кольца	Составное ОК	ОК формируется в два этапа	6.63	[42]
2		ОК с плавным p-n-переходом через слой поликремния	ОК легируется	6.64	[43, 44]
3	Уменьшение толщины эпитаксиального слоя (ЭС)	Углубление в эпитаксиальном слое на глубину p-n-перехода ОК	Сложность планаризации рельефа	6.65	[45]
4	Неоднородный профиль легирования ЭС	Сильнолегированный скрытый слой на границе с подложкой	Требуется дополнительная литография	6.66	[46, 47]
5		Уменьшение концентрации доноров приповерхностного слоя	Легирование поверхности примесью противоположного типа	6.67	[48]
6			Легирование донорами из вспомогательного слоя поликремния		[49]
7			Управление концентрацией доноров при нанесении ЭС	6.68	[50]
8	Многослойная эпитаксиальная структура	Формирование второго ЭС поверх первого	Аналогично п. 7	6.68	[51]
9		Второй ЭС сформирован поверх ОК	Второй ЭС наносится молекулярно-лучевой эпитаксией	6.69	[52]
10		В первом ЭС сформирован скрытый слой	Требуется дополнительная литография	6.70	[53, 54]

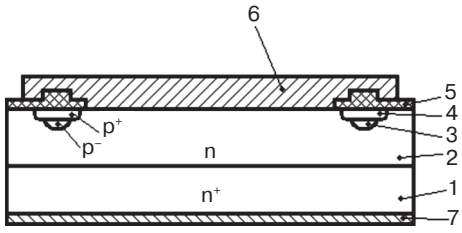


Рис. 6.63. Структура диода Шоттки с составным охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – нижняя часть охранного кольца; 4 – поверхностная часть охранного кольца; 5 – слой SiO_2, 6 – металлизация анода; 7 – металлизация катода

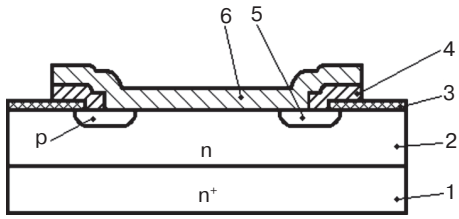


Рис. 6.64. Структура диода Шоттки с охранным кольцом, легированным через слой поликремния: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – слой поликремния; 5 – охранное кольцо; 6 – металлизация анода

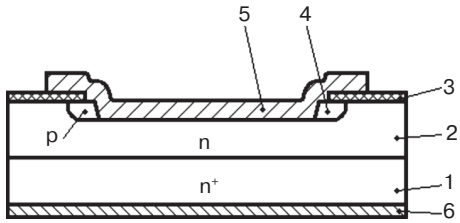


Рис. 6.65. Структура диода Шоттки с углублением в эпитаксиальном слое: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – металлизация анода; 6 – металлизация катода

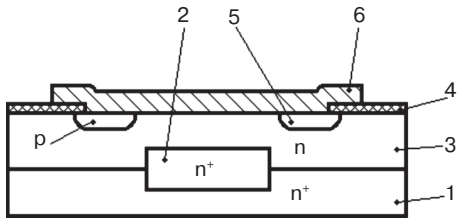


Рис. 6.66. Структура диода Шоттки с n^+-скрытым слоем: 1 – подложка; 2 – скрытый слой; 3 – эпитаксиальный слой; 4 – слой SiO_2; 5 – охранное кольцо; 6 – металлизация анода

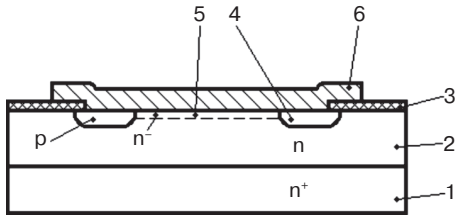


Рис. 6.67. Структура диода Шоттки с уменьшенной концентрацией примеси на поверхности эпитаксиального слоя: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – поверхностная область эпитаксиального слоя; 6 – металлизация анода

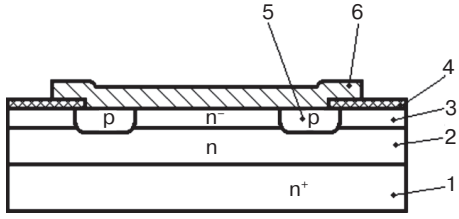


Рис. 6.68. Структура диода Шоттки с неоднородным профилем легирования эпитаксиального слоя: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – поверхностная область эпитаксиального слоя; 4 – слой SiO_2; 5 – охранное кольцо; 6 – металлизация анода

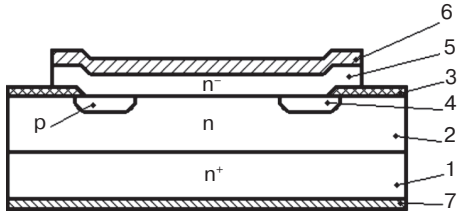


Рис. 6.69. Структура диода Шоттки с двухслойной эпитаксией: 1 – подложка; 2 – первый эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – второй эпитаксиальный слой; 6 – металлизация анода; 7 – металлизация катода

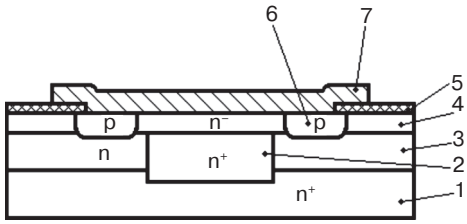


Рис. 6.70. Структура диода Шоттки с двухслойной эпитаксией и скрытым высоколегированным слоем: 1 – подложка; 2 – скрытый слой; 3 – первый эпитаксиальный слой; 4 – второй эпитаксиальный слой; 5 – слой SiO_2; 6 – охранное кольцо; 7 – металлизация анода

6.5. Конструктивно-технологические особенности формирования структур диодов Шоттки с повышенной устойчивостью к разрядам статического электричества

Если два образца материала соприкасаются друг с другом, причем один из них является изолятором, то при трении друг об друга на их поверхности могут накапливаться заряды, в результате чего возникает напряжение, возможно, весьма высокое. Такие заряды, полученные путем переноса электронов с одной поверхности на другую, обладающую большим сродством с электронами, имеют величину, зависящую от размеров, характера и энергетического состояния соприкасающихся поверхностей, а также от энергии (обычно механической), прилагаемой к этим поверхностям. Заряды такого типа называют электростатическими зарядами (ЭСЗ), которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Поляризация этих зарядов определяется плотностью электронов для каждой пары материалов. При соприкосновении двух материалов с разным уровнем ЭСЗ и возникновении проводящего пути между ними под воздействием возникающей разности электростатических потенциалов происходит стекание заряда одного знака с одного материала на другой [135].

Таким образом, разряд статического электричества (РСЭ) – это импульсный перенос электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами при непосредственном контакте или при сближении их на некоторое достаточно маленькое расстояние [136]. РСЭ могут возникать в результате контакта человеческого тела с радиоэлектронным устройством или его компонентами, а также при механическом воздействии на компоненты частей оборудования, при возникновении РСЭ в самом работающем устройстве, при коммутации устройства с кабелем [137, 138].

Повреждения, вызываемые РСЭ, можно разделить на две категории, определяемые по избытку потребления мощности или по наличию избыточного градиента напряжения [135].

В первом случае ЭСР вызывает прохождение разрядного тока, и этот ток (его действие может быть усилено за счет неоднородностей, или дефектности структуры, возникающими при изготовлении) обычно старается проходить по наиболее выгодному для него пути. При этом происходит существенное выделение теплоты, что может вызвать выход из строя диода Шоттки. Данное явление называется тепловым пробоем.

Во втором случае значительный градиент напряжений может вызвать пробой даже достаточно толстого слоя окисла, что создает вероятность короткого замыкания и утечки между изолированными областями.

Все виды повреждений диодов Шоттки, вызванных действием РСЭ, можно разделить на следующие типы [139]:

– пробой оксидных слоев;
– выгорание металлических и поликремниевых межсоединений;
– инжекция «горячих носителей» в оксидные слои;
– выгорание p-n-переходов и барьеров Шоттки, когда сквозь них формируются проводящие каналы.

Для диодов Шоттки наиболее характерным является последний механизм отказа, приводящий к деградации электрических свойств барьера Шоттки, проявляемой, главным образом, увеличением его обратного тока утечки и снижением пробивного напряжения.

Для структуры, приведенной на рис. 6.54, наибольшая напряженность электрического поля наблюдается на краях и углах контакта Шоттки [140]. Поэтому именно в этих местах наиболее вероятно возникновение лавинного пробоя – лавинообразного процесса генерации носителей заряда в полупроводнике при воздействии на него сильного электрического поля. В результате сквозь область с наиболее высокой концентрацией электрического поля начинает протекать электрический ток (поток электронов, направленный от высоколегированной области к краю контакта Шоттки вдоль силовых линий электрического поля). С другой стороны, электрическое поле концентрируется и на структурных дефектах на границе раздела металл–полупроводник, которые также могут стать причиной возникновения лавинного пробоя, например, в центральной части барьера Шоттки. Протекание электрического тока вызывает локальный нагрев полупроводника, а локальный нагрев проводника приводит к уменьшению его электрического сопротивления по пути протекания электрического тока. Этот своеобразная положительная обратная связь приводит к эффекту шнурования электрического тока [135].

Если во время скоротечного лавинного пробоя (длительность РСЭ 1–100 нс) температура полупроводника в токовом шнуре не достигает его температуры плавления, то после прекращения РСЭ токовый шнур остывает, и барьер Шоттки сохраняет свои электрические характеристики. Если же происходит плавление полупроводника в области токового шнура, то первичный лавинный пробой барьера Шоттки переходит во вторичный тепловой пробой. При этом барьер Шоттки либо выходит из строя, либо существенно увеличивается его обратный ток утечки.

Методы защиты диодов Шоттки от воздействия РСЭ принято делить на две группы: организационно-технические и конструктивно-технологические. Первые реализуются на этапе изготовления диодов Шоттки. Они направлены на предотвращение возникновения РСЭ и ускорение стекания электрических зарядов. Пути утечки РСЭ возможны через коронный разряд, объемную и поверхностную проводимость материалов [135].

Конструктивно-технологические методы, направленные на повышение устойчивости самих диодов Шоттки к воздействию РСЭ, можно условно разделить на три группы:

– шунтирование барьера контакта металл–полупроводник интегрированным p-n-переходом с меньшим обратным пробивным напряжением [116, 137, 140–142];

– уменьшение напряженности электрического поля, индуцированного РСЭ, в критических местах структуры [137, 140, 143–145];
– уменьшение проводимости полупроводникового материала при обратном смещении диода Шоттки [146, 147].

Основные конструктивно-технологические решения для вышеуказанных методов приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7. Конструктивно-технологические методы повышения стойкости диодов Шоттки к воздействию РСЭ

№ п/п	Способ реализации	Особенности конструкции	Особенности технологии	Рисунок	Источник
1	Шунтирование интегрированным ограничительным диодом	По периметру контакта металл–кремний сформировано охранное кольцо	Охранное кольцо формируется методом диффузии бора	6.71	41
2		Охранное кольцо выполнено распределенным, представляет собой внешнее P^+ кольцо и сеть из множества P^+ областей (ячеек)	Все элементы распределенного охранного кольца формируются в едином технологическом цикле	6.72	66
3		В тренч-МОП ДШ ограничительный диод дистанцирован от барьера Шоттки	Внутри охранного кольца формируется совокупность канавок с окисленными стенками. Канавки заполняются металлом	6.73	67
4	Уменьшение напряженности электрического поля, индуцированного РСЭ, путем использования полевой обкладки	Над P^+ охранным кольцом сформирован полевой окисел, барьерный металл перекрывает полевой окисел	Толщина полевого окисла более 0,5 мкм, металл полевой обкладки должен иметь хорошую адгезию к SiO_2	6.74	69
5		В качестве полевого окисла сформирован слой оксида титана с поверхностным сопротивлением 50–500 МОм/кв	Слой оксида титана формируется окислением титана через маску алюминия	6.75	68
6		Поверх полевой обкладки нанесен слой SIPOS с поверхностным сопротивлением 50 МОм/кв	Слой SIPOS осаждается из газовой фазы	6.76	70
7	Уменьшение проводимости кремния при обратном смещении диода Шоттки	В диоде Шоттки с распределенным охранным кольцом само охранное кольцо легируется сильнее, чем ячейки	Требуется дополнительная фотолитография	6.77	71
8		В N эпитаксиальном слое сформирована область p-типа (анод) с поверхностным каналом n-типа. При обратном смещении, происходит инверсия N канала, и обратное напряжение прикладывается к p-n-переходу	На поверхности структуры выращивают затворный окисел толщиной 50 нм, выпрямляющий контакт реализуется путем формирования силицида через окна в затворном окисле	6.78	72

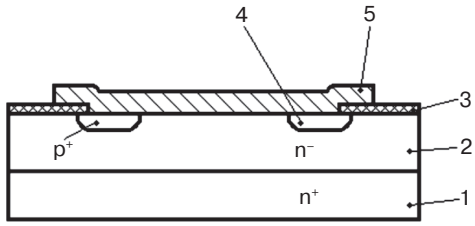


Рис. 6.71. Структура диода Шоттки с охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – охранное кольцо; 5 – металлизация анода

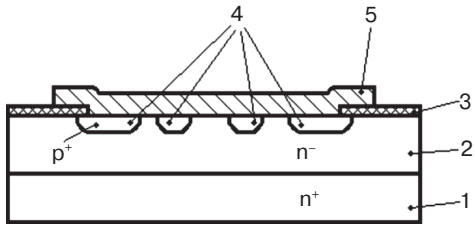


Рис. 6.72. Структура диода Шоттки с распределенным охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – распределенное охранное кольцо; 5 – металлизация анода

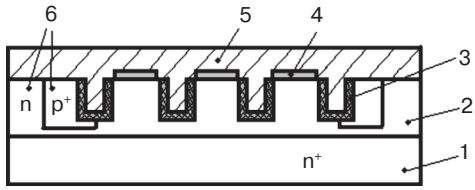


Рис. 6.73. Структура тренч-МОП диода Шоттки с ограничительным диодом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – барьерный металл; 5 – металлизация анода; 6 – ограничительный диод

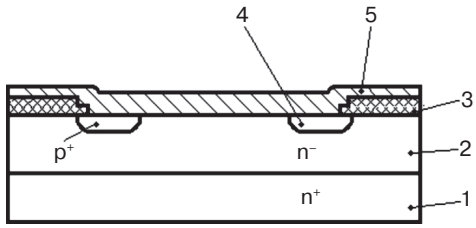


Рис. 6.74. Структура диода Шоттки с полевым окислом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – полевой окисел; 4 – охранное кольцо; 5 – металлизация анода

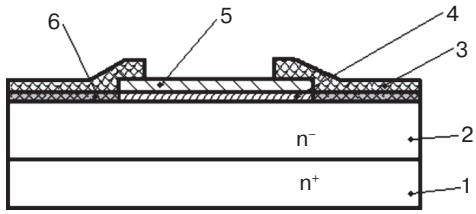


Рис. 6.75. Структура диода Шоттки с полевой обкладкой из оксида титана: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – слой Ti; 5 – металлизация анода; 6 – слой оксида титана

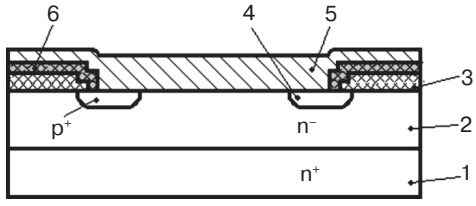


Рис. 6.76. Структура диода Шоттки с полевым окислом и слоем SIPOS: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – полевой окисел; 4 – охранное кольцо; 5 – металлизация анода; 6 – слой SIPOS

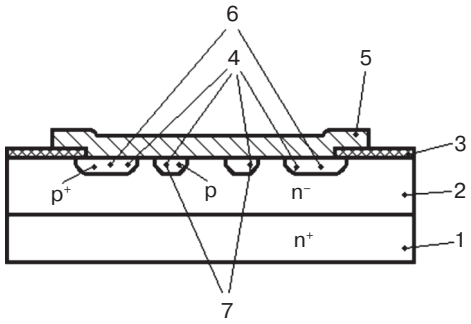


Рис. 6.77. Структура диода Шоттки с распределенным охранным кольцом и слаболегированными ячейками: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – слой SiO_2; 4 – распределенное охранное кольцо; 5 – металлизация анода; 6 – сильно легированное внешнее охранное кольцо; 7 – слаболегированные ячейки

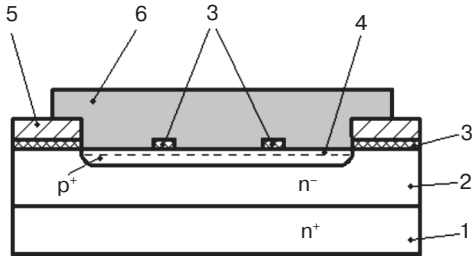


Рис. 6.78. Структура диода Шоттки с изолированным затвором: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – затворный оксид; 4 – n-канал; 5 – слой SiO_2; 6 – металлизация анода

Таким образом, можно сформулировать некоторые общие выводы на основе материалов разд. 6.4 и 6.5.

Проведен анализ современного состояния проблемы формирования высокотемпературных диодов Шоттки, устойчивых к воздействию РСЭ. Рассмотрены основные конструктивно-технологические приемы обеспечения заданных электрофизических параметров и устойчивости диодов Шоттки к воздействию РСЭ

Обеспечение температурной устойчивости диодов Шоттки входит в противоречие с требованием низкого прямого напряжения. Для решения данного противоречия необходимо выполнить математическое моделирование электрических параметров диодов Шоттки с учетом температуры окружающей среды, с целью определения минимальной высоты барьера Шоттки, гарантирующей работу структуры в заданном температурном диапазоне.

Для обеспечения устойчивости диодов Шоттки к РСЭ целесообразно использовать конструкцию с распределенным охранным кольцом. При этом необходимо учитывать влияние его конструктивно-технологических параметров на степень устойчивости к РСЭ.

Для обеспечения оптимальных параметров диодов Шоттки необходимо в каждом конкретном случае проводить физико-топологическое моделирование электрических параметров диодов Шоттки с распределенным охранным кольцом.

Литература к главе 6

1. Thompson S., Alavi M., Hussein M., Jacob P., Kenyon C., Moon P., Prince M., SivakumarS., Tyagi S., Bohr M. 130nm logic technology featuring 60nm transistors, high-*k* dielectrics, and Cu interconnects. Intel Technology Journal. 2002. Vol. 6. No 2. P. 5–13.

2. Thompson S., Packan P., Bhor M. MOS scaling: Transistor challenges for the 21st century. Intel Tech. J. 1998. Vol. Q3. P. 1–19.
3. Wilson R. Executive Editor of EDN, 10/22/2007.
4. International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2007. Overall Roadmap Technology Characteristics, 01_ORTC_JP.pdf, 57 pp.
5. The Lives and Death of Moore's Law by Ilkka Tuomi. www/issues/ issue7_11/tuomi/ index.html
6. Chau R., et al., in Proceedings of Device Research Conference, p. 123, June 2003.
7. Chau R., et al., in Extended Abstract of International Workshop on Gate Insulator. 2003. P. 124
8. Chau R., et al., in Proceedings of AVS 5th International Conference on Microelectronics and Interfaces. 2004. P. 3
9. Chau R., et al., IEEE Electron Device Letters, June 2004.
10. Ghani T., et al., IEDM Tech. Dig. 2003. P. 978.
11. Thompson S., et al., IEEE Electron Device Letters. Vol. 25. 2004. P. 191,
12. Datta S., et al., IEDM Tech. Dig. 2003. P. 653.
13. Jin B., et al., to be presented in SiGe: Materials, Processing, and Devices at the ECS Meeting in Honolulu, Hawaii in Oct. 2004.
14. Chau R., et al., in Proceedings Int. Conf. on Solid State Devices & Materials, Nagoya, Japan. 2002. P. 68.
15. Doyle B., et al., VLSI Symp. Tech. Dig. 2003. P. 133.
16. Radosavljeviж M., et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 83. 2003. P. 2435.
17. Javey A., et al., IEDM Tech. Dig. 2003. P. 741.
18. Lauhon L.J., et al., Nature. Vol. 420. 2002. P. 57.
19. Cui Y., et al. Nano Lett. Vol. 3. 2003. P. 149.
20. Ashley T., et al., IEDM Tech Digest. 1997. P. 751.
21. Royter Y., et al., IEDM Tech. Digest. 2003. P. 731.
22. Chau R., in Proceedings of 4th IEEE Conference on Nanotechnology, Munich, Germany, Aug. 2004.
23. Thompson S., et al., IEDM Tech Digest. 2002. P. 61
24. Rim K., et al., VLSI Symp. Tech. Dig. 2002. P. 98.
25. Rim K., et al., IEDM Tech Digest. 1995. P. 517.
26. Chau, et R. al., Physica E, Low-dimensional Systems and Nanostructures. Vol. 19. 2003. P. 1.
27. Chau R., et al., IEDM Tech. Digest. 2001. P. 621.
28. Lindert N., et al., IEEE Electron Devices Letters. Vol. 22. 2001. P. 487.
29. Chau R., et al., IEDM Tech. Digest. 2000. P. 45.
30. http://www.itrs.net/reports.html
31. International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2007. Executive Summary. 102 p.
32. International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2007. Design and System Drivers, 02_DSD_JP.pdf. 43 p.
33. International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2007. Radio Frequency and Analog/Mixed Signal Technologies for Wireless Communication, 05_Wireless_JP.pdf. 84 p.
34. International Technology Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association. 2007, Interconnects, 10_Interconnects_JP.pdf. 45 p.
35. www.intel.com/pressroom
36. blogs.intel.com

37. http://news.ferra.ru/hard/2009/07/25/89095/
38. http://www.amd.com/uk/Pages/AMDHomePage.aspx
39. http://www.oszone.net/9831/AMD
40. Денисенко В.В. Особенности субмикронных МОП-транзисторов. http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200207/4.html
41. Денисенко В.В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. http://kit-e.ru/articles/cad.php
42. Денисенко В.В. Точность и достоверность моделирования МОП-транзисторов СБИС / 3-я Всероссийская научно-техническая конференция. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем, МЭС-2008, 6–10 октября 2008 г. Москва, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН.
43. Brand A., Haranahalli A., Hsieh N., Lin Y.C., Sery G., Stenton N., Woo B.J. Intel's 0.25 Micron, 2.0Volts Logic Process Technology // Intel Technology Journal. Q3'98. P. 1–9.
44. Momose H.S., Ono M., Yoshitomi T., Ohguro T., Nakamura S., Saito M., Iwai H. 1.5 nm direct-tunneling gate oxide Si MOSFET's // IEEE Trans. on Electron Devices. Vol. 43. Aug. 1996. № 8. P. 1233–1242.
45. VanDerVoorn P., Gan D., Krusius P. CMOS Shallow-Trench-Isolation to 50-nm Channel Widths // IEEE Trans. on Electron Devices. Vol. 47. June 2000. № 6. P. 1175–1182.
46. Yeh W.-K., Chou J.-W. Optimum halo structure for Sub-0.1 mm CMOSFETs // IEEE Trans. ED. Vol. 48. Oct. 2001. № 10. P. 2357–2362.
47. Shin H., Lee S. An 0.1-m Asymmetric Halo by Large-Angle-Tilt Implant (AHLATI) MOSFET for High Performance and Reliability // Ieee Transactions On Electron Devices. April 1999. Vol. 46. № 4. P. 820–822.
48. Pindl S., Berthold J., Huttner T., Reif S., Schumann D., Philipsborn H. A 130-nm channel length partially depleted SOI CMOS-technology // IEEE Trans ED. 1999. Vol. 46. № 7. P. 1562–1566.
49. De I., Osburn C. M. Impact of Super-Steep-Retrograde Channel Doping Profiles on the Performance of Scaled Devices. IEEE Transactions On Electron Devices. August 1999. Vol. 46. № 8. P. 1711–1717.
50. Momose H.S., Ohguro T., Morifuji E., Sugaya H., Nakamura S., Iwai H. Ultrathin Gate oxide CMOS with nondoped selective epitaxial Si channel layer.IEEE Trans. ED. 2001. Vol. 48. № 6. P. 1136–1144.
51. Uchino T., Miyauchi A., Shiba T. MOSFETs with ultrashallow junction and minimum drain area formed by usin solid-phase diffusion from SiGe. IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. Vol. 48. № 7. P. 1406–1411.
52. Takahashi M., Ohno T., Sakakibara Y., Takayama K. Fully depleted 20-nm SOI CMOSFETs with W-Clad Gate/Source/Drain layers. IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. Vol. 48. No 7. P. 1380–1385.
53. Jurczak M., Skotnicki T., Paoli M., Tormen B., Martins J., Rogolini J.L., Dutartre D., Ribot P., Leneble D., Pantel R., Monfray S. Silicon-on-nothing (SON) – an innovative process for advanced CMOS. IEEE Trans ED. Vol. 47. No 11. P. 2179–2187.
54. Hisamoto D., Kaga T., Kawamoto Y., Takeda E. A fully depletad lean-channel transistor (DELTA) – a novel vertical ultrathin SOI MOSFET. IEEE Electron Device Letters. 1990. Vol. 11. № 1. P. 36–38.
55. Huang X., Lee W.-C., Kuo C., Hisamoto D., Chang L., Kedzierski J., Anderson E., Takeuchi H., Choi Y.-K., Asano K., Subramanian V., King T.-J., Bokor J. and Hu C. Sub 50-nm FinFET: PMOS. in IEDM Tech. Dig. 1999. P. 67–70.
56. Takato H., Sunouch K., Okabe N., Nitayama A., Hieda K., Horiguchi F., Masuoka F. Imact of surraunding gate transistor (SGT) for ultra-density LSI's. IEEE Trans. on ED. 1991. Vol. 38. № 3. P. 573–578.

57. Schulz T., Rosner W., Risch L., Korbel A., Langmann U. Short-channel vertical sidewall MOSFETs. IEEE Trans ED. 2001. Vol. 48. № 8. P. 1783–1788.
58. Chan V.W.C., Chan P.C.H. Fabricationof Gate-All-Around Transistors Using Metal Induced Lateral Crystallization. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS. February 2001. Vol. 22. № 2. P. 80–82.
59. Park J.-T., Colinge J.-P., Diaz C.H. Pi-Gate SOI MOSFET. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS. 2001. Vol. 22. № 8. P. 405.
60. Rim K., Hoyt J.L., Gibbons J.F. Fabrication and Analysis of Deep Submicron Strained-Si N-MOSFET's. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES. July 2000. Vol. 47. № 7. P. 1406–1415.
61. Yeo Y.-C., Subramanian V., Kedzierski J., Xuan P., King T.-J., Bokor J., Hu C. Design and fabrication of 50-nm thin-body pMOSFETs with a SiGe heterostructure channel. IEEE Trans. ED. 2002. Vol. 49. № 2. P. 279–286.
62. Chang S.-J., Chang C.-Y., Chao T.-S., Huang T.-Y. High Performance 0.1 _m Dynamic Threshold MOSFET Using Indium Channel Implantation. IEEE Electron Device Letters. March 2000. Vol. 21. № 3. P. 127–129.
63. Ohguro T., Naruse H., Sugaya H., Morifuji E., Nakamura S., Yoshitormi T., Moromoto T., Kimijima H., Momose H.S., Katsumata Y., Iwai H. An 0.18 mm CMOS for mixed digital and analog applications with zero-volt-Vthepitaxial-channel MOSFET's. IEEE Trans on Electron Devices. 1999. Vol. 46. № 7. P. 1378–1383.
64. Ponomarev Y., Stolk P., Dachs C.J.J., Montree A.H. A 0.13 mm poli-SiGe gate CMOS Technology for low-voltage mixed-signal applications. IEEE Trans on ED. 2000. Vol. 47. № 7. P. 1507–1513.
65. Razavi B. CMOS Technology Characterization for Analog and RF Design. IEEE Journ. on Solid-State Circuits. March 1999. Vol. 34. № 3. P. 268–276.
66. Suzuki E., Ishii K., Kanemaru S., Maeda T., Tsutsumi T., Sekogava T., Nagai K., Hiroshima H. Highly Suppressed Short-Channel Effects in Ultrathin SOI n-MOSFET's. IEEE Trans. on Electron Devices. Feb. 2000. Vol. 47. No 2. P. 354–359.
67. Zhao Ji., Chen H.-S., Teng C.S., Moberly L. Improved hot-carrier immunity for CMOSmixed-signal applications with LATID technology. IEEE Trans on Electron Devices. 1996. Vol. 46. No 6. P. 954–957.
68. International Technoljgy Roadmap for Semiconductors. Semiconductor Industry Association, 2007.
69. Белоус А.И., Красиков М.Г., Кулешов А.А., Нелаев В.В. и др. Сквозное статистическое проектирование технологии/прибора/схемы/системы / 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», МЭС-2008, 6–10 октября 2008 г. Москва, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН. – С. 173–178.
70. C. Cornelius, F. Grassert, S. Koppe, D. Timmermann. Deep Submicron Technology: Opportunity or Dead End for Dynamic Circuit Techniques VLSI Design, 2007. 6th International Conference on Embedded Systems, 2007. P. 330–338.
71. M. Battaglia et al. Monolithic pixel sensors in deep-submicron SOI Technology. Part of The Pixel 2008 Workshop. Published 15 April 2009.
72. Marco Battaglia, Dario Bisello, Devis Contarato, Peter Denes, Piero Giubilato, Lindsay Glesener, Serena Mattiazzo and Chinh Vu. Monolithic pixel sensors in deep-submicron SOI technology with analog and digital pixels / Proceedings of the 8th International Conference on Position Sensitive Detectors Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 604, Issues 1–2, 1 June 2009, P. 380–384.

73. Battaglia, M.; Bisello, D.; Contarato, D.; Denes, P.; Giubilato, P.; Glesener, L.; Mattiazzo, S.; Vu, C.Q. Monolithic pixel sensors in deep-submicron SOI Technology Journal of Instrumentation, Volume 04, Issue 04, 04/2009, pp. 04007 (2009).
74. E. Rauly, B. Iciguez, and D. Flandre. Investigation of Deep Submicron Single and Double Gate SOI MOSFETs in Accumulation Mode for Enhanced Performance / Electrochem. Solid-State Lett., Volume 4, Issue 3, pp. G28–G30 (2001).
75. Ferri, M. and Mancarella, F. and Ransley, J.H.T. and Seshia, A.A. Fabrication od DETF sensors in SOI technology with submicron air gaps using a maskless line narrowing technique / 7th IEEE Conference on Sensors, 26–29 October 2008, Lecce, Italy.
76. Родерик Э.Х. Контакты металл–полупроводник: Пер. с англ. / Под ред. Г.В. Степанова. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
77. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. / Пер. с англ. В.А. Гергеля, В.В. Ракитина. – М.: Мир, 1984. Кн. 1. – 456 с.
78. Стриха В.И., Бузанева Е.В. Физические основы надежности контактов металл–полупроводник в интегральной электронике. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
79. Попов С. Диоды Шоттки для преобразовательной техники // Электронные компоненты. – 2002. – № 3. – С. 35–38.
80. Попов С. Диоды Шоттки для преобразовательной техники. Ч. 2. Технологические классы диодов Шоттки // Электронные компоненты. – 2002. – № 4. – С. 65–67.
81. Технология СБИС: В 2-х тт. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – Т. 2. – 453 с.
82. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС / Пер. с англ. В.В. Баранова. – М.: Мир, 1986. – 176 с.
83. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 2001. – 368 с.
84. Пат. 3964084 США, МПК H 01L 29/48. Schottky barrier diode contacts / Andrews John M., Ryder Robert M., Sze Simon M.; Bell Telephone Laboratories Inc.; Заявл. 12.06.1974; Опубл. 15.06.1976.
85. Степина Н.П., Качурин Г.А. Управление эффективной высотой барьеров Шоттки на кремнии внедрением низкоэнергетичных ионов галлия // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1988. – № 12. – С. 138–140.
86. Пат. 2000022178 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Michimaro K., Takafumi T., Akio Y., Tadaaki S.; Sanyo Electric Co. Ltd.; Заявл. 29.06.1998; Опубл. 21.01.2000.
87. Пат. 5371400 США, МПК H 01L 29/48. Semiconductor diode structure / Sarukai K. (Япония); Fuji Electric Co. Ltd. (Япония); Заявл. 09.11.1993; Опубл. 06.12.1994.
88. Пат. 5262668 США, МПК H 01L 29/48. Schottky barrier rectifier including Schottky barrier regions of different barrier height / Tu Shang-bui L., Baliga Bantval J.; North Carolina State University; Заявл. 13.08.1992; Опубл. 16.11.1993.
89. Пат. 2000031505 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Michimaro K., Takafumi T., Akio Y., Tadaaki S.; Sanyo Electric Co. Ltd.; Заявл. 10.07.1998; Опубл. 28.01.2000.
90. Пат. 6483164 США, МПК H 01L 31/00. Schottky barrier diode / Kanemaru H., Ogino S. (Япония); Fuji Electric Co. Ltd. (Япония); Заявл. 07.07.2000; Опубл. 19.11.2002.
91. Пат. 3938243 США, МПК B 01J 17/00. Schottky barrier diode semiconductor structure and method / Rosvold Warren C.; Signetics Inc.; Заявл. 17.05.1974; Опубл. 17.02.1976.
92. Пат. 6184564 США, МПК H 01L 21/34. Schottky diode with adjusted barrier height and process for its manufacture / Gould Herbert J.; International Rectifier Corp. Заявл. 28.12.1998; Опубл. 6.02.2001.
93. Пат. 5888891 США, МПК H 01L 21/34. Process for manufacturing a Schottky diode with enhanced barrier height and high thermal stability / Gould Herbert J.; International Rectifier Corp. Заявл. 23.08.1996; Опубл. 30.03.1999.

94. Пат. 2000196108 Япония, МПК H 01L 29/872. Manufacture of Schottky barrier diode / Takashi K., Toshiyuki S., Yuji N.; Nippon Inter Electronics Corp.; Заявл. 28.12.1998; Опубл. 14.07.2000.
95. Пат. 7749877 США, МПК H 01L 29/47. Process for forming Schottky rectifier with PtNi silicide Schottky barrier / Rossano C., Carmelo S.; Siliconix Technology C.V.; Заявл. 06.03.2007; Опубл. 06.06.2010.
96. Турцевич А.С., Гранько В.И., Красницкий В.Я. Специальные технологические среды в производстве СБИС и УБИС // Зарубежная электронная техника. – 1991. – № 4. – С. 3 – 38.
97. Пат. 1272154 Япония, МПК H 01L 29/48. Schottky barrier Semiconductor device / Koji O, Norisumi O.; Sanken Electric Co. Ltd.; Заявл. 25.04.1988; Опубл. 31.10.89.
98. Пат. 2154464 Япония, МПК H 01L 29/48. Schottky barrier diode / Ken M., Sumino K.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 06.12.1988; Опубл. 13.06.1990.
99. Пат. 5256889 США, МПК H 01L 29/90. Semiconductor rectifying diode with PN geometry / Hiroshi K., Susumi M., Masanori T., Takao Y., Naofumi K. (Япония); Hitachi Ltd.; Заявл. 09.01.1992; Опубл. 26.10.1993.
100. Пат. 2000294805 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and its manufacture / Kenji I.; Matsushita Electronics Industry Corp.; Заявл. 09.04.1999; Опубл. 20.10.2000.
101. Пат. 11330498 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and fabrication thereof / Katsunori U.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 07.05.1998; Опубл. 30.11.1999.
102. Пат. 2001257367 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Koji M.; Toshiba Corp.; Заявл. 10.03.2000; Опубл. 21.09.2001.
103. Пат. 2000294804 Япония, МПК H 01L 29/872. Scottky barrier diode and its manufacture / Katsunori U., Akira S.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 07.04.1999; Опубл. 20.10.2000.
104. Пат. 2000349304 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky diode/ Tsutomu Y., Mitsuzo S., Masaki S.; Hitachi Ltd.; Заявл. 04.06.1999; Опубл. 15.12.2000.
105. Пат. 2002/0105007 США, МПК H 01L 29/872. Silicon improved Schottky barrier diode / Frederic L. (Франция), Ferruccio F. (Италия), Mario S (Италия); Заявл. 18.01.2002; Опубл. 08.08.2002 г.
106. Пат. 9283771 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Tetsuhiro M.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 12.04.1996; Опубл. 31.10.1997.
107. Пат. 2000022177 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Takafumi T., Shigeru Y., Michimaro K.; Sanyo Electric Co. Ltd.; Заявл. 29.06.1998; Опубл. 21.01.2000.
108. Пат. 6399996 США, МПК H 01L 29/47. Schottky diode having increased active surface area and method of fabrication / Chang P., Chern G.-C., Hsueh W., Rodov V.; APD Semiconductor Inc.; Заявл. 20.07.2000; Опубл. 04.07.2002.
109. Пат. 676402 Швейцария, МПК H 01L 29/48. Solid state pinch diode – has three zone structure with channel form and Schottky electrode regions / Halder E.; Asea Brown Boveri; Заявл. 29.11.1988; Опубл. 15.01.1991.
110. Пат. 5241195 США, МПК H 01L 29/48. Merged p-i-n / Schottky power rectifier having extended p-i-n junction / Tu Shang-bui L., Baliga Bantval J. / North Carolina State University; Заявл. 13.08.1992; Опубл. 31.08.1993.
111. Low-loss Schottky rectifier utilizing trench sidewall as junction-barrier -controlled Schottky contact. H.-S. Kim, S.-D Kim., M.-K. Han, Y.-I. Choi // Jap. J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 34. Pt. 1. № 2B. – P. 913–916.
112. Пат. 6404033 США, МПК H 01L 29/47. Schottky diode having increased active surface area with improved reverse bias characteristics and method of fabrication / Chang P., Chern G.-C., Hsueh W., Rodov V.; APD Semiconductor Inc.; Заявл. 20.07.2000; Опубл. 11.07.2002.

113. Пат. 2000252479 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and manufacture thereof / Hiroshi K., Shinji O.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 01.03.1999; Опубл. 14.09.2000.
114. Пат. 6426541 США, МПК H 01L 29/47. Schottky diode having increased forward current with improved reverse bias characteristics and method of fabrication / Chang P., Chern G.-C., Hsueh W., Rodov V.; APD Semiconductor Inc.; Заявл. 01.12.2000; Опубл. 30.07.2002.
115. Lepselter M.P., Sze S.M. Silicon Schottky barrier diode with near-ideal I-V characteristics // The Bell system technical journal. – 1968. – Vol. 47. – P. 195–208.
116. Пат. 4110775 США, МПК H 01L 29/48. Schottky diode with voltage limiting guard band / Festa Thomas A. (США); Заявл. 25.11.1977; Опубл. 29.08.1978.
117. Пат. 6657273 США, МПК H 01L 31/108. Termination for high voltage Schottky diode / Scocki S. (Италия); International Rectifier Corp.; Заявл. 12.06.2002; Опубл. 12.02.2003.
118. Пат. 2000332266 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and manufacture thereof / Kenji I.; Matsushita Electronics Industry Corp.; Заявл. 24.05.1999; Опубл. 30.11.2000.
119. Пат. 2001007350 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and manufacture thereof / Kenji I., Atsuhito N.; Matsushita Electronics Industry Corp.; Заявл. 18.06.1999; Опубл. 12.01.2001.
120. Пат. 1312678 Великобритания, МПК H 01L 5/00. Schottky barrier diode / Scace Robert I. (США); General Electric Comp.; Заявл. 30.07.1969; Опубл. 04.04.1973.
121. Пат. 11097717 Япония, МПК H 01L 29/872. Manufacture of Schottky barrier diode / Kenji I.; Matsushita Electronics Industry Corp.; Заявл. 17.09.1999; Опубл. 09.04.1999.
122. Пат. 2000315806 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode and manufacture of the same / Kenji I.; Matsushita Electronics Industry Corp.; Заявл. 28.04.1999; Опубл. 04.11.2000.
123. Пат. 2000036607 Япония, МПК H 01L 29/872. Schottky barrier diode / Michimaro K., Takafumi T., Akio Y., Tadaaki S.; Sanyo Electric Co. Ltd.; Заявл. 21.07.1998; Опубл. 02.02.2000.
124. Пат. 2001085705 Япония, МПК H 01L 29/872. Method for manufacture Schottky barrier diode / Shoji K., Toshiyuki M., Yasushi M.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 16.09.1999; Опубл. 30.03.2001.
125. Пат. 2000261006 Япония, МПК H 01L 29/872. Semiconductor substrate for forming Schottky junction, semiconductor element using the same, and Schottky barrier diode / Akira H.; Nippon Inter Electronics Corp.; Заявл. 12.03.1999; Опубл. 22.09.2000.
126. Badila M., Brezeanu G. Double epitaxial layer power Schottky diodes with end in the ramp oxide technique// Microelectron. J. – 1996. – Vol. 27. – № 1. – P. 67 – 72.
127. Пат. 2001068689 Япония, МПК H 01L 29/872. Manufacture of Schottky barrier diode / Shinji O., Hiroshi K.; Fuji Electric Co. Ltd.; Заявл. 26.08.1999; Опубл. 16.03.2001.
128. Пат. 11214711 Япония, МПК H 01L 29/872. Manufacture of Schottky barrier diode / Kenji I.; Matsushita Electron Corp.; Заявл. 29.01.1998; Опубл. 06.08.1999.
129. Пат. 11233796 Япония, МПК H 01L 29/872. Manufacture of Schottky barrier diode / Kenji I.; Matsushita Electron Corp.; Заявл. 17.02.1998; Опубл. 27.08.1999.
130. Пат. 6690037 США, МПК H 01L 29/74. Field plated Schottky diode / Desko John C., Evans Michael J. Hsieh C. – M. e.a.; Agere Systems Inc.; Заявл. 31.08.2000; Опубл. 10.02.2004.
131. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: Пер. с англ. / Под. ред. И.В. Грехова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
132. Пат. 3652905 США, МПК H 01L 9/00. Schottky barrier power rectifier / Page Derrick J.; Westinghouse Electric Corp.; Заявл. 26.05.1970; Опубл. 28.03.1972.

133. Пат. 5158909 США, МПК H 01L 21/44. Method of fabricating a high voltage, high speed Schottky semiconductor device / Otsuka K, Kutsuzawa Y., Ogata K., Ichinosawa H., Hideyuki I. (Япония); Sanken Electric Co. Ltd. (Япония); Заявл. 17.10.1990; Опубл. 27.10.1992.
134. Пат. 5859465 США, МПК H 01L 27/095. High voltage power Schottky with aluminum barrier metal spaced from first diffused ring / Spring Kyle A., Merril Perry L.; International Rectifier Corp.; Заявл. 15.10.1996; Опубл. 12.01.1999.
135. Горлов М.И., Емельянов А.В., Плебанович В.И. Электростатические заряды в электронике. – Минск: Бел. наука, 2006. – 295 с.
136. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам: ГОСТ Р51317.4.2-99. – Введ. 24.12.1999. (МЭК 61000-4-2-95) – М.: Изд-во стандартов, 2000.
137. Basic ESD and I/O design / Sanjay Dabral and Timothy Maloney. – NY.; John Wiley&Sons, 1998. – 305 c.
138. Latch-Up, ESD, and Other Phenomena [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www-s.ti.com/sc/psheets/slya014a/slya014a.pdf. – Дата доступа: 2012.
139. ESD protection device and circuit design for advanced CMOS technologies / Oleg Semenov, Hossein Sarbishaei, and Manoj Sachdev. – Springer, 2008. – 243 c.
140. Design of Edge Termination for GaN Power Schottky Diodes / Laroch J. e.a. // J. of Electronic Materials. – 2005. – Vol. 34. – № 4.
141. Пат. 6717229 США, МПК H 01L 29/66. Distributed reverse surge guard / Buchanan Walter R., Hamerski Roman J., Smith; Wayne A. (США); Заявл. 11.03.2002; Опубл. 6.04.2004.
142. Пат. 6078090 США, МПК H 01L 29/66. Trench-gated Schottky diode with integral clamping diode / Williams Richard K., Malikarjunaswamy Shekar S., Korec Jacek, Grabowski Wayne B. (США); Заявл. 02.04.1997; Опубл. 20.06.2000.
143. Пат. 5027166 США, МПК H 01L 29/872. High voltage, high speed Schottky semiconductor device and method of fabrication / Koji O., Yoshiro K., Kimio O., Hideyuki I. (Япония); Заявл. 29.11.1988; Опубл. 25.06.1991.
144. Пат. 4899199 США, МПК H 01L 23/52. Schottky diode with titanium or like layer contacting the dielectric layer / Gould Herbert J. (США); Заявл. 30.09.1983; Опубл. 06.02.1990.
145. Пат. 7820473 США, МПК H 01L 21/00. Schottky diode and method of manufacture / Linghui C., Kruse Blanca E., Duskin Mark., Moran John D. (США); Заявл. 21.03.2005; Опубл. 26.10.2010.
146. Пат. 2009059765 Япония, МПК H01L 29/47. Schottky barrier diod, and manufacturing method thereof / Kazuhiro O. (Япония); Заявл. 30.07.2007; Опубл. 19.03.2009.
147. Пат. 5258640 США, МПК H 01L 29/66. Gate controlled Schottky barrier diode / Hsieh Chang-Ming, Hsu Louis L., Nguyen Phung T., Wagner Jr Lawrence F. (США); Заявл. 02.09.1992; Опубл. 02.10.1993.

ГЛАВА 7

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ НА СУБМИКРОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Первые серьезные научные и экспериментальные исследования по проблеме радиационной стойкости изделий электронной техники военного и космического назначения были начаты в середине 60-х годов. На протяжении последующих 30 лет эта проблема постоянно являлась одной из приоритетных и решалась на основе государственного и межотраслевого планирования. В результате в СССР была создана функционально полная номенклатура радиационностойких изделий микроэлектроники, насчитывающая более тысячи типономиналов микросхем и полупроводниковых приборов. Эти советские микроэлектронные изделия практически не уступали по радиационной стойкости микросхемам лучших зарубежных фирм, а в ряде случаев их превышали.

Актуальность развития исследований в области проектирования и изготовления радиационностойких интегральных микросхем обусловлена тем очевидным обстоятельством, что финансовые и материальные затраты на эти работы несопоставимы с издержками, которые возникают при разработке, производстве и эксплуатации законченных изделий ракетно-космической техники. Как показывают оценки одного из мировых лидеров в области разработки и производства радиационно-стойких микросхем фирмы Harris Semiconductor (с 1999 года – Intercil Corporation, США), несмотря на то, что стоимость радиационностойких ИМС примерно в 100 раз выше стоимости аналогичных изделий индустриального исполнения, при использовании последних для достижения того же уровня радиационной стойкости аппаратуры требуются несравнимо большие затраты, чем при применении радиационностойкой элементной базы. Это связано как с необходимостью введения специального отбора изделий по заданным требованиям, так и с необходимостью использования конструкций (экранов) дополнительной защиты и значительно большего объема испытаний аппаратуры.

Современный этап обеспечения радиационной стойкости изделий полупроводниковой интегральной электроники для различных космических применений характеризуется тем, что тенденция повышения требований к тактико-техническим характеристикам образцов и комплексов ракетно-космической техники требует создания все новых типов функционально сложных больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС) по субмикронным технологиям, которые обладают повышенной чувствительностью к радиационным воздействиям в силу известных физических ограничений.

Кроме космических применений современные интегральные микросхемы находят все более широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре различ-

ного рода технических объектов, также работающих в условиях воздействия проникающей радиации. Эти условия могут возникать как при попадании технического объекта в зону действия источников ионизирующего излучения техногенного происхождения, так и при расположении РЭА вблизи ядерных силовых и энергетических установок. Как известно, на аппаратуру космических объектов воздействуют различные ионизирующие излучения космического пространства и радиационных поясов Земли, при этом РЭА может подвергаться воздействию следующих уровней радиации [1, 8, 9]:

- от ядерного взрыва – флюенсу нейтронов до 10^{15} см$^{-2}$ и гамма-квантов с экспозиционной дозой до 10^6 Р при мощности дозы до 10^{13} Р/с;
- вблизи ядерных реакторов – флюенсу нейтронов $10^{12} \div 10^{15}$ см$^{-2}$ и поглощенной дозе гамма-квантов до 10^5 рад;
- при прохождении естественных и искусственных радиационных поясов Земли в течение 5 лет функционирования космического аппарата на геостационарной синхронной орбите – общей дозе $5 \times 10^4 \div 6 \times 10^5$ рад (эквивалентно флюенсу электронов 5×10^{14} см$^{-2}$ с энергией $E = 1$ МэВ).

Высокая стоимость подобных объектов обусловливает особо жесткие требования к надежности и безотказности элементной базы РЭА и, в первую очередь, к ИМС различного функционального назначения. Действительно, отказ одной интегральной микросхемы в условиях воздействия вышеперечисленных дестабилизирующих факторов может повлечь за собой выход из строя всего сложного и дорогостоящего объекта, причем последствия подобного отказа не всегда предсказуемы. Поэтому задача гарантированного обеспечения радиационной стойкости ИМС и аппаратуры на их основе является исключительно актуальной.

7.1. Физические механизмы воздействия радиации на субмикронные КМОП интегральные микросхемы

Физические механизмы воздействия радиации на работу МОП-приборов в основном связаны с процессами, происходящими на границе раздела диэлектрик–полупроводник. Поэтому без глубокого понимания физических механизмов этих радиационных явлений в МОП-структурах невозможно обеспечить радиационную стойкость как базовых элементов МОП-транзисторов, так и соответствующих ИМС.

В связи с необходимостью решения различных научных и практических задач отечественной космонавтики в 60-х годах было начато целенаправленное изучение различных радиационных эффектов, наблюдаемых в МОП-приборах. Фундаментальные основы нового научного направления физики радиационных нарушений в МОП-структурах и приборах были изложены в целом ряде отечественных и зарубежных работ [10–35].

Так, было показано, что воздействие ионизирующей радиации на МОП-структуры приводит к заметному изменению их основных электрофизических характеристик, что обусловлено образованием так называемых центров захвата и накоплением пространственного заряда в области подзатворного диэлектрика, возрастанием

плотности быстрых поверхностных состояний (БПС) на границе раздела диэлектрик–полупроводних (ДП), а также уменьшением подвижности носителей заряда в приповерхностной области полупроводника [10–12, 24, 32].

Образование этих центров захвата в пленке SiO_2 и их зарядка при воздействии облучения объясняются тем, что неоднородность структур SiO_2 и Si на границе раздела ДП и наличие примесей в оксиде кремния создают множество областей с напряженными связями Si–O. В процессе облучения электроны уходят с атомных связей, что позволяет атомам сдвинуться в новое равновесное положение, в результате чего образуется устойчивый центр захвата. В частности, локализация связи на каждом атоме кислорода приводит к образованию донорного уровня, содержащего одну захваченную дырку, а локализованная связь кремния соответствует нейтральному акцепторному уровню [14].

Было установлено [25, 36–38], что в оксиде кремния могут существовать многообразные следующие собственные и примесные дефекты, в том числе:

- трехвалентный кремний ≡ Si (E′-центр) – простой донор,
- несвязанный кислород ≡ Si–O – простой акцепторный или амфотерный центр,
- вакансия кислорода V_o (≡ Si Si ≡) – двойной донор,
- вакансия кремния V_{Si} – простой донорный или амфотерный центр,
- междоузельный кремний V_i – двойной донор,
- междоузельный кислород O_i (DI-центр) – простой донорный или амфотерный центр,
- двойные или более сложные комплексы: O_2, SiO, V_oV_o и др.,
- примесные дефекты: H, OH (B-центр), Na (A′-центр) и др.

В SiO_2 большинство дефектов составляют донорные центры трехвалентного кремния (так называемые E′-центры) и междоузельного кислорода (DI-центры), которые несут основную ответственность за образование положительного заряда в оксиде [18, 25].

С помощью методов нейтронно-активационного анализа было установлено [39], что примеси с донорными свойствами (Na, K) образуют в оксиде кремния устойчивые соединения типа ≡ Si–O–Na, распределение которых отражает распределение дефектов так называемого немостикового кислорода. Примесные элементы с акцепторными свойствами (Cu, V, Mo, W) преимущественно реагируют с атомами и дефектами Si-подложки, образуя силицидные фазы. Показано, что примесные элементы могут оказывать положительный эффект на свойства МОП-структур, который заключается в компенсации оборванных связей, зарядов и механических напряжений в структурах.

Пленки SiO_2, полученные термическим окислением кремния, отличаются от аморфных пленок, полученных реактивным распылением, пиролитическим осаждением или плазменным анодированием [17, 40]. Термический оксид, который в [17] называется полиморфным, сохраняет ближний порядок атомов, в отличие от кристаллического кварца, где существует дальний порядок решетки.

Структура SiO_2–Si включает в себя некоторый переходный слой [22], химический состав которого описывается формулой SiO_n. В этом слое три характерные области: дефектная область, прилегающая к полупроводнику ($n < 1$), упоря-

доченная область SiO (n ~1), дефектная область ($1 < n \le 2$). Причины возникновения дефектной области – это несоответствие числа атомов кислорода, приходящихся на один атом кремния, а также несоответствие пространственного расположения атомов диэлектрика и полупроводника, из-за чего возникают напряженные и оборванные связи в переходном слое.

Дефекты в переходном слое в большинстве случаев являются электроактивными центрами, которые называются поверхностными состояниями (ПС). ПС, расположенные вблизи поверхности полупроводника (до 10 нм), имеют время перезарядки ~1 мкс и называются быстрыми (БПС). Состояния, расположенные в глубине переходного слоя, имеют большие времена релаксации (~1 мс и более) и называются медленными ПС [32].

В [41] установлена корреляция между плотностью БПС (N_{ss}) и концентрацией ловушечных центров в объеме SiO_2 (N_o):

$$N_{ss} = K_{кор} N_o,$$

где $K_{кор} = 3{,}75 \cdot 10^{-6}$ см·эВ$^{-1}$.

Это указывает на одинаковую причину образования дефектов – наличие напряженных валентных связей между атомами и их разрыв в результате ионизации.

К настоящему времени сформирована общая картина радиационного дефектообразования в МОП-приборах [9, 44] (рис. 7.1). Поглощение излучения в окисле сопровождается генерацией электронно-дырочных пар (процесс *1* на рис. 7.1). Часть образующихся пар рекомбинирует за времена порядка 10^{-12} с (процесс *2*). Избежавшие рекомбинации электроны и дырки разделяются электрическим полем окисла (процесс *3*) и участвуют в процессах переноса подвижного заряда через окисел (процесс *4*) и захвата на глубокие уровни (*5*). Образующиеся под действием радиации электроны намного более подвижны, чем дырки, и покидают слой окисла за времена порядка 1 пс. Дырки, которым удалось избежать рекомбинации, под действием электрического поля испытывают стохастические переходы, передвигаясь через оксидный слой. Этот подвижный заряд в окисле вызывает зависящий от времени сдвиг порогового напряжения. При достижении дырками границы раздела полупроводник–окисел или металл–окисел некоторые из них захватываются глубокими центрами, приводя к остаточному сдвигу порогового напряжения. В дальнейшем происходят отжиг части захваченных дырок и генерация ПС (процесс *6*).

Рассмотрим более детально процессы, характеризующие изменение параметров МОП-транзисторов при облучении. В работе [42] приводятся ориентировочные диапазоны поглощенных доз и происходящие в этих диапазонах основные изменения физических параметров МДП-приборов, а именно:

$D = 10^1–10^2$ Гр. Происходит деградация приборов с зарядовой связью (уменьшение эффективности переноса вследствие уменьшения времени релаксации процессов неравновесного обеднения и роста генерационных токов);

$D = 10^2–10^3$ Гр. Происходит деградация параметров БИС и СБИС (инверсия заряда p^+-охранного слоя, рост потребляемой мощности, усиление паразитных связей между ячейками вследствие роста величины объемного заряда в толстых (до ~1 мкм) пассивирующих слоях SiO_2);

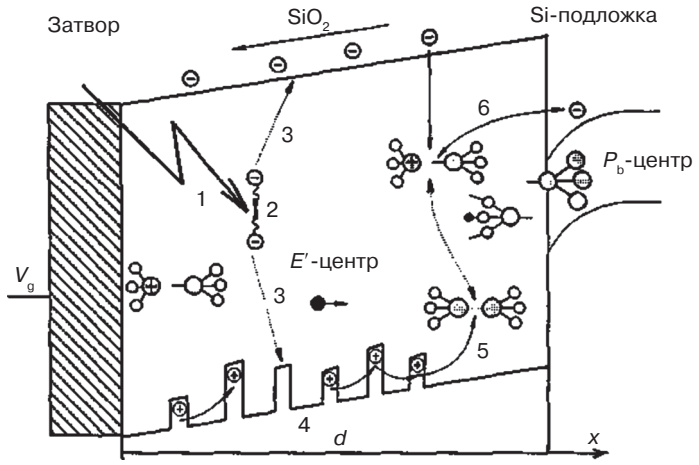


Рис. 7.1. Схематическое изображение основных процессов, происходящих в окисле при облучении [9]

$D = 10^3$–10^4 Гр. Происходит деградация МОП-транзисторов (уход величины порогового напряжения, снижение быстродействия, уменьшение крутизны характеристик вследствие роста объемного заряда в подзатворном слое SiO_2 (~10÷50 нм) и плотности БПС, N_{SS} 10^{11} см$^{-2}$·эВ$^{-1}$);

$D = 10^4$–10^5 Гр. Происходит деградация МНОП-транзисторов, приводящая к стиранию записанной информации вследствие неконтролируемого накопления объемного заряда в слоях Si_3N_4 и SiO_2;

$D = 10^5$–10^6 Гр. Происходит деградация МДП-транзисторов со сверхтонким (<10 нм) диэлектриком вследствие накопления избыточного объемного заряда в слоях SiO_2, Si_3N_4 и др.;

$D = 10^6$–10^7 Гр. Активизируется процесс дефектообразования в объеме Si и всех диэлектрических слоев (наблюдается рост величины токов через объем диэлектрика, существенное изменение концентрации основных носителей в полупроводнике);

$D = 10^7$–10^8 Гр. Наступает эффект электрического пробоя подзатворных диэлектриков.

Обычно при облучении стокозатворные ВАХ $I_c = f(U_з)$ p-канальных МОП-транзисторов сдвигаются в сторону отрицательных напряжений, снижается крутизна характеристик. В случае n-канальных МОП-транзисторов с ростом дозы облучения сначала происходит практически параллельный сдвиг ВАХ в сторону отрицательных напряжений, а при достижении некоторой дозы (~10^3 Гр) начинается обратный сдвиг характеристик, заметно уменьшается их крутизна [43].

Таким образом, можно утверждать, что радиационные изменения электрических характеристик МОП-транзисторов связаны, во-первых, с захватом и последующим отжигом свободных носителей на глубокие центры (ловушки) в объеме диэлектрика и, во-вторых, с образованием поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик–полупроводник. Захват носителей заряда в объеме SiO_2 и на уровни поверхностных состояний вызывает сдвиг пороговых напряжений, а уве-

личение плотности поверхностных состояний приводит к дополнительному рассеянию подвижных носителей заряда и к уменьшению крутизны сток-затворной вольт-амперной характеристики МОП-транзисторов [24, 32].

Сдвиг величины порогового напряжения при облучениив в количественном отношении можно представить в виде суммы отдельных составляющих [44]:

$$\Delta U_t = \Delta U_{to} + \Delta U_{ot} + \Delta U_{it} + \Delta U_{ah}, \tag{7.1}$$

где ΔU_{to} – вклад от подвижных дырок; ΔU_{ot}, ΔU_{it}, ΔU_{ah} – сдвиги напряжения за счет эффекта захвата дырок, роста поверхностных состояний и отжига дырок, соответственно.

Начальная величина сдвига порогового напряжения определяется суммарным зарядом непрорекомбинированных дырок:

$$\Delta U_{to} = -qDf_y g_0 d^2_{ox}/\varepsilon_{ox}, \tag{7.2}$$

где D – поглощенная доза излучения в оксиде; q – заряд электрона, f_y – доля непрорекомбинированных дырок, g_o – скорость генерации электронно-дырочных пар в SiO_2 ($g_o = 8 \cdot 10^{12}$ рад$^{-1}$·см$^{-3}$), d_{ox} – толщина диэлектрика, ε_{ox} – диэлектрическая постоянная оксида.

Другие составляющие сдвига порогового напряжения можно вычислить с помощью следующих простых соотношений:

$$\Delta U_{ot} = -K_1 Df_y, \tag{7.3}$$

где K_1– коэффициент, соответствующий максимальному сдвигу порогового напряжения за счет захвата заряда в оксиде при $D = 1$ рад;

$$\Delta U_{it} = K_3 D[1 - (1 + t/\tau_{it})^{-0,5}], \tag{7.4}$$

где K_3 – коэффициент, соответствующий максимальному сдвигу порогового напряжения за счет захвата заряда на поверхностные состояния при $D = 1$ рад; t – время облучения; τ_{it} – характерное время образования ПС.

$$\Delta U_{ah} = (-U_{ot})K_2 \ln(t/t_a) \text{ при } t < t_a, \tag{7.5}$$

где K_2 соответствует коэффициенту полного отжига дырок; t_a – типовое время отжига.

Выражение для использования при практическом расчете крутизны S стокозатворной ВАХ МДП-транзистора может иметь более сложный вид [32]:

$$S = K_o[1 - qN_{ss}(\vartheta\varphi_s/\vartheta U_з)](U_з - U_{пор})/(1 + \eta), \tag{7.6}$$

где N_{ss} – средняя плотность ПС; K_o – удельная крутизна; η – коэффициент влияния подложки; φ_s – поверхностный потенциал.

$$K_o = \mu_s C_д W_к / L_к,$$

где $W_к$ и $L_к$ – ширина и длина канала, μ_s – поверхностная подвижность носителей заряда.

$$\mu_s = 2\mu_п/[\exp(S_s) + \exp(-S_s)],$$

где $\mu_п$ – подвижность в объеме полупроводника; S_s – средняя квадратичная флуктуация поверхностного потенциала.

Следует учитывать очень важный для расчета радиационно-стойкой БИС параметр – ток утечки в цепи стока $I_{с.у}$, который обычно проявляется при закрытом МОП-транзисторе. Он представляет собой обратный ток p-n-перехода стока, где основную роль играют ток термогенерации $I_{ген}$ и поверхностный ток утечки $I_{s.у}$ [32].

$$I_{ген} = I_{ген}(0) + qAl_о n_i K_\tau \Phi, \qquad (7.7)$$

где A – площадь p-n-перехода; $l_о$ – ширина обедненной области; n_i – концентрация электронов в собственном полупроводнике; K_τ – деградационный коэффициент; Φ – флюенс частиц или квантов излучений высоких энергий.

В n-канальных МОП-транзисторах положительный заряд в диэлектрике под затвором создает в приповерхностной области полупроводника p-типа инверсный слой. Величина тока утечки при этом существенно зависит от того, насколько эффективно отрицательный заряд БПС компенсирует положительный заряд в объеме диэлектрика. Если этот заряд $Q_{пс}$ мал, то ток утечки в канале транзистора быстро возрастает при облучении. В случае заметного увеличения плотности БПС ток $I_{s.у}$ может уменьшаться.

Пробой подзатворного диэлектрика является одним из основных и наиболее опасных видов отказа МОП-приборов [45]. Сущность этого эффекта заключается в следующем: при воздействии радиации в объеме диэлектрика накапливается положительный заряд, который создает дополнительное электрическое поле на границах этого диэлектрика, вызывая уменьшение ширины потенциального барьера и тем самым снижение напряжения пробоя $U_{пр}$, которое для подзатворного SiO_2 описывается известным выражением [46]:

$$U_{пр} = d_д\,[E_{пр} - Q_D/(\varepsilon_д \varepsilon_о)], \qquad (7.8)$$

где $E_{пр}$ – предельная для диэлектрика напряженность электрического поля.

Рассмотрим более подробно некоторые важные аспекты влияния радиации на параметры МДП ИМС. Известно, что большинство сложных микросхем построено на комбинации простых логических элементов (НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ, И-ИЛИ-НЕ и др.) [47]. Их функциональные и электрические параметры определяют характеристики практических всех типов ИМС одной серии; нарушение работоспособности этих элементов при воздействии ИИ автоматически приводит к отказам более сложных микросхем, спроектированных на их основе.

Среди современных БИС КН ведущее место по праву заняли микросхемы на основе комплементарных МОП-транзисторов (КМОП ИМС), которые при достаточно высоком быстродействии обладают большой помехоустойчивостью и малой потребляемой мощностью [47–49].

Как показывают результаты экспериментальных исследований, основными видами отказов серии простейших логических КМОП ИМС при воздействии облучения являются [29, 50]:

- отсутствие переключательных свойств, когда значение выходного напряжения остается постоянным во всем диапазоне изменения входного напряжения в связи с тем, что n-канальный транзистор открыт уже при $U_{вх} = 0$ и его порог переключения меньше нуля;
- уменьшение быстродействия в связи с увеличением численного значения времени задержки распространения сигнала; последнее обусловлено сдвигом порогового напряжения n-канального транзистора к более положительным значениям, а p-канального – к более отрицательным значениям, что приводит к увеличению эффективного сопротивления канала и увеличению времени, необходимого для зарядки и разрядки нагрузочной емкости на выходе микросхемы;
- увеличение токов утечки (а, следовательно, и потребляемой мощности в статическом режиме), когда пороговое напряжение n-канальных транзисторов становится отрицательным;
- снижение помехоустойчивости микросхем с высоким уровнем выходного сигнала, связанное с уменьшением порога переключения микросхемы и, тем самым, амплитуды положительного напряжения помехи; для микросхем, работающих при низком уровне выходного сигнала, помехоустойчивость (к воздействию отрицательной помехи) при облучении возрастает.

Таким образом, можно сказать, что отказы КМОП ИМС при воздействии ИИ в основном происходят вследствие эффектов ионизации и структурных повреждений материалов, а также в связи с действием эффекта выделения тепла [51–58].

Структурные повреждения (при воздействии нейтронов, высокоэнергетических протонов и т.п.) оказывают существенное влияние на электрофизические параметры полупроводниковых материалов: снижают концентрацию, время жизни и подвижность неосновных носителей заряда. Однако так как МОП-транзисторы являются приборами на основных носителях, то КМОП ИМС имеют относительно слабую чувствительность к объемным структурным повреждениям по сравнению с биполярными транзисторами. Вместе с тем структурные повреждения могут существенно изменять электрические характеристики МОП-транзисторов при флюенсах нейтронов $\Phi = 10^{14}–10^{15}$ нейтрон см$^{-2}$.

Доминирующие механизмы отказов КМОП ИМС связаны в основном с поверхностными ионизационными эффектами, которые, в свою очередь, связаны в основном с накоплением зарядов в тонких слоях подзатворных и пассивирующих диэлектриков, а также на границах раздела Si/SiO_2 [32, 44]. Данные эффекты являются доминирующими при воздействии стационарного ИИ (гамма, рентгеновского и электронного). При импульсных воздействиях поверхностные эффекты могут проявляться в виде остаточных отказов, возникновение которых определяется величиной накопленной дозы ИИ. В большинстве стандартных КМОП ИМС поверхностные эффекты практически не влияют на кратковременные отказы (сбои) изделий, так как характерная величина поглощенной дозы за импульс при этом обычно не превышает $10^3–10^4$ рад, что не приводит к существенному изменению параметров современных КМОП ИМС. Однако при наиболее мощных импульсах ИИ (более 10^{11} рад·с$^{-1}$) релаксация поверхностных ионизационных эффектов может влиять на время потери работоспособности КМОП ИМС.

Другая группа эффектов, связанных с выделением тепла, может приводить к функциональным отказам КМОП ИМС вследствие механического разрушения корпусов и кристаллов. Данные термодинамические эффекты обычно имеют место в случаях неоднородного поглощения энергии импульсного ИИ (например, сверхжесткого рентгеновского (СЖР) излучения) вследствие разных коэффициентов теплового расширения материалов, используемых в конструкции ИМС, и зависят от конкретного конструктивного исполнения изделия.

Следует отметить, что термодинамические эффекты, как правило, не приводят к нарушению работоспособности КМОП ИМС при воздействии ИИ в диапазоне мощности дозы до 10^{13} рад·с$^{-1}$ [33].

В работе [59] были экспериментально определены уровни бессбойной работы и время потери работоспособности КМОП ИМС серии 1554 при воздействии импульсного ИИ и определен реальный уровень стойкости к воздействию стационарного ИИ. Показано, что критическим параметром, определявшим отказ всех исследованных ИМС, является ток потребления в статическом режиме; наиболее критичным является режим облучения с постоянным уровнем напряжения на входах ИМС.

Восстановление характеристик облученных МДП-приборов. Результаты ряда исследований показали [60], что после облучения в МДП-приборах происходит дальнейшее изменение зарядов, т.е. долговременный естественный отжиг, который зависит как от условий облучения, так и технологических факторов. При этом дрейф характеристик p-канальных МДП-транзисторов обычно не превышает 10–20% при комнатной температуре. Восстановление величины порогового напряжения n-канальных транзисторов наблюдается при любых напряжениях на затворе, особенно при положительных смещениях, хотя в отдельных случаях величина $U_{\text{пор}}$ может заметно превысить исходное значение – это так называемый эффект «сверхвосстановления» [61]. Стадия «быстрого» восстановления значения $U_{\text{пор}}$ (по логарифмическому закону от времени) обычно длится от 0,8 до 30 ч при комнатной температуре. Насыщение наступает обычно через 10^3 ч при T = 300 K и много быстрее – при T = 373–398 K (10–50 ч) [60].

Эффект отжига положительного заряда в оксиде кремния теоретически объясняется переходом электронов из свободной зоны кремния через потенциальный барьер на границе раздела Si–SiO_2 и последующей нейтрализацией положительно заряженных ловушек в SiO_2 [62]. Существует важный для практического использования спектр энергии активации отжига, что обусловлено пространственным распределением ловушек в слое оксида, где максимумы этого спектра физически соответствуют энергетическому положению уровней этих ловушек в SiO_2.

Как убедительно показано в работе [63], нейтрализация положительного заряда в слое SiO_2 может происходить за счет эмиссии захваченных дырок или туннелирования электронов, а также в результате компенсации заряда дырок зарядом электронов, захваченных на эти ловушки. Экспериментально показано, что после облучения в слоях SiO_2 толщиной 350 нм захваченные электроны компенсируют ~15% положительного заряда и ~45% заряда в слоях толщиной 45 нм.

Также экспериментально установлено [62–65], что наведенный радиацией заряд в оксиде МОП-структур практически полностью отжигается при температурах 523–623 K в течение 30–90 мин.

Влияние условий облучения на радиационную стойкость МДП-приборов. Опыт показывает, что радиационные эффекты в МДП-приборах зависят от условий, в которых проводится облучение (электрический режим работы приборов, температура окружающей среды, вид, энергия, интенсивность и доза ИИ) [24, 31–33].

Электрический режим смещения при облучении оказывает заметное влияние на параметры облучаемых МДП-приборов. Заряд вводится в диэлектрик при любом напряжении на затворе, но значение заряда обычно больше при положительном смещении. При этом величина заряда насыщения возрастает с увеличением напряжения на затворе или линейно [11], или по закону $\sim U_з^{0,5}$ [66], или по более сложному закону [67].

В работах [68, 69] было дополнительно показано, что при больших дозах (10^5–10^6 Гр) в случае изменения полярности напряжения на затворе в процессе облучения возможно немонотонное изменение $\Delta U_{пор}(D)$, так как поле внутри диэлектрика будет суммироваться с внешним полем. После перераспределения зарядов зависимость $\Delta U_{пор}(D)$ практически достигает уровня, соответствующего приложенному к затвору напряжению.

В работе [70] было обнаружено, что конкретные электрические условия смещения стока и истока МДП-транзистора при облучении также оказывают заметное влияние на сдвиг $U_{пор}$. Наибольшее изменение порогового напряжения наблюдалось при равномерном поле в канале транзисторов, когда напряжения на стоке и истоке равны $E_п$. Что интересно: в случае n-канальных приборов наихудший режим достигался во включенном состоянии (при подаче смещения на затвор, сток, исток), а у p-канальных – в выключенном состоянии (без подачи смещения на затвор). Полученные результаты можно объяснить тем, что электрическое поле в области оксида около стока или истока будет различным в зависимости от того, подано на них смещение относительно подложки или нет.

В работе [71] исследовалось изменение характеристик n- и p-канальных МОП-транзисторов при различных полярностях импульсного и постоянного напряжений на затворе при облучении. Обнаружено, что радиационный дрейф стоко-затворных ВАХ при изменении импульсного напряжения от +10 до –10 В находится в промежутке между результатами, полученными при постоянных напряжениях ±10 В.

Величина напряжения питания заметно влияет на уровень работоспособности МОП ИМС в условиях облучения. Так, при увеличении $E_п$ (т.е. величины напряжений на затворах транзисторов) возрастает изменение $U_{пор}$. С другой стороны, увеличение $E_п$ расширяет границы допустимых значений пороговых напряжений [32]. Практика показывает, что рабочая область цифровых ИМС расширяется в большей мере, чем возрастает дрейф $U_{пор}$ МОП-транзисторов. Поэтому с увеличением $E_п$ отказы МОП БИС наступают при больших значениях дозы [72–74].

Температура окружающей среды весьма значительно влияет на характеристики МДП-приборов при облучении. Различают чисто температурные эффекты (например, уменьшение подвижности носителей заряда в Si при повышении температуры) и эффекты, определяющие радиационные параметры при изменении температуры (генерация и захват зарядов в подзатворном SiO_2 и на границеSi–SiO_2; отжиг этих зарядов строго зависит от температуры) [60].

Было установлено [75], что без облучения с возрастанием температуры от 218 до 298 К $U_{пор}$ n-канальных МОП-транзисторов уменьшалось со скоростью 3,1 мВ/К, а у p-канальных транзисторов – 2,3 мВ/К. Подвижность носителей в канале снизилась при этом на ~50%. Исследования показали, что в жестких температурных условиях стандартные КМОП ИМС нормально функционируют вплоть до $T = 553–583$ К [76].

В целом ряде работ [75, 77–83] была обнаружена повышенная чувствительность МОП-приборов к радиации при низких температурах (77–90 К) по сравнению с комнатной температурой, что обусловлено образованием в SiO_2 дополнительного положительного заряда. Причиной этого явления считается значительное уменьшение подвижности дырок в оксиде с понижением температуры [84], что способствует их более активному захвату в SiO_2. Кроме того, при низких температурах происходит зарядка мелких локальных уровней в оксиде [32]. Отсутствие термовозбуждения делает этот заряд дырок неподвижным. При повышении температуры увеличивается эмиссия электронов из полупроводника или металла [60], что снижает величину накопленного положительного заряда в SiO_2.

Другой характерной особенностью МОП-приборов при низкотемпературном облучении является незначительное образование БПС [79, 83], что обусловлено уменьшением коэффициента диффузии собственных дефектов или подвижных ионов в МОП-структурах.

К сожалению, влияние повышенной температуры при облучении на свойства МОП-приборов исследовалось в значительно меньшем числе работ [75, 85–90]. Было обнаружено [85], что при облучении МОП-структур электронами с $E_e = 2,5$ и 15 МэВ при $T = 573$ К в диапазоне флюенсов $10^{12}–10^{14}$ см$^{-2}$ отсутствуют какие-либо изменения параметров, тогда как в результате облучения при комнатной температуре параметры структур заметно изменились. Следовательно, при $T = 573$ К все радиационные дефекты отжигались в процессе облучения.

В работе [86] установлено, что повышенная температура ($T_o = 673$ К) приводит к ускорению деградации параметров МОП БИС под действием рентгеновского излучения. Существенным являлось несовпадение изменений $U_{пор}$ n- и p-канальных МОП-приборов, обусловленных рентгеновским облучением, с последующим отжигом при температуре T_o и изменением $U_{пор}$ при облучении той же дозой при температуре T_o. Величина $\Delta U_{пор}$ оказалась больше во втором случае на 20–30%, что свидетельствует о неаддитивности процессов облучения и отжига.

Следует отметить, что направления изменений уровней характеристи: надежности (минимальной наработки) и уровня радиационной стойкости микросхем в зависимости от температуры и электрического режима могут быть противоположными. Для КМОП ИМС повышение температуры от 298 до 343 К приводило к увеличению РС в 2-3 раза, но при этом – и к уменьшению минимальной наработки ИМС в несколько раз [87].

Рассмотрим еще один важный для разработчиков БИС КН аспект, такой как вид и энергия ИИ, который обусловливает различия в уровне РС МОП-приборов. Авторы работы [10], сопоставив различные виды радиации, предложили ионизационный механизм повреждений МОП-структур и предположили независимость величины и характера радиационных нарушений от источника излучений. Одна-

ко последующие многочисленные экспериментальные исследования опровергли этот постулат. Так, в работе [88] детально исследовалось воздействие рентгеновских лучей, электронов с энергией 4 МэВ, а также гамма-нейтронного излучения реактора на МОП-структуры. Было обнаружено, что наибольший встроенный заряд образуется в слое SiO_2 при реакторном облучении, причем был установлен факт отсутствия насыщения величины накопленного заряда с ростом дозы. Этот эффект объясняется образованием новых дефектов в диэлектрике под действием нейтронов.

С другой стороны, в работе [13] было убедительно показано, что при воздействии на МОП-приборы нейтронов любой энергии атомы кислорода в SiO_2 получают на 50% больше энергии, чем атомы кремния. В результате этого усиливается ионизация атома кислорода и возрастает вероятность его смещения. Было установлено, что эквивалентная поглощенная доза в SiO_2 связана с флюенсом быстрых нейтронов (E_n > 100 кэВ) численным соотношением: 1 Гр (SiO_2) = $2 \cdot 10^{12}$ н/см^2. (*Справка:* **Грей (Гр)** – *единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ). Поглощенная доза равна одному грею, если вещество получило один джоуль поглощенной энергии ионизирующего излучения на один килограмм массы. В базовых единицах СИ грей можно выразить как* $м^2 \cdot с^{-2}$.)

Аналогичные результаты также были получены в работе [89] при воздействии нейтронов с энергией 1 МэВ на МОП-структуры.

Влияние нейтронного облучения с E_n = 14 МэВ на характеристики МДП БИС (матрицы памяти) исследовалось в работе [90]. Здесь был обнаружен существенный дрейф параметров БИС при облучении нейтронами. Средние размеры поврежденных областей составили 0,20–0,45 мкм, что сравнимо с размерами элементов БИС. Установлено, что в МДП-транзисторах область повреждения вызывает параметрический отказ, если связывает сток и исток или захватывает подложку и оксид под затвором. В результате этого существенно возрастают токи утечки вплоть до катастрофического отказа БИС.

Из работ [10, 15, 24] следует, что основной результат воздействия излучений на материалы в МОП-структурах определяется дозой поглощенной энергии. В частности, было установлено, что эквивалентная поглощенная доза радиации в кремнии или диоксиде кремния равна 1 Гр для экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений $2{,}58 \cdot 10^{-2}$ Кл/кг; для флюенса быстрых электронов $5 \cdot 10^8$ эл/см^2 (при $E_e \geq 20$ кэВ) или $3 \cdot 10^9$ эл/см^2 (при E_e = 1–5 МэВ).

В работе [91] было обнаружено превышение в два раза скорости изменения параметров широко используемых в космических приложениях КМОП ИМС 564ЛА9 при гамма-облучении Co^{60} по сравнению с воздействием b-излучения источника Y^{90}–Sr^{90}, что объяснялось различием спектрально-энергетического состава излучений разных источников.

Также экспериментально установлено [92], что электроны с E_e = 1 и 7 МэВ оказывают такое же воздействие на МОП-транзисторы, как и гамма-излучение Co^{60}, тогда как электроны с E_e = 0,5 МэВ были менее эффективны, а с E_e = 2 МэВ – более эффективны.

Сравнение скоростей восстановления параметров МОП-транзисторов после облучения различными видами радиации показало [93], что время 50%-ного

восстановления $U_{пор}$ для гамма-излучения Co^{60} составило 28 мин, электронов с E_e = 1 МэВ – 41 мин., с E_e = 7 МэВ – 23 мин., протонов с E_p = 22 МэВ – 70 мин., α-частиц с E_α = 3,4 МэВ – 3500 мин. Полученные результаты объяснялись различной концентрацией захваченных дырок вследствие отличия ионизирующей способности разных источников радиации.

В то же время следует отметить, что в работе [94] было установлено, что деградация характеристик другой широко используемой КМОП ИМС CD4007UBE была одинакова как при облучении источником Co^{60}, так и электронами с E_e = 13 МэВ от линейного ускорителя при мощности дозы в импульсе 10^6–10^8 рад/с.

Влияние энергии ***гамма-излучения*** на свойства МОП-структур исследовалось в работе [95] в диапазоне от 70 эВ до 1,25 МэВ. Было установлено, что излучение с энергией 70 эВ вызывает такой же сдвиг ВФХ МОП-структур, как и излучение с E_γ = 1,25 МэВ. В области энергии 1,49 кэВ наблюдается минимальное изменение характеристик структур. Полученные результаты объясняются в рамках модели рекомбинации электронно-дырочных пар в SiO_2 [96]. При низких энергиях квантов (≤ 100 эВ), а также при высоких энергиях (≥ 100 кэВ) электронно-дырочные пары оказываются пространственно изолированными, что приводит к аналогичным изменениям характеристик МОП-структур при низких и высоких энергиях гамма-излучения.

Влияние энергии ***электронного излучения*** на свойства МОП-структур рассматривалось в работах [15, 97, 98]. Было обнаружено [97], что снижение энергии электронов от 1 МэВ до 125 кэВ в несколько раз увеличивает накопленный заряд в МОП-конденсаторах, что объясняется увеличением эффективности ионизации диэлектрической пленки.

Накопление положительного заряда в оксиде МОП-структур ***в зависимости от энергии электронов*** (от 3 кэВ до 1 МэВ) изучалось в работе [98] для различных толщин диэлектрика. Было обнаружено, что для каждого значения толщины SiO_2 накопленный заряд возрастает с увеличением энергии электронов до некоторой величины E_{max}, а затем заряд уменьшается. Полученные данные объясняются тем, что энергии электронов, которые дают максимальные энергетические потери на границе раздела $Si–SiO_2$, соответствуют E_{max} для каждой толщины оксида.

Влияние интенсивности (мощности дозы) ИИ на параметры МДП-приборов исследовалось в целом ряде работ [11, 66, 94, 99–115]. В работах [11, 66] была установлена независимость изменений параметров МОП-транзисторов от мощности дозы гамма-излучения в диапазоне 10^0–10^8 Гр/с. В других работах [99–101] наблюдалось ухудшение характеристик МОП-транзисторов с ростом мощности дозы до 10^6–10^7 Гр/с, что связывалось с процессами прохождения фототока в подложке приборов [99].

В работе [102] с ростом мощности дозы (P_e) электронного излучения с E_e = = 60 кэВ происходило близкое к линейному увеличение положительного заряда в диэлектрике МНОП-структур. Изменение напряжения плоских зон $\Delta U_{FB}(P_e)$ составило ~1,5 В при вариации P_e от 15 до 750 Гр/с при фиксированном значении дозы в диапазоне 10^2–10^5 Гр.

В работе [94] получено, что при облучении электронами с E_e = 13 МэВ сдвиг $\Delta U_{пор}$ n-канального МОП-транзистора в КМОП инверторе CD4007UBE не зави-

сел от мощности дозы до 10^6 Гр/с, но при $P_e = 10^7$–10^8 Гр/с наблюдалось снижение величины $\Delta U_{пор}$. Этот эффект объяснялся уменьшением смещения на приборах в КМОП ИМС вследствие индуцирования фототоков в p-n-переходах и подложке при больших интенсивностях. Аналогичные эффекты наблюдались в работе [103] для КМОП и n-МОП БИС при мощности дозы выше 10^8 Гр/с.

РС МОП-приборов к маломощному облучению в большинстве случаев оказалась выше, чем к облучению с высокой мощностью дозы. Например, при снижении P_γ Co^{60} от 10^2 до 10^{-2} Р/с сдвиг порогового напряжения тестового n-канального МОП-транзистора уменьшался в 2,5 раза [104]. Для n-канальных МДП-транзисторов С1916А критическая доза составила 380 Гр при мощности дозы облучения $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ Гр/с и всего 190 Гр при 2,0 Гр/с [105]. Было установлено [106], что сдвиг $\Delta U_{пор}$ МОП-транзистора при мощности дозы облучения $3{,}7 \cdot 10^{-2}$ Гр/с в три раза меньше, чем при 5,24 Гр/с, что объяснялось эффектом долговременного отжига, проявляющегося при длительном облучении с низкой интенсивностью [107].

Изучение влияния низкой интенсивности ИИ на РС МОП ИМС показало аналогичные результаты: РС повышается при снижении мощности дозы облучения. Например, вероятность 10% отказа КМОП/КНС ЗУ типа CDP1821 (1 кбит) при мощности дозы облучения 1,47 Гр/с имела место при дозе 10 Гр, а для $P = 1{,}6 \cdot 10^{-5}$ Гр/с – при 43 Гр [108].

В работах [109–111] теоретически и экспериментально было показано, что зависимость дозы отказа МОП ИМС от интенсивности немонотонна и имеет максимум при мощности дозы ~10^{-2} Гр/с. Такой вид зависимости обусловлен разными механизмами отказа при низких и высоких интенсивностях облучения. При $P_\gamma > 10^{-2}$ Гр/с отказ связан с отрицательным, а при $P_\gamma < 10^{-2}$ Гр/с – с положительным дрейфом порогового напряжения n-канального МОП-транзистора (критерий отказа $\Delta U_{пор} = +0{,}45$ В для микропроцессора Z80A). В промежуточной области (10^{-3} Гр/с $< P_\gamma < 10^{-1}$ Гр/с) отказы ИМС обусловлены либо дрейфом $U_{пор}$ n-канального МОП-транзистора в любом направлении, либо отрицательным дрейфом p-канального транзистора.

В работах авторов [112–114] тоже установлено наличие максимума при $P_\gamma = 10^{-3}$–10^{-2} Гр/с на зависимости дозы отказа от P_γ КМОП ИМС 564 серии, а также 1526ИР6, 1417УД6.

Интересные результаты были получены в работе [115] при испытаниях КМОП-транзисторов на линейном ускорителе электронов с $E_e = 20$ МэВ и гамма-установках с Co^{60} в диапазоне мощностей доз от $5 \cdot 10^{-4}$ Гр/с до $6 \cdot 10^7$ Гр/с. На всех установках было обнаружено, что если учитывать время отжига начиная с момента начала облучения, то величина мощности дозы практически не влияет на изменения параметров КМОП-приборов при облучении.

Следует отметить, что накопление заряда в SiO_2, изменение подвижности носителей в канале и другие радиационные эффекты, проявляющиеся при длительном облучении с низкой интенсивностью, могут значительно отличаться для разных производственных партий МОП-приборов одного и того же типа [109]. Тем более существенно они могут отличаться при изменениях конструкции или технологии производства МОП ИМС.

7.2. Воздействие радиации на аналоговые биполярные интегральные микросхемы

Аналоговые ИМС, которые широко применяются в изделиях космического приборостроения для усиления, преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции, имеют некоторые отличительные особенности (по сравнению со своими дискретными аналогами), которые в значительной мере определяют их радиационную стойкость [3, 116, 117]. В аналоговых ИМС, как правило, применяют каскады с непосредственными связями, так как использовать конденсаторы в разделительных и блокирующих цепях практически невозможно. В силу ограничений микроэлектронных технологий изготовления БИС отказ от применения в структурах субмикронных БИС конденсаторов прежде всего требует решения проблемы стабилизации режима по постоянному току, что особенно сложно обеспечить при работе ИМС в условиях облучения. Нужен особый подход к проектированию цепей задания и стабилизации режима. При применении непосредственных связей возникает опасность рассогласования режима работы последующих каскадов из-за изменений в предыдущих каскадах. В итоге изменение режимов работы каскадов, образующих цепочку элементов с непосредственными связями, приводит к существенному итоговому изменению выходного напряжения ИМС. Это обстоятельство часто является определяющим при оценке радиационной стойкости ИМС. Практически эту оценку проводят по допустимому отклонению точностных параметров ИМС, к числу которых относятся входные токи смещения и сдвига, входное напряжение смещения, коэффициенты влияния изменений напряжений источников питания.

Наряду с указанными параметрами по постоянному току при оценке радиационной стойкости аналоговых ИМС принимается во внимание также изменение усилительных характеристик ИМС; это прежде всего уменьшение коэффициента усиления обрабатываемого сигнала, а в некоторых случаях также изменения входного и выходного сопротивлений, изменение ширины полосы пропускания, определяемой верхней граничной частотой $f_в$, или частотой единичного усиления f_1. Изменение частотных параметров особенно важно при использовании аналоговой ИМС с глубокими обратными связями. К сожалению, при этом возможны существенные искажения частотной и переходной характеристик, а в ряде случаев и нарушение устойчивости устройства.

Радиационные эффекты в интегральных операционных усилителях. Интегральные операционные усилители (ИОУ) представляют собой высококачественные прецизионные усилители, которые относятся к классу универсальных и многофункциональных аналоговых микросхем [118, 119]. Радиационная стойкость аналоговых ИМС определяется не только влиянием ионизирующих излучений на характеристики элементов микросхемы (транзисторов, резисторов), но она зависит также от структуры ИМС и схемотехнических особенностей. Поскольку большинство современных аналоговых ИМС построены по структуре ИОУ, то на их примере можно выяснить влияние радиационных эффектов на характеристики аналоговых микросхем.

Радиационная стойкость микросхем зависит и от технологии изготовления ИМС, в частности, от способа изоляции элементов друг от друга и от подложки, а

также от технологии формирования резисторов. При одинаковой структуре ИМС более высокой стойкостью к ионизационным эффектам обладают микросхемы с изоляцией диэлектрической пленкой и пленочными резисторами (вместо диффузионных). В микросхемах с изоляцией обратносмещенными p-n-переходами из-за действия паразитных p-n-p-транзисторов, образуемых в местах формирования рабочих транзисторов, радиационная стойкость снижается.

При нормальной работе ИОУ в аналоговых устройствах все рабочие транзисторы оказываются в активной области, поэтому активное действие паразитных транзисторов не проявляется (они работают в области отсечки), а сказывается лишь действие обратных токов, которые могут достигнуть заметной величины из-за большой площади изолирующих p-n-переходов.

При использовании ИОУ в нелинейных устройствах (генераторах релаксационных и гармонических сигналов, модуляторах, демодуляторах и т.д.) часть транзисторов в процессе функционирования естественно может оказаться в области насыщения. Когда рабочий транзистор переходит в область насыщения и его коллекторный переход, являющийся одновременно эмиттерным переходом паразитного транзистора, смещается в прямом направлении, этот паразитный транзистор начинает работать в активной области, усиливая так называемые паразитные токи, что может привести к отказу функционирования микросхемы. Независимо от режима работы паразитных транзисторов их действие особенно опасно при переходных процессах, при которых происходит генерация дополнительных ионизационных токов, значение которых оказывается существенно больше, чем значение фототоков нормального рабочего транзистора (из-за значительно больших площадей изолирующих p-n-переходов и толщины подложки). Следует также иметь в виду, что эти паразитные транзисторы, образующие с рабочими транзисторами классическую полупроводниковую четырехслойную структуру n-p-n-p, часто являются причиной возникновения не менее опасного тиристорного эффекта.

Поэтому в большинстве модификаций микросхем КН в каждом ИОУ на его входе разработчиками включается специальный дифференциальный каскад для повышения стабильности выходного потенциала. В ряде ИОУ этот дифференциальный каскад включается также в последующих звеньях в качестве промежуточного усилителя, который одновременно производит преобразование двухфазного выхода в однофазный. Применение дифференциальных каскадов, обеспечивающих классическую функцию подавления возникающих синфазных помех, к числу которых безусловно относится эффект отклонения от номинала уровня выходного напряжения, обусловленный воздействием облучения, способствует существенному повышению уровня радиационной стойкости ИМС КН.

К сожалению, известные схемотехнические решения специализированных ИОУ частного применения, к числу которых относятся и широко используемые в электронных системах КА микросхемы с повышенным входным сопротивлением, прецизионные и микромощные ИОУ, быстродействующие усилители [119], обычно более чувствительны к остаточным радиационным эффектам, так как схемотехнические и технологические решения, применяемые разработчиками «гражданских» микросхем для достижения предельных возможностей по каким-либо параметрам, как правило, приводят к снижению их радиационной стойкости.

Разработчикам ИМС КН следует учитывать и тот факт, что особенно чувствительны к воздействию облучения ИОУ при работе в наиболее часто используемом в КА энергосберегающем для РЭА так называемом «спящем» режиме (микрорежиме). Физически это объясняется тем, что в микрорежиме процессы деградации параметров транзисторов происходит при более низких флюенсах облучения.

Одной из основных причин нарушения нормальной работы ИОУ являются также переходные ионизационные эффекты. Изоляция p-n-переходами является серьезным недостатком ИОУ, работающих в полях ионизирующих излучений. Воздействие γ-излучения, электронного и высокоэнергетического нейтронного ($E_n > 14$ МэВ) излучений приводит к протеканию через изолирующие p-n-переходы достаточно мощных фототоков, которые часто становятся причиной нарушения электрической изоляции p- и n-областей, возрастания рассеиваемой мощности, возникновения тиристорного эффекта, катастрофического пробоя как в рабочих, так и в паразитных транзисторах. Здесь с физической точки зрения значительный вклад в образование фототоков вносят участки подложки, прилегающие к изолирующим p-n-переходам. Технологи, специализирующиеся на разработке микросхем категории «military» и «space» знают, что эти токи можно существенно уменьшить путем легирования подложки с тыльной стороны золотом, уменьшающим время жизни носителей в подложке [120]. Наиболее эффективным технологическим способом уменьшения численным значением этих фототоков является применение диэлектрической изоляции [121], а также использование конструкции пленочных резисторов вместо диффузионных.

Указанные меры были эффективно реализованы в усилителе μA744, выполненном по совмещенной технологии с диэлектрической изоляцией и с улучшенной защитой поверхности кристалла [122, 123].

Помимо технологических приемов для повышения стойкости μA744 к ионизирующему воздействию разработчиками ИМСМ были приняты также схемотехнические меры – использование дополнительных транзисторов в диодном включении (для закорачивания фототоков, способных вывести из строя усилитель) и дополнительных резисторов между цепями электрических соединений рабочих элементов с шинами источников питания. Поэтому микросхема μA744 сохраняет работоспособность при воздействии нейтронного потока до 10^{14} нейтр./см^2 и ионизирующих излучений до $5 \cdot 10^4$ Гр (Si)/с, восстанавливает свою работоспособность после импульсного воздействия мощностью $5 \cdot 10^8$ Гр (Si)/с и до сих пор используется в электронных системах управления КА, РН и других устройствах ракетно-космической техники.

Еще одно эффективное схемотехническое решение – включение униполярных транзисторов во входные каскады ИОУ (как, например, в зарубежной микросхеме μA740 и отечественных 544УД1, 140УД8) способствует уменьшению [124, 125] уровня их шумов в области низших частот ($f \le 10^3$ Гц) и при работе от высокоомных источников сигналов ($R_г > 10^3 \div 10^4$ Ом). Достоинство таких ИОУ также в том, что они менее критичны к выбору оптимального сопротивления источника сигналов $R_{г.опт}$, поэтому сдвиг шумовых характеристик, вызываемый облучением, не сопровождается заметным увеличением шумовых сигналов из-за неизбежного нарушения условия оптимальности по номиналу $R_г$.

Лучшими шумовыми характеристиками обладают микросхемы с диэлектрической изоляцией (в них не образуются шумы, связанные с возникновением фототоков через изолирующие p-n-переходы), а также с пленочными резисторами (вместо диффузионных). При этом низкочастотные шумы уменьшаются с уменьшением площади эмиттера и толщины базы входных транзисторов, что характерно при переходе на более жесткие проектные нормы (например – с уровня 350 нм к уровню 180 нм и так далее). Способствует этому также применение технологических способов, например, введение различных добавок (например, хрома) в диоксид кремния (пассивирующую поверхность) для уменьшения плотности ПС [126].

Радиационные эффекты в интегральных компараторах напряжений. Схемотехнические решения интегральныхе компараторов напряжений (ИКН) в микросхемах КН отличаются от индустриальныхИОУ в основном структурой выходных каскадов [119]. В этих компараторах выходные каскады построены так, чтобы обеспечить электрическое согласование с цифровыми ИМС без применения специальных согласующих устройств, преобразующих уровни выходных потенциалов. Поэтому ИКН можно отнести к классу аналого-цифровых ИМС. При этом радиационная стойкость современных ИКН микросхем космического назначения прежде всего лимитируется аналоговой частью ИМС, выполняющей функции классического порогового устройства, точностные характеристики которого в итоге определяют пределы допустимого уровня ионизирующих излучений. Радиационная стойкость таких ИКН любого цифрового устройства электронной системы КА лимитируется только численным изменением его выходных потенциалов $U^1_{вых}$ и $U^0_{вых}$.

Для прецизионных ИКН, типичным представителем которых является также микросхема LM111, отличительной характеристикой являются малые входные токи (менее 0,1 мкА) и существенно большие коэффициенты усиления (более 10^5). Благодаря этим усовершенствованиям прецизионные ИКН КН обеспечивают более высокую точность сравнения напряжений при работе от высокоомных источников. Однако они же приводят к снижению их радиационной стойкости, которая в первую очередь определяется зависимостью коэффициента усиления от суммарного флюенса ионизирующего излучения факторов космического пространства. Это является результатом перехода рабочих характеристик в область микротоков (для уменьшения $I_{вх.см}$), а также использования в усилительном тракте p-n-p-транзистора с боковой инжекцией. По данным работы [118] стандартная микросхема LM111 практически перестает выполнять свои функции – усиливать при флюенсах 3Ч10^{13} электрон/см^2.

Наименьшей чувствительностью к облучению обладают быстродействующие ИКН [119], представителями которых являются широко используемые в КА SE527 и AM685. Выходные потенциалы $U^1_{вых}$ и $U^0_{вых}$, напряжение смещения $U_{вх.см}$, входной ток сдвига этих микросхем вплоть до флюенса 10^{14} нейтр./см^2 практически не меняются. Наиболее заметно растет с увеличением флюенса входной ток смещения, что является естественным следствием процесса деградации коэффициента передачи тока базы β_N входных транзисторов. Более высокая радиационная стойкость большинства быстродействующих ИКН объясняется применением в них высокочастотных транзисторов и малым временем пролета носителей τ_{TN}.

7.3. Основные методы обеспечения радиационной стойкости интегральных микросхем

Снижение радиационной чувствительности ИМС в достаточной степени достигается с помощью различных конструктивно-технологических и схемотехнических методов [127–130]. К первой группе методов относятся: применение оптимальной топологии (охранных колец и т.п.), оптимальным образом выбранная толщина подзатворного окисла, режимы его формирования и отжига, использование самосовмещенных низкоомных поликремниевых контактов, применение диэлектрической изоляции элементов ИМС и др. Вторая группа методов, кроме уже перечисленных выше, включает: применение специальных схемных решений ИМС, например, схемотехническая компенсация изменения параметров МОП-транзисторов при облучении, оптимизация напряжения питания ИМС, использование резервирующих систем, в том числе информационного резервирования БИС ОЗУ за счет избыточного кодирования данных.

В Беларуси ОАО «ИНТЕГРАЛ» разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру биполярных и КМОП микросхем, в том числе для применения в аппаратуре промышленных, космических и других специальных систем. Основные результаты этой работы по совершенствованию конструкции и технологии ИМС, обеспечивающей повышение их радиационной стойкости, представлены в работе [5, 128].

Отдельные вопросы оптимизации технологии изготовления пленок SiO_2 с точки зрения повышения их радиационной стойкости также рассматривались в ряде работ [127–132]. Так, было установлено, что из всего спектра основных конструктивных параметров КМОП приборов наибольшее влияние на обеспечение их радиационной стойкости оказывают толщины подзатворного и изолирующего окислов. При этом наиболее чувствительными структурами (по дозовым эффектам) являются как активные МОП-транзисторы (особенно n-канальные), так и паразитные МОП-транзисторы, связанные с качеством изолирующего окисла. Поэтому основное влияние на радиационную стойкость КМОП ИМС оказывают температурный режим, механические напряжения и неконтролируемые примеси. В первую очередь эти факторы приводят к нестабильности характеристик радиационной стойкости ИМС (например, возникновению токов утечки подзатворного окисла).

Значительное улучшение требуемых показателей радиационной стойкости КМОП ИМС космического применения (предельные дозы 10^4 Гр и выше) можно обеспечить с помощью использования технологических решений, в частности – высоколегированных защитных областей, предотвращающих возникновение радиационно-индуцированных токов утечки, целенаправленной оптимизации технологии изготовления подзатворного диэлектрика в МОП-транзисторах, использования специальных методик отбраковки потенциально нестойких образцов, введения специальной радиационно-термической обработки и целого ряда других дополнительных нетрадиционных операций в технологический процесс изготовления КМОП ИМС [133–136].

Прогнозирование радиационной стойкости КМОП ИМС космического назначения с достаточной достоверностью можно осуществить с помощью специальных расчетно-экспериментальных методов, включающих соответствующие адекватные математические модели и использование в конструкторской деятельности результатов радиационных испытаний специально разработанных для этих целей тестовых МОП-транзисторов [137, 138].

7.4. Радиационная стойкость современных и перспективных ИМС

Анализ тенденций стремительного развития современных технологий изготовления МОП ИМС показал, что по мере уменьшения линейных размеров элементов микросхем радиационная стойкость приборов в основном повышается [139]. Хотя следует отметить, что этот достаточно спорный экспертный вывод получен фактически на ограниченном количестве изготовленных образцов, без анализа физических причин.

Необходимо отметить, что с ростом степени интеграции БИС и СБИС, характеризующихся сложным и многообразным характером внутрисхемных связей, все эти связи могут быть реализованы лишь на основе изолируемых окислом компонентов, имеющих предельно малые размеры и объемы активных и пассивных областей и работающих в электрических режимах, близких к предельно возможным для используемых материалов. В результате этого возникают определенные физические ограничения, неизбежно снижающие радиационную стойкость БИС и СБИС по сравнению со схемами малой и средней степени интеграции [5].

Эксперты утверждают, что реальная зависимость изменения уровня стойкости от размеров элементов ИМС будет иметь немонотонный характер, так как по мере уменьшения геометрических размеров элементов все больший вклад будут давать так называемые краевые эффекты, связанные с особенностями процессов переноса неосновных носителей через периферийные области [9]. Действительно, если полезный ток пропорционален площади канала, тогда величины токов утечки должны быть пропорциональны периметру канала. Очевидно, что по мере уменьшения линейных размеров численное значение величины отношения периметра к площади возрастает, что приводит ко все большему вкладу паразитных эффектов. Поэтому на первом этапе по мере уменьшения технологических размеров стойкость приборов удавалось повышать в первую очередь технологически – за счет снижения толщины диэлектрика. Однако уже при некоторых определенных размерах элементов ИМС вклад периферийных областей стал преобладающим, и стойкость начала снижаться. Область таких оптимальных линейных размеров зависит от конкретной используемой технологии.

По мере развития технологии в ИМС КН начали проявляться совершенно новые, ранее не известные физические эффекты и ограничения. Типовой – история появления технологии КНИ и КНС. Для подобных структур характерны очень тонкие слои активных приборов (менее десятых долей мкм), ограниченные с двух сторон диэлектрическими структурами. Из-за малых линейных размеров элементов таких размеров элементов ИМС и относительно больших напряженностях

электрических полей в этих структурах имеют место многочисленные установленные экспериментально эффекты, обусловленные влиянием малых размеров и особенностей кинетики горячих электронов [140, 141]. Некоторые из них уменьшают пробивное напряжение стока и связаны с паразитным влиянием биполярного n-p-n-транзистора в n-канальном КНИ МОП-транзисторе. Другие приводят к так называемому схемотехническому перегибу (Кинк-эффект) выходной сток-истоковой характеристики. Эффект Кинка наиболее сильно проявляется в n-канальных транзисторах и обычно отсутствует в p-канальных транзисторах [2]. Для короткоканальных приборов имеет место деградация характеристик, обусловленная действием горячих электронов. Однако наибольшее значение при оценке стойкости КНИ/КНС структур имеет наличие так называемой второй границы раздела полупроводник/окисел, которая к тому же может иметь плавающий потенциал. Наличие этой второй границы раздела и возможность появления неконтроллируемого радиационно-индуцированного заряда в изолирующем окисле подложки такой микросхемы могут привести к образованию цепи проводящих каналов на обратной стороне подложки и в итоге – к отказу микросхемы.

Основная проблема при количественной оценке влияния обратного канала на надежность функционирования ИМС обусловлена тем, что, как правило, этот окисел бывает толстым и к нему не приложено напряжение. Следовательно, теоретически для таких структур бывает очень трудно оценить величину суммарного заряда в объеме окисла, который остался после процессов первичной рекомбинации. К сожалению, как показывает печальный опыт анализа отказов ИМС КН, во многих случаях этот заряд сам может формировать плохое электрическое поле, к тому же из-за относительно слабых напряженностей электрического поля радиационно-индуцированный заряд может зависеть от режима работы МОП транзистора (напряжения сток–исток), а его положение внутри окисла из-за этого может меняться.

Анализ физических механизмов деградации показал, что наличие толстых диэлектриков, в которых перенос подвижного заряда осуществляется достаточно медленно, в ряде ИМС КН приводит к задержанным (латентным) эффектам. Подобные латентные релаксационные процессы [142] проявляются в резком возрастании темпов отжига положительного заряда и образования ПС спустя некоторое (как правило, значительное) время после прекращения облучения. В качестве основного механизма экспертами рассматривается диффузия молекулярного водорода в пассивирующих слоях окисла и его последующий крекинг, приводящий к отжигу положительного заряда и образованию ПС [143], а также релаксация этого объемного заряда в диэлектрических подложках.

Комплексный анализ информации, представленной в зарубежных и отечественных научно-технических периодических изданиях и материалах конференций по физике и технологии полупроводниковых приборов [128, 129, 136, 144–147], дает основание сделать вывод, что за сравнительно короткий срок (за последние 5-7 лет) зарубежные фирмы, специализирующие в области ИМС КА, сделали резкий прорыв в освоении технологий изготовления радиационностойких ИМС на структурах КНС и КНИ по КМОП (а в перспективе и БиКМОП) маршруту и реально вышли на промышленный выпуск СБИС, перешагнув характерные для СНГ топологические нормы 0,5 мкм (табл. 7.1–7.3).

Таблица 7.1. Параметры стойкости КМОП СБИС

Производитель	Тип СБИС	Технология, мкм	Dose, Крад(Si)	Upset, рад(Si)/с	Latchup, рад(Si)/с	SEU, МэВ·см²/мг (сб/бит·дн)	SEL, МэВ·см²/мг
Aeroflex	ОЗУ 4М (12Т)	0,18	300	10^9	$> 10^{11}$	53 ($8 \cdot 10^{-10}$)	>100
	ОЗУ 4М	0,25	200	10^9	$> 10^{11}$	53 (10^{-10})	>100
Atmel	ОЗУ 4М (6Т)	0,25 (RHD)	300	–	–	–	> 80
	ОЗУ 1М (6Т)	0,35	200	–	–	–	IL*
Honeywell	ОЗУ 1М	0,7 (SOI)	1000	$3 \cdot 10^{10}$	$> 10^{11}$	(10^{-10})	NL**
	ОЗУ 4М (7Т)	0,35 (SOI)	> 300	$> 10^{10}$	$> 10^{12}$	(10^{-10})	NL**

* IL – стойкая к защелкиванию.
** NL – отсутствует защелкивание.

Таблица 7.2. Зарубежная радиационно-стойкая элементная база КНС КМОП ИМС, работающая в условиях космоса

Наименование показателей	Радиационно стойкие микросхемы фирмы **Mitel Semicond.** (бывш. **GEC Pleassey**)	Радиационно стойкие микросхемы фирмы **Intersil**	Радиационно стойкие микросхемы фирмы **Dynex Semicond.**	Радиационно стойкие схемы фирмы **Peregrine Semicond. Corp.**	Микропроцессорный комплект для серии Б1825, Б1620 **ОАО НПП Сапфир**
Диапазон рабочих температур, °С	–65…+150°	–55…+125°	–55…+125°	–65…+150°	–60…+85°
Максимальная доза облучения, рад (Si)	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	10^5–10^6
Вероятность сбоев, сбой/(бит·сут.)	$< 5 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-10}$	$< 1 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-9}$	$< 3 \cdot 10^{-11}$
Мощность дозы излучения (при которой наступает отказ системы), рад (Si)/с	$> 1 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{12}$	$> 1 \cdot 10^{12}$	$\geq 1 \cdot 10^{12}$

Таблица 7.3. Зарубежная радиационно-стойкая элементная база КМОП КНИ БИС, работающая в условиях космоса

Honeywell		
БМК 1,5- и 8-млн вентилей	1 Мрад (Si)	10^{-12} ошибок/ (бит·сутки)
4- и 16-Мбит ОЗУ	1 Мрад (Si)	10^{-10} ошибок/ (бит·сутки)
16-бит встраиваемый микропроцессор	100 крад (Si)	10^{-9} ошибок/ (бит·сутки)
ST Microelectronics		
12-бит 50 МГц АЦП	300 крад (Si)	60 МэВ/(мг·см²)
Набор микросхем стандартной логики	100 крад (Si)	72 МэВ/(мг·см²)
Схемы для аппаратуры передачи данных	300 крад (Si)	72 МэВ/(мг·см²)
Sandia Nat. Lab.		
Технология CMOS 6R (0,5 мкм; 5 В)	1 Мрад (Si) 10^9 рад (Si)/с	40 МэВ/(мг·см²)
Технология CMOS 7 (0,35 мкм; 3,3 В)	1 Мрад (Si) 10^{11} рад (Si)/с	40 МэВ/(мг·см²)

В настоящее время по технологии КМОП/КНС промышленно выпускается широкая гамма микросхем с различными функциональными свойствами, имеющих топологические нормы до 1 мкм. В таких БИС отдельные узлы и элементы полностью электрически изолированы друг от друга сапфировой подложкой и воздушным или твердотельным диэлектрическим зазором. Малые линейные размеры полупроводниковых областей слоев кремния позволяют изготавливать транзисторы со сквозной (до подложки) геометрией сток-истоковых областей. Благодаря этому реально обеспечивается снижение уровня ионизационных и тепловых токов, а также подавляются паразитные емкостные связи между активными элементами микросхем. Это обуславливает их большую стойкость к воздействию радиационных полей различной природы по сравнению с БИС на монолитном кремнии [144].

Проблема перехода к производству микросхем КН с проектными нормами менее 0,5 мкм на практике решается путем использования в качестве подложек структур КНИ, степень дефектности приборных слоев которых намного ниже, чем пленок кремния композиций КНС [145]. К настоящему времени разработано несколько известных технологических вариантов изготовления исходных структур КНИ, которые освоены в промышленных масштабах зарубежными фирмами IBIS, Canon (США) и SOITEC (Франция). По мнению специалистов, структуры с наиболее хорошими электрофизическими характеристиками и качеством приборных слоев обеспечивает технология Smart-Cut. Предполагается, что на полученных этим методом структурах с нанометровыми толщинами отсеченных слоев кремния станет возможным изготовление ультраБИС (УБИС) с МОП-транзисторами, имеющими длину канала ВСЕГО 5–15 нм.

Так, компания Atmel (Франция) освоила новую смешанную аналого-цифровую технологию DMILL [147], разработанные по этой технологии БИС могут выдержать большие дозы облучения, тем более что в настоящее время компания Atmel перешла на крупносерийное производство 0,25 микронных технологий КМОП и БиКМОП с четырьмя уровнями металлизации, в 2013 г. завершает переход на 0,18 микронные технологии с пятью уровнями металлизации. На рынке уже имеется ряд радиационностойких компонентов компании Atmel, изготовленных по 0,8 микронной БиКМОП технологии, которые обеспечивают работоспособность с очень низким уровнем шумов при воздействии жесткого ионизирующего излучения с дозой до 10 Мрад и флюенсом нейтронов 10^{14} н/см^2.

Проведенный выше анализ показал, что проблема влияния проникающей радиации на характеристики биполярных или МОП-транзисторов и соответствующих ИМС остается весьма актуальной. Данные отечественной и зарубежной литературы показывают, что вопросы обеспечения (прогнозирования и повышения) радиационной стойкости биполярных и КМОП ИМС, особенно перспективных ИМС (КМОП/КНИ, БиКМОП, субмикронных КМОП), являются исключительно актуальными для обеспечения минимального риска аварий изделий ракетно-космической техники на текущий и перспективный период реализации амбициозных, космических программ ведущих индустриально развитых государств.

7.5. Рекомендуемый набор тестовых элементов для экспериментальных исследований влияния радиационных воздействий на характеристики кремниевых микросхем

Тестовые элементы для оценки элементной базы аналоговых биполярных интегральных микросхем:

- n-p-n-транзисторы с различной площадью эмиттера;
- горизонтальные p-n-p-транзисторы с различной шириной базы;
- вертикальные p-n-p-транзисторы с различной площадью эмиттера.

Тестовые транзисторные n-p-n- и p-n-p-структуры изготавливались в тестовом модуле по стандартной эпитаксиально-планарной технологии на эпитаксиальном кремнии n-типа (КЭФ-4,5), выращенном на p-подложке (КДБ-10). Оксид кремния использовался для пассивации структур.

Элементная база логических КМОП интегральных микросхем

Тестовые кремниевые транзисторные МОП-структуры рекомендуется изготавливать в тестовом модуле с изготовлением по стандартной эпитаксиально-планарной технологии с индуцированными каналами n-типа (длина канала $L = 1{,}5$ мкм и ширина $W = 50{,}0$ мкм) и p-типа ($L/W = 2{,}0/50{,}0$), толщина подзатворного оксида кремния порядка 25 нм, целесообразно использовать поликремниевый затвор.

Прежде всего исследовалось радиационное поведение тестового паразитного n-МОПТ на толстом окисле с поликремниевым затвором ($L/W = 1{,}2/50$), а также n-МОПТ № 2 ($L/W = 50/3$), не имевшего защиты от утечек.

Исследовались тестовые структуры n-МОПТ с различным отношением топологической ширины к длине канала W/L (1,4/50, 1,4/4, 50/4, 50/50, 1,4/50). Каждая из тестовых структур была представлена двумя группами образцов: 1Т и 2Т. В приборах предусматривалась защита от утечек («уши»).

Рекомендуемый состав тестов для элементной базы субмикронных (0,35 мкм) КМОП ИМС:

- тестовые МОП-конденсаторы с толстым изолирующим окислом. Толщина окисла – 0,38–0,52 мкм, подложка – кремний p-типа;
- тестовые МОП-конденсаторы с тонким подзатворным окислом (7,0 нм) на p-подложке;
- тестовые МОПТ с каналами n- и p-типа (длина и ширина канала $L/W = 0{,}35/10{,}0$ мкм) рекомендуется изготавливать по стандартной эпитаксиально-планарной технологии, тестовые МОПТ должны иметь как классическую, так и кольцевую конструкции (сток окружен затвором).

Элементная база электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств (ЭСППЗУ)

Целесообразно исследовать тестовые элементы БИС, изготовленные по типовому технологическому маршруту для микроконтроллеров со встроенными блоками ЭСППЗУ, содержащими запоминающие ячейки двух типов. Первый тип – однотранзисторная ячейка памяти с параллельным стиранием, которая обычно состоит из запоминающего элемента – n-канального МОП-транзистора с плавающим затвором.

Таблица 7.4. Исследуемые аналоговые ИМС

Тип ИМС	Функциональное назначение
1244ЕН5Т; 1244ЕН24Т	Стабилизатор напряжения
1252ЕР1Т	
1253ЕИ5Т; 1253ЕИ24Т	
1467СА1Т; 1467СА2Р;	
1467СА3Т	Компаратор напряжения
1467УД1Т; 1467УД2Р	Операционный усилитель
1473УД1Т	

Такая ячейка ЭСППЗУ должна быть сформирована в подложке р-типа, где плавающий затвор транзистолра отделен от подложки слоем подзатворного окисла. В области стока необходимо предусмотреть «окно» тонкого туннельного окисла (инжектор) толщиной 8÷10 нм. Плавающий затвор должен быть отделен от управляющего затвора межслойным диэлектриком. Второй исследуемый тип – двухтранзисторная ячейка памяти классического полнофункционального ЭСППЗУ, которая обычно состоит из двух n-канальных МОП-транзисторов: транзистора выборки (адресного транзистора) и запоминающего транзистора с плавающим затвором. Технология изготовления ячеек памяти второго типа должна быть в основном такая же, как и ячеек первого типа.

В качестве объектов исследований целесообразно использовать стабилизаторы напряжения (СН), операционные усилители (ОУ) и компараторы напряжения (КН) ОАО «Интеграл» (табл. 7.4).

В частности, в последующих разделах представлены результаты экспериментальных исследований этих компонентов производства.

Так, например, микросхема 1467СА2Р – это четыре компаратора напряжения с общим питанием, размещенные на одном полупроводниковом кристалле, основная функция такого компаратора – переключение выходного уровня в момент времени, соответствующий заданному превышению входным сигналом опорного напряжения (заданного извне порога срабатывания) – широко используется в электронных системах обработки данных КА различного назначения.

Логические КМОП ИМС

В ходе работ по выбору наиболее оптимальных конструктивно-схемотических решений логических элементов, рекомендуемых для использования в задачах, решаемых госкорпорацией «Роскосмос», авторами исследовались логические КМОП ИМС серии 1594Т: 1594ЛЛ1Т – четыре логических элемента «2ИЛИ»; 1594ЛН1Т – шесть логических элементов «НЕ». ИМС серии 1594Т являются функциональными аналогами ИМС серии 1554ТБМ и отличаются ТТЛ-выходом.

Исследовались также шесть типов КМОП ИМС серии 5584 (разработчик НТЦ «Белмикросистемы»): 5584ЛП5Т (логические элементы «Исключающее ИЛИ»), ИМС 5584ИР8Т (регистр сдвига), 5584ТМ9Т (D-триггеры), 5584КП11Т (селекторы-мультиплексоры), 5584АП3Т (формирователи с тремя состояниями и инверсией на выходе) и 5584ИЕ10Т (двоичный счетчик).

Результаты этих исследований могут представлять интерес для разработчиков КА различного назначения и представлены в последующих главах данной книги.

КМОП БИС памяти

Поставленная разработчиками ЭКБ КН задача создания КМОП БИС ОЗУ информационной емкостью 256К потребовала проведения экспериментальных исследований различных конструктивно-технологических вариантов реализации ячеек памяти (ЯП), для чего была создана тестовая КМОП БИС IN4K информационной емкостью 4 Кбит (организация 4Кх1). Соответствующие тестовые БИС ОЗУ были спроектированы в трех конструктивно-технологических вариантах, различающихся величинами топологических зазоров между стоковой (n^+) и охранной (p^+) областями (1,5 мкм для вариантов № 1,2 и 1,0 мкм для № 3), а также между стоковой (p^+) и областью р-кармана (4,5 мкм для вариантов №1,3 и 4,0 мкм для № 2).

В качестве непосредственных объектов исследований были также выбраны ЭСППЗУ 1568РР1 емкостью 2 Кбит (256 × 8), разработанные и изготовленные в холдинге «ИНТЕГРАЛ» по КМОП технологии и предназначенные для решения конкретных технических задач ГК «Роскосмос».

Кроме того, также исследовались БИС ПЗУ 1632РТ1Т и 1835РЕ2Т – соответственно однократно программируемые пользователем и масочные ПЗУ информационной емкостью 32К × 8 и 128К × 8, изготовленные по КМОП технологии в холдинге «Интеграл».

КМОП БИС СОЗУ на основе КНИ-структур

Для проведения экспериментальных исследований использовались КНИ-структуры на пластинах диаметром 150 мм, изготовленные по технологиям SIMOX [148], Smart-Cut [149] и Dele-Cut [150].

КНИ-структуры были подобраны с одинаковой толщиной пленки кремния 0,23–0,29 мкм и толщиной изолирующего окисла 0,28–0,4 мкм и проведены по цеху серийного производства холдинга «Интеграл» в составе одной партии пластин по 5 пластин каждой из трех КНИ технологий.

Для исследований была разработана специализированная тестовая матрица, содержащая набор тестовых элементов для контроля электрических параметров элементной базы КМОП БИС, контроля и оптимизации технологии их изготовления. В состав тестовой матрицы были включены КМОП БИС статического оперативною запоминающего устройства емкостью 8 Кбит с организацией 1024 × 8 бит на базе 6-ти и 10-ти транзисторных ячеек памяти. Эти БИС были разработаны с проектными нормами 1,2 мкм под серийный КМОП процесс с одним уровнем поликристаллическою кремния и двумя уровнями металлизации. Подзатворный окисел толщиной 13 нм получали при температуре 850 °С методом пирогенного окисления.

БиКМОП БИС

Объектом исследований являлась БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных 5559ИН2Т, предназначенного для применения в спутниковых телекоммуникационных системах с низкой рассеиваемой мощностью, соответствующих стандартам RS-485, RS-422; трансляторах уровня; приемопередающих устройствах; системах управления промышленными объектами.

Так, БИС приемопередатчика 5559ИН2Т является типовым представителем класса интерфейсных микросхем. Она преобразует входной сигнал уровня КМОП

в дифференциальный выходной сигнал стандарта RS-485, что требуется для обеспечения надежной передачи сигнала по двухпроводной длинной линии, и наоборот – преобразует дифференциальный входной сигнал уровней RS-485 в выходной сигнал КМОП. Минимальная чувствительность по дифференциальному входу приемника – 200 мВ в диапазоне входных напряжений от –7 до +12 В, скорость передачи данных – 2,5 Мбит/с. Диапазон напряжений питания микросхемы приемопередатчика – U_{CC} = 4,5–5,5 В. Предельная температура окружающей среды – от –60 до +125 °С.

Микросхемы 5559ИН2Т были разработаны по комбинированной технологии БиКМОП, обеспечивающей следующие характеристики: низкий ток потребления, свойственный КМОП технологии, и быстрое переключение сигналов, свойственное биполярной технологии. Эти микросхемы обладают повышенной защитой от электростатических разрядов и высокочастотных электромагнитных помех, что достигается с помощью специальных технических решений.

7.6. Оборудование и методики облучения тестовых структур и исследуемых образцов микросхем

Облучение образцов полупроводниковых приборов гамма-квантами Co^{60} с энергией 1,25 МэВ проводилось на установке «Исследователь» при температуре 300÷310 К. Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,5÷1,0 Гр/с, доза – 10^3÷10^5 Гр. Дозиметрия гамма-излучения проводилось образцовыми глюкозными детекторами ДОГ-0.05/2 или твердотельными стеклянными детекторами ДТС-0.01/1.0 с погрешностью ±7%.

Гамма-установка «Исследователь» (рис. 7.2) содержит свинцово-стальной защитный корпус, в центре которого установлен облучатель в виде трех кассет с 36 изотопными источниками Co^{60} типа ГИК-7-2 в каждой. Всего – 108 гамма-источников, которые располагаются вокруг рабочей облучательной камеры объемом 4200 $см^3$. Время радиационного воздействия определяется по формуле:

$$t = D/P,$$

где D – доза гамма-излучения, P – мощность дозы излучения, которая зависит от расположения изделий в контейнере в рабочей камере установки.

Расчетная мощность дозы гамма-излучения определялась на основе контрольных измерений с помощью образцовых детекторов ДОГ-0,05/2 в различных точках рабочей камеры установки «Исследователь».

Расчеты проводились исходя из закона радиоактивного распада [151]: число радиоактивных ядер уменьшается во времени экспоненциально. Таким же образом уменьшается и интенсивность (мощность дозы) излучения:

$$P = P_o \exp[(-0{,}693t)/T_{1/2}],$$

где P_o – начальная мощность дозы гамма-излучения; $T_{1/2}$ = 5,272 лет – период полураспада радионуклидов Co^{60}.

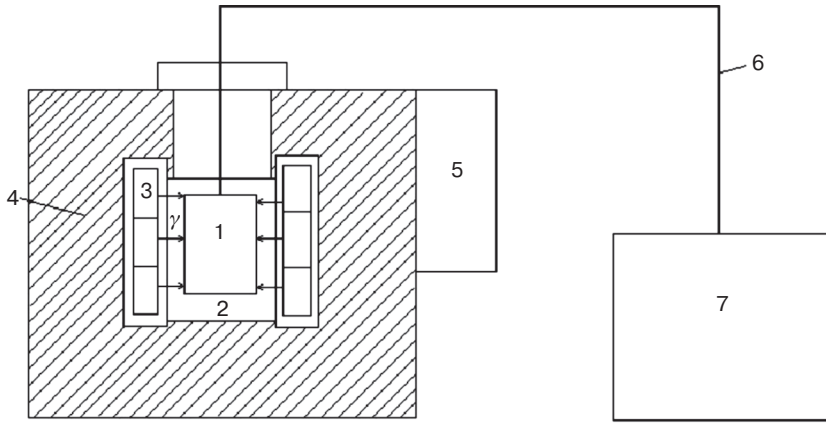


Рис. 7.2. Структурная схема проведения испытаний тестовых структур и ИМС на гамма-установке «Исследователь»: 1 – облучаемые образцы; 2 – рабочая камера гамма-установки; 3 – изотопные источники гамма-излучения Co^{60}; 4 – радиационная защита; 5 – пульт управления гамма-установкой; 6 – многожильный кабель; 7 – контрольно-измерительная аппаратура

Облучение образцов электронами с энергией 4 МэВ проводилось на линейном ускорителе ЭЛУ-4 при комнатной температуре. Плотность потока электронов составляла $10^{11} \div 10^{12}$ см$^{-2}$с$^{-1}$, флюенс – $10^{13} \div 10^{15}$ см$^{-2}$. Дозиметрический контроль (измерение плотности потока электронов) осуществлялся с помощью цилиндра Фарадея. Погрешность измерения плотности потока электронов составляет $\pm 10\%$.

Общая блок-схема облучения образцов транзисторных МОП-структур и КМОП ИМС на электронном ускорителе ЭЛУ-4 показана на рис. 7.3.

Облучение образцов биполярных и МОП-транзисторов в активном режиме гамма-квантами или электронами проводилось с учетом конструктивных особенностей как самих тестовых элементов микросхем, так и облучательной установки.

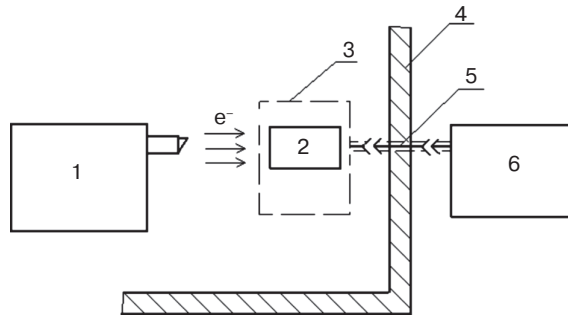


Рис. 7.3. Блок-схема облучения транзисторных структур и ИМС на электронном ускорителе: 1 – ускоритель электронов ЭЛУ-4; 2 – облучаемые структуры; 3 – кассета-держатель; 4 – радиационная защита; 5 – экранированный кабель длиной 12 м для дистанционного контроля режима облучения; 6 – контрольно-измерительный блок

К зоне облучения гамма-установки через специальные отверстия в штоке проведены два восьмижильных жгута (рис. 7.2). Число проводов лимитировано количеством подключаемых одновременно выводов тестового модуля.

При облучении образцов на ускорителе электронов используются контрольно-измерительный блок и экранированный кабель длиной 12 м для дистанционного контроля режима облучения (рис. 7.3).

Принципиальная электрическая схема подключения n-p-n- и p-n-p-транзисторов при облучении в активном режиме тестового модуля приведена на рис. 7.4 и 7.5. Подключение осуществлялось по схеме с общим эмиттером. Смещение U_0 на транзисторах в процессе облучения контролировалось вольтметром (V) типа Щ300 и поддерживалось равным $5 \pm 0{,}05$ В. Оно задавалось источником постоянного напряжения типа Б5-7.

Как видно из рис. 7.4 и 7.5, в тестовом модуле одновременно подключались четыре транзистора: три n-p-n- и один p-n-p-типа. Ток базы $I_б$ каждого транзистора контролировался амперметрами А1, А3, А5 (рис. 7.4) и А7 (рис. 7.4) с точностью $\pm 5\%$. Тип амперметров определялся из условия временной длительности эксперимента. Величина $I_б$ для всех транзисторов составляла 10 мкА. При заданном напряжении смещения она регулировалось с помощью переменных резисторов $R1-R4$ (430÷450 кОм).

Наряду с током базы также измерялся ток эмиттера $I_э$ облучаемых транзисторов с помощью амперметров А2, А4, А6 (рис. 7.4) и А8 (рис. 7.4) с точностью $\pm 5\%$. Как видно из приведенных микросхем, ток $I_э$ равен:

$$I_э = I_б\,(\beta + 1),$$

где β – коэффициент усиления транзисторов по току. Следовательно, по измеряемому значению $I_э$ можно было контролировать изменение β непосредственно в процессе облучения подключенных транзисторов.

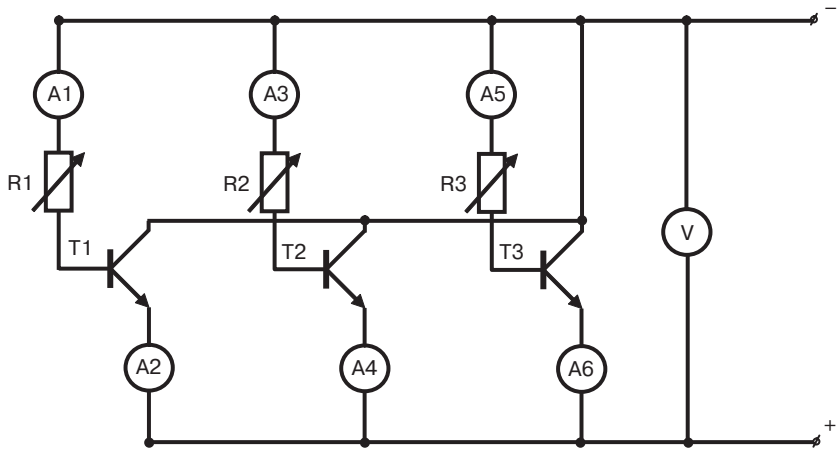


Рис. 7.4. Схема подключения n-p-n-транзисторов (Т1–Т3) для облучения гамма-квантами Co^{60} в активном режиме

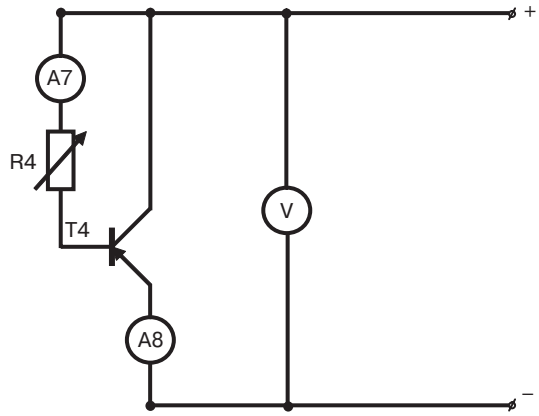


Рис. 7.5. Схема подключения p-n-p-транзистора (Т4) для облучения гамма-квантами Co^{60} в активном режиме

При облучении тестового модуля с МОП-транзисторами в активном режиме подключение осуществляется по следующей схеме: у n-канальных МОП-транзисторов подается смещение «минус» – на сток, исток, соединенные с подложкой; «плюс» – на затвор; у p-канальных МОП-транзисторов – «плюс» – на сток, исток, соединенные с подложкой; «минус» – на затвор. Смещение U_0 на затворе МОП-транзисторов в процессе облучения контролируется вольтметром типа Щ300 и поддерживается равным 5 ± 0,05 В. Оно задается источником постоянного напряжения типа Б5-7.

Испытания БИС на стойкость к эквивалентному воздействию импульсного гамма-излучения проводились с использованием лазерного имитатора «РАДОН-5М». При этом использовались следующие режимы: длина волны лазерного излучения – 1,08 мкм; энергия излучения в импульсе – 50 мДж; длительность импульса – 12 нс; максимальное значение имитируемой мощности дозы – 10^{12} рад (Si)/с. Облучение микросхем проводилось сверху при предварительно удаленной крышке корпуса. Дозиметрия проводилась по показаниям калиброванного детектора лазерного излучения БКЛИ-601 с погрешностью ±10%.

Испытания БИС и тестовых структур на стойкость к эквивалентному воздействию стационарного гамма-излучения проводились с использованием рентгеновского имитатора «РЕИМ-2». Эффективная энергия рентгеновского излучения составляла 10 кэВ. Эквивалентная мощность дозы составляла 70÷100 рад (Si)/с. Дозиметрия проводилась по показаниям калиброванного детектора рентгеновского излучения БДРИ-601 с погрешностью ±10%.

7.7. Методика измерения электрических параметров тестовых структур после радиационной обработки

Определение характеристик радиационных дефектов (концентрация, энергия активации, сечение захвата носителей заряда) в базовой области p-n-структур осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (Deep Level Transient Spectroscopy – DLTS) [152]. При этом напряжение обратного

смещения на образцах составляло –5 В, длительность импульса заполнения ловушек носителями заряда – 0,01 с. Измерялись спектры в режимах заполнения ловушек как основными, так и неосновными носителями заряда. В первом случае напряжение импульса заполнения было 0 В, а во втором – +2 В. Измерения проводились в диапазоне температур 78÷400 К.

С помощью измерителя Tektronix 370B контролировались параметры биполярных транзисторных структур (вольт-амперные характеристики и коэффициент усиления по току) с погрешностью ±10%.

Измерения параметров МОП-транзисторов: вольт-амперных характеристик, порогового напряжения и крутизны проводились с помощью стандартного измерителя Л2-56, а также автоматизированного измерителя параметров транзисторов Л2-70. Погрешность измерений составляла ±10%.

CV-характеристики МОП-структур измерялись с помощью автоматизированного цифрового LCR измерителя Е7-12 на частоте 1 МГц с погрешностью ±10%.

Параметры логических КМОП ИМС, а также аналоговых биполярных ИМС измерялись с помощью автоматизированной измерительной системы АИС «Дакота» с погрешностью ±10%.

Методика контроля параметров ЭСППЗУ

Контроль ячейки ЭСППЗУ

Контролируется величина порогового напряжения запоминающего элемента ячейки ЭСППЗУ (транзистора с плавающим затвором) в запрограммированном и стертом состоянии до облучения и после его окончания.

Запоминающий элемент ячейки ЭСППЗУ (МОП-транзистор с плавающим затвором) программируется согласно приведенной ниже схеме (рис. 7.6).

Параметры режима программирования:

- напряжение стока $U_с = 0$ В;
- напряжение истока $U_и = 0$ В;
- напряжение подложки $U_п = 0$ В.

На затвор запоминающего элемента от генератора импульса Г5-54 подается импульс программирующего напряжения, амплитуда импульса 14 В, длительность импульса 1 мс.

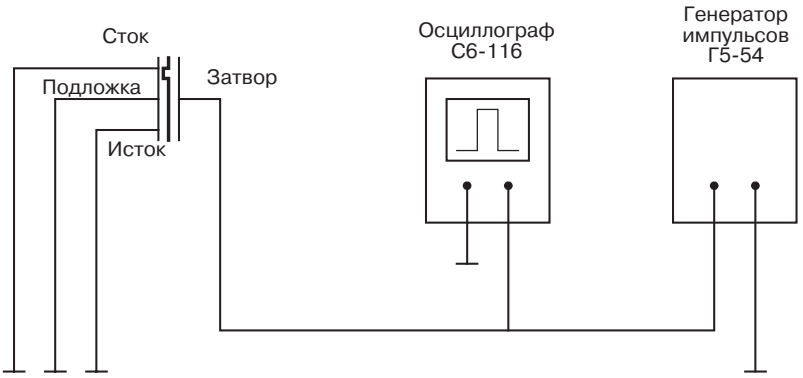


Рис. 7.6. Схема программирования запоминающего элемента ячейки ЭСППЗУ

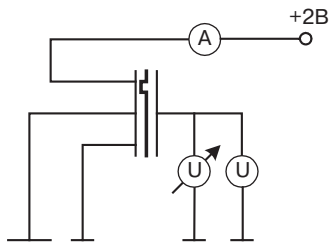


Рис. 7.7. Схема контроля порогового напряжения

Контроль порогового напряжения после программирования осуществляется по схеме, приведенной на рис. 7.7.

Запоминающий элемент ячейки ЭСППЗУ (транзистор с плавающим затвором) стирается согласно приведенной ниже схеме (рис. 7.8).

Параметры режима стирания:

- напряжение затвора $U_з = 0$ В;
- напряжение истока не определено (обрыв);
- напряжение подложки $U_п = 0$ В.

На сток запоминающего элемента от генератора импульса Г5-54 подается импульс стирающего напряжения, амплитуда импульса 14 В, длительность импульса 1 мс.

Контроль порогового напряжения после программирования осуществляется по схеме, приведенной на рис. 7.7.

Контроль блока ЭСППЗУ

Контролируются до облучения и после его окончания: ток потребления, входные токи высокого и низкого уровня, функциональный контроль блока ЭСППЗУ в запрограммированном состоянии в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 7.9.

D1 – микросхема;

G1 – источник напряжения питания 4,0÷6,0 В;

G2 – источник постоянного напряжения 0,0÷6,0 В;

G3 – источник постоянного напряжения 4,0÷6,0 В;

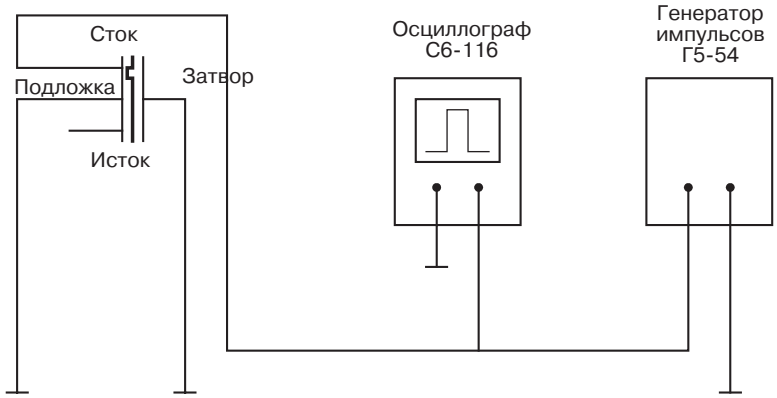


Рис. 7.8. Схема стирания запоминающего элемента ячейки ЭСППЗУ

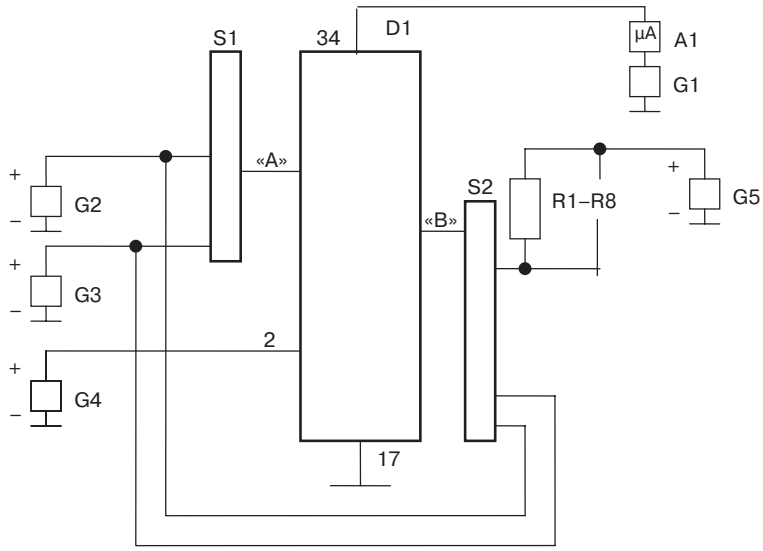


Рис. 7.9. Структурная схема включения блока ЭСППЗУ при измерении электрических параметров и контроля ФК

G4 – генератор импульсов положительной полярности с амплитудой, равной напряжению питания $E_{\text{п}}$;

G5 – источник постоянного напряжения 4,0÷6,0 В;

A1 – микроамперметр постоянного тока;

S1, S2 – коммутационные устройства;

R1–R8 – резисторы с сопротивлением 1,0 кОм ±5%.

В группу «A» включены выводы 01, 03, 04, 08–16, 21–23, 25–28, 32–34, 47.

В группу «B» включены выводы 35–40, 45, 46.

7.8. Экспериментальные результаты воздействия электронного облучения на параметры эпитаксиальных кремниевых p-n-структур

В данном разделе приводятся экспериментальные результаты исследований влияния облучения электронами с энергией $E = 4$ МэВ на параметры диодных p-n-структур, изготовленных на эпитаксиальном кремнии n-типа [182, 183].

Цель исследований – изучение влияния радиационных дефектов (РД) на параметры облученных быстрыми электронами кремниевых диодных p-n-структур.

Образцы p-n-структур облучались электронами с энергией 4 МэВ при комнатной температуре. Изохронный отжиг облученных образцов проводился в диапазоне температур $T_{\text{отж}} = 370 \div 770$ K на воздухе с шагом 50 K в течение 1200 с.

Измерялись основные характеристики диодов: прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}$ при разных значениях прямого тока в импульсном режиме (длительность импульса 400 мкс) и время жизни τ неосновных носителей заряда (ННЗ) методом Локса [153].

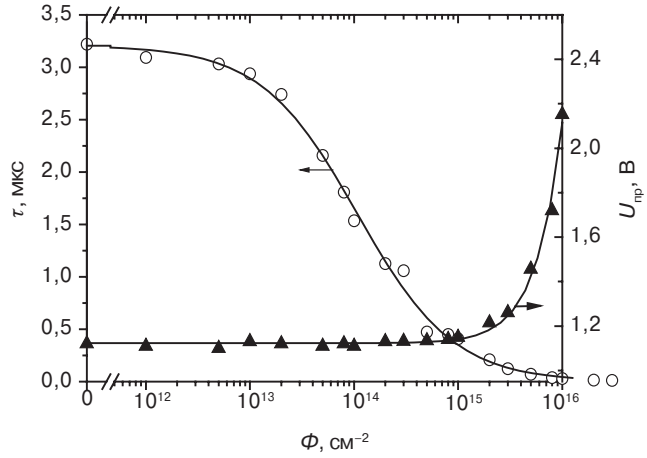


Рис. 7.10. Типичные зависимости времени жизни ННЗ и прямого падения напряжения диодных p-n-структур от флюенса электронного облучения

Определение характеристик радиационных дефектов (энергия активации, сечение захвата носителей заряда) в базовой области p-n-структур осуществлялось методом DLTS-спектроскопии.

Изменение времени жизни неосновных носителей заряда и прямого падения напряжения при разных значениях прямого тока p-n-структур после электронного облучения представлено на рис. 7.10. Во всем исследуемом диапазоне флюенсов электронов наблюдается уменьшение значения t. Наиболее существенно этот процесс происходит при $\Phi > 10^{13}$ см$^{-2}$. Так, на начальном этапе облучения, примерно до $\Phi = 10^{13}$ см$^{-2}$, значение времени жизни ННЗ уменьшается незначительно, а при $\Phi = 10^{13} \div 10^{15}$ см$^{-2}$ – более чем на порядок.

Величина прямого падения напряжения остается практически неизменной до $\Phi = (1 \div 2) \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ при всех значениях прямого тока (рис. 7.10). При больших флюенсах электронного облучения наблюдается резкий рост значения $U_{пр}$.

При облучении исследуемых диодных p-n-структур электронами в их объеме генерируются первичные РД: вакансии и междоузлия. Последние, в силу своей высокой подвижности, мигрируют по кристаллу и взаимодействуют с различного рода структурными нарушениями решетки и примесями, образуя вторичные РД. Именно вторичные РД и определяют основные изменения характеристик p-n-структур. Поскольку концентрация РД пропорциональна флюенсу электронного облучения, то эти изменения возрастают с увеличением Φ, что и наблюдается в эксперименте. При этом определяющую роль играют процессы радиационного дефектообразования в менее легированной n-базе p-n-структур.

На рис. 7.11*а* представлены DLTS-спектры одного из образцов после облучения электронами флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$. В результате облучения в базовую область диодных p-n-структур вводятся радиационные дефекты, перезарядка глубоких уровней которых приводит к возникновению на спектрах максимумов и минимумов. Глубокие уровни, расположенные в верхней половине запрещенной зоны кремния, дают при перезарядке основными носителями заряда максимумы

$E1-E5$, а в нижней половине запрещенной зоны и перезарядке неосновными носителями – минимумы $H1$ и $H2$. Вид спектров, полученных при других значениях окна скоростей эмиссии e, существенно не отличался от приведенного на рис. 7.11*а*. Только при максимальном значении $e = 19140$ с$^{-1}$ наблюдался в области азотных температур еще один пик $E1$, что показано на вставке к рисунку.

Сплошная линия на рис. 7.11*а* соответствует перезарядке ловушек основными, а штриховая – неосновными носителями заряда. Значение амплитуды DLTS-пиков напрямую зависит от концентрации соответствующих РД [154]. Из результатов на рис. 7.11*а* видно, что при электронном облучении в область базы диодных p-n-структур наиболее эффективно вводятся дефекты, ответственные за возникновение максимума $E2$ и минимума $H2$. Концентрация остальных дефектов в несколько раз меньше.

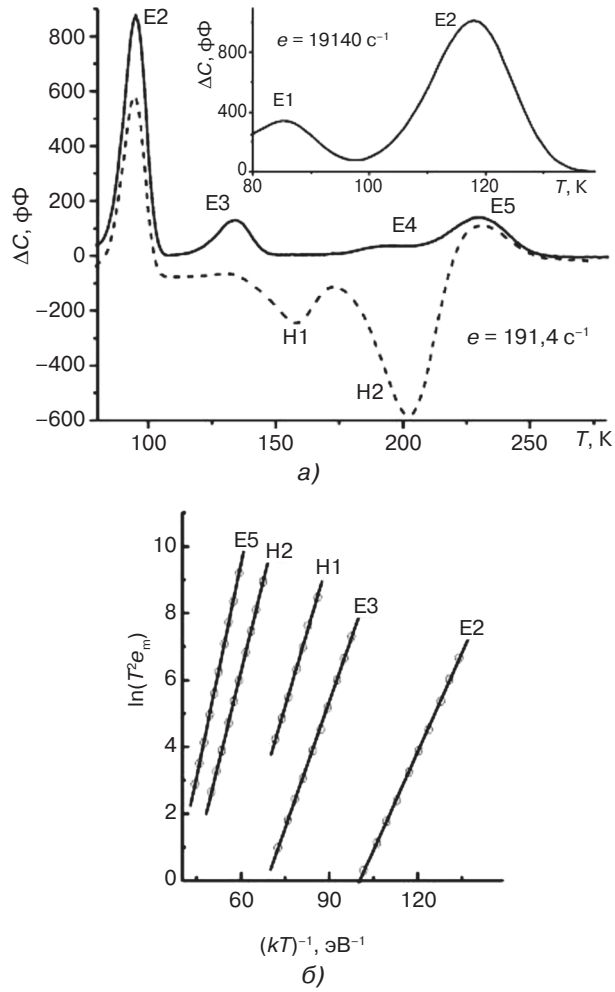


Рис. 7.11. DLTS-спектры облученного электронами ($\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$) образца (*а*) и зависимости Аррениуса (*б*) для наблюдаемых ловушек

Параметры глубоких уровней, наблюдаемые на DLTS-спектрах, определялись из зависимостей Аррениуса [154], представленных на рис. 7.11*б*. Ловушке *E*2 соответствуют глубокий уровень акцепторного типа $E_c - 0{,}19$ эВ и сечение захвата электронов $\sigma = 5{,}48 \cdot 10^{-14}$ см^2, *E*3 – $E_c - 0{,}25$ эВ и $\sigma = 5{,}26 \cdot 10^{-15}$ см^2, *E*5 – $E_c - 0{,}42$ эВ и $\sigma = 1{,}17 \cdot 10^{-15}$ см^2. Ловушке *H*1 соответствуют глубокий уровень донорного типа $E_v + 0{,}29$ эВ и сечение захвата дырок $\sigma = 1{,}4 \cdot 10^{-14}$ см^2, *H*2 – $E_v + 0{,}36$ эВ и $\sigma = = 2{,}27 \cdot 10^{-15}$ см^2. Параметры ловушек *E*1 и *E*4 определить не удалось. Для *E*1 не была получена зависимость Аррениуса, так как при значениях окна скоростей эмиссии $e < 19140$ с$^{-1}$ пик *E*1 смещается на спектре в область не регистрируемых измерительной установкой температур (< 78 K). Ловушка *E*4 плохо разрешается с *E*5.

Сопоставление полученных результатов с литературными данными [132, 155] свидетельствует о том, что уровень *E*2 принадлежит комплексу вакансия–кислород V–O (A-центр), уровень *H*2 – комплексу углерод внедрения – кислород внедрения C_iO_i и *E*3, *E*5 – комплексу дивакансия V_2 в двукратно и однократно отрицательно заряженных состояниях, соответственно.

Для идентификации ловушек *E*1, *E*4 и *H*1 проводился дополнительный изохронный отжиг при $T_{отж} = 300 \div 400$ K. На рис. 7.12 представлены DLTS-спектры того же образца, что и на рис. 7.11, после отжига при 325 K в течение 1800 с. Видно, что на спектрах исчезли пик *E*1 и минимум *H*1. Это позволяет соотнести данные глубокие уровни с одним и тем же радиационным дефектом – углерод внедрения C_i. Согласно [156] этот дефект дает в верхней половине запрещенной зоны кремния акцепторный уровень $E_c - 0{,}12$ эВ и в нижней половине – донорный уровень $E_v + 0{,}29$ эВ, что и наблюдается сразу после облучения на рис. 7.11*а*. Данный дефект термически весьма нестабилен уже в области комнатных температур. Его энергия активации отжига $\Delta E = 0{,}77 \pm 0{,}05$ эВ. Основными стоками для C_i при отжиге являются углерод замещения C_s и кислород внедрения O_i, с образованием комплексов C_iC_s и C_iO_i, соответственно. Комплекс C_iC_s дает в запрещенной зоне кремния акцепторный уровень $E_c - 0{,}16$ эВ, перезарядка которого приводит к возникновению на DLTS-спектрах пика, совпадающего с пиком для A-центра. Следовательно, отжиг C_i должен также сопровождаться увеличением на спектрах амплитуд пика *E*2 и минимума *H*2. Это также подтверждается экспериментальными результатами на рис. 7.12.

Пик *E*4 исчезает на спектрах после отжига диодных p-n-структур при 370 K в течение 1800 с. Установить природу соответствующей данному пику ловушки пока не удалось.

Следовательно, основными типами радиационных дефектов, вводимыми электронным облучением в n-базу диодных p-n-структур, являются: вакансия – кислород и углерод внедрения – кислород внедрения, а также дивакансии. Эти дефекты определяют изменения основных характеристик исследуемых образцов при облучении электронами. При этом комплекс вакансия – кислород имеет наибольшее значение сечения захвата носителей заряда, что позволяет его отнести к основному рекомбинационному центру НН3.

С целью изучения термической стабильности параметров облученных приборных структур исследовалось влияние изохронного отжига РД при 370÷770 K на параметры облученных электронами кремниевых диодных p-n-структур.

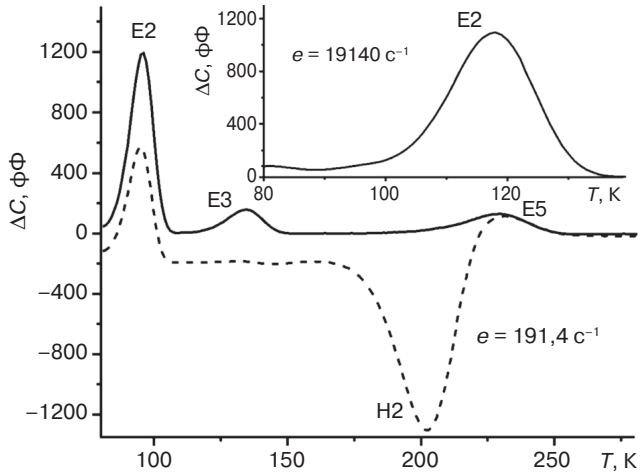


Рис. 7.12. DLTS-спектры облученного электронами ($\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$) образца после отжига при 325 K в течение 1800 с, измеренные при перезарядке ловушек основными (сплошная линия) и неосновными (штриховая) носителями заряда

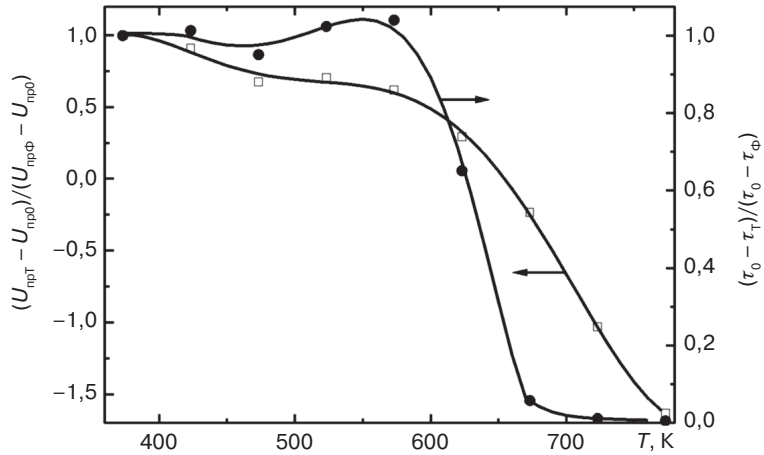


Рис. 7.13. Изменение в результате изохронного отжига прямого падения напряжения, измеренного при $I_{пр} = 30$ А, и времени жизни ННЗ диодных *p-n*-структур, облученных флюенсом электронов $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$

Влияние изохронного отжига на параметры облученных p-n-структур представлено на рис. 7.13. На зависимости $U_{пр}(T_{отж})$ наблюдаются два участка восстановления измеряемого параметра: первый при 370÷470 K, а второй при 570÷770 K. При $T_{отж} = 470 \div 570$ K значение $U_{пр}$ практически не изменяется. Наиболее существенное восстановление его значения происходит на втором участке. Более того, после термообработки диодных *p-n*-структур при $T_{отж} \geq 650$ K величина прямого падения напряжения снижается до значений меньших $U_{пр0}$, соответствующих необлученным образцам.

Значение времени жизни ННЗ восстанавливается в результате отжига только при $T_{отж} > 570$ K (рис. 7.13). При $T_{отж} = 370 \div 570$ K значение τ практически не изменяется. Только при 470 K наблюдается некоторое его увеличение. В отличие от $U_{пр}$, величина τ даже при $T_{отж} \geq 700$ K не достигает значений больше исходного τ_0. $U_{прТ}$; $U_{пр0}$; $U_{прФ}$ – значения прямого падения напряжения после отжига, до и после облучения, соответственно. Обозначения для τ аналогичны.

Из полученных результатов следует, что наиболее существенное восстановление значений τ и $U_{пр}$ облученных образцов в результате отжига происходит при $T_{отж} > 570$ K. На рис. 7.14 показано влияние изохронного отжига при 570÷770 K на диодные p-n-структуры, облученные разными флюенсами электронов. Видно, что значения прямого падения напряжения и времени жизни ННЗ после каждой температуры отжига существенно зависят от флюенса облучения. Чем выше значение Φ, тем меньше τ и больше $U_{пр}$.

Независимо от флюенса облучения значение прямого падения напряжения диодных p-n-структур, прошедших отжиг, меньше $U_{пр0}$ (рис. 7.14). Температура отжига, начиная с которой $U_{пр} < U_{пр0}$, увеличивается с ростом Φ. Так, если для p-n-структур, облученных флюенсом электронов $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, $U_{пр}$ становится меньше 1 В примерно при $T_{отж} = 660$ K, то для $\Phi = 3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ такое наблюдается при $T_{отж} = 720$ K.

Значение времени жизни ННЗ не восстанавливается до исходного во всем диапазоне температур отжига (рис. 7.14). С ростом Φ разница между τ_0 и τ возрастает.

Значение амплитуды DLTS-пиков напрямую зависит от концентрации соответствующих радиационных дефектов [154]. На рис. 7.15 приведено изменение амплитуд DLTS-пиков в результате изохронного отжига диодной p-n-структуры, облученной флюенсом электронов $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$. При $T_{отж} = 420 \div 470$ K наблюдается незначительное уменьшение амплитуды пика $E1$, соответствующего комплексу VO. Данный тип РД отжигается при $T_{отж} = 623$ K [155]. Поэтому изменение амплитуды пика $E1$ вызвано отжигом другого типа РД, пик которого совпадает на спектре с $E1$.

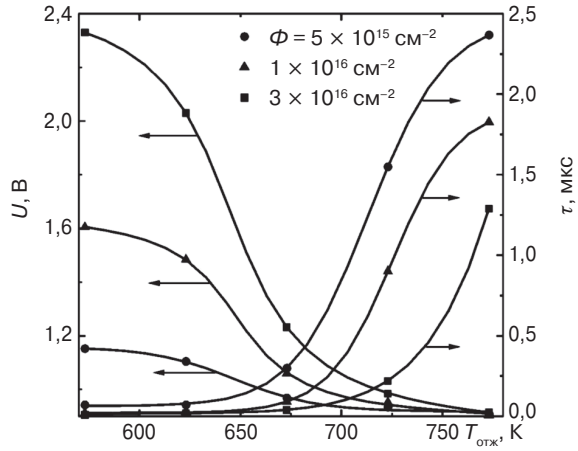


Рис. 7.14. Изменение в результате изохронного отжига при 570÷770 K прямого падения напряжения ($I_{пр} = 15$ А) и времени жизни ННЗ диодных p-n-структур, облученных различными флюенсами электронов

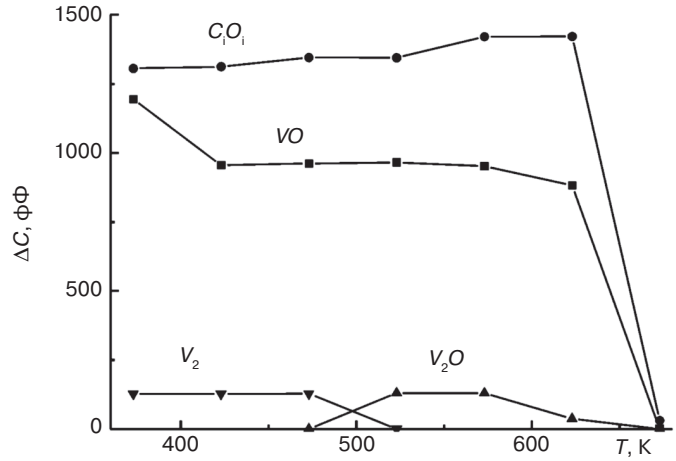


Рис. 7.15. Изменение в результате изохронного отжига амплитуд DLTS-пиков диодной *p-n*-структуры, облученной флюенсом электронов $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

Таким дефектом может являться комплекс углерод внедрения – углерод замещения [155]. При $T_{отж} = 420$ K также отжигается комплекс вакансия–фосфор. Однако он практически не наблюдается на DLTS-спектрах из-за малой концентрации. Отжиг при 420÷470 K указанных типов РД может приводить к соответствующему восстановлению прямого падения напряжения p-n-структур и незначительным изменениям времени жизни ННЗ.

При $T_{отж} = 523$ K наблюдается перестройка комплекса V_2 в V_2O (рис. 7.15). На DLTS-спектрах это выражается в смещении пика $E2$ в область более низких температур, а пика $E3$ – в область более высоких температур [157]. Вновь образованные пики соответствуют комплексу дивакансия–кислород V_2O с $E_c - 0{,}24$ эВ и $\sigma = 5{,}6 \cdot 10^{-15}$ см^2 и $E_c - 0{,}46$ эВ и $\sigma = 6{,}3 \cdot 10^{-15}$ см^2. Следует отметить, что параметры образовавшейся ловушки весьма близки к параметрам комплекса V_2. Поэтому на кривых отжига прямого падения напряжения и времени жизни при 523÷573 K не наблюдается сильных изменений (рис. 7.13). Благодаря этому факту характеристики облученных диодных p-n-структур обладают сравнительно высокой термической стабильностью.

Наиболее существенное изменение DLTS-спектров происходит при $T_{отж} =$ $= 620 \div 670$ K (рис. 7.15). При $T_{отж} = 670$ K полностью отжигается А-центр, V_2O и в значительной степени комплекс C_iO_i, что вполне согласуется с литературными данными [132, 155]. Отжиг этих РД объясняет резкое восстановление параметров облученных образцов, наблюдаемое на рис. 7.13 и 7.14. Очевидно, что данные РД являются доминирующими рекомбинационными ловушками для неосновных носителей заряда облученных диодных p-n-структур. Факт неполного восстановления значения времени жизни ННЗ до исходного при $T_{отж} \geq 670$ K свидетельствует о наличии в n-области еще более термостабильных рекомбинационных ловушек. Такие ловушки могут образовываться как в процессе облучения, так и отжига РД [158]. В их состав входят атомы вводимых и остаточных примесей, атомы собственных компонентов, а также собственные точечные дефекты кристаллической решетки.

Типичным примером являются комплексы кислорода с вакансиями и собственными междоузельными атомами решетки кремния [159].

Согласно [160] в кислородосодержащем кремнии при температурах отжига 620÷820 К происходит генерация дефектных комплексов. Эти комплексы получили название термодоноров, так как в запрещенной зоне *Si* дают донорные уровни с E_c – 0,14÷0,15 эВ. Увеличение степени легирования базовой n-области отжигаемых диодных p-n-структур кислородными термодонорами может привести к снижению прямого падения напряжения.

Таким образом, при облучении электронами с $E = 4$ МэВ флюенсами $\Phi = (1\div2) \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ диодных p-n-структур, изготовленных на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния, значение времени жизни неосновных носителей заряда в n-базе уменьшается более чем на порядок без существенного изменения величины прямого падения напряжения. Показано, что изменения параметров облучаемых p-n-структур вызваны введением в n-область таких радиационных дефектов, как комплекс вакансия – кислород, углерод внедрения – кислород внедрения и дивакансии.

Установлено, что при изохронном отжиге эпитаксиальных диодных p-n-структур, облученных электронами с энергией $E = 4$ МэВ, значения времени жизни ННЗ и прямого падения напряжения наиболее эффективно восстанавливаются при $T_{отж} > 570$ К в результате отжига радиационных дефектов: вакансия–кислород, углерод внедрения – кислород внедрения и дивакансия–кислород. Обнаружено, что в результате отжига облученных диодных p-n-структур при $T_{отж} > 700$ К прямое падение напряжения уменьшается до значений меньше исходных в результате генерации в базовой n-области кислородных термодоноров.

7.9. Экспериментальные результаты исследования воздействия проникающей радиации на параметры биполярных транзисторных структур

В данном разделе приводятся результаты исследований влияния гамма-облучения на параметры тестовых транзисторных структур (элементов аналоговых биполярных ИМС) [184–186].

Радиационные изменения параметров транзисторов определяются конструктивно-технологическими характеристиками их изготовления, электрическим режимом работы, параметрами воздействующей радиации [3].

В частности, исследовалось влияние электрического режима при облучении тестовых транзисторных n-p-n- и p-n-p-структур, а также временная стабильность их параметров после облучения.

Облучение тестовых образцов гамма-квантами Co^{60} проводилось в активном электрическом режиме (напряжение на коллекторе $U_к = 5$ В, ток базы $I_б = 10$ мкА), а также в пассивном электрическом режиме ($U_к = 0$, $I_б = 0$). Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,8 Гр/с, доза – $10^2 \div 10^5$ Гр.

Контролировались следующие параметры тестовых транзисторов:

- коэффициент усиления по постоянному току β ($U_к = 5$ В, $I_б = 10$ и 100 мкА);

- токи утечки $I_{ут}$ переходов коллектор – эмиттер $I_{кэ0}$ ($U_к$ = 40 В), коллектор – база $I_{кб0}$ ($U_к$ = 40 В), эмиттер – база $I_{эб0}$ ($U_э$ = 5 В);
- напряжения пробоя $U_{проб}$ переходов коллектор – эмиттер $U_{кэ}$ ($I_к$ = 10 мкА), коллектор – база $U_{кб}$ ($I_к$ = 10 мкА), эмиттер – база $U_{эб}$ ($I_э$ = 10 мкА);
- падение напряжения на переходе эмиттер – база $U_{бэ}$ ($I_б$ = $I_к$ = 100 мкА), смещенном в прямом направлении $U_{прям}$.

Проводились также исследования временной стабильности параметров облученных транзисторов. Установлено, что наиболее нестабильным параметром является коэффициент усиления n-p-n-транзисторов. Например, после облучения дозой $D = 5{,}7 \cdot 10^4$ Гр коэффициент усиления n-p-n-транзистора довольно заметно восстановился в течение ~100 ч и вышел в насыщение при более длительном времени; в случае p-n-p-транзисторов коэффициент усиления после облучения практически не изменился (рис. 7.16). Здесь $\Delta\beta = \beta - \beta_о$, где $\beta_о$ – величина коэффициента усиления до облучения.

В табл. 7.5 представлены результаты испытаний транзисторов при воздействии гамма-излучения. Из всех параметров двух видов транзисторов наиболее чувствительным к радиации оказался коэффициент усиления, особенно при малых токах базы. Практически не изменились напряжение пробоя и падение прямого напряжения на переходе эмиттер – база. Токи утечки возросли примерно на 10% в основном у n-p-n-транзисторов. Через 102 ч после облучения токи утечки фактически вернулись к исходным значениям до облучения, коэффициент усиления восстановился более заметно при малых токах базы, а другие параметры с течением времени остались неизменными.

На рис. 7.17 показана типичная деградация выходных ВАХ n-p-n-транзисторов при воздействии гамма-излучения. Видно, что после облучения дозой $D = 10^4$ Гр выходной ток сильно понизился, а коэффициент усиления уменьшился почти на порядок.

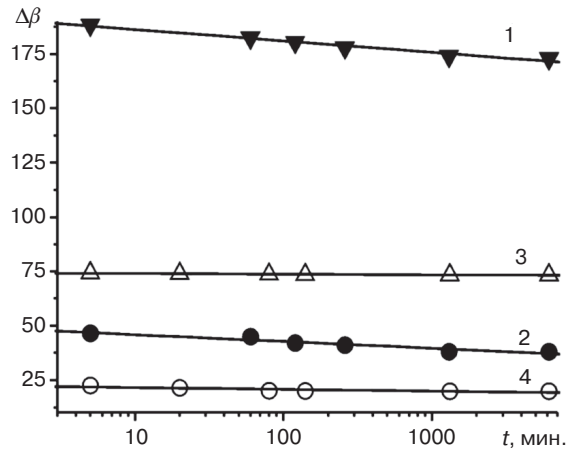
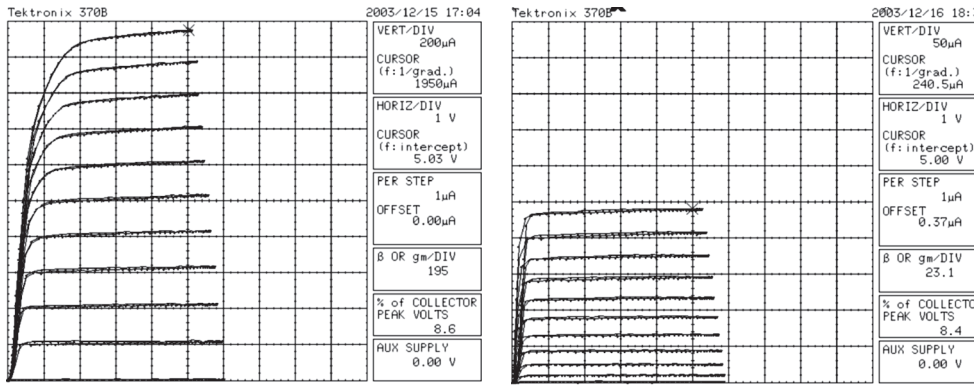


Рис. 7.16. Изменение коэффициента усиления n-p-n- (1, 2) и p-n-p-транзисторов (3, 4) в зависимости от времени после облучения ($D = 5{,}7 \cdot 10^4$ Гр): 1, 3 – $I_б$ = 10 мкА; 2, 4 – $I_б$ = 100 мкА

Таблица 7.5. Влияние гамма-излучения ($D = 5{,}7 \cdot 10^4$ Гр) на параметры тестовых транзисторов

Тип транзистора	Режим воздействия	β		$I_{ут}$, нА			$U_{проб}$, В			$U_{прям}$, В
		$I_б$ = 10 мкА	$I_б$ = 100 мкА	К-Э	К-Б	Э-Б	К-Э	Э-Б	К-Б	Э-Б
n-p-n	До облуч.	200,0	78,0	18	15	13	57,4	7,2	69,0	0,68
	5 мин. после облуч.	11,6	31,5	30	30	10	61,0	7,3	65,0	0,71
	102,5 ч после облуч.	27,0	40,0	18	16	12	63,0	7,35	67,0	0,72
p-n-p	До облуч.	75,0	20,5	40	15	14	53,0	80,0	79,0	0,66
	10 мин. после облуч.	2,5	3,4	20	25	20	60,0	69,0	79,0	0,66
	102,5 ч после облуч.	2,9	4,0	15	15	13	63,0	69,0	76,0	0,65



а) *б)*

Рис. 7.17. Выходные ВАХ n-p-n-транзистора до облучения, $\beta = 195$ (*а*) и после облучения ($D = 10^4$ Гр), $\beta = 23{,}1$ (*б*)

Влияние гамма-излучения на коэффициент усиления транзисторных n-p-n-структур при различных токах базы имеет немонотонный характер (рис. 7.18). Наблюдается значительная деградация коэффициента усиления после радиационного воздействия при $D = (1–5) \cdot 10^4$ Гр. Однако при $D = 10^5$ Гр происходит снижение деградации β.

Проводились исследования изменений параметров транзисторов в активном электрическом режиме в процессе и после гамма-облучения. При облучении дозой $D = 10^4$ Гр коэффициент усиления n-p-n-транзистора довольно заметно уменьшился, а после облучения частично восстановился в течение ~1000 ч (рис. 7.19*а*). В случае p-n-p-транзистора коэффициент усиления после облучения практически мало восстановился (рис. 7.19*б*).

Влияние гамма-облучения на коэффициент усиления при различных электрических режимах работы тестовых транзисторов представлено на рис. 7.20. Наблюдается значительная деградация коэффициента усиления после радиационного воздействия до $D = (1–4) \cdot 10^4$ Гр. При более высоких дозах облучения происходит

снижение деградации β. Исключение составляет пассивный режим облучения p-n-p-транзистора, где наблюдается практически линейное возрастание величины $\Delta\beta$ (рис. 7.20*б*). Отметим, что у n-p-n-транзистора происходит более значительное изменение коэффициента усиления при облучении в пассивном режиме по сравнению с облучением в активном режиме (рис. 7.20*а*).

Биполярные транзисторы изменяют свои характеристики при облучении в основном из-за уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в связи с рекомбинацией на радиационных центрах в активных областях приборов. Применение изопланарной технологии привело к приближению границы раздела диэлектрик–полупроводник к рабочим областям биполярных транзисторов, вследствие этого увеличилось влияние на их характеристики плотности поверхностных состояний и накопленного заряда в изолирующем оксиде. Поэтому в ряде случаев поверхностные радиационные эффекты являются определяющими и для биполярных транзисторов [1, 3].

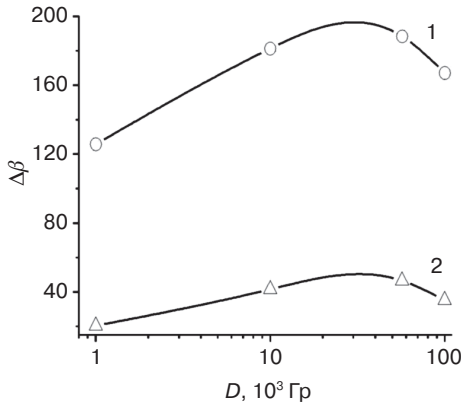


Рис. 7.18. Дозовые зависимости изменений коэффициента усиления n-p-n-транзисторов: 1 – $I_б$ = 10 мкА; 2 – $I_б$ = 100 мкА

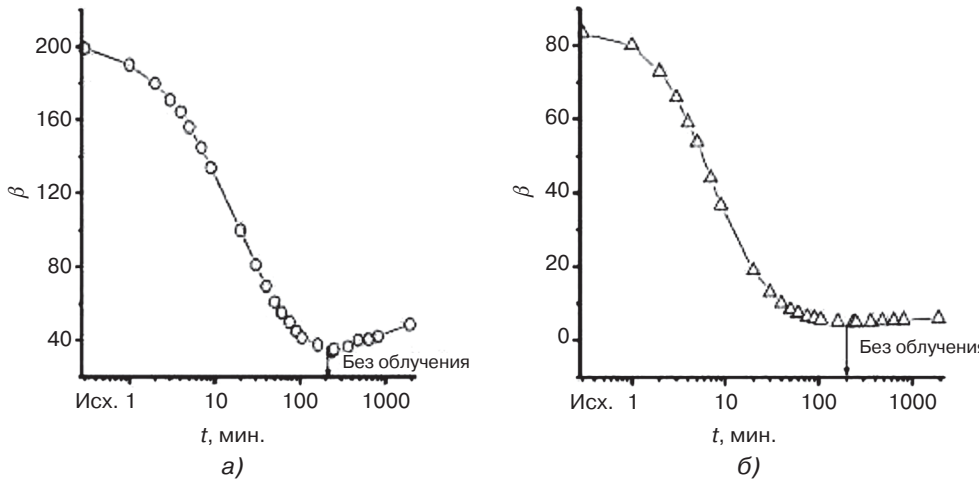


Рис. 7.19. Величина коэффициента усиления n-p-n- (*а*) и p-n-p-транзисторов (*б*) в зависимости от времени в процессе и после облучения ($D = 10^4$ Гр)

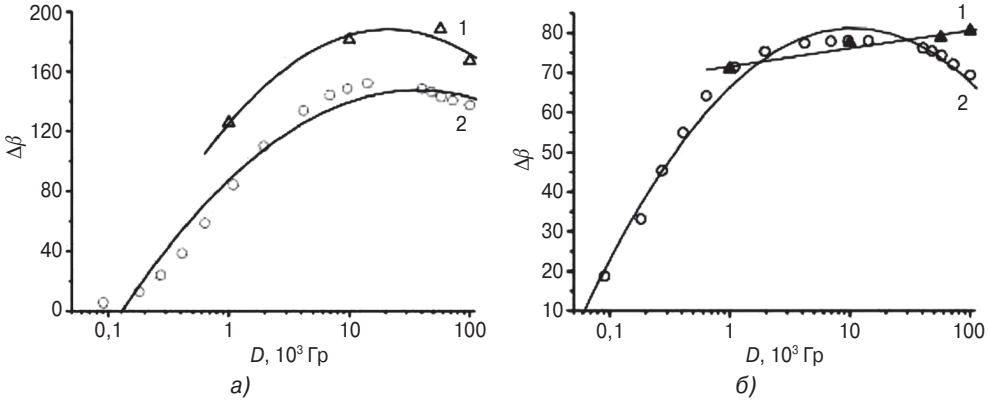


Рис. 7.20. Влияние гамма-излучения на изменение коэффициента усиления n-p-n- (*а*) и p-n-p-транзисторов (*б*) в пассивном (1) и активном электрическом режиме работы (2): очки – эксперимент, линии – расчет

Полученные результаты объясняются влиянием объемных и поверхностных радиационных дефектов. В первом случае при снижении β необходимо учитывать уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда в базовой области транзисторов в связи с образованием центров рекомбинации [3]. Во втором случае рост скорости поверхностной рекомбинации приводит к уменьшению коэффициента усиления за счет возрастания поверхностной составляющей тока базы, а также увеличению токов утечки [1]. Очевидно, что изменения параметров исследованных биполярных транзисторов связаны как со структурными повреждениями, так и с ионизационными процессами встраивания заряда в пассивирующем (защитном) оксиде в области базы и объемного заряда эмиттерного перехода [162]. При этом в приборах n-p-n-типа основное влияние на поверхностную рекомбинацию оказывает объемный заряд в оксиде, а в p-n-p – заряд на поверхностных состояниях у границы раздела $Si–SiO_2$ [163, 164]. Этим и объясняется различное влияние электрического режима на параметры разных типов транзисторов при облучении (рис. 7.20).

Эффект снижения деградации β при больших дозах облучения (10^5 Гр) можно объяснить уменьшением влияния суммарного эффективного заряда диэлектрика вследствие компенсации положительного заряда дырок в объеме SiO_2 отрицательным зарядом электронов, захваченных ловушками вблизи границы раздела $Si–SiO_2$, при значительном росте плотности поверхностных состояний [3]. Частичное восстановление величины β после прекращения облучения обусловливается релаксацией объемного заряда в диэлектрике вследствие туннелирования электронов с быстрых поверхностных состояний [1].

Обычно у n-канальных МОП-транзисторов при облучении большими дозами также наблюдается снижение деградации порогового напряжения в связи с ростом плотности отрицательно заряженных поверхностных состояний, компенсирующих положительный заряд в SiO_2 [1, 3]. Отсюда следует, что поверхностные эффекты оказывают основное влияние и на исследованные биполярные транзисторные структуры при воздействии гамма-излучения до $D = 10^5$ Гр.

Таким образом, установлено, что при больших дозах радиации (10^5 Гр) наблюдается снижение деградации параметров биполярных транзисторных структур. Кроме того, обнаружена несколько более высокая радиационная стойкость биполярных приборов в пассивном электрическом режиме по сравнению с облучением в активном режиме.

7.10. Экспериментальные исследования влияния ионизирующих излучений на параметры биполярных аналоговых интегральных микросхем

В данном разделе приводятся результаты исследований радиационных воздействий на аналоговые биполярные ИМС (операционные усилители, компараторы, стабилизаторы напряжения) [187–190].

Исследовались интегральные биполярные компараторы 1467СА2Р и операционные усилители 1473УД1Т) при воздействии гамма-излучения Co^{60}.

Контролируемые параметры компараторов 1467СА2Р: входное напряжение смещения нуля U_{IO}; разность входных токов I_{IO}; входной ток смещения I_{IB}; ток потребления I_{CC}; выходной ток низкого уровня I_{OL}; выходное напряжение низкого уровня U_{0L}; выходной ток утечки I_{OH}; коэффициент усиления по напряжению A_{UOL}.

Контролировались следующие параметры операционных усилителей 1473УД1Т: ток потребления I_{CC}, входное напряжение смещения нуля U_{IO}, разность входных токов I_{IO}, размах выходного напряжения $U_{o+(-)}$ входной ток I_I, коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля K_{svr}, коэффициент ослабления входного синфазного напряжения K_{cmr}, коэффициент усиления напряжения A_U, входное дифференциальное сопротивление R_{IN}, полоса пропускания (при замкнутой цепи обратной связи) *GBW*, максимальная скорость нарастания выходного напряжения *SR_LH*, максимальная скорость спада выходного напряжения *SR_HL*.

Влияние гамма-излучения на параметры компараторов 1467СА2Р имеет немонотонный характер (рис. 7.21–7.23). После радиационного воздействия при $D = 10^3–5 \cdot 10^4$ Гр происходит значительная деградация основных параметров. Однако при $D = 5 \cdot 10^4–10^5$ Гр наблюдается снижение деградации A_{UOL}, а также U_{0L} и U_{IO}.

Еще более сложный характер имеют дозовые зависимости изменений параметров операционных усилителей 1473УД1Т (рис. 7.24–7.28). Как и в случае компараторов, у операционных усилителей при больших дозах облучения (до 10^5 Гр) наблюдается некоторое восстановление отдельных параметров (K_{svr}, A_U, *GBW*).

Эффект снижения деградации β (у транзисторов) и A_{UOL} (у компараторов и операционных усилителей) при больших дозах облучения (10^5 Гр) можно объяснить уменьшением влияния эффективного суммарного заряда диэлектрика вследствие компенсации положительного заряда дырок в объеме SiO_2 отрицательным зарядом электронов, захваченных ловушками вблизи границы раздела $Si–SiO_2$, при значительном росте плотности поверхностных состояний [3]. Частичное восстановление величины β после прекращения облучения обусловливается релаксацией объемного заряда в диэлектрике вследствие туннелирования электронов с быстрых поверхностных состояний [1].

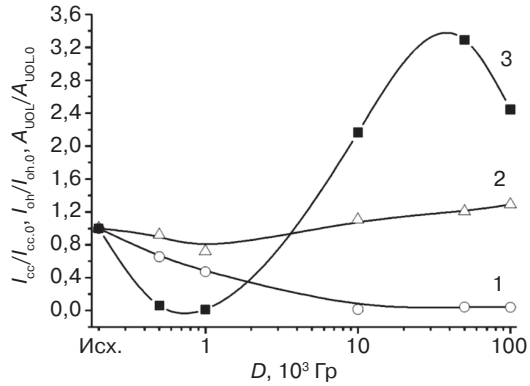


Рис. 7.21. Относительные изменения тока потребления I_{cc} (1), выходного тока утечки I_{oh} (2) и коэффициента усиления по напряжению A_{UOL} (3) компараторов в зависимости от дозы облучения

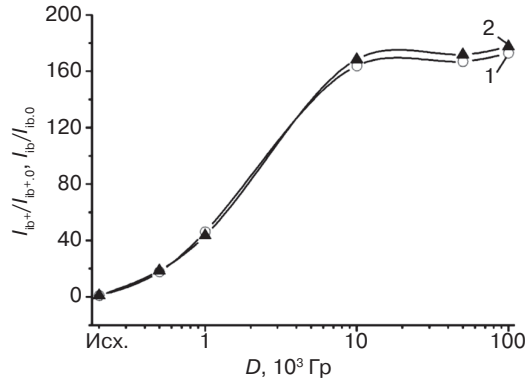


Рис. 7.22. Относительные изменения входных токов смещения I_{ib+} (1) и I_{ib-} (2) компараторов в зависимости от дозы облучения

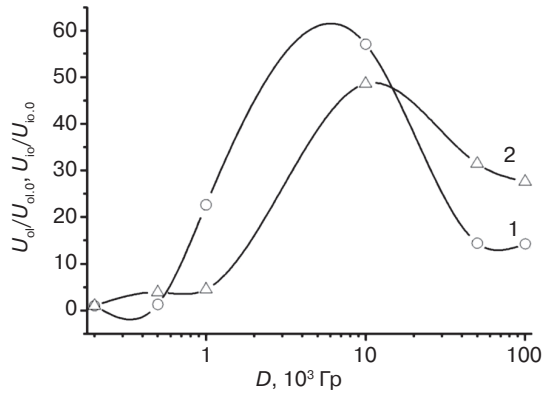


Рис. 7.23. Относительные изменения выходного напряжения низкого уровня U_{ol} (1) и входного напряжения смещения нуля U_{i0} (2) компараторов в зависимости от дозы облучения

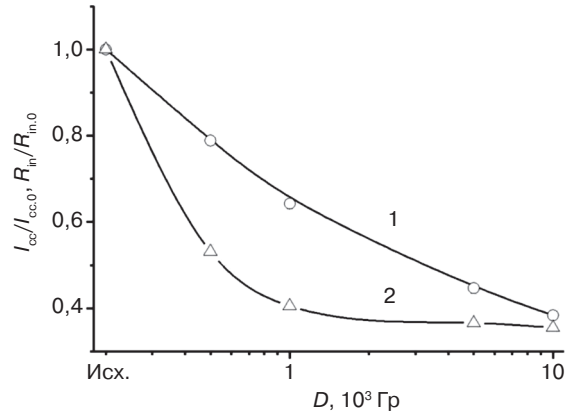


Рис. 7.24. Относительные изменения тока потребления I_{cc} (1) и входного дифференциального сопротивления R_{in} (2) операционных усилителей в зависимости от дозы облучения

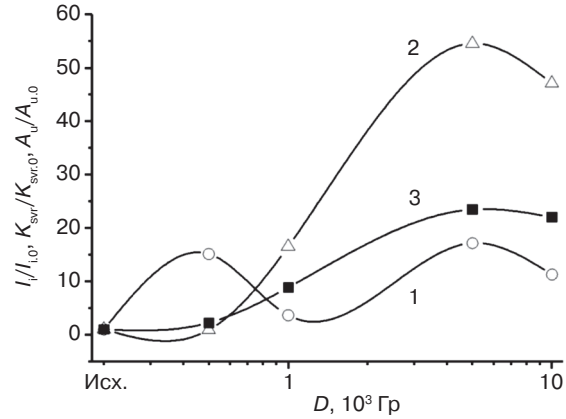


Рис. 7.25. Относительные изменения входного тока I_i (1), коэффициента влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля K_{svr} (2) и коэффициента усиления напряжения A_U (3) операционных усилителей в зависимости от дозы облучения

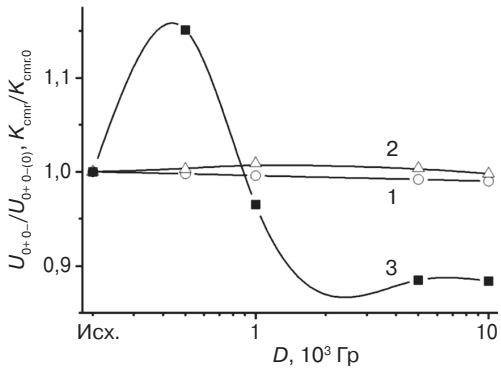


Рис. 7.26. Относительные изменения размахов выходного напряжения U_{o+} (1), U_{o-} (2) и коэффициента ослабления входного синфазного напряжения K_{cmr} (3) операционных усилителей в зависимости от дозы облучения

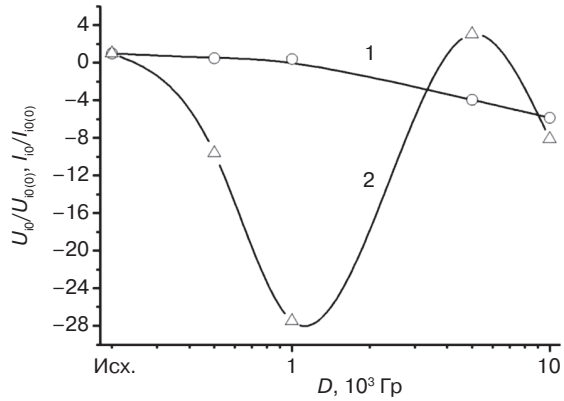


Рис. 7.27. Относительные изменения входного напряжения смещения нуля U_{i0} (1) и разности входных токов I_{i0} (2) операционных усилителей в зависимости от дозы облучения

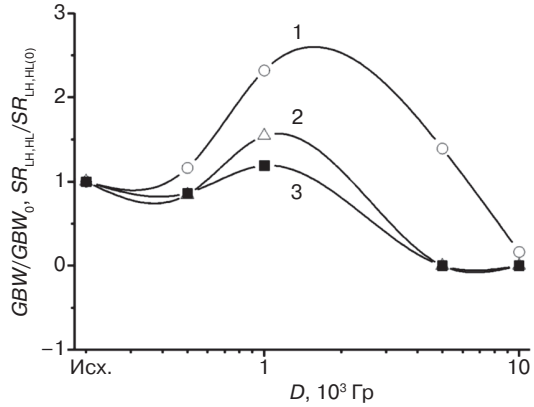


Рис. 7.28. Относительные изменения полосы пропускания *GBW* (1), максимальной скорости нарастания выходного напряжения *SR_LH* (2) и максимальной скорости спада выходного напряжения *SR_HL* (3) операционных усилителей в зависимости от дозы облучения

На основе экспериментальных данных были получены предельные уровни стойкости $D_{пр}$ (дозы облучения, при которых параметры приборов выходят за пределы ТУ) для тестовых транзисторов (табл. 7.6), компараторов (табл. 7.7) и операционных усилителей (табл. 7.8).

Таблица 7.6. Уровни стойкости тестовых транзисторов по коэффициенту усиления β (при $I_б$ = 10 мкА)

Тип транзистора	**$D_{пр}$, Гр**
n-p-n-транзистор, площадь эмиттера $S_э$ = (18 × 17) мкм²	(1,0–1,5) · 10³
n-p-n-транзистор, диаметр эмиттера $D_э$ = 22 мкм	(3–4) · 10³
Горизонтальный p-n-p-транзистор, $S_э$ = (20 × 20) мкм²	(2–3) · 10²
Горизонтальный p-n-p-транзистор, толщина базы $W_б$ = 11 мкм, $D_э$ = 26 мкм	(4–5) · 10²

Таблица 7.7. Уровни стойкости компараторов 1467СА2Р по основным параметрам

Параметры	$D_{пр}$, **Гр**
Ток потребления I_{CC-5B}	10^5
Выходной ток утечки I_{oh}	10^5
Выходной ток низкого уровня I_{ol}	$(5–6) \cdot 10^2$
Выходное напряжение низкого уровня U_{ol}	$(5–6) \cdot 10^2$
Входное напряжение смещения нуля U_{i0}	$1{,}5 \cdot 10^3$
Разность входных токов I_{i0}	10^5
Входной ток смещения I_{ib+}	$< 5 \cdot 10^2$
Входной ток смещения I_{ib-}	$< 5 \cdot 10^2$
Коэффициент усиления по напряжению A_{UOL}	$< 5 \cdot 10^2$

Таблица 7.8. Уровни стойкости операционных усилителей 1473УД1Т по основным параметрам

Параметры	$D_{пр}$, **Гр**
Ток потребления I_{CC}	10^4
Размах выходного напряжения U_{o+}	10^4
Размах выходного напряжения U_{o-}	10^4
Входное напряжение смещения нуля U_{i0}	$(2{,}0–2{,}2) \cdot 10^3$
Разность входных токов I_{i0}	10^4
Входной ток I_i	10^4
Коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля K_{svr}	$(2{,}0–2{,}5) \cdot 10^3$
Коэффициент ослабления входного синфазного напряжения K_{cmr}	$5 \cdot 10^3$
Коэффициент усиления напряжения A_U	$5 \cdot 10^2$
Входное дифференциальное сопротивление R_{in}	$5 \cdot 10^2$
Полоса пропускания (при замкнутой цепи обратной связи) *GBW*	$(8–9) \cdot 10^3$
Максимальная скорость нарастания выходного напряжения *SR_LH*	10^3
Максимальная скорость спада выходного напряжения *SR_HL*	10^3

Из данных табл. 7.7–7.8 следует, что радиационная стойкость горизонтальных p-n-p-транзисторов в 5–10 раз ниже, чем n-p-n-транзисторов. При этом деградация p-n-p-транзисторов определяет радиационную стойкость компараторов и операционных усилителей. В частности, для коэффициента усиления в p-n-p-транзисторов предельная доза $D_{пр} = (2 \div 5) \cdot 10^2$ Гр, что соответствует предельной дозе $D_{пр} = 5 \cdot 10^2$ Гр для коэффициента усиления по напряжению A_{UOL} (A_U) компараторов и операционных усилителей.

Наиболее чувствительным к облучению параметром у компараторов и операционных усилителей является коэффициент усиления по напряжению A_{UOL} (A_U), а наиболее устойчивым параметром – ток потребления I_{CC}, для которого $D_{пр} = 10^4 \div 10^5$ Гр.

Исследования радиационного поведения ИМС стабилизаторов напряжения 1244ЕН5Т, 1244ЕН24Т, 1252ЕР1Т, 1253ЕИ5Т, 1253ЕИ24Т проводились имитационными методами с использованием лазерного и рентгеновского имитаторов «РАДОН-5М» и «РЕИМ-2» при температурах –60 °С; +25 °С; +125 °С. При исследовании эффектов мощности дозы контролировались выходное напряжение и ток потребления ИМС.

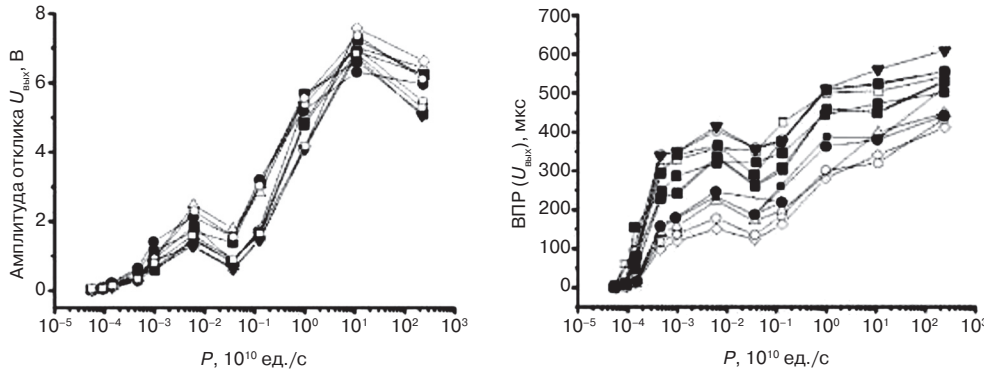


Рис. 7.29. Зависимость амплитуды отклика (*а*) и ВПР (*б*) ИМС 1253ЕИ5Т от уровня импульсного ИИ (P, 10^{10} ед./с) (белые маркеры – +25 °С, черные маркеры – +125 °С)

В результате исследований установлено:

1. наиболее чувствительным к воздействию импульсного ИИ является параметр «выходное напряжение» независимо от температуры облучения;
2. уровень бессбойной работы (УБР) и время потери работоспособности (ВПР) стабилизаторов напряжения при повышении температуры облучения изменяются незначительно (рис. 7.29);
3. стабилизаторы напряжения отрицательной полярности более чувствительны к эффектам мощности дозы.

При исследовании стойкости стабилизаторов напряжения к дозовым эффектам облучение проводилось в статическом режиме. Контролировались следующие параметры ИМС: входное напряжение, ток потребления, коэффициент нестабильности по току, коэффициент нестабильности по напряжению.

В результате исследований установлено:

1. наиболее чувствительным параметром стабилизаторов напряжения при дозовом воздействии является выходное напряжение независимо от температуры облучения;
2. ток потребления не испытывает заметной деградации при дозовом воздействии независимо от температуры облучения и величины стабилизируемого напряжения;
3. дозовая деградация параметров стабилизаторов замедляется при уменьшении напряжения питания и уменьшении температуры облучения (рис. 7.30 и 7.31).

Проводились также сравнительные исследования радиационной стойкости интегральных стабилизаторов напряжения (СН), операционных усилителей (ОУ) и компараторов напряжения (КН) при воздействии импульсного и стационарного ионизирующего излучения.

Исследования проводились с целью определения закономерностей радиационного поведения микросхем СН, ОУ и КН. Работа состояла из двух этапов. На первом этапе исследовалась зависимость уровня радиационной стойкости СН от величины выходного напряжения при воздействии стационарного ионизирую-

щего излучения (СИИ). В качестве объектов исследования были выбраны ИМС стабилизаторов, изготовленные по биполярной технологии. В табл. 7.9 приведены объекты исследования и их основные параметры.

Анализ полученных результатов показал, что уровень стойкости СН сильно зависит от выходного напряжения. Исследуемые ИМС можно условно разделить на две группы независимо от предприятия-изготовителя: СН малого выходного напряжения (до 5 В) и СН с большим уровнем выходного напряжения (от 5 В и более). ИМС с малым выходным напряжением показали гораздо более низкий уровень параметрического отказа (на 2 порядка и более) при воздействии СИИ. Характерные уровни параметрического отказа СН представлены в табл. 7.10.

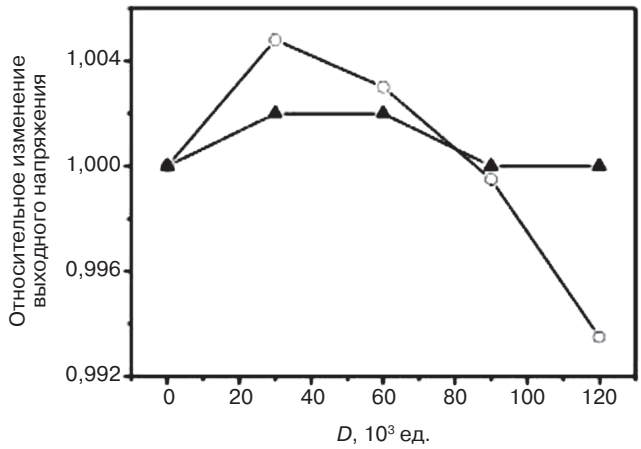


Рис. 7.30. Относительное изменение выходного напряжения ИМС 1244ЕН5Т и 1244ЕН24Т от уровня дозового воздействия (D, 10^3 ед.) (черные маркеры – 1244ЕН5Т; белые маркеры – 1244ЕН24Т)

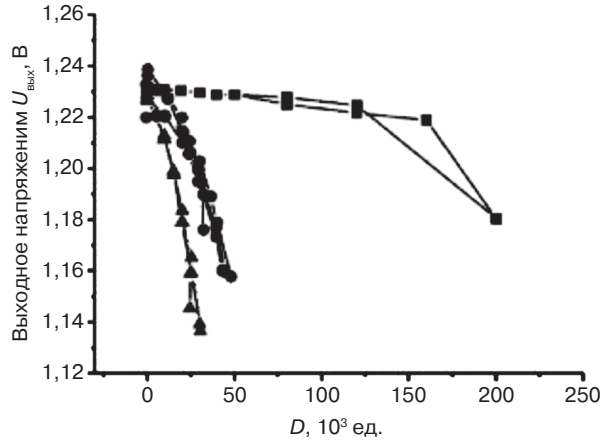


Рис. 7.31. Зависимости выходного напряжения ИМС 1252ЕР1Т от уровня дозового воздействия (D, 10^3 ед.) (круглые маркеры – +25 °С; треугольные маркеры – +125 °С; квадратные маркеры – –60 °С)

Таблица 7.9. Основные параметры исследуемых стабилизаторов

ИМС	Изготовитель	$U_{вых}$, В	$I_{пот}$, мА
1244ЕН5Т	УП «Белмикросистемы»	5	5
1244ЕН24Т	УП «Белмикросистемы»	24	6
1252ЕР1Т	УП «Белмикросистемы»	1,2	0,6
1253ЕИ5Т	УП «Белмикросистемы»	–24	4
1253ЕИ24Т	УП «Белмикросистемы»	–5	5
LM2990	National Semiconductor	–5	1,1
MC78L12	On Semiconductor	12	4
TPS76833	Texas Instruments	3,3	0.1
MAX874	Maxim	4,096	0,007
L78LO5	STMicroelectronics	5	3
LT1117	Linear Technology	3,3	5,5
V24C5	Vicor	5	20 000

Таблица 7.10. Характерные уровни параметрического отказа СН при воздействии СИИ

Тип ИМС	$U_{вых}$, В	Характерный уровень отказа
1252ЕР1Т	1,2	От 10^4 до 10^5 ед.
LT1117	3,3	
TPS76833	3,3	
MAX874	4,096	
1244ЕН5Т	5	От 10^6 до 10^7 ед.
L78L05	5	
V24C5	5	
1253ЕИ24Т	–5	
LM2990	–5	
MC78L12	12	
1244ЕН24Т	24	
1253ЕИ5Т	–24	

На втором этапе было проведено сравнительное исследование радиационной стойкости аналоговых ИМС разных типов одного производителя. В качестве объектов исследований были выбраны СН, операционные усилители (ОУ) и компараторы напряжения (КН), выполненные по биполярной технологии в НТЦ «Белмикросистемы». Результаты исследований представлены на рис. 7.32 и 7.33.

Анализ результатов сравнительных экспериментальных исследований радиационной стойкости СН, КН и ОУ позволяет сделать следующие выводы:

- при воздействии СИИ микросхемы СН показали более высокие по сравнению с ОУ и КН уровни параметрического отказа (в среднем на два порядка);
- при воздействии ИИИ уровни бессбойной работы микросхем СН оказались ниже, чем у КН и ОУ, на порядок и более.

Результаты проведенной работы показали возможные критерии определения радиационной стойкости в аналоговых СБИС. При воздействии ИИИ одними из самых уязвимых блоков станут СН. При воздействии СИИ радиационную стойкость устройства будут определять ОУ, КН и СН с малым выходным напряжением.

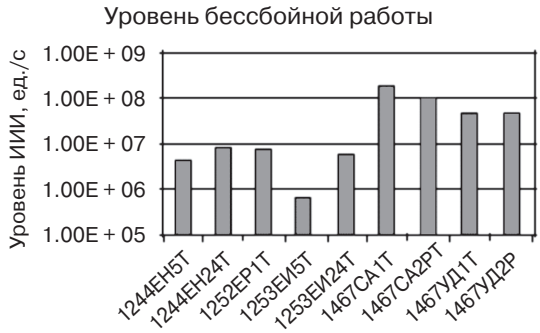


Рис. 7.32. Уровни бессбойной работы биполярных ИМС при воздействии импульсного ИИ

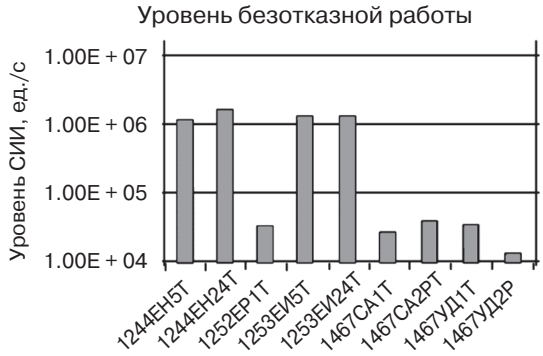


Рис. 7.33. Уровни параметрического отказа биполярных ИМС при воздействии СИИ

7.11. Экспериментальные результаты исследований воздействия ионизирующих излучений на параметры транзисторных МОП-структур и интегральных микросхем на их основе

7.11.1. Исследование влияния гамма-излучения на параметры транзисторных МОП-структур

В данном разделе приводятся результаты исследований влияния гамма-излучения на параметры тестовых транзисторных МОП-структур (элементов логических КМОП ИМС) [191, 192, 196, 197, 198, 199].

Исследовалось поведение тестовых транзисторных МОП-структур с индуцированными каналами n- и p-типа при облучении гамма-квантами Co^{60} (мощность дозы 90 рад/с, доза $D = 10^5 \div 10^7$ рад) при температуре $T = 303$ 313 К и различных смещениях затвора $U_з = 0, \pm 3, \pm 5$ В.

До и после облучения измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП-транзисторов, пороговые напряжения $U_{0.n}$ и $U_{0.p}$ (при токе стока $I_с = 0{,}1$ мкА). Из стоко-затворных ВАХ определялись крутизна S (при $I_с = 3$ мА) и эффективная подвижность носителей в каналах транзисторных структур (μ_n и μ_p).

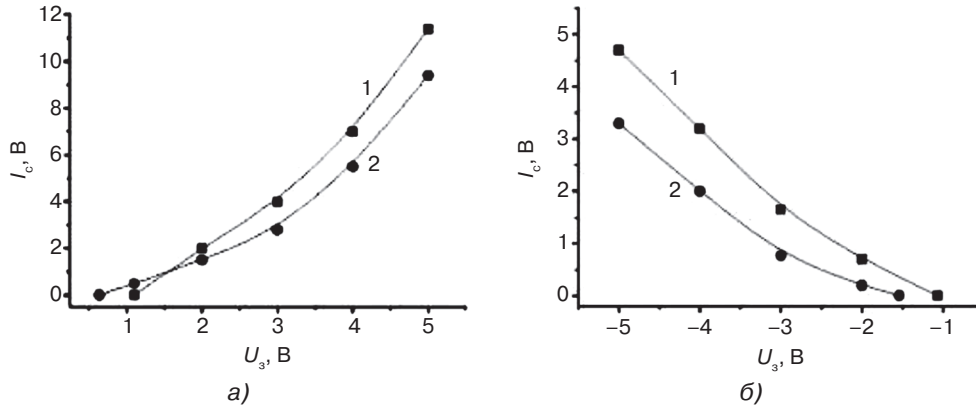


Рис. 7.34. Изменение стоко-затворных ВАХ транзисторных МОП-структур с n- (*а*) и p-каналами (*б*) под воздействием гамма-излучения: – до облучения, 2 – после $D = 10^7$ рад ($U_з = 0$ В)

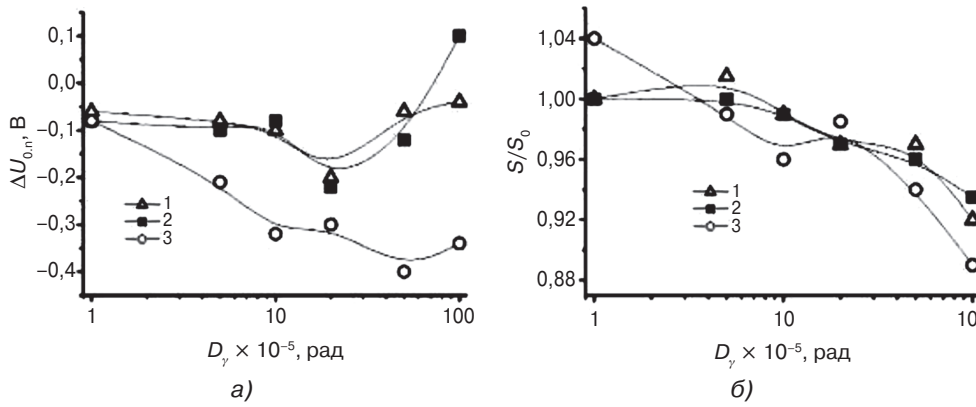


Рис. 7.35. Изменения параметров $\Delta U_{0.n}$ (*а*) и S/S_0 (*б*) n-канальных транзисторных МОП-структур в зависимости от дозы облучения при различных электрических режимах: 1 – $U_з = +3$; 2 – +5; 3 – 0 В

На рис. 7.34 показано влияние гамма-излучения на стоко-затворные ВАХ транзисторных МОП-структур в пассивном электрическом режиме. Наблюдается относительно небольшой сдвиг значений порогового напряжения $U_{0.n}$ в сторону нуля, а $U_{0.p}$ – к более отрицательным значениям, снижается наклон характеристик. Полученные результаты свидетельствуют о накоплении положительного заряда в объеме оксида, а также увеличении плотности быстрых поверхностных состояний при облучении.

На рис. 7.35 представлены дозовые зависимости изменений величины порогового напряжения $\Delta U_{0.n}$ (*а*) и относительной крутизны S/S_0 (*б*) n-канальных транзисторных МОП-структур при различных электрических режимах. В результате облучения величина $\Delta U_{0.n}$ оказалась максимальной в пассивном режиме при $D_\gamma = 5 \cdot 10^6 \div 10^7$ рад, а в активном режиме наибольшее изменение порогового напряжения достигается при $D_\gamma = 2 \cdot 10^6$ рад, что, однако, в 2,5 раз меньше, чем

в первом случае. Аналогичное соотношение получено и для изменений крутизны. В целом заметное снижение величины S/S_0 происходит при $D_\gamma > 2 \cdot 10^6$ рад.

Эти изменения можно объяснить тем, что при этом на границе раздела $Si–SiO_2$ возрастает плотность поверхностных состояний, которые захватывают электроны из n-канала и n^+-областей стока и истока. В результате при больших дозах облучения происходит частичная компенсация положительного заряда в объеме оксида отрицательным зарядом поверхностных состояний [1, 3].

В случае p-канальных транзисторных МОП-структур (рис. 7.36) также происходит более значительное изменение всех параметров при облучении в отсутствие электрического смещения, особенно в диапазоне доз $D_\gamma = 2 \cdot 10^6 \div 10^7$ рад.

Более подробно влияние электрического режима затвора на радиационное поведение транзисторных МОП-структур показано на рис. 7.37.

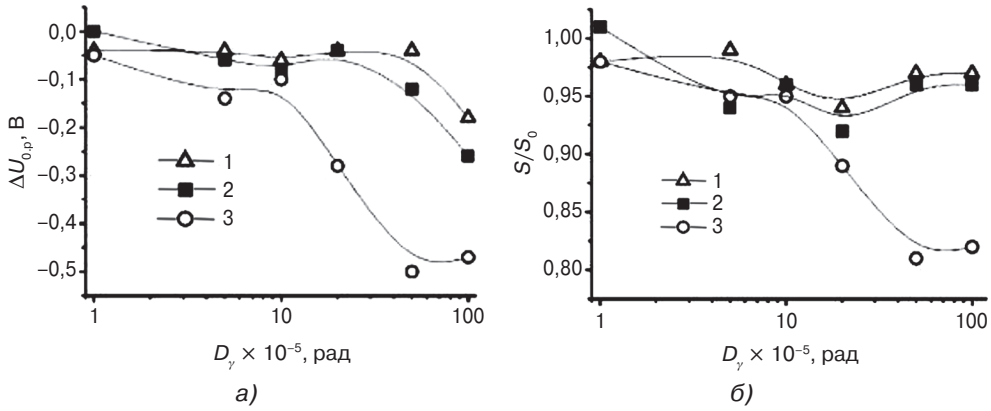


Рис. 7.36. Изменения параметров $\Delta U_{0.p}$ (*а*) и S/S_0 (*б*) p-канальных транзисторных МОП-структур в зависимости от дозы при различных электрических режимах: 1 – $U_з = –3$; 2 – –5; 3 – 0 В

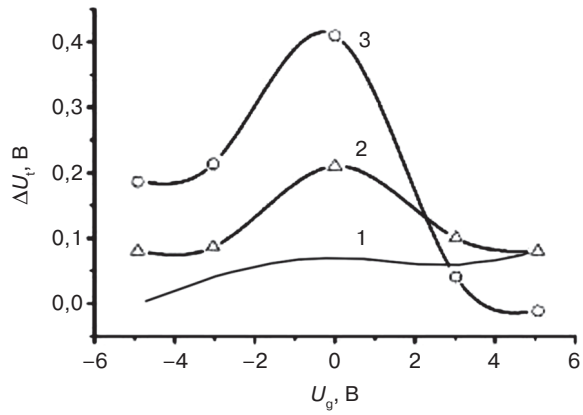


Рис. 7.37. Изменение порогового напряжения транзисторных МОП-структур в зависимости от напряжения смещения затвора при гамма-облучении дозой $D_\gamma = 10^5$ (1), 10^6 (2), 10^7 рад (3)

Для более детального анализа полученных экспериментальных результатов рассматривались изменения составляющих порогового напряжения, обусловленных радиационно-наведенным зарядом в объеме оксида (ΔU_{ot}) и зарядом на ПС на границе раздела Si–SiO_2 (ΔU_{it}). Использовалась относительно простая методика разделения значений порогового напряжения на объемную и поверхностную составляющие [165]. При этом предполагалось, что ПС заряжаются отрицательно в n-МОП и положительно в p-МОП транзисторных структурах. Допускалось, что в n-МОП и p-МОП структурах с идентичными характеристиками оксида кремния при одинаковых условиях облучения накопление заряда в SiO_2 и образование ПС происходят по одному и тому же закону. Тогда изменения порогового напряжения транзисторных МОП-структур при облучении представляются в следующем виде:

$$\Delta U_{tn} = \Delta U_{otn} + \Delta U_{itn} = (\Delta N_{otn} + \Delta N_{itn}) qd/\varepsilon_o \varepsilon, \tag{7.9}$$

$$\Delta U_{tp} = \Delta U_{otp} + \Delta U_{itp} = (\Delta N_{otp} + \Delta N_{itp}) qd/\varepsilon_o \varepsilon, \tag{7.10}$$

где q – заряд электрона; ε_o и ε – диэлектрические постоянные вакуума и оксида кремния соответственно; $\Delta N_{otn,p}$ и $\Delta N_{itn,p}$ – изменения плотности заряда в объеме SiO_2 и на ПС в n- и p-канальных структурах соответственно.

Деградация подвижности носителей заряда в n- и p-каналах МОП-транзисторов определяется соответствующими изменениями плотности ПС [44]:

$$\mu_n/\mu_{no} = (1 + w\Delta N_{itn})^{-1}, \tag{7.11}$$

$$\mu_p/\mu_{po} = (1 + w\Delta N_{itp})^{-1}, \tag{7.12}$$

где μ_{no} и μ_{po} – исходные значения подвижностей носителей в n- и p-каналах; коэффициент пропорциональности $w = 8 \cdot 10^{-13}$ см^2.

Из выражений (7.11) и (7.12) можно определить значения ΔN_{itn} и ΔN_{itp}, используя экспериментальные зависимости μ_n/μ_{no} и μ_p/μ_{po} от дозы облучения (рис. 7.38).

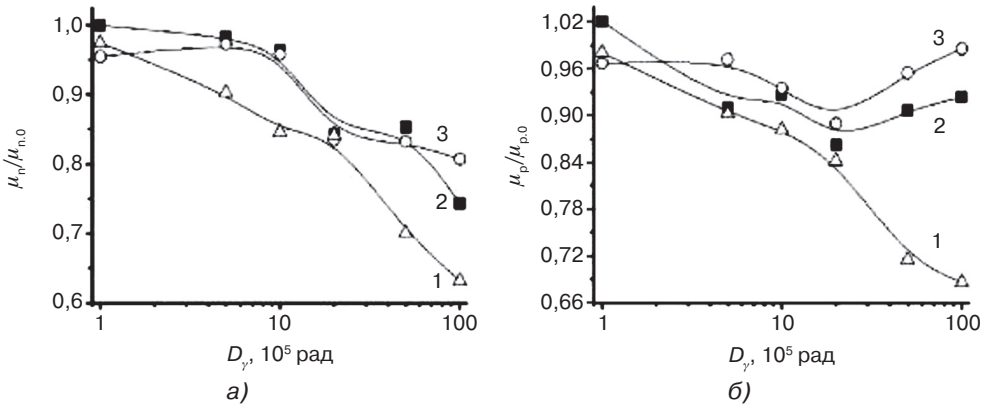


Рис. 7.38. Относительные изменения подвижности носителей в каналах n- (*а*) и p-типа (*б*) транзисторных структур при облучении: 1 – $U_з = 0$; 2 – ±3; ±5 В

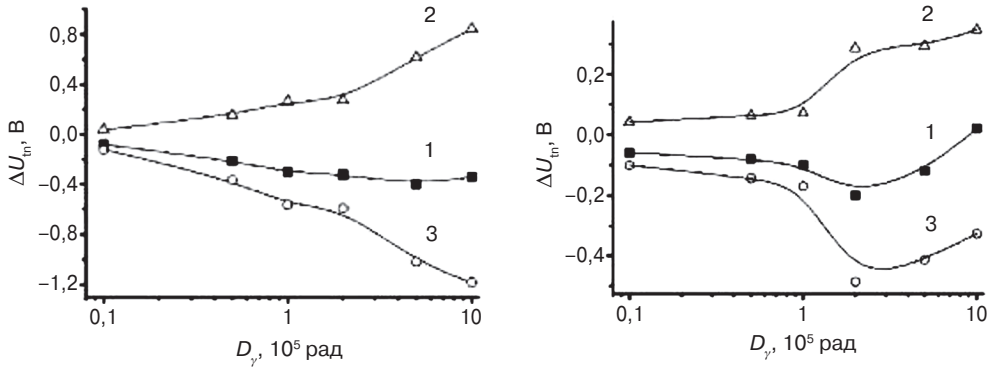


Рис. 7.39. Дозовые зависимости изменений составляющих порогового напряжения n-МОП транзисторных структур ΔU_{tn} (1), ΔU_{itn} (2), ΔU_{otn} (3) при $U_з = 0$ В (*а*) и 5 В (*б*)

Здесь также наблюдаются более заметные изменения подвижностей носителей в каналах при облучении без смещения. С помощью полученных величин ΔN_{itn} и ΔN_{itp} из выражений (7.9) и (7.10) можно найти численные значения ΔN_{otn} и ΔN_{otp}, а затем рассчитать изменения объемных и поверхностных составляющих порогового напряжения.

На рис. 7.39 показаны усредненные для измеряемой выборки $N = 100$ значения изменения составляющих порогового напряжения n-канальных транзисторных МОП-структур при различных электрических режимах облучения. Как видно, во всех случаях происходит более значительное изменение объемной составляющей $\Delta U_{otn,}$ что особенно заметно при облучении с $U_з = 0$ В.

У p-канальных транзисторных МОП-структур при облучении без смещения происходит, наоборот, более заметное изменение поверхностной составляющей ΔU_{itp} (рис. 7.40). При этом объемная составляющая ΔU_{otp} имеет небольшое положительное значение, что может свидетельствовать о преобладании отрицательных зарядов в окисле в связи с захватом электронов в объеме SiO_2.

Из рис. 7.35–7.37 видно, что пассивный режим работы транзисторных МОП-структур при облучении является наихудшим с точки зрения их радиационной стойкости. Этот эффект можно объяснить тем, что при облучении в активном режиме на затворы МОП-транзисторов подается напряжение, создающее в оксиде электрическое поле (~$3 \cdot 10^6$ В/см), способствующее инжекции электронов в SiO_2. Поскольку толщина окисла мала (25 нм), величина этого поля достаточна для туннелирования электронов из кремния на расстояние, соизмеримое с глубиной расположения положительного заряда в оксиде (3–5 нм от границы раздела $Si–SiO_2$) [1, 166], что приводит к его почти полной компенсации при дозах до 10^6 рад и частичной нейтрализации при $D_\gamma = 10^7$ рад. При облучении в пассивном режиме такая компенсация происходит в меньшей степени, так как при этом первоначально имеется только небольшое внутреннее электрическое поле в окисле, обусловленное контактной разностью потенциалов.

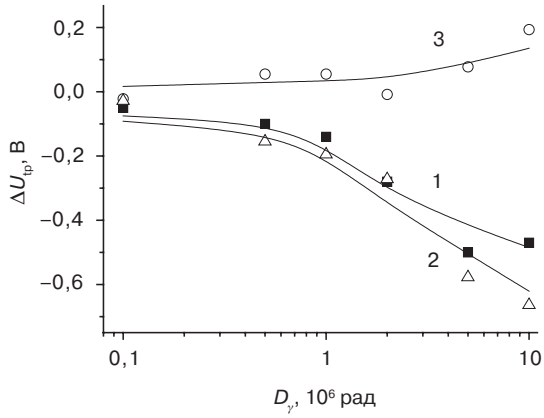


Рис. 7.40. Зависимости изменений порогового напряжения и его составляющих p-канальных МОП транзисторных структур ΔU_{tp} (1), ΔU_{itp} (2), ΔU_{otp} (3) при облучении с $U_з = 0$ В

Разработчикам конструкций РС-микросхем иногда важно узнать «глубину» туннелирования электронов в окисел от границы раздела $Si–SiO_2$ за некоторое время t. Для этого можно использовать выражение [166]:

$$X_T(t) = (1/2\beta)\ln(t/t_0), \qquad (7.13)$$

где $\beta = 2{,}63$ нм$^{-1}$ – константа туннелирования, $t_0 = 10^{-4}$ с – начальный момент времени процесса туннелирования.

Тогда получим для облучения дозой $D_\gamma = 10^7$ рад (при $U_з = 5$ В) в течение $t = 1{,}11 \cdot 10^5$ с величину $X_T(t) = 3{,}97$ нм.

В работах [167, 168] также было установлено, что при облучении электроны захватывались в оксиде кремния и частично компенсировали положительный заряд захваченных дырок. Образование отрицательного заряда в SiO_2 в основном было обусловлено наличием несвязанного кислорода, действующего как акцепторный или амфотерный центр [25].

Следовательно, для оценки предельной работоспособности КМОП микросхем на основе транзисторных МОП-структур с тонким подзатворным оксидом (20÷25 нм) в условиях облучения как минимум необходимо провести испытания тестовых структур в пассивном (наихудшем) электрическом режиме. Кроме того, известно [53], что нормальное функционирование логических КМОП элементов прекращается при напряжении питания $U_п = U_{0.n} + |U_{0.p}|$. Тогда можно заключить, что КМОП ИМС на основе исследованных транзисторных МОП-структур будут нормально функционировать при $U_п = (3÷5)$ В до доз гамма-излучения $D_\gamma = 10^7$ рад.

Представляют интерес также сравнительные экспериментальные исследования дозовой реакции паразитных МОПТ и МОПТ без защиты от утечек из состава тестовых структур КМОП ИМС.

Исследовалось сравнительное радиационное поведение тестовых паразитного n-МОПТ № 1 на толстом окисле с поликремниевым затвором (отношение длины и ширины канала $L/W = 1{,}2/50$) и рабочего n-МОПТ № 2 ($L/W = 50/3$), не имевшего конструктивной защиты от утечек. В ходе эксперимента измерялись параметры ВАХ МОПТ № 2 (рис. 7.41) и паразитного МОПТ № 1.

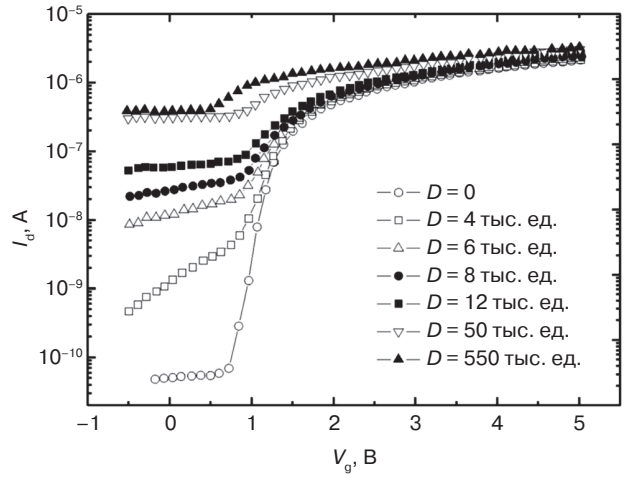


Рис. 7.41. ВАХ МОПТ № 2 при различных дозах облучения

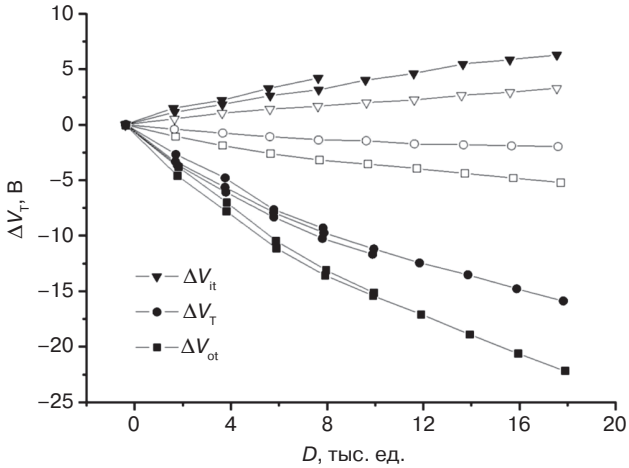


Рис. 7.42. Дозовые зависимости компонент сдвига порогового напряжения паразитного МОПТ № 1

На рис. 7.42 показана дозовая зависимость компонент сдвига порогового напряжения паразитного МОПТ, обусловленных зарядом окисла (ΔV_{ot}) и ПС (ΔV_{it}); облучение проводилось при напряжениях на затворе, равном +5 В (темные фигуры) и 0 В (светлые фигуры). Как и следовало ожидать, доминирующим оказывается процесс формирования положительного заряда, хотя вклад ПС также оказывается существенным. Заметим, что для исследованных тестов отношение $\Delta V_{it}/\Delta V_{ot}$ в рассматриваемом диапазоне доз оказывалось практически независящим от дозы как для активных, так и для паразитных МОПТ. Указанное отношение имело близкие значения для активных и паразитных МОПТ. Например, для теста D19 среднее значение отношения составляет 0,26 для активного МОПТ № 1 и 0,34 для паразитного МОПТ (при облучении с $V_g = +5$ В).

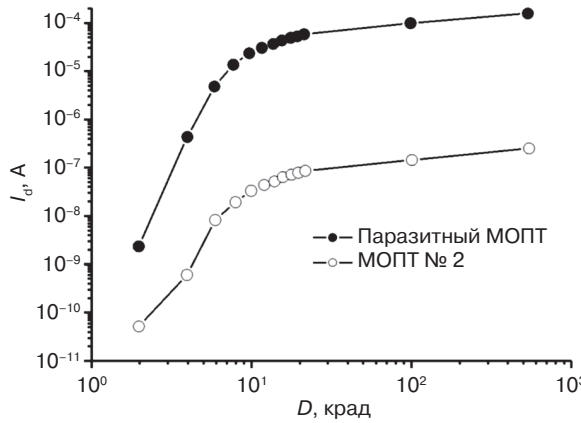


Рис. 7.43. Дозовые зависимости токов утечки рабочего МОПТ № 2 и паразитного МОПТ № 1

Для уточнения модельных представлений о формировании утечек в современных МОПТ представляет интерес сопоставление кинетик изменения тока утечки рабочего n-МОПТ № 2 и изменения параметров паразитного МОПТ № 1.

На рис. 7.43 показаны дозовые зависимости токов стока МОПТ № 2 и паразитного МОПТ № 1 при напряжении на затворе, равном 0 (токи утечки). Видно, что уже при дозах выше двух крад кинетики становятся подобными, а отношение токов утечки МОПТ № 2 и паразитного МОПТ (η) является медленно изменяющейся функцией дозы (рис. 7.44). Исходя из относительно слабой зависимости отношения η от дозы, можно сделать предположение о том, что основной вклад в формирование утечки вносят наиболее толстые участки переходной области между тонким и толстым окислами. Указанные участки окисла МОПТ имеют параметры, близкие к параметрам диэлектрика паразитного МОПТ. На основании представленных данных можно оценить ширину Z паразитного канала утечки в МОПТ № 2. Полагая, что паразитный МОПТ и толстый окисел МОПТ № 2 имеют одинаковые параметры, получим

$$Z/L_2 = W\eta/L \text{ или } Z = WL_2\eta/L, \tag{7.14}$$

где W и L – ширина и длина канала паразитного МОПТ, L_2 – длина канала МОПТ № 2.

В результате Z~$(50/1{,}2) \times 50 \times 1{,}2 \times 10^{-3} = 2{,}5$ мкм, что по порядку величины соответствует физически ожидаемым значениям. Таким образом, радиационное поведение паразитного МОПТ и переходных областей МОПТ без применения конструктивных элементов защиты от утечек можно считать практически эквивалентным.

Можно ожидать, что отказ КМОП ИМС, выполненных по представленной технологии, будет обусловлен деградацией паразитных структур в n-МОПТ. Определенные значения параметров стойкости активных структур позволяют ожидать, что при введении известных мер защиты от утечек показатели стойкости этой базовой конструкции активной структуры МОП ИМС могут составить величины от 500 тыс. ед. и выше.

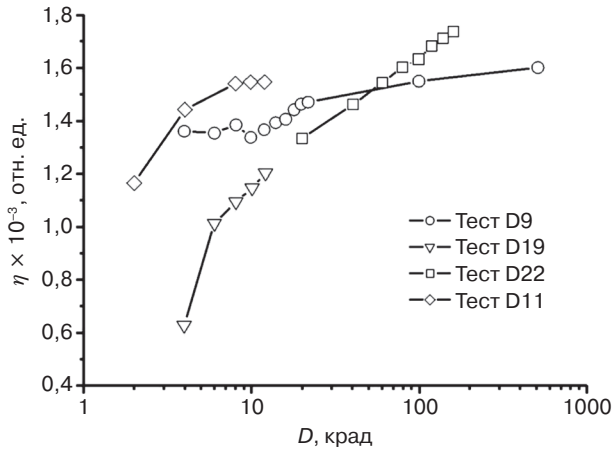


Рис. 7.44. Зависимость отношения токов утечки «рабочего» МОПТ № 2 и «паразитного» МОПТ № 1 от дозы

7.11.2. Экспериментальные исследования воздействия гамма-излучения на параметры МОП-конденсаторов и транзисторных МОП-структур – элементов субмикронных КМОП ИМС

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости элементной базы КМОП ИМС с топологическими проектными нормами 0,35 мкм (МОП-конденсаторов и транзисторов) при воздействии гамма-излучения Co^{60} [193, 194].

Эксперименты проводились на тестовых элементах 0,35 мкм КМОП ИМС: тестовых МОП-структурах с толстым изолирующим окислом (толщина $d_{ox} = 0{,}38$ мкм) и тонким подзатворным окислом ($d_{ox} = 7{,}0$ нм); тестовых МОПТ с каналами n- и p-типа (длина и ширина канала $L/W = 0{,}35/10{,}0$ мкм). Исследовались тестовые МОПТ классической конструкции, а также кольцевой конструкции (сток окружен затвором). Облучение тестовых образцов гамма-квантами Co^{60} проводилось на установке «Исследователь» при температуре 300÷310 К и различных электрических режимах. Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,4 Гр/с, доза $D = 10^2 \div 10^4$ Гр.

На рис. 7.45*а* показаны изменения CV-характеристик МОП-структур ($d_{ox} = 0{,}38$ мкм) при облучении в активном электрическом режиме (при напряжении на затворе $U_з = 5$ В). В результате воздействия гамма-излучения происходит значительный сдвиг CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов с толстым окислом в сторону отрицательных напряжений затвора, что обусловлено накоплением положительного фиксированного заряда в объеме окисла. Наблюдается также уменьшение наклона CV-характеристик и искажение их первоначальной формы, что объясняется увеличением плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела $Si–SiO_2$ [1–3].

После облучения наблюдалось частичное восстановление CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов ($d_{ox} = 0{,}38$ мкм). Этот эффект обусловлен нейтрализацией захваченного положительного заряда в приграничной области окисла в результате туннелирования электронов из кремния на заряженные дырочные ловушки [1].

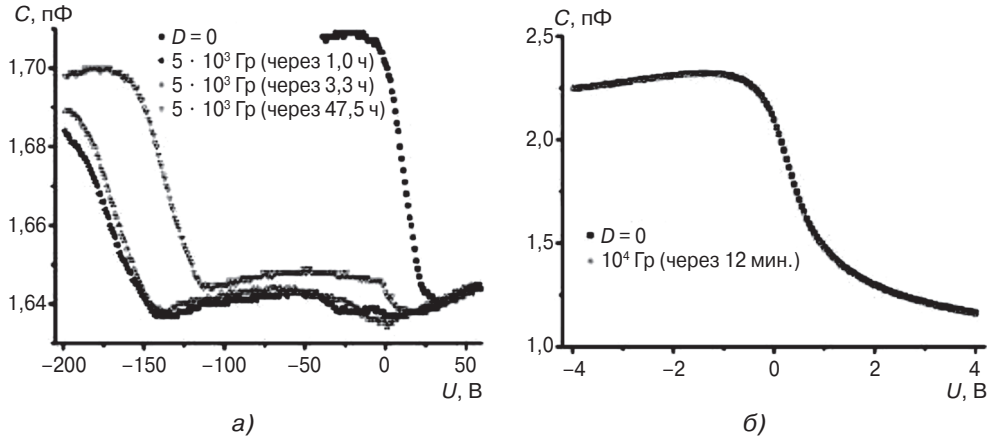


Рис. 7.45. Влияние гамма-излучения на CV-характеристики МОП-структур с d_{ox} = = 0,38 мкм (*а*) и d_{ox} = 7 нм (*б*)

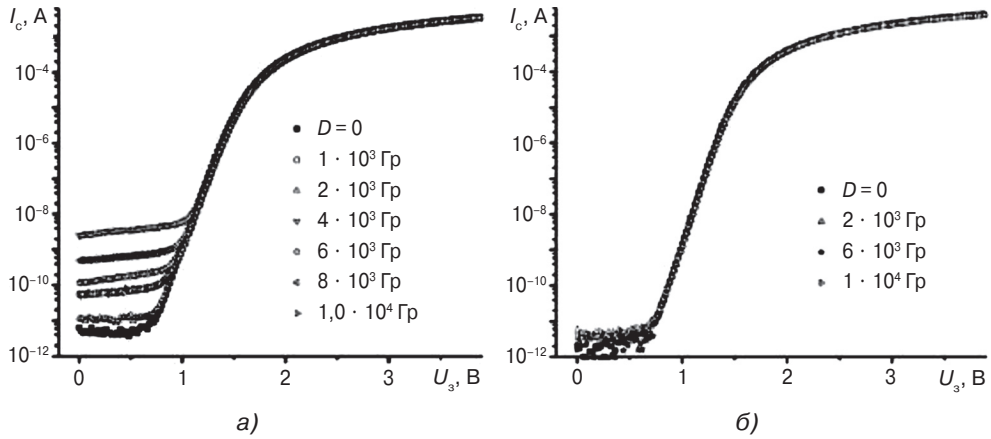


Рис. 7.46. Влияние гамма-излучения на ВАХ n-канальных МОПТ с классической (*а*) и кольцевой геометрией (*б*)

Испытания МОП-конденсаторов (d_{ox} = 7 нм) при гамма-облучении в активном электрическом режиме ($U_з$ = 3,3 В) показали, что при дозе $D = 10^4$ Гр сдвиг CV-характеристик по напряжению составляет не более 0,1 В (рис. 7.45*б*).

Результаты испытаний тестовых n-МОПТ при воздействии гамма-излучения Co^{60} в активном электрическом режиме ($U_з$ = 3,3 В) представлены на рис. 7.46. Сток-затворные вольт-амперные характеристики n-МОПТ классической конструкции при облучении изменились более значительно (рис. 7.46*а*), чем ВАХ n-МОПТ кольцевой конструкции (рис. 7.46*б*). В первом случае происходит заметное возрастание токов утечки с ростом дозы облучения. Во втором случае токи утечки изменились очень незначительно вплоть до $D = 10^4$ Гр.

У кольцевых n-МОПТ при облучении токи утечки практически не возрастают, поскольку там не имеется активных краевых областей, перекрываемых поли-

кремнием, т.е. нет контакта между толстым изолирующим окислом и р-областью подложки, где могут протекать токи утечки [139].

Следует отметить, что в результате облучения не происходит сдвиг и искажение ВАХ n-МОПТ обоих типов, т.е. в подзатворном диэлектрике не накапливается объемный положительный заряд, а также не увеличивается плотность быстрых поверхностных состояний. Этот результат подтверждается данными по стабильности CV-характеристик МОП-конденсаторов (d_{ox} = 7 нм) при гамма-облучении (рис. 7.45*б*). Полученный эффект объясняется тем, что толщина подзатворного окисла сравнима с характеристической длиной туннелирования дырок (~5 нм) [139]. Поэтому при наличии внешнего электрического поля радиационно-индуцированный заряд дырок выносится из окисла в кремний путем туннелирования, а вероятность захвата дырок в объеме окисла или их участия в образовании граничных поверхностных состояний становится очень малой.

Результаты испытаний тестовых р-МОПТ при воздействии гамма-излучения Co^{60} в активном электрическом режиме ($U_з$ = –3,3 В) представлены на рис. 7.47. В отличие от n-МОПТ сток-затворные ВАХ р-МОПТ классической конструкции при облучении изменились за счет небольшого сдвига в сторону отрицательных напряжений затвора, что обусловлено накоплением некоторого положительного фиксированного заряда в объеме окисла, примыкающего к затвору. Однако токи утечки р-МОПТ при облучении возросли незначительно.

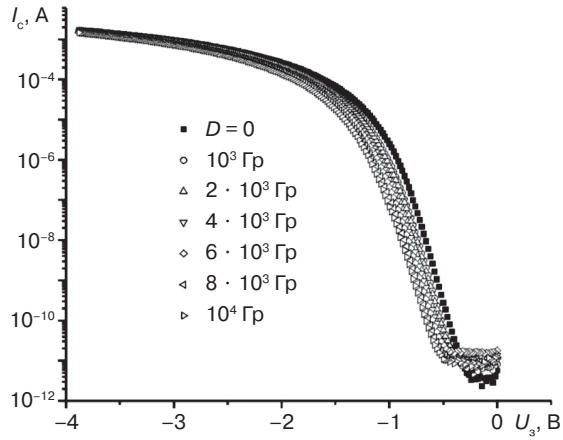


Рис. 7.47. Влияние гамма-излучения на ВАХ р-канальных МОПТ с классической геометрией

Токи утечки формируются в паразитных МОПТ с толстым окислом вследствие накопления зарядов преимущественно в краевых областях между толстым и тонким окислами, в которых действуют значимые электрические поля от напряжения на затворах [9].

В результате исследования элементной базы субмикронных (0,35 мкм) КМОП ИС при воздействии гамма-излучения Co^{60} установлено, что при облучении в активном электрическом режиме происходит значительный сдвиг и уменьшение наклона

CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов с толстым окислом (d_{ox} = 0,38 мкм). Испытания МОП-структур (d_{ox} = 7 нм) при облучении в активном электрическом режиме показали, что при дозе $D = 10^4$ Гр CV-характеристики структур практически не изменились.

Обнаружено, что сток-затворные ВАХ n-МОПТ классической конструкции при облучении изменились более значительно, чем ВАХ n-МОПТ кольцевой конструкции. В первом случае происходит заметное возрастание токов утечки с ростом дозы облучения до $D = 10^4$ Гр. ВАХ p-МОПТ классической конструкции при облучении изменились за счет небольшого сдвига в сторону отрицательных напряжений затвора, однако при этом токи утечки p-МОПТ возросли незначительно.

7.11.3. Особенности воздействия гамма-излучения на параметры МОП-ячеек памяти ЭСППЗУ

В данном разделе представлены результаты исследований тестовых *n*-канальных транзисторных МОП-структур: элементов МОП микросхем памяти – ЭСППЗУ при воздействии гамма-излучения Co^{60} [199, 200].

Приборы со встроенными блоками энергонезависимой памяти в настоящее время являются одним из наиболее используемых типов микросхем [169]. Эти приборы применяются в различных качествах – микросхемы для компьютерной техники и калькуляторов, электронных часов и оборудования для телефонии, средств связи и т.д. Включение в состав микроконтроллеров блоков энергонезависимой памяти расширяет возможности этого класса микросхем. Блоки энергонезависимой памяти могут выполнять функции электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств (ЭСППЗУ или EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory). Важнейшей особенностью этого класса ИМС является тот факт, что запоминающие элементы ЭСППЗУ хранят информацию при отключенном напряжении питания. Обычно она представляется зарядом в диэлектрике или на специальном плавающем затворе МОП-транзистора. ЭСППЗУ разделены на два класса приборов: с параллельным стиранием (FLASH EEPROM) и полнофункциональные ЭСППЗУ (FLOTOX EEPROM). Здесь термин «FLASH» используется как характеристика высокой скорости стирания: «in a flash» – в мгновение ока. Термин «FLOTOX» означает «Floating Gate Tunnel Oxide» – «плавающий затвор с туннелированием в окисле». В полнофункциональных ЭСППЗУ возможно стирание каждой ячейки в отдельности, а операция стирания FLASH памяти может выполняться только для больших секторов или для всего массива ячеек одновременно. Такое различие обусловлено использованием для полнофункциональных ЭСППЗУ базовых двухтранзисторных запоминающих ячеек, а для FLASH памяти – однотранзисторных ячеек.

Программирование запоминающей ячейки осуществляется туннелированием электронов из области стока транзистора на плавающий затвор через туннельный окисел под воздействием приложенного к управляющему затвору высокого напряжения при заземлении стока. Стирание запоминающей ячейки происходит обратным туннелированием электронов с плавающего затвора на сток под воздействием приложенного к стоку высокого напряжения (управляющий затвор заземлен).

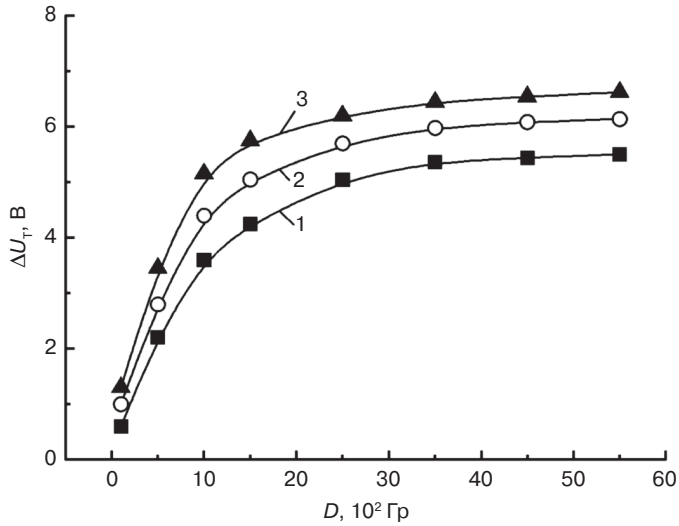


Рис. 7.48. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) с различной площадью плавающего затвора S_F при гамма-облучении: 1 – $S_F = 3{,}1 \times 2{,}6$ мкм^2; 2 – $S_F = 3{,}1 \times 3{,}6$ мкм^2; 3 – $S_F = 3{,}1 \times 6{,}0$ мкм^2

Исследования проводились для напряжения программирования (стирания) 15 В, длительность импульса напряжения составляла 1 мс. Контролировалось пороговое напряжение U_T каждого запоминающего элемента ЭСППЗУ после программирования (стирания).

На рис. 7.48 показаны дозовые зависимости изменения порогового напряжения (в состоянии программирования) запоминающих элементов ЭСППЗУ с параллельным стиранием (FLASH EEPROM) при облучении в пассивном электрическом режиме. В процессе облучения наблюдалось экспоненциальное снижение порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов, что обусловлено накоплением положительного заряда в подзатворном окисле [1, 44]. При дозах $(4 \div 5) \cdot 10^3$ Гр практически достигается насыщение зависимостей $\Delta U_T(D)$.

У запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) с различными топологическими размерами наблюдаются некоторые отличия в изменениях порогового напряжения при облучении. Наименьшая деградация порогового напряжения происходит у структур с минимальной площадью плавающего затвора: $S_F = 3{,}1 \times 2{,}6$ мкм^2 (рис. 7.48).

С использованием методов регрессионного анализа [161] проводился расчет дозовых зависимостей изменений порогового напряжения запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) при облучении. Была получена относительно несложная и пригодная для практического применения следующая экспоненциальная зависимость $\Delta U_T(D)$:

$$\Delta U_T = y_0 + A\,[1 - \exp(-D/t)]. \qquad (7.15)$$

Здесь y_0, A, t – постоянные коэффициенты.

Например, для тестовых структур ячеек памяти с площадью плавающего затвора $S_F = 3{,}1 \times 3{,}6$ мкм^2 были определены следующие значения постоянных коэффициентов: $y_0 = 0{,}364$; $A = 5{,}736$; $t = 8{,}702$.

Полученные аналитические дозовые зависимости могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости запоминающих элементов ЭСППЗУ типа FLASH EEPROM.

Один цикл перепрограммирования ЭСППЗУ состоит из операций записи (соответствует высокому пороговому напряжению транзистора с плавающим затвором) и стирания (соответствует низкому значению порогового напряжения). Разница между значениями порогового напряжения запоминающей ячейки в записанном и стертом состояниях называется окном программирования.

На рис. 7.49 показаны дозовые зависимости порогового напряжения (в состояниях программирования и стирания) запоминающих элементов полнофункционального ЭСППЗУ (FLOTOX EEPROM) при облучении в пассивном электрическом режиме. Видно, что с ростом дозы облучения происходит уменьшение абсолютных значений высокого и низкого порогового напряжения, т.е. фактическое сужение окна программирования.

Аналогичные результаты были получены на таких же образцах элементов памяти ЭСППЗУ (FLOTOX) при исследовании воздействия циклов перезаписи информации на параметры запоминающей ячейки. Эксперименты показали, что в течение первых циклов перезаписи окно программирования немного расширяется, а затем с увеличением количества циклов начинает сужаться.

Параметры запоминающих ячеек (пороговые напряжения в записанном и стертом состояниях) контролировались после 10^M, $2 \cdot 10^M$, $5 \cdot 10^M$ циклов для M от 0 до 5. Приведенные на рис. 7.50 зависимости пороговых напряжений запоминающей ячейки ЭСППЗУ от количества циклов перепрограммирования информации N построены для средних значений измеряемых параметров.

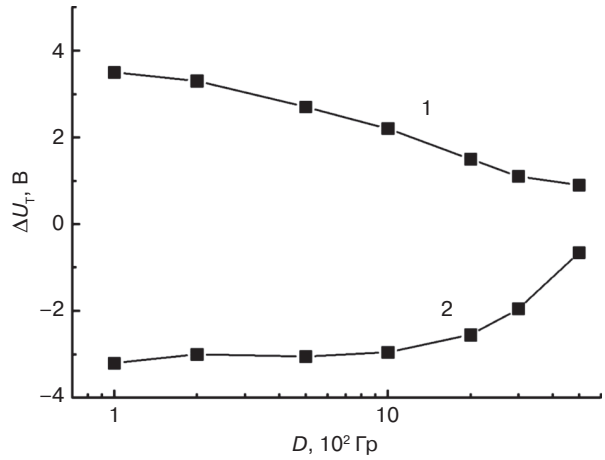


Рис. 7.49. Дозовые зависимости величины порогового напряжения (в состояниях программирования – 1 и стирания – 2 запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) при гамма-облучении

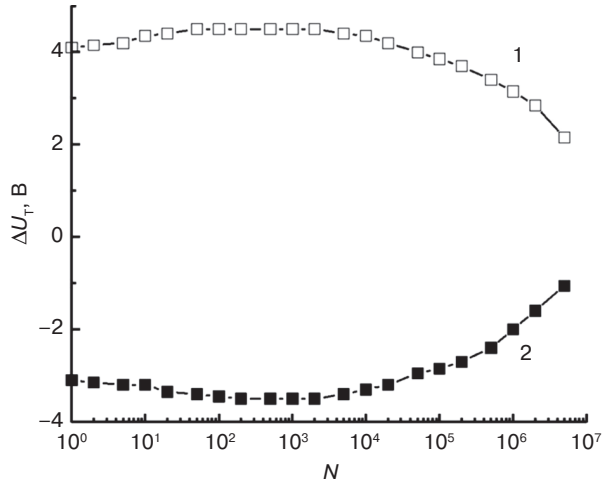


Рис. 7.50. Зависимости пороговых напряжений запоминающей ячейки ЭСППЗУ (FLOTOX) от количества циклов перепрограммирования: 1 – состояние программирования; 2 – состояние стирания

Было установлено, что во время выполнения первой тысячи циклов окно программирования несколько увеличивается. Этот эффект связан с появлением положительного заряда на границе раздела кремний–туннельный окисел [169], который возникает вследствие туннелирования дырок из кремния на границу раздела с окислом или электронов в противоположном направлении. Накопленный на границе раздела положительный заряд понижает потенциальный барьер и увеличивает туннельный ток Фаулера–Нордгейма через туннельный окисел. После приблизительно 2000 циклов перезаписи тенденция изменяется, окно программирования начинает сужаться, что обусловлено накоплением уже отрицательного заряда в туннельном окисле [169]. При этом уменьшается электрическое поле в окисле и, соответственно, количество туннелирующих электронов, а также туннельный ток в процессе программирования (стирания) ячейки. При дальнейшем увеличении количества циклов перезаписи информации происходит исчезновение окна программирования, что соответствует началу процесса физического разрушения туннельного окисла.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что запоминающие ячейки ЭСППЗУ (FLOTOX) выдерживают до $5 \cdot 10^6$ циклов перезаписи информации (рис. 7.50), что примерно соответствует экспериментальным результатам по деградации параметров запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) как при воздействии гамма-излучения, так и при воздействии циклов перезаписи информации.

7.11.4. Экспериментальные исследования воздействия проникающего излучения на параметры логических КМОП ИМС

В данном разделе приводятся результаты исследований влияния ионизирующего излучения на параметры различных типов логических КМОП ИМС серии 1594Т [195, 200–204].

В процессе исследований радиационной стойкости оценивались прежде всего два параметра – уровни бессбойной работы (УБР) и время потери работоспособности (ВПР).

Исследовались два типа ИМС серии 1594Т: 1594ЛЛ1Т – четыре логических элемента «2ИЛИ»; 1594ЛН1Т – шесть логических элементов «НЕ».

ИМС серии 1594Т являются функциональными аналогами ИМС серии 1554ТБМ и отличаются ТТЛ-выходом.

В качестве параметров-критериев использовались ток потребления, выходные напряжения логических уровней и функционирование.

В процессе лазерных имитационных испытаний контролировались импульсные реакции электрических параметров ИМС, а также функциональные сбои, катастрофические отказы (КО) и тиристорный эффект (ТЭ).

В процессе рентгеновских имитационных испытаний контролировались реакции электрических параметров ИМС и функционирование. Установлено, что наиболее радиационно-чувствительным параметром данных ИМС является статический ток потребления, тогда как уровни выходного сигнала остаются в допустимых пределах, и функционирование ИМС сохраняется.

В результате испытаний ИМС серии 1594Т (ЛЛ1 и ЛН1) на стойкость к импульсному ИИ было установлено следующее:

- катастрофических отказов и тиристорного эффекта не обнаружено при воздействии до максимального уровня ($1{,}0 \cdot 10^{12}$ ед./с);
- ВПР в схеме включения по ТУ составляло не более 1 мкс;
- УБР по выходному напряжению составляет $3 \cdot 10^{8}$ ед./с.

На рис. 7.51 представлены эскизы осциллограммы с выходов ИМС (уровень логической «1») при эквивалентном уровне импульсного ИИ $1{,}2 \cdot 10^{12}$ ед./с.

В результате предварительных исследований влияния режимов ИМС на показатели стойкости было установлено, что наиболее критичным по стойкости к дозовым воздействиям является статический режим работы ИМС. Поэтому все ИМС облучались в статических режимах (на всех выходах «0», на всех выходах «1» и смешанный режим).

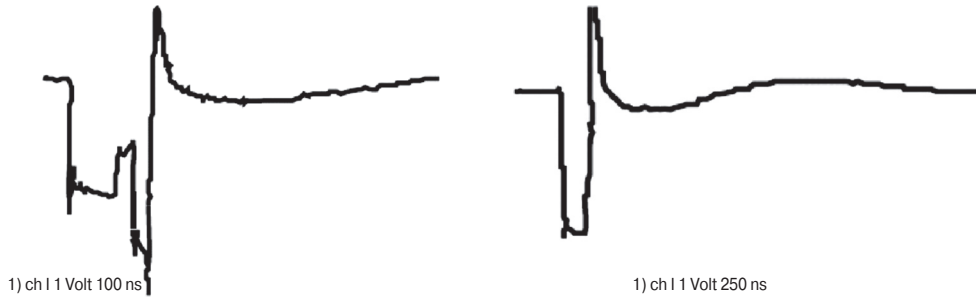


Рис. 7.51. Осциллограммы сигнала с выхода (уровень логической «1») при эквивалентном уровне импульсного ИИ $1{,}2\ 10^{12}$ ед./с: 1594ЛЛ1Т (*а*); 1594ЛН1Т (*б*)

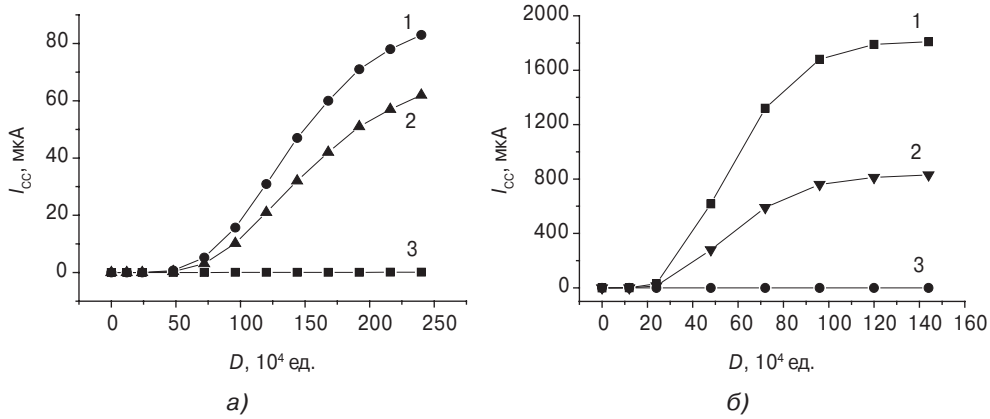


Рис. 7.52. Зависимости тока потребления I_{CC} от уровня дозового воздействия для ИМС 1594ЛЛ1Т (*а*) и 1594ЛН1Т (*б*): кривая 1 – «0» на всех входах, кривая 2 – «1» на всех входах, кривая 3 – смешанный режим

На рис. 7.52 представлены графики зависимости тока потребления I_{CC} от уровня воздействия стационарного ИИ для ИМС серии 1594Т (ЛЛ1 и ЛН1). Как видно из представленных зависимостей, уровень стойкости к воздействию стационарного ИИ для данных ИМС в значительной степени определяется режимом, в котором находится ИМС в процессе облучения.

Радиационные испытания проводились для шести базовых типов КМОП ИМС серии 5584: 5584ЛП5Т (логические элементы «Исключающее ИЛИ»), ИМС 5584ИР8Т (регистр сдвига), 5584ТМ9Т (D-триггеры), 5584КП11Т (селекторы-мультиплексоры), 5584АП3Т (формирователи с тремя состояниями и инверсией на выходе) и 5584ИЕ10Т (двоичный счетчик).

Радиационная стойкость микросхем оценивалась по изменениям тока потребления, уровней выходного напряжения, функционированию, сохранности информации, отсутствию катастрофических отказов и возбуждения тиристорного эффекта.

Основные результаты проведенных испытаний определяют следующие основные характеристики радиационной стойкости микросхем исследуемой серии:

- стойкость к воздействию фактора 7.С4 по параметру I_{CC}: после воздействия этого фактора с уровнем $2 \cdot 10^5$ ед. значение I_{CC}, измеренное при $U_{вх} = 0$ и $U_{вх} = 5{,}5$ В, более чем на порядок ниже установленного в технических условиях предельно допустимого значения. Характер зависимости тока потребления от уровня фактора 7.С4 для микросхем данной серии показан на рис. 7.53;
- параметры I_{cc}, U_{OL}, U_{OL} образца после воздействия с уровнем характеристики 7.И1, в 5 раз превышающем требования ТУ по этой характеристике, остались в пределах допустимых значений;
- тиристорный эффект у микросхем серии 5584 при уровнях воздействия до $D_г = 760$ ед. и $P_\gamma = 3{,}6 \cdot 10^{10}$ ед./с при испытаниях на установке РИУС-5 не возбуждался. Катастрофические отказы при указанных уровнях воздействия отсутствовали.

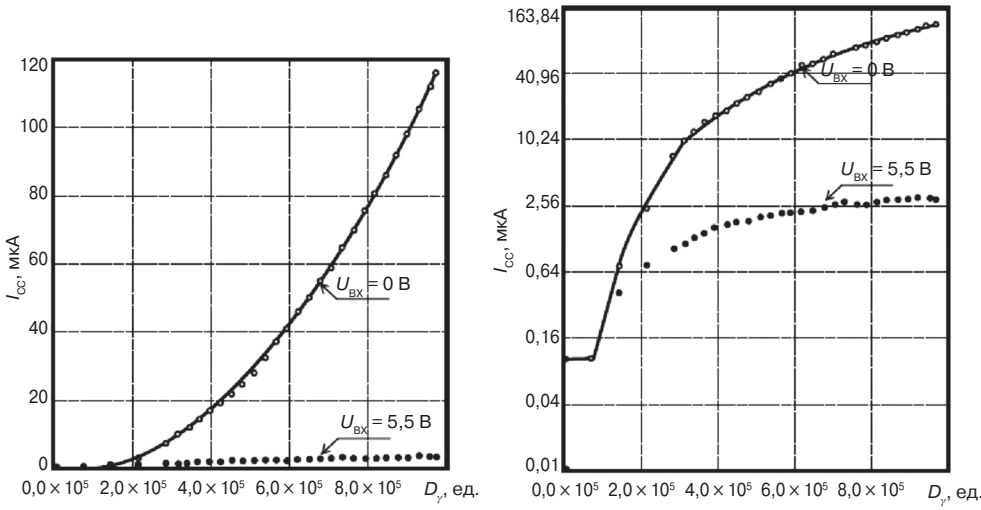
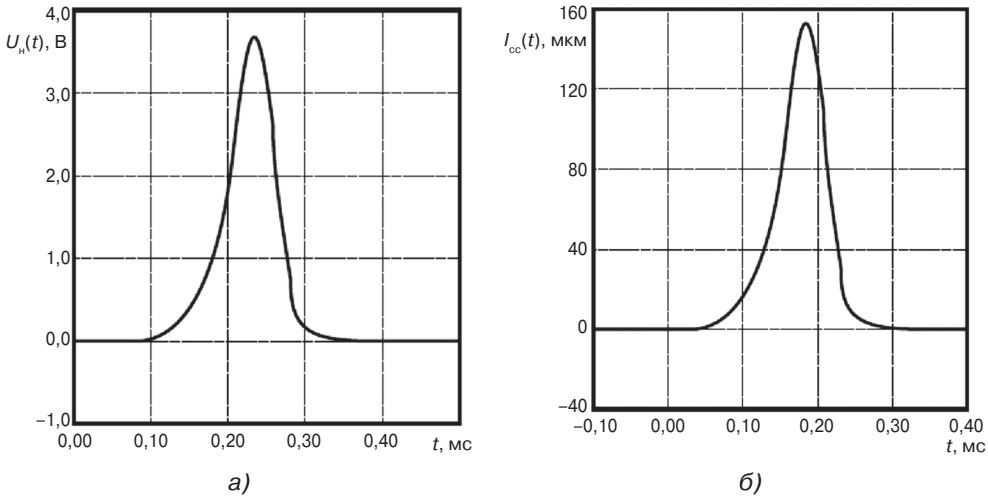


Рис. 7.53. Зависимость тока потребления микросхем 5584ЛП5Т от уровня воздействия при испытаниях на установке ГУ-200 (P_γ = 234 ед./с): линейный масштаб (*а*); логарифмический (по оси тока) масштаб (*б*)

Сплошная линия на рис. 7.53*а* – аппроксимация полиномом четвертой степени. Отклик исследуемых микросхем по току потребления на воздействие импульсных спецфакторов характеризуется существенной инерционностью (наличием задержанной составляющей). Поэтому значения УБР этих микросхем по параметру I_{CC} существенно зависят от формы воздействующего импульса.

В связи с существенной зависимостью УБР от формы импульсного ИИ при данных испытаниях была практически отработана методика оценки минимально возможных значений УБР по току потребления при всех возможных формах импульсного ИИ. Методика позволяет оценивать минимально возможные значения УБР по результатам испытаний на установках статического излучения (типа ГУ-200).

Минимально возможное значение УБР изделия при воздействии импульсного излучения ($min\ P_{\gamma бр}$) может быть определено по результатам испытаний на установках статического излучения типа ГУ-200 и на моделирующих установках импульсного излучения, которое по отношению к данному изделию может рассматриваться как квазистационарное. Сопутствующее гамма-излучение установки БАРС-4 может считаться квазистационарным по отношению к изделиям с характерным временем релаксации отклика на воздействие импульсного излучения, не превышающим 5 мкс. Для этих изделий экспериментальные значения УБР, определенные при испытаниях на установке БАРС-4, отличаются от $minP_{\gamma бр}$ не более чем на 3%. По результатам испытаний на установке РИУС-5 микросхема 5584ИЕ10Т удовлетворяет указанным условиям. Дополнительные подтверждения возможности определения $min\ P_{\gamma бр}$ на установке БАРС-4 были получены при испытаниях на этой установке.



а) *б)*

Рис. 7.54. Формы импульса гамма-излучения $P_г(t)$ установки БАРС-4 (*а*, начальный участок) и отклика $I_{cc}(t)$ микросхемы 5584ИЕ10Т по току потребления на воздействие импульса этой установки (*б*)

На рис. 7.54 приведены осциллограммы сигналов, пропорциональных форме импульса $P_\gamma(t)$ установки БАРС-4 (зависимость мощности поглощенной дозы от времени, определенная по ионизационному току диода 2Д2999, предварительно облученного нейтронами с флюенсом ~ $5 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см^2) и отклику $I_{cc}(t)$ микросхемы 5584ИЕ10Т по току потребления на импульс установки БАРС-4. Практическое совпадение форм импульсов $P_\gamma(t)$ и $I_{cc}(t)$ на рис. 7.54 подтверждает квазистационарный характер импульса гамма-излучения установки по отношению к отклику $I_{cc}(t)$ данной микросхемы и, следовательно, возможность оценки $minP_{\gamma бр}$ для этой микросхемы значением УБР, экспериментально определенным при испытаниях на установке БАРС-4. (На первом этапе вклад нейтронной составляющей в зависимость $P_\gamma(t)$ и влияние на значение УБР не учитывались.)

Значение $minP_{\gamma бр}$ при испытаниях на установке ГУ-200 определялось по скачку тока потребления после подъема источников (до проявления возрастания I_{CC} вследствие дозовых эффектов). Значения $minP_{\gamma бр}$ определялись по коэффициентам гамма-чувствительности и предельно допустимому значению тока потребления I_{CC} = 80 мкА. Результаты оценок $minP_{\gamma бр}$ приведены в табл. 7.11.

Данные табл. 7.11 позволяют оценить коэффициент относительной эффективности гамма-излучения установок БАРС-4 и ГУ-200:

$$K_{\gamma эфф}(\text{Б-4, ГУ-200}) = [K_\gamma(\text{Б-4})]/[\,K_\gamma(\text{ГУ-200})] = 4{,}44/2{,}73 = 1{,}6.$$

Таблица 7.11. Оценки $minP_{\gamma бр}$ микросхемы 5584ИЕ10 по результатам испытаний на установках ГУ-200 и БАРС-4

Установка (дата)	P_γ, Р/с	ΔI_{cc}	K_γ, А·с/Р	$min\,P_{\gamma\,бр}$, Р/с
БАРС-4 (21.12.06 г.)	$2{,}93 \cdot 10^6$	1,30 *мА*	$4{,}44 \cdot 10^{-10}$	$1{,}8 \cdot 10^5$
ГУ-200 (18.01.07 г.)	95,3	*26 нА*	$2{,}73 \cdot 10^{-10}$	$2{,}9 \cdot 10^5$

Полученное значение $K_{\gamma эфф}$ является, по-видимому, первой оценкой относительной эффективности (ионизирующей способности по отношению к падающему излучению) установок БАРС-4 и ГУ-200.

7.11.5. Влияние ионизирующего излучения на параметры КМОП БИС памяти

В данном разделе приводятся результаты исследований воздействия ионизирующего излучения на параметры различных типов логических КМОП БИС ЗУ [205–207].

Проводились радиационные исследования времени выборки данных БИС памяти при дозовом воздействии с учетом всех разрядов данных на примере КМОП БИС ПЗУ 1632РТ1Т и 1835РЕ2Т.

Из практики радиационных испытаний известно, что время выборки данных при стационарном воздействии ионизирующего излучения на БИС памяти является одним из критериальных параметров [170]. Обычно вследствие ограниченных технических возможностей этот параметр в процессе испытаний контролируется по одному или двум разрядам данных.

Целью данной работы была разработка программно-аппаратных средств позволяющих контролировать время выборки сразу по всем разрядам данных и исследование поведения этого параметра у БИС памяти при дозовом воздействии.

В качестве объектов исследования были выбраны современные БИС 1632РТ1Т и 1835РЕ2Т – соответственно однократно программируемые пользователем и масочные ПЗУ информационной емкостью $32К \times 8$ и $128К \times 8$, изготовленные по КМОП-технологии в ОАО «Интеграл». Исследования проводились с использованием рентгеновского имитатора «РЕИМ-5М».

В данном исследовании использовался специализированный блок функционального контроля, разработанный в ЭНПО СПЭЛС. Время выборки данных определялось по результату контроля всех разрядов данных методом последовательного уменьшения времени регистрации выходных данных БИС относительно подачи сигнала выборки, при этом регистрировалось количество ошибок считывания по каждому разряду данных по всем логическим адресам.

Статистическая обработка полученных результатов (рис. 7.55–7.58) показала, что у обеих БИС до воздействия выделяется разряд, определяющий время выборки БИС в целом. При дозовом воздействии время выборки у двух БИС увеличивается, а вклад аномально медленного разряда в значение времени выборки уменьшается за счет ухудшения выборки по остальным разрядам.

Результаты проведенных исследований показывают, что контроль времени выборки БИС памяти следует проводить по всем выводам данных одновременно, так как не исключена возможность различия радиационного поведения этого параметра для разных разрядов данных.

Представлены также результаты исследований времени потери работоспособности (ВПР) КМОП БИС ПЗУ в статическом и динамическом режимах при импульсном ионизирующем воздействии. При определении ВПР интегральных микросхем при импульсном ионизирующем воздействии обычно используют подход, основанный на контроле для каждого критериального параметра времени его выхода за критериальный уровень при воздействии. ВПР для объекта в целом при-

нимается равным максимальному наблюдаемому ВПР. В качестве критериальных параметров наиболее часто используются выходные напряжения, причем при воздействии ИМС функционирует в статическом режиме.

Для БИС памяти такой подход не позволяет адекватно определить ВПР, так как: 1) БИС памяти в реальных условиях функционируют в динамическом режиме со сравнительно сложной временной диаграммой; 2) выходные напряжения формируются в выходных каскадах, представляющих только незначительную часть всей микросхемы; 3) в БИС ОЗУ возможно переключение ячеек памяти, что не позволяет определить ВПР (переключение определяет уровень потери информации, а не ВПР).

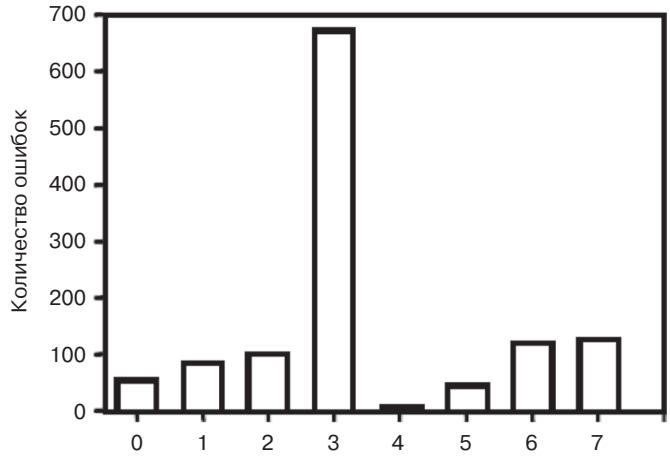


Рис. 7.55. Суммарное количество ошибок считывания в разрядах данных для всех исследованных образцов БИС 1632РТ1Т при контроле времени выборки

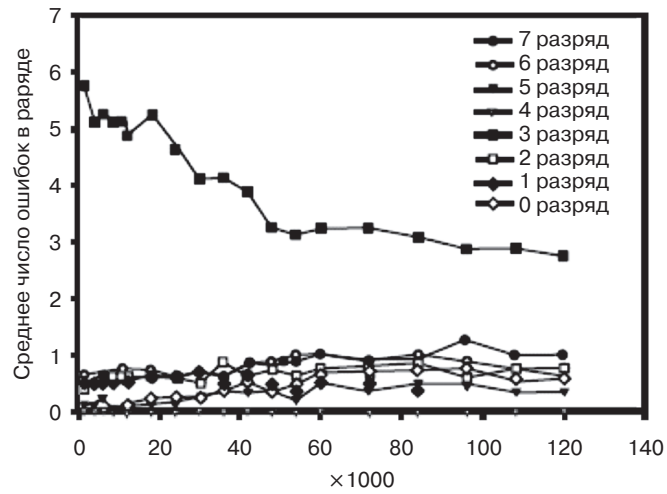


Рис. 7.56. Среднее количество ошибок считывания в разрядах данных для всех исследованных образцов БИС 1632РТ1Т при контроле времени выборки в зависимости от поглощенной дозы

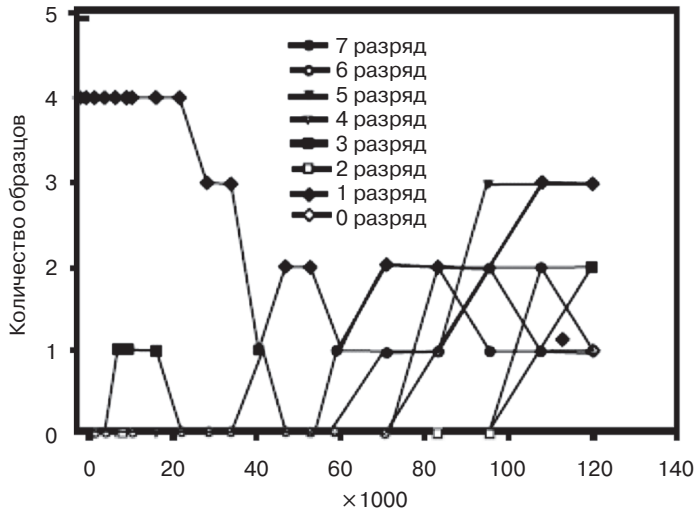


Рис. 7.57. Количество образцов БИС 1835РЕ2Т (из 4-х), в которых ошибки считывания при контроле времени выборки проявлялись в указанных разрядах данных

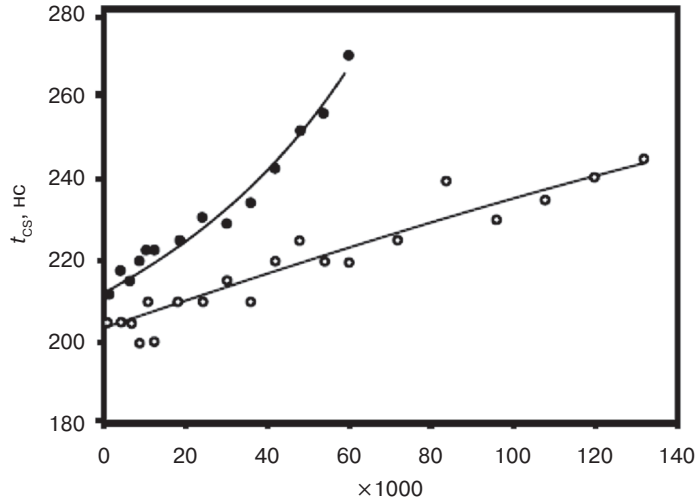


Рис. 7.58. Характерные зависимости времени выборки от поглощенной дозы для БИС ПЗУ 1835РЕ2Т (сверху) и 1632РТ1Т (снизу)

Таким образом, для БИС памяти целесообразнее исследовать ВПР при функционировании БИС в динамическом режиме. Очевидно, что для полноты контроля нужно обеспечить перебор всех логических адресов и режимов: как считывание, так и запись для БИС ОЗУ. ВПР определяется по искажению временной диаграммы, причем для повышения точности измерения ВПР нужно обеспечить максимальную частоту следования и четкую идентификацию циклов считывания (записи) по осциллограмме.

Представлены результаты экспериментальных исследований радиационного поведения тестовых КМОП БИС ОЗУ IN4K, анализ которых позволил обоснованно выбрать конструктивно-технологические параметры при проектировании БИС ОЗУ 256К.

Задача создания КМОП БИС ОЗУ информационной емкостью 256К потребовала проведения экспериментальных исследований различных конструктивно-технологических вариантов реализации ЯП, для чего была создана тестовая КМОП БИС IN4K информационной емкостью 4 Кбит (организация $4К \times 1$). Тестовые БИС ОЗУ были выполнены в трех конструктивно-технологических вариантах, различающихся величинами топологических зазоров между стоковой (n^+) и охранной (р) областями (1,5 мкм для вариантов № 1, 2 и 1,0 мкм для № 3), а также между стоковой (p^+) и областью р-кармана (4,5 мкм для вариантов № 1, 3 и 4,0 мкм для № 2).

Экспериментальные исследования тестовых БИС ОЗУ проводились на лазерном и рентгеновском имитаторах «РАДОН-5М» и «РЕИС-ИМ». Для контроля функционирования БИС ОЗУ использовался специализированный программно-аппаратный комплекс, реализующий различные алгоритмы функционального контроля и режимы работы микросхемы, при этом использовались алгоритмические функциональные тесты (АФТ) «шахматный», «инверсный шахматный», «поле 0» и «поле 1», «марширующие 0 и 1». Контролировались статические (выходные напряжения логических уровней U_{OL}, U_{OH}; ток потребления I_{CCS}) и динамические параметры (время выборки адреса $t_{A(A)}$), а также функционирование (сохранение способности записи и считывания) и сохранность информации при импульсном воздействии.

В результате исследований установлено, что для всех вариантов КМОП БИС ОЗУ IN4K катастрофические отказы и тиристорный эффект не наблюдаются в диапазоне уровней воздействия импульсного ИИ от $2{,}0 \cdot 10^8$ до $2{,}4 \cdot 10^{12}$ ед./с. УБР составляет $1{,}3 \cdot 10^9$ ед./с и определяется откликом выходного напряжения низкого логического уровня. Уровень сохранности информации для всех испытанных образцов варьировался в пределах одного порядка (рис. 7.59).

Время потери работоспособности (ВПР) контролировалось в динамическом режиме чередования циклов записи и считывания по фиксированному логическому адресу. Установлено, что ВПР не превосходит 20 мкс (это соответствовало одному циклу запись–считывание).

При дозовых воздействиях для всех исследованных образцов значения параметров U_{OL}, U_{OH} и $t_{A(A)}$ находились в пределах установленных норм до максимального уровня воздействия $1{,}2 \cdot 10^6$ ед. (для некоторых образцов – $5{,}4 \cdot 10^6$ ед.). Скорость изменения выходных напряжений существенно возрастала начиная с уровня воздействия около 10^6 ед. (рис. 7.60), а характер изменения практически не зависел от конструктивно-технологического варианта.

Наиболее чувствительными к дозовым эффектам оказались образцы варианта № 2, деградация времени выборки которых начала проявляться при уровне $3{,}6 \cdot 10^5$ ед. (рис. 7.61). Наиболее существенные количественные изменения времени выборки адреса наблюдались у одной из БИС варианта № 3, при этом, однако, первые изменения зафиксированы при уровне $1{,}2 \cdot 10^6$ ед.

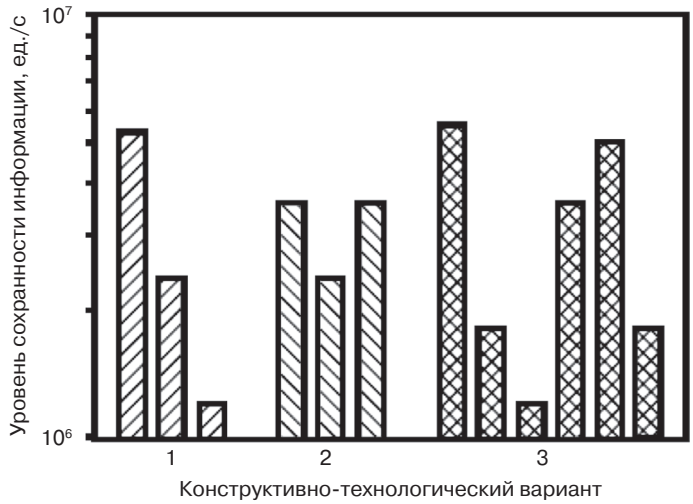


Рис. 7.59. Уровень сохранности информации тестовых БИС ОЗУ

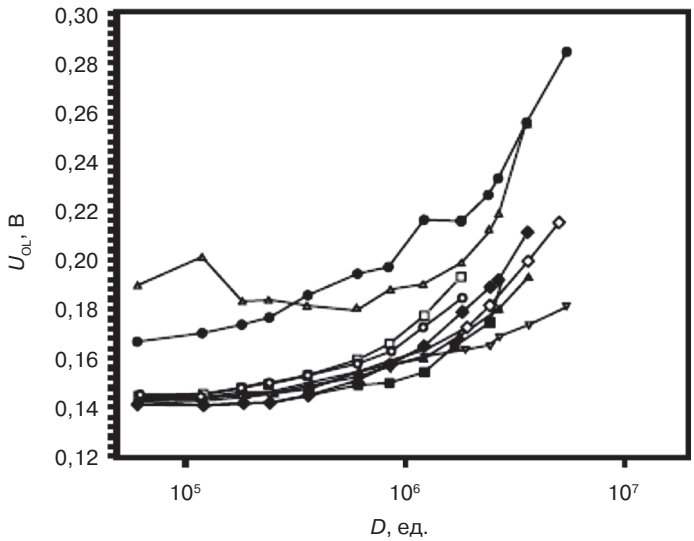


Рис. 7.60. Дозовая зависимость выходного напряжения низкого логического уровня тестовых БИС ОЗУ

Во всех образцах наблюдались ошибки при контроле функционирования с АФТ «марширующие 0 и 1» до воздействия, а в процессе воздействия их количество изменялось немонотонно. Отказы в ячейках памяти при функциональном контроле с кодами «поле 0», «поле 1» и «шахматный» были зафиксированы у образцов всех конструктивно-технологических вариантов, причем у образцов варианта № 1 и № 2 при уровнях до $(2{,}4–7{,}5) \cdot 10^5$ ед., а у образцов варианта № 3 – при $1{,}2 \cdot 10^6$ ед.

Полученные результаты послужили основой для выбора конструктивно-технологических параметров при проектировании 256К ОЗУ.

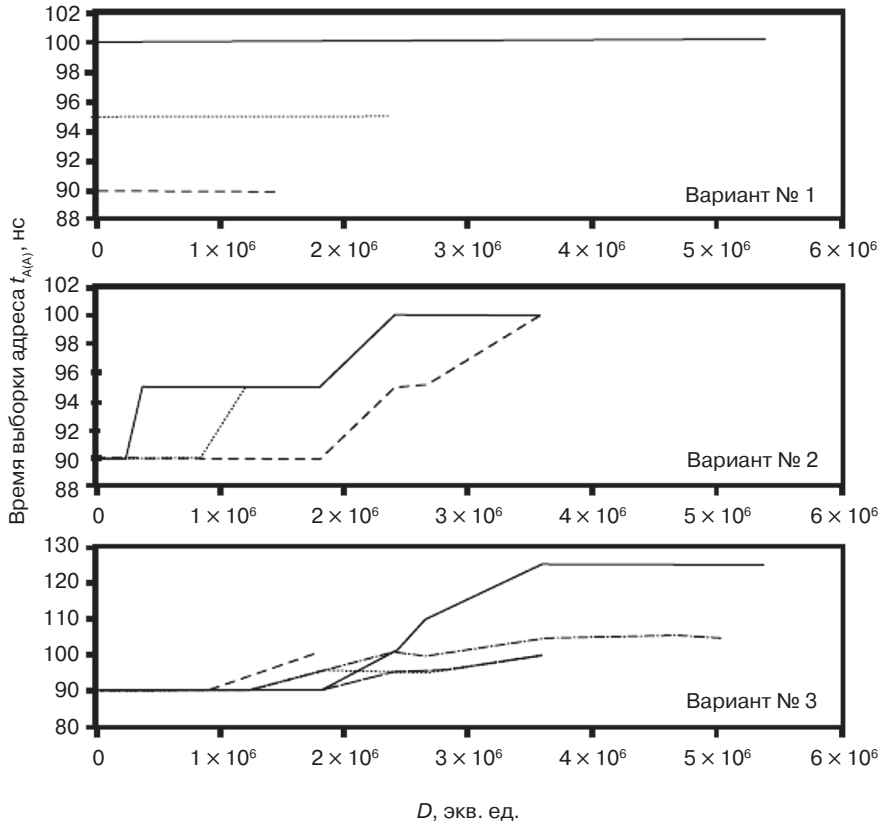


Рис. 7.61. Дозовые зависимости времени выборки адреса различных конструктивно-технологических вариантов ОЗУ

Представлены результаты имитационных испытаний КМОП БИС РПЗУ 1568РР1. Определены уровни бессбойной работы и время потери работоспособности РПЗУ при воздействии импульсного ИИ и уровень стойкости к воздействию стационарного ИИ в реальных режимах функционирования.

Проводились имитационные радиационные испытания репрограммируемых ПЗУ с электрическим стиранием (РПЗУ) 1568РР1 емкостью 2 Кбит (256×8), разработанных и изготовленных в НПО «Интеграл» по КМОП технологии. В качестве параметров-критериев использовались ток потребления и функционирование. Кроме того, при испытаниях на стойкость к воздействию импульсного ИИ контролировался тиристорный эффект (ТЭ).

На рис. 7.62 показаны осциллограммы тока потребления РПЗУ при различных уровнях эквивалентной мощности дозы лазерного излучения, а на рис. 7.63 – зависимости амплитуды и длительности быстрой компоненты импульса тока потребления от мощности дозы.

Вплоть до максимального уровня импульсного воздействия $5 \cdot 10^{11}$ ед./с не обнаружено искажения записанной в РПЗУ информации. На уровне $5 \cdot 10^{8}$ ед./с происходит функциональный отказ, связанный со сбоем протокола считывания.

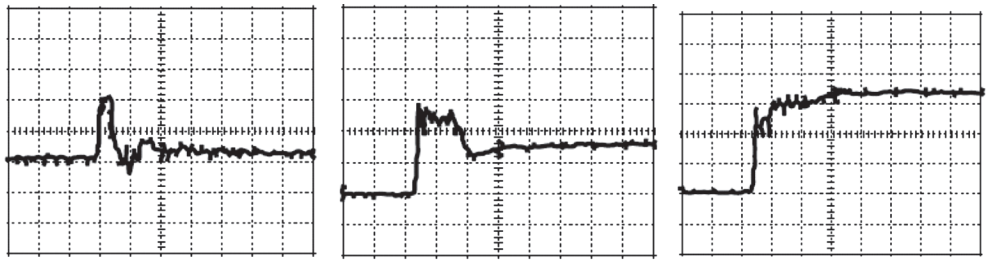


Рис. 7.62. Осциллограммы тока потребления РПЗУ при различных уровнях мощности дозы (везде – 50 нс/дел): $5 \cdot 10^8$ ед./с (200 мВ/дел) (*а*), $4 \cdot 10^9$ ед./с (500 мВ/дел) (*б*), $3 \cdot 10^{10}$ ед./с (500 мВ/дел) (*в*)

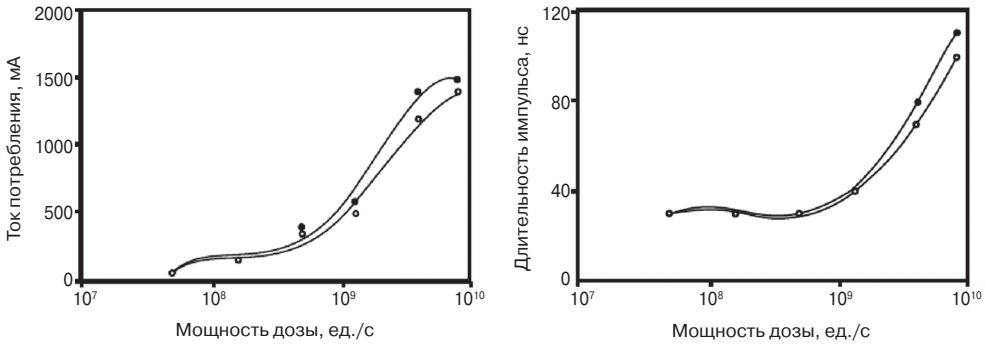


Рис. 7.63. Зависимости амплитуды (*а*) и длительности (*б*) импульсов тока потребления от мощности дозы

При контроле стойкости к воздействию стационарного ИИ образцы облучались в статическом режиме (хранение) с контролем сохранности информации и тока потребления. На рис. 7.64 приведены зависимости токов потребления в режимах хранения и чтения от поглощенной дозы.

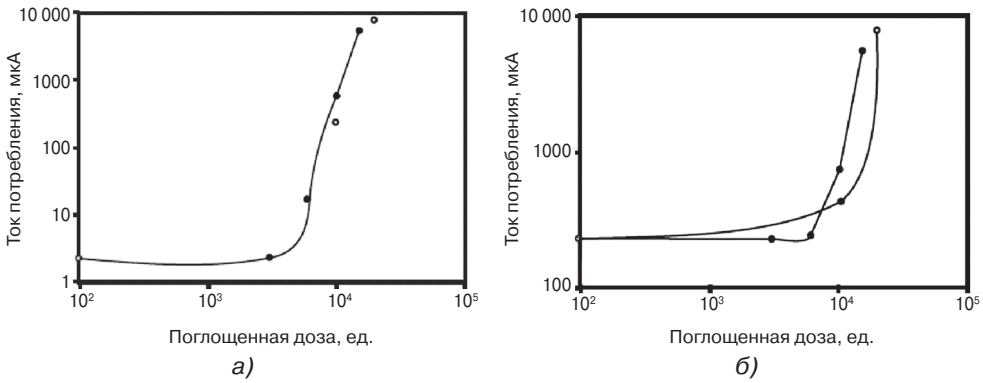


Рис. 7.64. Дозовые зависимости тока потребления в режимах хранения (*а*) и чтения (*б*)

5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A 5 A	5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F 5 F
а)	*б)*

Рис. 7.65. Исходная (*а*) и искаженная в результате облучения (*б*) информация в РПЗУ

На уровне $1{,}5 \cdot 10^4$ ед. наблюдается функциональный отказ РПЗУ, который проявляется как искажение записанной информации (рис. 7.65) и как невозможность записи.

Таким образом, в результате имитационных испытаний КМОП БИС РПЗУ 1568РР1 установлено следующее.

- Уровень стойкости к воздействию импульсного ИИ определяется тиристорным эффектом и составляет не менее 10^9 ед./с. УБР определяется функциональным сбоем и составляет не менее 10^8 ед./с.
- Уровень стойкости к воздействию стационарного ИИ составляет не менее $3 \cdot 10^4$ ед. и определяется превышением нормы током потребления в режиме хранения. Уровень функционального отказа (сохранности информации) составляет не менее 10^5 ед.

7.11.6. Экспериментальные исследования влияния радиационного воздействия на параметры транзисторных МОП/КНИ-структур и КМОП БИС ОЗУ на их основе

В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований КМОП БИС СОЗУ, изготовленных в КНИ структурах по технологии SIMOX и Smart Cut. Приведены данные фотолюминесцентного анализа структурного совершенства пленок кремния в КНИ структурах и результаты исследований устойчивости БИС к радиационным воздействиям [208–214].

Организации, занимающиеся кремниевой микроэлектроникой, обращают внимание на структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ) для разработки новых изделий с улучшенными характеристиками.

Наибольшее распространение для производства КМОП БИС получили КНИ структуры, получаемые методом имплантации кислорода (SIMOX) [148]. Очень перспективными считаются технологии Smart Cut [149] и Dele Cut [150], основанные на имплантации водорода и термокомпрессионном сплавлении пластин. По данным [174], Dele Cut КНИ структуры даже превосходят свой аналог Smart Cut и обеспечивают повышенную радиационную стойкость. В Беларуси исследования по КНИ технологии возобновились в 2001 году после получения финансовой поддержки в рамках государственной программы «Белэлектроника». В настоящее время исследования ведутся по 2-м направлениям: разработка собственной технологии изготовления КНИ структур, удовлетворяющих требованиям современной микроэлектроники, и разработка элементной базы КМОП КНИ БИС.

Рассмотрим вначале результаты сравнительных экспериментальных исследований различных КНИ структур, имеющихся на рынке.

Для проведения этих исследований использовались КНИ структуры диаметром 150 мм, изготовленные по технологиям SIMOX, Smart-Cut и Dele-Cut. КНИ структуры подобраны с одинаковой толщиной пленки кремния 0,21÷0,29 мкм и толщиной изолирующего окисла 0,28÷0,4 мкм и были изготовлены в составе одной партии пластин по 5 пластин каждой из трех КНИ технологий.

Для их исследований была разработана специализированная тестовая матрица, содержащая набор тестовых элементов для контроля электрических параметров элементной базы КМОП БИС, контроля и оптимизации технологии их изготовления. В состав тестовой матрицы также были включены КМОП БИС статического оперативного запоминающего устройства емкостью 8К с организацией 1024×8 бит на базе 6-ти и 10-ти транзисторных ячеек памяти.

Подзатворный окисел толщиной 14 нм получали при температуре 850 °С методом пирогенного окисления. Все операции создания легированных областей были рассчитаны с использованием программ моделирования Supreme-4 фирмы Silvaco. Структура этого тестового кристалла представлена на рис. 7.66. Здесь в модуле 1 размещены тестовые элементы для проведения различных испытаний, в модуле 2 размешены тестовые элементы для автоматизированного контроля электрических характеристик тестовых элементов, а модули 3 и 4 представляют собой фактически КМОП БИС СОЗУ.

С целью сравнительного исследования уровня стойкости и характера изменения параметров одновременно проводились радиационные испытания КМОП БИС СОЗУ, изготовленных на КНИ и КНС структурах и спроектированных по одинаковым проектным нормам. В образцах, изготовленных в КНИ структурах, имелась и использована возможность реализации двух вариантов подключения подложки – к шине с нулевым потенциалом и к шине, соединенной с источником питания.

На всех образцах КНИ структур были исследованы МОП транзисторы с широким набором длин каналов и ширин затворов транзисторов. Эксперименталь-

но установлено, что такие параметры МОП транзисторов, как пороговое напряжение, напряжение пробоя исток–сток, ток стока, практически не зависели от типа использованных в эксперименте КНИ структур, а определялись только уровнями исходного легирования областей карманов и приповерхностной области пленки кремния. В то же время начальные участки и наклон допороговых характеристик весьма сильно зависели от типа КНИ структур. Лучшие «интегральные» результаты показали структуры Smart Cut и SIMOX. На структурах Dele Cut были получены МОП транзисторы с удовлетворительными характеристиками, но со значительным разбросом параметров по поверхности пластин.

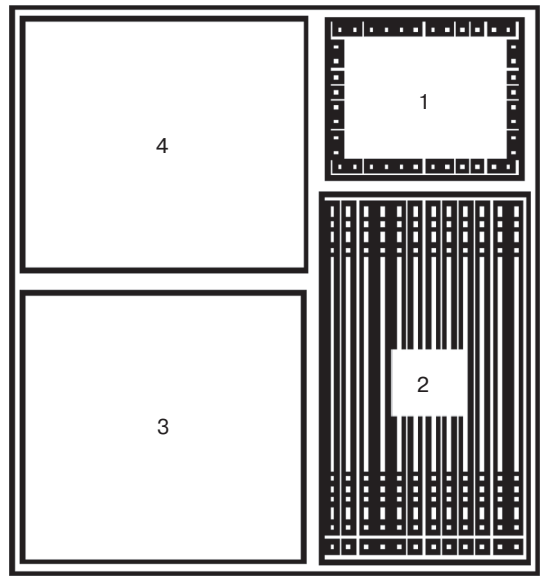


Рис. 7.66. Структура кристалла тестовой матрицы

Выход годных определялся как процентное отношение количества годных кристаллов к общему количеству физических кристаллов КМОП БИС СОЗУ на пластине. Наиболее высокий выход годных обеспечивали образцы Smart Cut. На образцах SIMOX выход годных составил всего 60–70%. На образцах Dele Cut не было получено годных кристаллов.

Для оценки качества структурного совершенства пленок кремния в КНИ структурах был использован метод низкотемпературной фотолюминесценции при температуре жидкого гелия 4,2 К. Эти исследования выполнялись на КНИ структурах, прошедших операции технологического процесса изготовления КМОП БИС. Спектры фотолюминесценции снимались на участках пленки кремния, поверхность которых была защищена фоторезистом на операциях имплантации и травления Поверхность образца КНИ структур подвергалась травлению в 5%-ном водном растворе фтористоводородной кислоты, а затем исследовалась с помощью микроскопа. Этот метод позволял выявлять HF-дефекты – сквозные дефекты в пленке кремния.

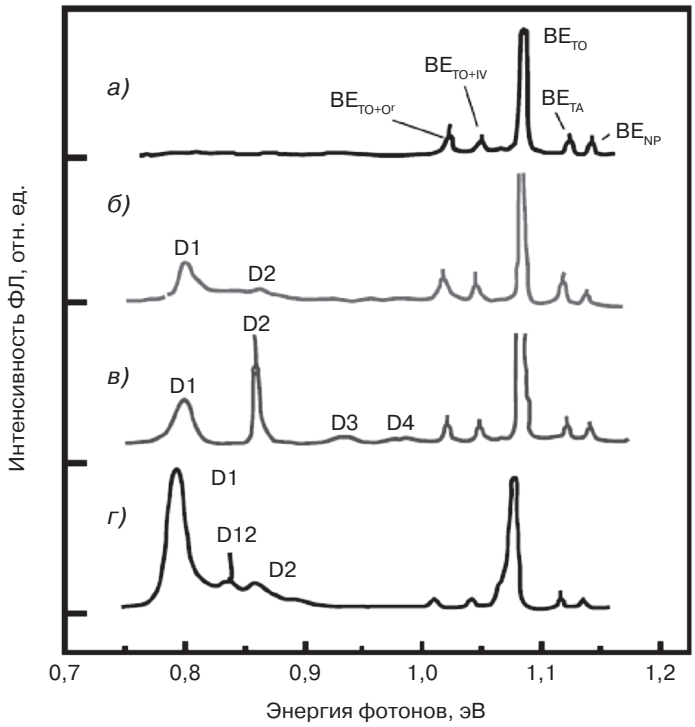


Рис. 7.67. Спектры фотолюминесценции пластины кремния КДБ-12 (100) (*а*) и КНИ структур Smart Cut (*б*), SIMOX (*в*) и Dele Cut (*г*)

Изучение структурного совершенства пленок кремния КНИ структур всегда важно для анализа причин различного выхода годных БИС и поведения электрических параметров тестовых элементов. Низкотемпературная (4,2 K) фотолюминесценция дает информацию об оптических свойствах кремния как в области края фундаментального поглощения (рекомбинация собственных свободных экситонов и экситонов, связанных на основных легирующих примесях), так и в области спектра с энергией фотонов менее 1,0 эВ, где регистрируются полосы излучения точечных и объемных структурных нарушений (собственные дефекты структуры; примесные атомы кислорода, углерода, водорода; дислокации и т.д.).

На рис. 7.67 представлены спектры фотолюминесценции монокристаллического кремния КДБ-12 (100) и различных структур КНИ. В спектрах всех образцов в области края фундаментального поглощения доминирует люминесценция, обусловленная рекомбинацией экситонов, локализованных на атомах бора. Линия BE_{NP} ~ 1,149 эВ является следствием бесфононной излучательной рекомбинации связанных экситонов, линия BE_{TA} ~ 1,131 эВ обусловлена рекомбинацией связанных экситонов с одновременным испусканием поперечных акустических фононов *TA* ~ 18 мэВ. Наиболее интенсивная линия B_{TO} ~ 1,093 эВ обусловлена рекомбинацией локализованных экситонов с одновременной эмиссией поперечных оптических фононов с энергией *TO* ~ 58 мэВ. Компоненты B_{TO+IV} и B_{TO+O^r} связаны с рекомбинацией локализованных экситонов, но с участием двух фононов. Боль-

шой интерес представляет область спектра с энергией менее 1,0 эВ. В этой части спектра наблюдаются полосы люминесценции с различной интенсивностью и разным характером спектрального распределения. На основании анализа формы спектров и изучения их температурной зависимости, а также сравнения с известными данными наиболее достоверно отнесение этих полос люминесценции к дислокационному излучению. Такое утверждение можно принять на основании сравнения положения линий в исследуемых образцах с аналогичными значениями, найденными в литературе для монокристаллов кремния, содержащих дислокации, где D1 ~ 0,807, D12 ~ 0,844 и D2 ~ 0,874 эВ.

Положение линий D1 и D2 для образцов SIMOX составляло 0,800 и 0,860 эВ, а для структур Smart Cut – 0,802 и 0,865 эВ. Спектр люминесценции образца Dele Cut содержит перекрывающиеся линии дислокационного излучения D1 ~ 0,796, D12 ~ 0,840 и D2 ~ 0,862 эВ.

Следует отметить, что наиболее сильная дислокационная люминесценция была характерна для образца КНИ Dele Cut, хотя при этом интенсивность экситонной люминесценции была примерно на 30% меньше, чем у других КНИ структур и собственно монокристалла кремния. Спектры для структур SIMOX также характеризуются дислокационной люминесценцией. В спектрах люминесценции структур Smart Cut присутствуют интенсивные линии экситонов, связанных на боре, и слабые полосы Д1 и Д2 дислокационной люминесценции. Для этого экспериментального образца спектры фотолюминесценции оказываются близки по своим параметрам (форме линий, их энергетическому положению, интенсивности) к аналогичным спектрам, характерным для монокристаллов кремнии p-типа проводимости с концентрацией носителей заряда ~ 10^{15}÷10^{16} $см^{-3}$, что позволяет предполагать высокое структурное качество пленок кремния на изолирующем окисле в Smart Cut КНИ структурах.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что основными оптически активными структурными дефектами в исследованных КНИ структурах являются дислокации. Оценка концентрации дислокаций в слоях КНИ, проведенная по сравнительному анализу интенсивности люминесценции в пленках и интенсивности дислокационной люминесценции от кристаллов пластически деформированного кремния с известной плотностью дислокаций, составляет не более 10^2 $см^{-2}$ для Smart Cut, ~ 10^3 $см^{-2}$ для SIMOX и ~ 10^4 $см^{-2}$ для Dele Cut. Анализ поверхности пленок КНИ структур после травления в HF позволил заключить, что пленки кремния КНИ структур Smart Cut и SIMOX практически не содержат сквозных HF дефектов. В то же время было установлено наличие большого количества (10^4÷10^5 $см^{-2}$) сквозных HF-дефектов в Dele Cut КНИ структурах.

Исследовались тестовые n- и p-канальные МОП/КНИ транзисторы (SIMOX), которые имели различные соотношения длины и ширины каналов и разную конфигурацию: без запитки канала, с линейной запиткой канала, с H-образной запиткой канала и с 2T-образной запиткой канала.

На рис. 7.68 и 7.69 представлены результаты исследований n- и p-канальных транзисторных МОП/КНИ-структур с H-запиткой при воздействии рентгеновского излучения.

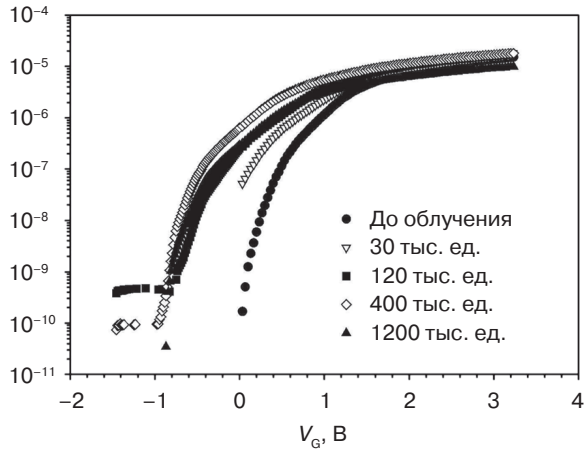


Рис. 7.68. Влияние рентгеновского излучения на ВАХ n-МОПТ/КНИ при $V_G = +3{,}3$ В

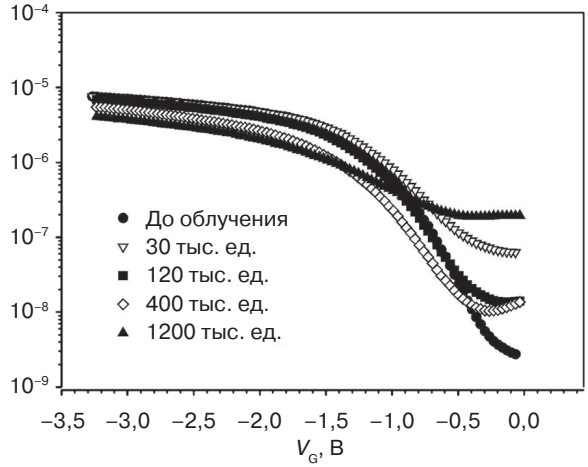


Рис. 7.69. Влияние рентгеновского излучения на ВАХ p-МОПТ/КНИ при $V_G = -3{,}3$ В

Экспериментально обнаружено, что с ростом дозы излучения у n-канальных транзисторных МОП/КНИ-структур уменьшается пороговое напряжение, крутизна ВАХ и возрастают токи утечки (рис. 7.68); у p-канальных транзисторных МОП/КНИ-структур увеличивается пороговое напряжение и уменьшается крутизна ВАХ (рис. 7.69).

Вышеуказанные изменения параметров проявляются в большей степени у n-канальных транзисторных МОП/КНИ-структур при облучении в активном электрическом режиме ($V_G = +3{,}3$ В), а у p-канальных транзисторных МОП/КНИ-структур – в пассивном электрическом режиме ($V_G = 0$ В).

С целью исследования уровня стойкости и характера изменения параметров проводились сравнительные радиационные испытания КМОП БИС СОЗУ 8К, изготовленных в КНИ и КНС структурах. В образцах, изготовленных в КНИ структу-

рах, имелась возможность реализации двух вариантов подключения подложки – к шине с нулевым потенциалом и к шине, соединенной с источником питания. Радиационные испытания включали оценку стойкости БИС к импульсному воздействию и полной дозе с использованием лазерного и рентгеновского имитаторов. Максимальный эквивалентный уровень импульсного воздействия составил $2{,}5 \cdot 10^{12}$ ед./с, эквивалентная мощность дозы рентгеновского излучения – 174 ед./с. В процессе испытаний контролировалось наличие тиристорного эффекта и катастрофических отказов, контроль функционирования (отсутствие сбоев и отказов), сохранность записанной информации (совпадение считанной и записанной информации), величины токов потребления. При функциональном контроле применялись алгоритмические тесты типа «запись–считывание»: «поле 0», «поле 1», «шахматы», «инверсные шахматы», «псевдослучайный код».

Прежде всего отметим, что различий в радиационной стойкости образцов КМОП СОЗУ 8К, изготовленных в Smart Cut и SIMOX КНИ структурах, не установлено. Катастрофических отказов и тиристорного эффекта во всех исследованных образцах не обнаружено до уровня импульсного воздействия $2{,}5 \cdot 10^{12}$ ед./с. Уровень сохранности информации (УСИ) для образцов БИС СОЗУ на 10-ти транзисторных ячейках памяти на КНИ структурах составил $3{,}9 \cdot 10^{11}$ ед./с, что более чем в три раза больше УСИ для образцов на КНС структурах ($1{,}2 \cdot 10^{11}$ ед./с). При увеличении уровня воздействия более УСИ количество ошибок в СОЗУ на 6-ти транзисторных ячейках резко увеличивалось от нуля до нескольких сотен ошибок, в отличие от СОЗУ на 10-ти транзисторных ячейках памяти, для которых количество ошибок возрастало от нуля до нескольких десятков ошибок. Механизм возникновения сбоев информации в СОЗУ на 6-ти транзисторных ячейках памяти предположительно связан со сбоями самих ячеек памяти, а в СОЗУ на 10-ти транзисторных ячейках памяти – с взаимовлиянием ячеек памяти. УСИ КНИ БИС на 6-ти транзисторных ячейках памяти составлял $1{,}2 \cdot 10^{11}$ ед./с.

Следует отметить и очень важный для практического конструирования РС ИМС установленный факт – уровень сохранности информации и характер изменения импульсной реакции тока потребления образцов на КНИ структурах не зависят от способа подключения подложки (к нулевому потенциалу или к потенциалу источника питания).

При уровнях воздействия до $1 \cdot 10^{11}$ ед./с характер изменения импульсной реакции тока потребления КНС СОЗУ совпадает с характером изменения импульсной реакции тока потребления КНИ СОЗУ на 6-ти транзисторных ячейках памяти при подключении подложки к нулевому потенциалу. При уровнях воздействия от $1{,}2 \cdot 10^{11}$ до $7 \cdot 10^{11}$ ед./с характеры изменения импульсной реакции тока потребления в КНС и КНИ СОЗУ на 6-ти транзисторных ячейках памяти совпадают и не зависят от способа подключения подложки. При уровнях воздействия от $7 \cdot 10^{11}$ ед./с до максимально достигнутого $2{,}5 \cdot 10^{12}$ ед./с характер изменения импульсной реакции тока потребления не зависит от способа подключения подложки, а средние значения амплитуд откликов импульсной реакции тока потребления КНС СОЗУ и КНИ СОЗУ на 10-ти транзисторных ячейках памяти составляли, соответственно, 865 мА и 850 мА, а для КНИ СОЗУ на 6-ти транзисторных ячейках памяти – 910 мА.

В результате исследований по влиянию полной дозы облучения установлено, что уровень отказа по функционированию (по способности записи и считывания информационного кода) составил $2 \cdot 10^4$ ед. для КНИ СОЗУ (при подключении подложки к потенциалу питания) для 6-ти и 10-ти транзисторных ячеек и $6 \cdot 10^4$ ед. для КНС и КНИ (при подключении к нулевому потенциалу). Ток потребления КМОП БИС СОЗУ 8К в режиме хранения до уровня функционального отказа зависит от варианта реализации исследованных образцов БИС (КНИ или КНС структуры), от способа подключения подложек и от варианта реализации ячеек памяти.

Причину повышенной стойкости к импульсному воздействию БИС на КНИ структурах по сравнению с БИС КНС структурами можно объяснить в основном возможностью подключения подложки КНИ структур к нулевому потенциалу, что оказывает существенное влияние на скорость протеканияпроцессов накопления заряда в «захороненном» окисле КНИ структур.

Экспериментально определенное амплитудное значение отклика тока потребления почти во всем диапазоне мощностей доз для КНС было больше, чем для КНИ ОЗУ (рис. 7.70), а при предельных уровнях (порядка 10^{12} ед./с) величина импульсной реакции тока потребления как по форме, так и по амплитуде для КНС и КНИ микросхем практически совпадает и в максимуме достигала 1 А (рис. 7.71).

В результате экспериментальной оценки уровня устойчивости однотипных КНС и КНИ ОЗУ к дозовым эффектам было установлено, что уровень функционального отказа (УФО) КНИ ОЗУ был не ниже, чем у КНС ОЗУ. Подключение подзатворной области к земле приводит к существенному (на порядки величины) увеличению уровня параметрических отказов КНИ ОЗУ по току потребления.

Таким образом, переход с КНС на КНИ-структуры в рамках единых правил проектирования и эквивалентных решений схемотехники и топологии, по меньшей мере, не приводит к снижению устойчивости БИС ОЗУ, к эффектам мощности дозы и полной дозы при потенциальной возможности обеспечения существенно большей информационной емкости для последних.

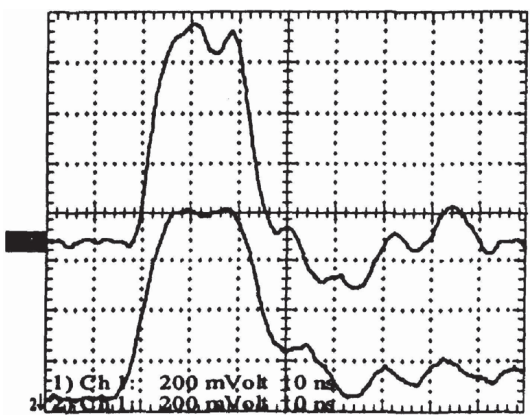


Рис. 7.70. Типовые осциллограммы импульсного тока потребления КМОП КНС и КНИ БИС ОЗУ при одинаковом уровне ИИВ

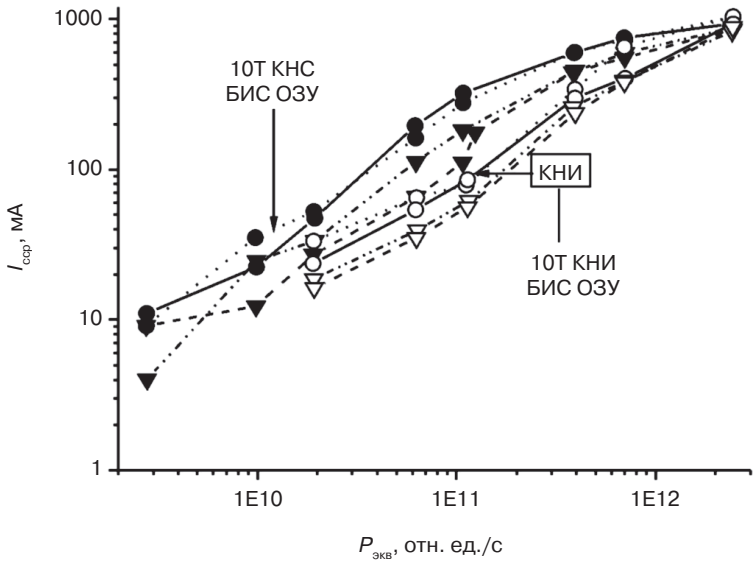


Рис. 7.71. Зависимости амплитуды отклика тока потребления для КМОП КНС и КНИ БИС ОЗУ от уровня ИИВ

7.11.7. Экспериментальное исследование воздействия проникающего излучения на параметры БиКМОП БИС

В данном разделе приводятся результаты экспериментальных исследований радиационных эффектов, возникающих в типовой БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных 5559ИН2Т при воздействии импульсного и стационарного ионизирующего излучения [193, 215].

В системах автоматического управления космическими и оборонными объектами, бортовыми системами сбора и обработки информации, поступающей от датчиков и удаленных периферийных устройств, широкое распространение получили интерфейсные БИС последовательной передачи данных в длинную несогласованную линию, поддерживающие стандарты RS-485, RS-422. Стандарт RS-485 обеспечивает двунаправленную полудуплексную передачу данных и допускает подключение к общей шине множества приемников и передатчиков; стандарт RS-422 предусматривает применение однонаправленного драйвера, управляющего множеством приемников.

Вопросам исследования радиационных эффектов в биполярных и КМОП интерфейсных БИС посвящено достаточно большое количество публикаций в открытой научно-периодической печати, чего нельзя сказать о БиКМОП – базисе, соединяющем достоинства первых двух типов технологий.

Перечень параметров БиКМОП БИС, контролируемых в процессе радиационных испытаний, и критериев работоспособности представлен в табл. 7.12.

Проводились также радиационные испытания тестовых структур вертикального p-n-p-транзистора, перечень основных контролируемых параметров и нормы отбраковки которого приведены в табл. 7.13.

Таблица 7.12. Параметры-критерии работоспособности БИС 5559ИН2Т при испытаниях

Контролируемые параметры	Критерии работоспособности
Выходное напряжение высокого уровня приемника, U_{OH}, В	≥ 3,5
Выходное напряжение низкого уровня приемника, U_{OL}, В	≤ 0,4
Дифференциальное выходное напряжение, U_{OD}, В для стандарта RS-485 для стандарта RS-422	 ≥ 1,5 ≥ 2,0
Статический ток потребления, I_{CC}, мкА высокого уровня низкого уровня	 ≤ 900 ≤ 500
Время потери работоспособности, t_{LS}, мс	≤ 2,0
Контроль функционирования (при U_{CC} = 5,5 В)	Отсутствие сбоев и отказов
Контроль тиристорного эффекта (ТЭ) и катастрофических отказов (при U_{CC} = 5,5 В)	Отсутствие ТЭ

Таблица 7.13. Контролируемые параметры тестовых биполярных p-n-p-транзисторов

Параметры	Норма	
	Минимум	Максимум
Статический коэффициент передачи тока, β, отн. ед. (при токе базы 10 мкА; напряжении коллектор–эмиттер 5 В)	30	75
Напряжение коллектор–эмиттер, В (при токе утечки 10 мкА)	–	15
Напряжение коллектор–база, В (при токе утечки 10 мкА)	–	20
Напряжение эмиттер–база, В (при токе утечки 10 мкА)	7,5	11,5

Радиационные испытания БИС и тестовых структур проводились в ЭНПО СПЭЛС (г. Москва) на автоматизированном испытательном комплексе при нормальных условиях (T = +25 °С) и при температурах T = –60 и +125 °С.

Испытания БИС на стойкость к эквивалентному воздействию импульсного гамма-излучения проводились с использованием лазерного имитатора «РАДОН-5М».

Испытания БИС и тестовых p-n-p-структур на стойкость к эквивалентному воздействию стационарного гамма-излучения проводились с использованием рентгеновского имитатора «РЕИМ-2».

В процессе исследований тестовых p-n-p-структур на рентгеновском имитаторе установлено, что обратные токи переходов коллектор–эмиттер, коллектор–база и эмиттер–база изменялись незначительно. Поэтому значения соответствующих контролируемых напряжений оставались в пределах норм ТУ (табл. 7.13) вплоть до уровней воздействия $1{,}2 \cdot 10^6$ ед.

Типичные дозовые зависимости статического коэффициента передачи тока в при различных температурах приведены на рис. 7.72. При облучении в нормальных условиях наблюдается незначительное (менее 5%) снижение β. Установлено, что воздействие излучения при повышенной температуре приводит к появлению заметного минимума на зависимости $\beta(D)$. Наблюдаемый эффект, по-видимому, обусловлен взаимным влиянием процессов формирования поверхностных состояний и встраивания радиационно-индуцированного положительного заряда в пассивирующем окисле. После окончания облучения при повышенной температуре параметры тестовых биполярных транзисторов, измеренные при T = +100 и +25 °С, не вышли за нормы ТУ (табл. 7.13).

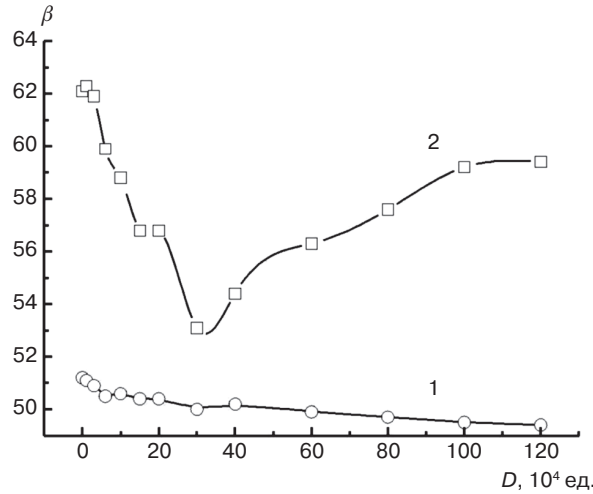


Рис. 7.72. Изменения статического коэффициента передачи тока тестовых *p-n-p*-транзисторов в зависимости от эквивалентной дозы облучения при $T = +25$ °C (1) и +100 °C (2)

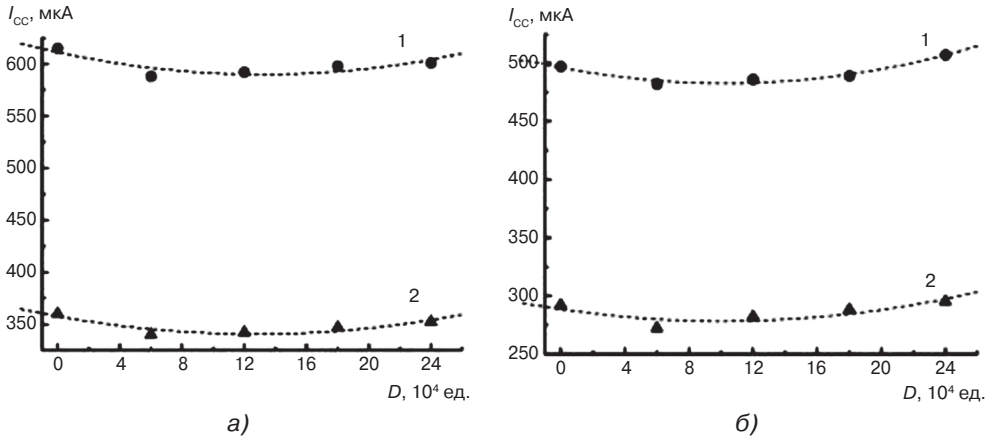


Рис. 7.73. Дозовые зависимости статического тока потребления высокого уровня (1) и низкого уровня (2) при $T = +25$ °C (*а*) и –60 °C (*б*): точки – эксперимент, пунктирные линии – расчет

Дозовые зависимости статического тока потребления высокого и низкого уровня БИС при $T = +25$ °C (*а*) и –60 °C (*б*) представлены на рис. 7.73. При всех режимах исследований наблюдается незначительное изменение I_{CC}, численное значение которого немного снижается при $D = 6 \cdot 10^4$ ед., а затем возрастает практически до исходной величины при $D = 2 \cdot 10^5$ ед.

На рис. 7.74 показаны дозовые зависимости выходного напряжения низкого уровня приемника U_{OL}, высокого уровня приемника U_{OH} и дифференциального выходного напряжения U_{OD} для стандарта RS-485 при $T = +25$ °C. Все параметры почти не изменились во всем исследованном диапазоне доз облучения. Анало-

гичные количественные и качественные результаты были получены для этих же параметров при $T = -60$ °C.

Характерные осциллографические отклики выходного напряжения низкого уровня приемника при воздействии импульсного излучения с различной мощностью дозы при комнатной температуре представлены на рис. 7.75. Осциллограммы того же параметра показаны на рис. 7.76 для облучения при $T = +125$ °C. Видно, что радиационное воздействие при повышенной температуре начинает проявляться в виде импульсной реакции выходного напряжения приемника при более высоких мощностях доз облучения.

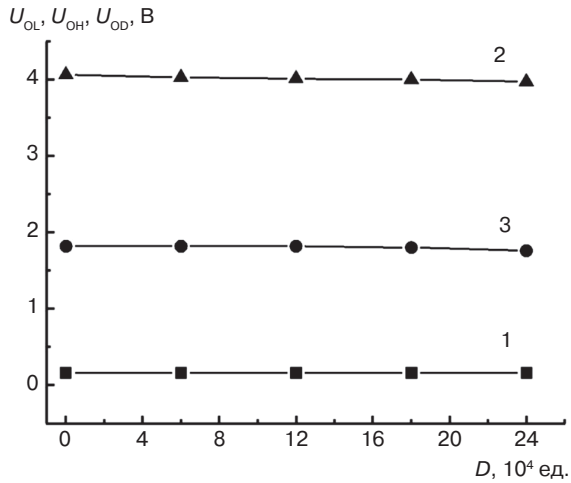
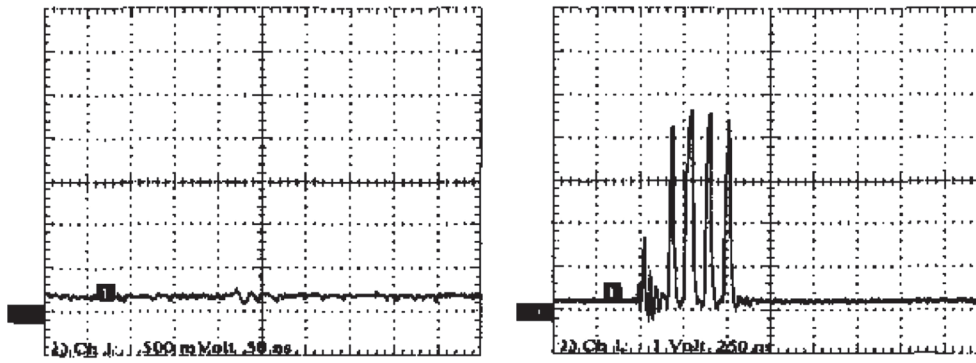


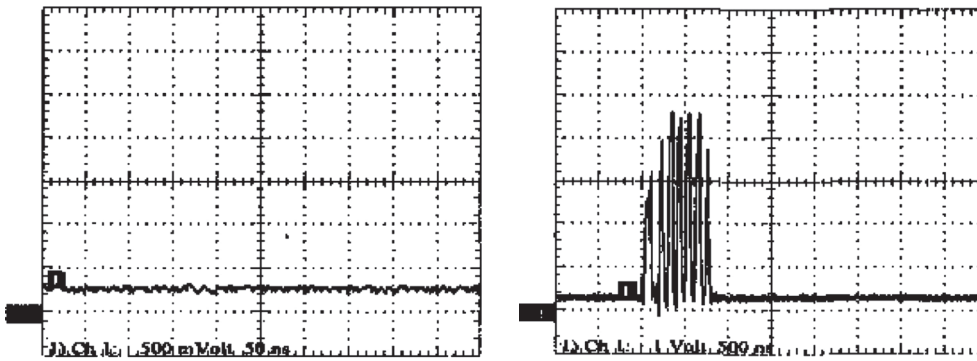
Рис. 7.74. Дозовые зависимости выходного напряжения низкого уровня приемника U_{OL} (1), высокого уровня приемника U_{OH} (2) и дифференциального выходного напряжения U_{OD} для стандарта RS-485 (3) при $T = +25$ °C



K_x = 50 нс/д, K_y = 0,5 В/д — *а)*

K_x = 250 нс/д, K_y = 1 В/д — *б)*

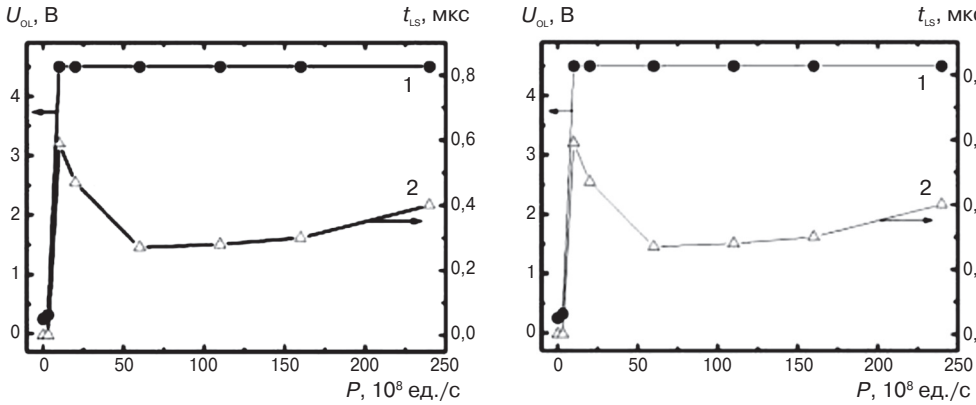
Рис. 7.75. БИС 5559ИН2Т (образец № 3): Осциллограммы сигнала с выхода приемника (уровень логического «0») при эквивалентных уровнях импульсного облучения: $1{,}6 \cdot 10^8$ ед./с (*а*); $5{,}0 \cdot 10^8$ ед./с (*б*) при нормальной температуре



K_x = 50 нс/д, K_y = 0,5 В/д — *а)*

K_x = 500 нс/д, K_y = 1 В/д — *б)*

Рис. 7.76. БИС 5559ИН2Т (образец № 5): Осциллограммы сигнала с выхода приемника (уровень логического «0») при эквивалентных уровнях импульсного облучения: $3{,}2 \cdot 10^8$ ед./с (*а*); $2{,}0 \cdot 10^9$ ед./с (*б*) при температуре +125 °С



а) *б)*

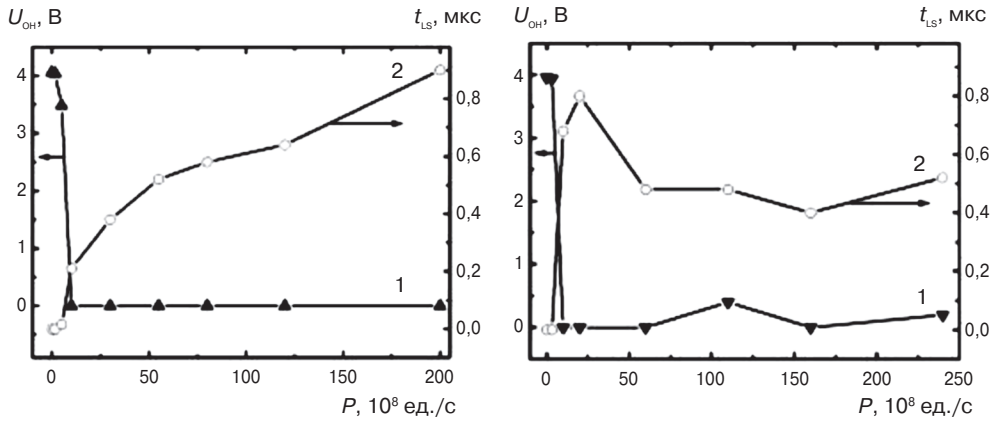
Рис. 7.77. Изменения выходного напряжения низкого уровня приемника 1 (*а*) и ВПР-2 (*б*) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при T = +25 °С (*а*) и +125 °С (*б*)

На рис. 7.77–7.79 показаны изменения параметров U_{OL}, U_{OH} и U_{OD} в зависимости от мощности дозы импульсного излучения при T = +25 и +125 °С.

На тех же рисунках представлены соответствующие изменения времени потери работоспособности (ВПР) t_{LS}. У всех параметров не наблюдается заметных отличий в радиационной стойкости к импульсному облучению при комнатной и повышенной температурах: параметрический отказ происходит при $P = 5 \cdot 10^8 \div 1 \cdot 10^9$ ед./с. Некоторые отличия в характере изменений ВПР при импульсном облучении проявляются для параметра U_{OH} при различных температурах (рис. 7.78). В целом ВПР остается < 5 мкс при мощностях доз до $2{,}4 \cdot 10^{10}$ ед./с.

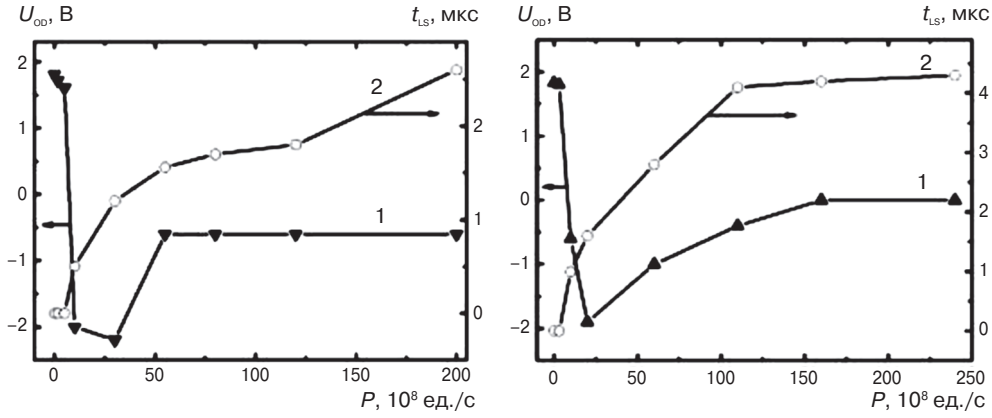
В процессе лазерных испытаний по специальной методике также было установлено, что возникновение единичных функциональных сбоев БИС не проис-

ходит до уровней мощности дозы $P = 2 \cdot 10^{10}$ ед./с (при комнатной температуре) и $P = 1{,}6 \cdot 10^{10}$ ед./с (при $T = +125$ °С). Тиристорный эффект (по входу) наблюдался при $P \geq 7{,}5 \cdot 10^{10}$ ед./с ($T = +25$ °С) и $P \geq 1{,}6 \cdot 10^{10}$ ед./с ($T = +125$ °С).



а) *б)*

Рис. 7.78. Изменения выходного напряжения высокого уровня приемника 1 (*а*) и ВПР-2 (*б*) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при $T = +25$ °С (*а*) и +125 °С (*б*)



а) *б)*

Рис. 7.79. Изменения дифференциального выходного напряжения для стандарта RS-485 1(*а*) и ВПР-2 (*б*) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при $T = +25$ °С (*а*) и +125 °С (*б*)

Основной общей причиной отказов как МОП-элементов, так и биполярных транзисторов в составе БиКМОП БИС при воздействии стационарного облучения является радиационная деградация их характеристик вследствие изменений параметров приповерхностных областей. Эти изменения связаны, во-первых, с захватом и последующим отжигом свободных носителей на глубокие центры (ло-

вушки) в объеме диэлектрика и, во-вторых, образованием поверхностных состояний (ПС) на границе раздела диэлектрик–полупроводник. Захват носителей заряда в объеме диэлектрика и на уровни ПС вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности ПС приводит к включению дополнительного механизма рассеяния подвижных носителей заряда и, следовательно, к уменьшению крутизны стокозатворной вольтамперной характеристики МОП-транзистора [1–3].

Увеличение плотности ПС приводит также к увеличению скорости поверхностной рекомбинации. Рост скорости поверхностной рекомбинации обусловливает уменьшение коэффициента усиления биполярных транзисторов за счет возрастания поверхностной составляющей тока базы, а также увеличение токов утечки [1]. Очевидно, что изменения значений параметров исследованных биполярных транзисторов связаны в основном с ионизационными процессами встраивания заряда в пассивирующем (защитном) окисле в области базы и объемного заряда эмиттерного перехода [162]. Положительный заряд в окисле конвертируется в поверхностные состояния, которые непосредственно влияют на рекомбинацию инжектированных носителей [175]. При этом знак заряда поверхностных состояний соответствует увеличению рекомбинационных потерь (для p-n-p транзисторов заряд отрицателен).

Также очевидно, что увеличение температуры при облучении приводит к возрастанию числа забрасываемых в окисел электронов, что снижает общую величину накопленного положительного заряда. Релаксация (отжиг) этого заряда может происходить за счет нескольких механизмов, в том числе путем термического возбуждения электронов из валентной эоны SiO_2, что возможно при высокой температуре и практически не зависит от величины приложенного напряжения. Туннелирование же свободных электронов из зоны проводимости кремния уже линейно зависит от приложенного напряжения (с ростом напряжения на затворе увеличивается поверхностная концентрация электронов), а также определяется значением температуры [1].

С другой стороны, с понижением температуры окружающей среды подвижность дырок в SiO_2 заметно уменьшается [176], что способствует их более активному захвату в окисле.

Из представленных результатов следует важный для практического использования вывод: уровень стойкости КМОП БИС уменьшается по мере снижения температуры. Однако данное утверждение справедливо только при оценке приращений, так как начальные изменения параметров-критериев также могут изменяться. Вся сложность процесса анализа влияния на функционирование ИМС температурных эффектов заключается в том, что исходные значения параметров-критериев могут гораздо сильнее зависеть от температуры, чем радиационные приращения. Данное положение качественно объясняется на примере установленного факта изменения тока потребления КМОП микросхемы в диапазоне температур от –60 до +125 °С [9]. Действительно, приращение тока потребления после облучения уменьшается по мере роста температуры. Однако значительные температурные изменения исходного тока потребления могут привести к тому, что уровень стойкости, определяемый по этому критерию, будет иметь немонотонной характер при изменении температуры.

В наблюдаемых экспериментах изменение тока потребления БиКМОП БИС также имело немонотонный характер в зависимости от дозы облучения при различных температурах (рис. 7.76). Здесь, очевидно, оказывают некоторое влияние на величину I_{CC} и биполярные транзисторы, а также отдельные паразитные структуры.

Экспериментально установлено, что воздействие импульсного ионизирующего излучения (гамма, рентгеновского, электронного, лазерного) приводит к возникновению в БиКМОП БИС ряда переходных эффектов (сбоев), а также остаточных отказов (обратимых или необратимых). Переходные эффекты – кратковременные изменения параметров или нарушения функционирования в процессе и после воздействия импульса излучения, связанные с генерацией электронно-дырочных пар и дальнейшей релаксацией свободного заряда в элементах микросхем [4]. При этом по внешним выводам элементов протекают кратковременные ионизационные токи, способные вызвать ложные переключения в БИС. В линейных и комбинационных ИМС (логических элементах, сумматорах и др.) через некоторое время после импульса радиации происходит полное восстановление первоначального состояния, определяемого комбинацией входных сигналов. Значительные токи, протекающие в активной структуре кремния и по выводам ИМС при воздействии импульсного ИИ, вызывают остаточные отказы вследствие вторичных эффектов – радиационного защелкивания и теплового пробоя, которые могут быть как обратимыми, так и необратимыми (катастрофическими, например, вследствие перегорания шин металлизации).

Использованные в данной работе общие принципы конструктивно-технологической реализации БиКМОП БИС, направленные на обеспечение их стойкости к воздействию импульсного и стационарного излучения (оптимизация и введение в конструкции базовых элементов новых полупроводниковых слоев и областей) [135], позволили разработать конкретные методы обеспечения работоспособности всех базовых компонентов микросхем в условиях радиационных воздействий и тем самым существенно повысить общий уровень радиационной стойкости интерфейсных БИС, в том числе конкретной БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных 5559ИН2Т, широко используемой в электронных системах РКТ.

В итоге было установлено, что исследованные БИС производства ОАО «Интеграл» являются достаточно радиационностойкими: сохраняют основные параметры в пределах ТУ при воздействии эквивалентной мощности дозы импульсного ионизирующего излучения до $P = 1 \cdot 10^9$ ед./с, а также дозы стационарного ионизирующего излучения до $D = 2{,}4 \cdot 10^5$ ед. и функционируют до $P = 2 \cdot 10^{10}$ ед./с при температурах окружающей среды от –60 до +125 °С.

7.12. Особенности применения имитационных методов исследования радиационных эффектов в БиКМОП микросхемах

В настоящее время тактико-технические требования, предъявляемые к микросхемам электронной аппаратуры систем управления и контроля ракетно-космической и военной техники, обеспечивают возможность их эксплуатации в усло-

виях воздействия ионизирующих излучений. Среди радиационных факторов естественного и искусственного происхождения наибольшим поражающим действием по отношению к микроэлектронной элементной базе аппаратуры (по энергетическому критерию) обладает импульсное ионизирующее излучение. Конечно, необходимо также учитывать и воздействие стационарного ионизирующего излучения на микросхемы в составе радиоэлектронной аппаратуры.

В системах автоматического управления КА, в частности, системах сбора и обработки информации, поступающей от удаленных периферийных устройств, широкое распространение получили интерфейсные БИС последовательной передачи данных в длинную несогласованную линию, поддерживающие стандарты RS-485, RS-422 [216]. Стандарт RS-485 обеспечивает двунаправленную полудуплексную передачу данных и допускает подключение к общей шине множества приемников и передатчиков; стандарт RS-422 предусматривает применение однонаправленного драйвера, управляющего множеством приемников.

Вопросам исследования радиационных эффектов в биполярных и КМОП интерфейсных БИС посвящено достаточно большое количество публикаций в открытой научно-периодической печати, чего нельзя сказать о БиКМОП – базисе, соединяющем достоинства первых двух типов технологий.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию радиационных эффектов, возникающих в БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных при воздействии импульсного и стационарного ионизирующего излучения, и рассмотрению физических механизмов, объясняющих наблюдаемые закономерности.

Объектом исследований являлась БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных 5559ИН2Т, предназначенного для применения в телекоммуникационных системах с низкой рассеиваемой мощностью, соответствующих стандартам RS-485, RS-422, трансляторах уровня; приемопередающих устройствах, системах управления промышленными объектами.

БИС приемопередатчика 5559ИН2Т является типовым представителем класса интерфейсных микросхем. Она преобразует входной сигнал уровня КМОП в дифференциальный выходной сигнал стандарта RS-485, что требуется для обеспечения надежной передачи сигнала по двухпроводной длинной линии, и наоборот – преобразует дифференциальный входной сигнал уровней RS-485 в выходной сигнал КМОП. Режим работы микросхемы – полудуплексный. Минимальная чувствительность по дифференциальному входу приемника – 200 мВ в диапазоне входных напряжений от –7 до +12 В, скорость передачи данных – 2,5 Мбит/с. Диапазон напряжений питания микросхемы приемопередатчика – U_{CC} = 4,5–5,5 В. Предельная температура окружающей среды – от –60 до +125 °С.

Микросхемы 5559ИН2Т разработаны по комбинированной технологии БиКМОП, обеспечивающей следующие характеристики: низкий ток потребления, свойственный КМОП технологии, и быстрое переключение сигналов, свойственное биполярной технологии. Дополнительно эти микросхемы обладают повышенной защитой от электростатических разрядов и высокочастотных электрических и электромагнитных помех, что достигается путем использования специальных технических решений входных каскадов БИС.

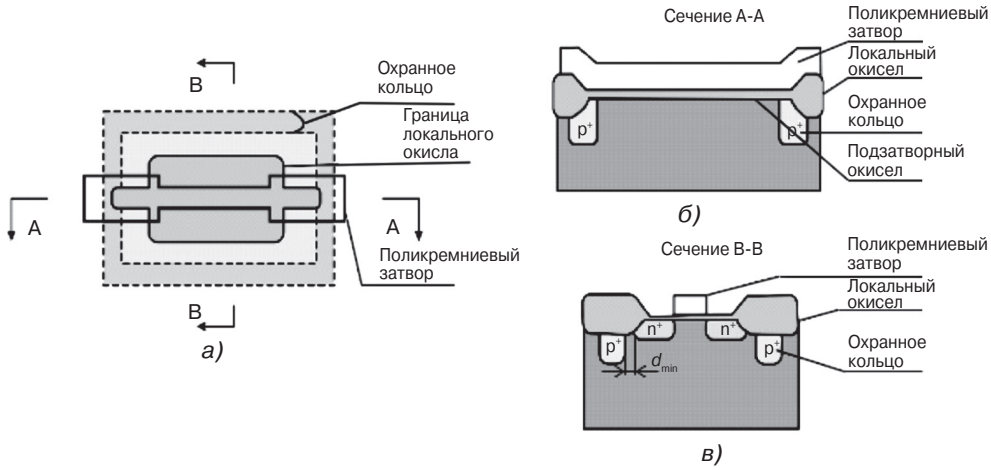


Рис. 7.80. Эскиз топологии n-МОП транзистора с повышенной устойчивостью к ионизирующим воздействиям (*а*) и разрезы (*б*, *в*) его вертикальных сечений

При разработке конструкции и технологии интерфейсной БИС за основу была взята двухкарманная самосовмещенная БиКМОП технология с двумя уровнями поликремния и одним уровнем металла. Использовались подложка р-типа КДБ-12 ориентации (100); эпитаксиальный слой КЭФ-4.5 толщиной 20 мкм; подзатворный окисел толщиной 42,5 нм; пассивация окисной пленкой толщиной 1,5 мкм, полученной плазменно-химическим осаждением.

Устойчивость к воздействию ионизирующих излучений, тиристорному эффекту (ТЭ) и статическому электричеству обеспечивается, в частности, следующими решениями: применением кольцевых затворов МОП-транзисторов, охранных колец; использование низкотемпературного окисления под затвор (пирогенное окисление при температуре $T = 850$ °С), а также термообработки подзатворного окисла при $T \le 850$ °С.

Так, на рис. 7.80 приведены эскизы топологии используемого в исследуемой БИС n-канального МОП-транзистора (*а*) и разрезы (*б*, *в*) его вертикальных сечений. Охранное кольцо p^+-типа с концентрацией примеси $N > 10^{18}$ см$^{-3}$, сформированное под локальным слоем SiO_2, исключает возможность инверсии типа проводимости в процессе облучения. Особенностью данного конструктивно-технологического решения является необходимость выполнения важного условия – область охранного кольца должна быть выполнена с зазором от области стока на величину $d_{min} \ge 2{,}6$ мкм (рис. 7.80*в*), что исключает вероятность возникновения эффекта снижения пробивных напряжений стока.

Для исключения образования проводящих каналов утечек типа «исток–сток» в области выхода затвора на локальный слой SiO_2 затвор выводится на область p^+-охранного кольца по тонкому подзатворному окислу.

На рис. 7.81 представлены эскиз топологии (*а*) и разрез топологии (*б*) конструкции n-канального МОП-транзистора с повышенной устойчивостью к ионизирующему излучению (ИИ), где охранное p^+-кольцо формируется под тонким

слоем подзатворного диэлектрика в технологическом процессе одновременно с формированием областей стока и истока p-канальных МОП-транзисторов. Такая конструкция транзистора в основном используется в периферийных блоках кристаллов БИС КН, поскольку кроме эффекта исключения утечек по цепям «исток–сток» в процессе облучения с дозой до 10^6 рад эта конструкция обеспечивает более высокие (не менее 15 В) значения пробивных напряжений области стока.

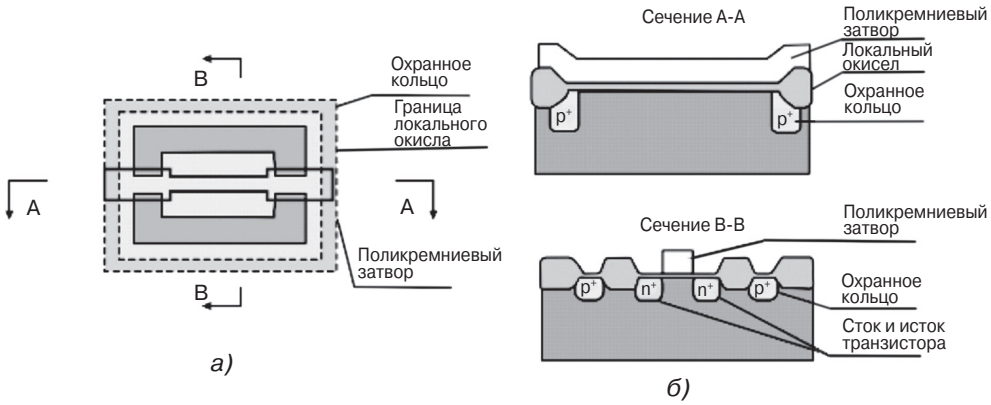


Рис. 7.81. Эскиз топологии (*а*) и разрез (*б*) конструкции n-канального МОП транзистора с повышенными значениями пробивных напряжений «сток–исток»

Минимальный состав элементной базы микросхемы 5559ИН2Т: n-МОП- и p-МОП-транзисторы с одинаковыми размерами (длина канала – 3,5 мкм, ширина канала – 50 мкм); вертикальный p-n-p-транзистор; резисторы; конденсаторы. Всего микросхема содержит около двух тысяч таких базовых элементов.

Краткий перечень параметров БИС, контролируемых в процессе радиационных испытаний и критериев работоспособности, представлен в табл. 7.14.

Таблица 7.14. Важнейшие параметры-критерии работоспособности БИС КН 5559ИН2Т при испытаниях на радиационную стойкость

Контролируемые параметры	**Критерии работоспособности**
Выходное напряжение высокого уровня приемника, U_{OH}, В	≥ 3,5
Выходное напряжение низкого уровня приемника, U_{OL}, В	≤ 0,4
Дифференциальное выходное напряжение, U_{OD}, В для стандарта RS-485 для стандарта RS-422	 ≥ 1,5 ≥ 2,0
Статический ток потребления, I_{CC}, мкА высокого уровня низкого уровня	 ≤ 900 ≤ 500
Время потери работоспособности, t_{LS}, мс	≤ 2,0
Контроль функционирования (при U_{CC} = 5,5 В)	Отсутствие сбоев и отказов
Контроль тиристорного эффекта (ТЭ) и катастрофических отказов (при U_{CC} = 5,5 В)	Отсутствие ТЭ

Таблица 7.15. Контролируемые параметры тестовых биполярных p-n-p-транзисторов при испытаниях на радиационную стойкость

Параметры	Норма	
	Минимум	Максимум
Статический коэффициент передачи тока, β, отн. ед. (при токе базы 10 мкА;напряжении коллектор–эмиттер 5 В)	30	75
Напряжение коллектор–эмиттер, В (при токе утечки 10 мкА)	–	15
Напряжение коллектор–база, В (при токе утечки 10 мкА)	–	20
Напряжение эмиттер–база, В (при токе утечки 10 мкА)	7,5	11,5

Проводились также радиационные испытания тестовых структур вертикального p-n-p-транзистора, перечень основных контролируемых параметров и нормы отбраковки которого приведены в табл. 7.15.

Радиационные испытания БИС и тестовых структур проводились в ЭНПО СПЭЛС (г. Москва) на автоматизированном испытательном комплексе при нормальных условиях ($T = +25$ °С) и при температурах $T = -60$ и +125 °С.

Испытания БИС на стойкость к эквивалентному воздействию импульсного гамма-излучения проводились с использованием лазерного имитатора «РАДОН-5М». Использовались следующие режимы: длина волны лазерного излучения – 1,08 мкм; энергия излучения в импульсе – 50 мДж; длительность импульса – 12 нс; максимальное значение имитируемой мощности дозы – 10^{12} рад(Si)/с. Облучение микросхем проводилось сверху при предварительно удаленной крышке корпуса. Дозиметрия проводилась по показаниям калиброванного детектора лазерного излучения БКЛИ-601.

Испытания БИС и тестовых p-n-p-структур на стойкость к эквивалентному воздействию стационарного гамма-излучения проводились с использованием рентгеновского имитатора «РЕИМ-2». Эффективная энергия рентгеновского излучения составляла 10 кэВ. Эквивалентная мощность дозы составляла 71 рад(Si)/с. Дозиметрия проводилась по показаниям калиброванного детектора рентгеновского излучения БДРИ-601.

В процессе исследований тестовых p-n-p-структур на рентгеновском имитаторе установлено, что обратные токи переходов коллектор–эмиттер, коллектор–база и эмиттер–база изменялись незначительно. Поэтому значения соответствующих контролируемых напряжений оставались в пределах норм ТУ (табл. 7.15) вплоть до уровней воздействия $1{,}2 \cdot 10^6$ ед.

Типичные дозовые зависимости статического коэффициента передачи тока в при различных температурах приведены на рис. 7.82. При облучении в нормальных условиях наблюдается незначительное (менее 5%) снижение β. Установлено, что воздействие излучения при повышенной температуре приводит к появлению заметного минимума на зависимости $\beta(D)$. Наблюдаемый эффект, по-видимому, обусловлен взаимным влиянием процессов формирования поверхностных состояний и встраивания радиационно-индуцированного положительного заряда в пассивирующем окисле. После окончания облучения при повышенной температуре параметры тестовых биполярных транзисторов, измеренные при $T = +100$ и +25 °С, не вышли за нормы ТУ (табл. 7.15).

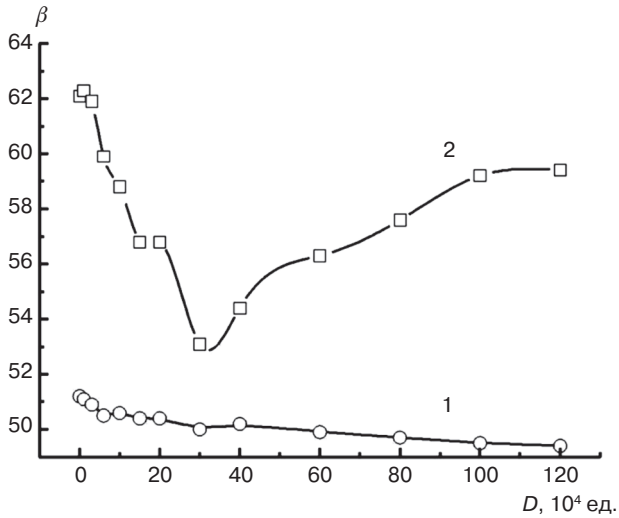


Рис. 7.82. Изменения статического коэффициента передачи тока тестовых p-n-p-транзисторов в зависимости от эквивалентной дозы облучения при $T = +25$ °C (1) и +100 °C (2)

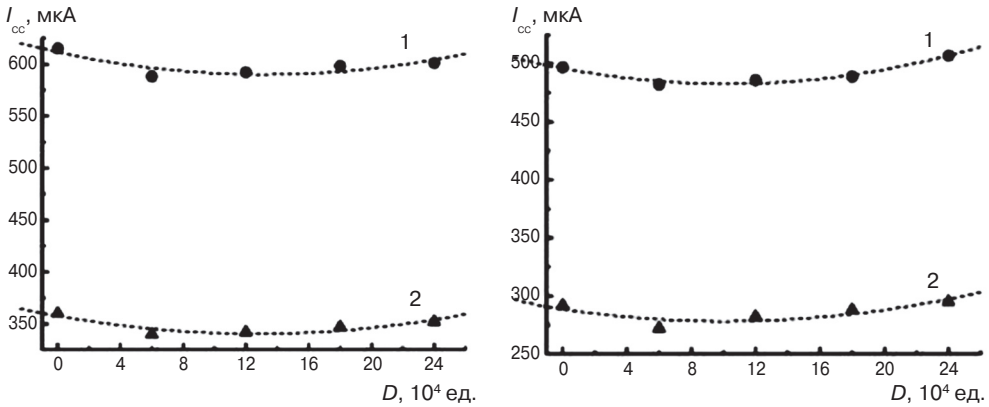


Рис. 7.83. Дозовые зависимости статического тока потребления высокого уровня (1) и низкого уровня (2) при $T = +25$ °C (*а*) и –60 °C (*б*). Точки – эксперимент, пунктирные линии – расчет

Дозовые зависимости статического тока потребления высокого и низкого уровня БИС при $T = +25$ °C (*а*) и –60 °C (*б*) представлены на рис. 7.83. При всех режимах исследований наблюдается незначительное изменение I_{CC}, численное значение которого немного снижается при $D = 6 \cdot 10^4$ ед., а затем возрастает практически до исходной величины при $D = 2 \cdot 10^5$ ед.

На рис. 7.84 показаны дозовые зависимости выходного напряжения низкого уровня приемника U_{OL}, высокого уровня приемника U_{OH} и дифференциального выходного напряжения U_{OD} для стандарта RS-485 при $T = +25$ °C. Все параметры

почти не изменились во всем исследованном диапазоне доз облучения. Аналогичные количественные и качественные результаты были получены для этих же параметров при $T = -60$ °C.

Характерные осциллографические отклики выходного напряжения низкого уровня приемника при воздействии импульсного излучения с различной мощностью дозы при комнатной температуре представлены на рис. 7.85. Осциллограммы того же параметра показаны на рис. 7.86 для облучения при $T = +125$ °C. Видно, что радиационное воздействие при повышенной температуре начинает проявляться в виде импульсной реакции выходного напряжения приемника при более высоких мощностях доз облучения.

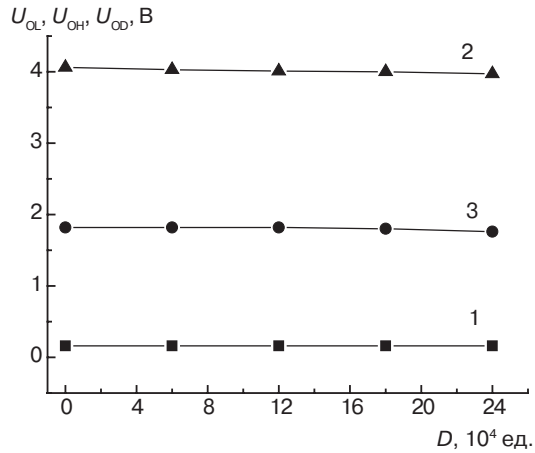
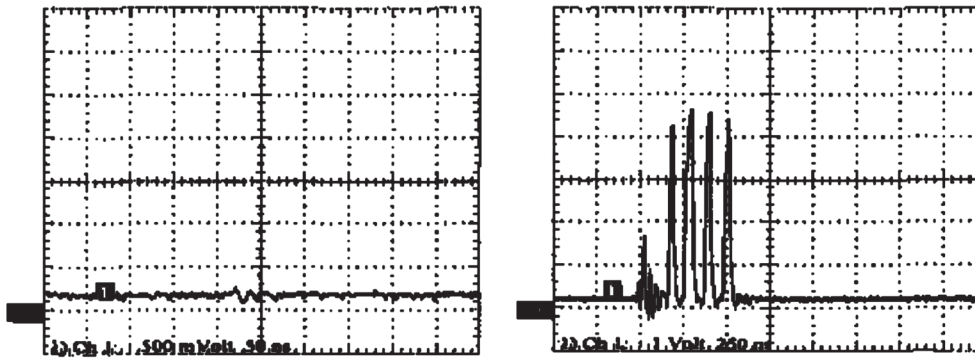


Рис. 7.84. Дозовые зависимости выходного напряжения низкого уровня приемника U_{OL} (1), высокого уровня приемника U_{OH} (2) и дифференциального выходного напряжения U_{OD} для стандарта RS-485 (3) при $T = +25$ °C



а) *б)*

Рис. 7.85. БИС 5559ИН2Т (образец № 3): Осциллограммы сигнала с выхода приемника (уровень логического «0») при эквивалентных уровнях импульсного облучения: $1{,}6 \cdot 10^8$ ед./с (*а*); $5{,}0 \cdot 10^8$ ед./с (*б*) при нормальной температуре

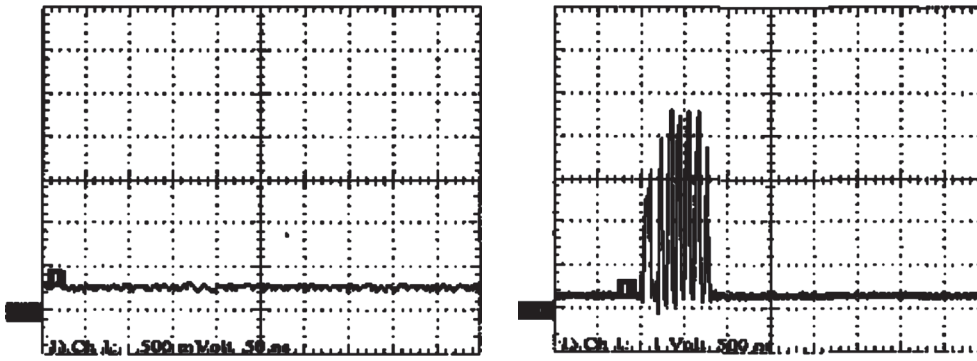


Рис. 7.86. БИС 5559ИН2Т (образец № 5): Осциллограммы сигнала с выхода приемника (уровень логического «0») при эквивалентных уровнях импульсного облучения: $3{,}2 \cdot 10^8$ ед./с (*а*); $2{,}0 \cdot 10^9$ ед./с (*б*) при температуре +125 °С

На рис. 7.87–7.89 показаны наблюдаемые экспериментально изменения параметров U_{OL}, U_{OH} и U_{OD} в зависимости от мощности дозы импульсного излучения при $T = +25$ и +125 °С. На тех же рисунках представлены соответствующие изменения времени потери работоспособности (ВПР) t_{LS}. У всех параметров не наблюдается заметных отличий в радиационной стойкости к импульсному облучению при комнатной и повышенной температурах: параметрический отказ происходит при $P = 5 \cdot 10^8$–$1 \cdot 10^9$ ед./с. Некоторые различия в характере изменений ВПР при импульсном облучении проявляются для параметра U_{OH} при различных температурах (рис. 7.86). В целом ВПР остается < 5 мкс при мощностях доз вплоть до $2{,}4 \cdot 10^{10}$ ед./с.

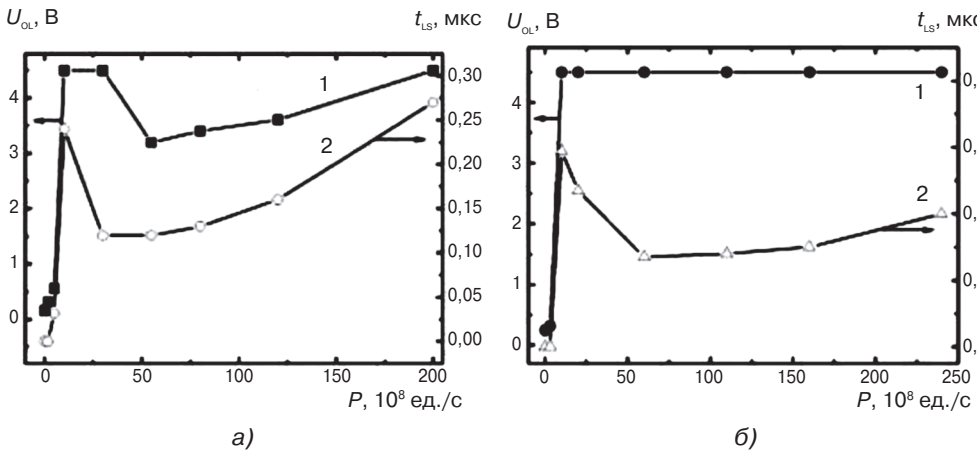


Рис. 7.87. Изменения выходного напряжения низкого уровня приемника (1) и ВПР (2) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при $T = +25$ °С (*а*) и +125 °С (*б*)

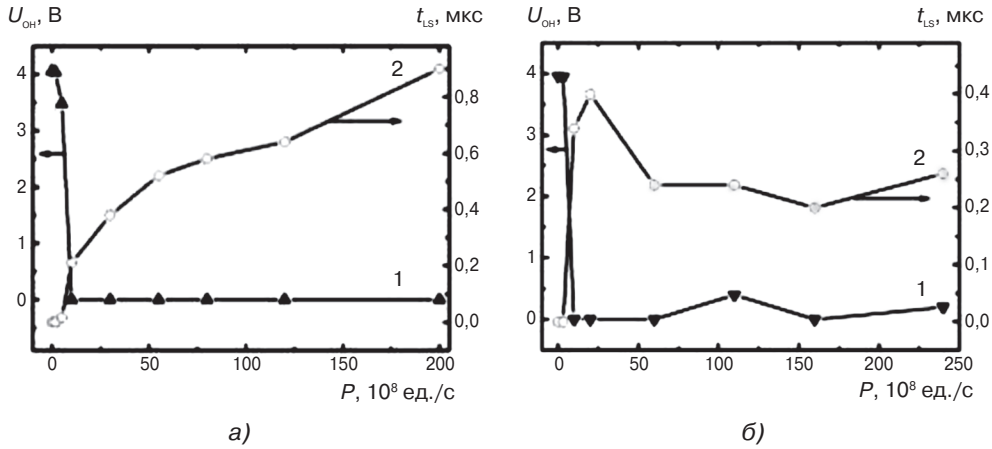


Рис. 7.88. Изменения выходного напряжения высокого уровня приемника (1) и ВПР (2) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при $T = +25$ °С (*а*) и +125 °С (*б*)

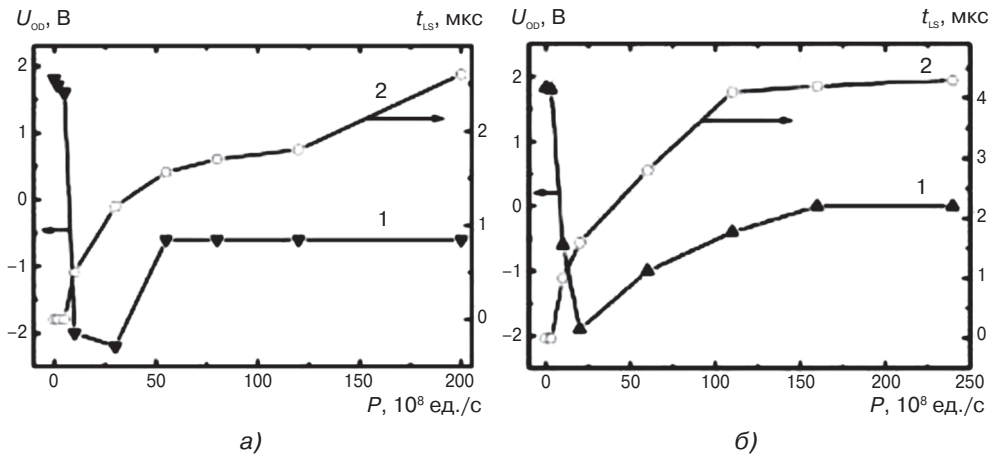


Рис. 7.89. Изменения дифференциального выходного напряжения для стандарта RS-485 (1) и ВПР (2) в зависимости от эквивалентной мощности дозы облучения при $T = +25$ °С (*а*) и +125 °С (*б*)

В процессе лазерных испытаний также было установлено, что возникновение функциональных сбоев БИС не происходит до уровней мощности дозы $P = 2 \cdot 10^{10}$ ед./с (при комнатной температуре) и $P = 1{,}6 \cdot 10^{10}$ ед./с (при $T = +125$ °С). Единственные случаи тиристорного эффекта (по входу) наблюдались только при $P \geq 7{,}5 \cdot 10^{10}$ ед./с ($T = +25$ °С) и $P \geq 1{,}6 \cdot 10^{10}$ ед./с ($T = +125$ °С).

Основной установленной причиной отказов МОП-элементов, а также биполярных транзисторов в составе БиКМОП БИС при воздействии стационарного облучения является радиационная деградация их характеристик вследствие изменений параметров приповерхностных областей. Эти изменения связаны, во-первых, с захватом и последующим отжигом свободных носителей на глубокие центры

(ловушки) в объеме диэлектрика и, во-вторых, с образованием поверхностных состояний (ПС) на границе раздела диэлектрик–полупроводник. Захват носителей заряда в объеме диэлектрика и на уровни ПС вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности ПС приводит к включению дополнительного механизма рассеяния подвижных носителей заряда и, следовательно, к уменьшению крутизны сток-затворной вольт-амперной характеристики МОП-транзистора [3].

Увеличение плотности ПС приводит также к увеличению скорости поверхностной рекомбинации. Рост скорости поверхностной рекомбинации обусловливает уменьшение коэффициента усиления биполярных транзисторов за счет возрастания поверхностной составляющей тока базы, а также увеличение токов утечки. Очевидно, что изменения значений параметров исследованных биполярных транзисторов связаны в основном с ионизационными процессами встраивания заряда в пассивирующем (защитном) окисле в области базы и объемного заряда эмиттерного перехода [162]. Положительный заряд в окисле конвертируется в поверхностные состояния, которые непосредственно влияют на рекомбинацию инжектированных носителей. При этом знак заряда поверхностных состояний соответствует увеличению рекомбинационных потерь (для p-n-p-транзисторов заряд отрицателен).

Очевидно, что увеличение температуры при облучении приводит к возрастанию числа забрасываемых в окисел электронов, что снижает величину накопленного положительного заряда. Релаксация (отжиг) этого заряда может происходить за счет нескольких механизмов, например, путем термического возбуждения электронов из валентной эоны SiO_2, что возможно при высокой температуре и не зависит от приложенного напряжения. Туннелирование свободных электронов из зоны проводимости кремния зависит от приложенного напряжения (с ростом напряжения на затворе увеличивается поверхностная концентрация электронов), а также определяется температурой.

С другой стороны, с понижением температуры подвижность дырок в SiO_2 заметно уменьшается [13], что способствует их более активному захвату в окисле.

Из представленных результатов следует, что уровень стойкости КМОП БИС вроде бы должен уменьшаться по мере убывания температуры окружающей среды. Однако данное утверждение справедливо только при оценке приращений, так как начальные изменения параметров-критериев также могут изменяться. Сложность анализа температурных эффектов заключается в том, что исходные значения параметров-критериев могут гораздо сильнее зависеть от температуры, чем радиационные приращения. Данное положение качественно объясняется на примере возможного изменения тока потребления КМОП микросхемы в диапазоне температур от –60 до +125 °С [9]. Действительно, приращение тока потребления после облучения уменьшается по мере роста температуры. Однако значительные температурные изменения исходного тока потребления могут привести к тому, что уровень стойкости, определяемый по этому критерию, будет иметь немонотонной характер при изменении температуры.

В нашем эксперименте изменение тока потребления БиКМОП БИС также имело немонотонный характер в зависимости от дозы облучения при различных температурах (рис. 7.81), что обусловлено влиянием на величину I_{CC} как процес-

сов, происходящих в биполярных транзисторах, так и влиянием отдельных паразитных структур.

В ходе исследования проводилось также моделирование изменения величины тока потребления БИС 5559ИН2Т в зависимости от дозы стационарного излучения. Была выбрана регрессионная модель в виде полинома второй степени, которая достаточно хорошо отражает зависимость $I_{CC}(D)$ при дозах до $2{,}4 \cdot 10^5$ ед. (рис. 7.81). Для нахождения коэффициентов линии регрессии использовался метод наименьших квадратов. В результате были получены следующие аналитические зависимости тока потребления БИС (I_{CC}, мкА) от дозы облучения (D, 10^4 ед.).

Так, для облучения при $T = +25$ °С ток потребления высокого уровня определяется выражением:

$$I_{CC} = 611{,}257 - 3{,}252D + 0{,}123D^2, \tag{7.17}$$

а ток потребления низкого уровня:

$$I_{CC} = 357{,}571 - 2{,}674D + 0{,}105D^2. \tag{7.18}$$

Для облучения при $T = -60$ °С ток потребления высокого уровня определяется выражением:

$$I_{CC} = 496{,}086 - 2{,}645D + 0{,}129D^2; \tag{7.19}$$

ток потребления низкого уровня:

$$I_{CC} = 288{,}543 - 2{,}014D + 0{,}099D^2. \tag{7.20}$$

Полученные расчетные зависимости (7.17)–(7.20) могут быть успешно использованы для прогнозирования радиационной стойкости БИС данного типа к воздействию стационарного ионизирующего излучения.

Воздействие импульсного ионизирующего излучения (гамма, рентгеновского, электронного, лазерного) приводит к возникновению в БиКМОП БИС переходных эффектов (сбоев), остаточных отказов (обратимых или необратимых). Переходные эффекты – кратковременные изменения параметров или нарушения функционирования в процессе и после воздействия импульса излучения, связанные с генерацией электронно-дырочных пар и дальнейшей релаксацией свободного заряда в элементах микросхем. При этом по внешним выводам элементов протекают ионизационные токи, способные вызвать ложные переключения в БИС. В линейных и комбинационных ИС (логических элементах, сумматорах и др.) через некоторое время после импульса радиации происходит полное восстановление первоначального состояния, определяемого комбинацией входных сигналов. Значительные токи, протекающие в активной структуре кремния и по выводам ИС при воздействии импульсного ИИ, вызывают остаточные отказы вследствие вторичных эффектов – радиационного защелкивания и теплового пробоя, которые могут быть обратимыми или необратимыми (катастрофическими, например, вследствие перегорания шин металлизации).

Использованные в данной работе общие принципы конструктивно-технологической реализации БиКМОП БИС, направленные на обеспечение их стойкости к воздействию импульсного и стационарного излучения (оптимизация и введение в конструкции базовых элементов новых полупроводниковых слоев и об-

ластей), позволили гарантировать работоспособность всех базовых компонентов микросхем в условиях радиационных воздействий и существенно повысить общий уровень радиационной стойкости БИС.

С применением имитационных методов (при воздействии лазерного и рентгеновского излучений) исследованы радиационные эффекты в БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика последовательных данных 5559ИН2Т.

Установлено, что исследованные БИС являются достаточно радиационностойкими: сохраняют основные параметры в пределах ТУ при воздействии эквивалентной мощности дозы импульсного ионизирующего излучения до $P = 1 \cdot 10^9$ ед./с, а также дозы стационарного ионизирующего излучения до $D = 2{,}4 \cdot 10^5$ ед. и функционируют до $P = 2 \cdot 10^{10}$ ед./с при температурах окружающей среды от –60 до +125 °С.

В результате регрессионного моделирования были получены аналитические зависимости тока потребления БИС от дозы облучения в виде полинома второй степени. Полученные расчетные зависимости могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости БИС данного типа к воздействию стационарного ионизирующего излучения.

Литература к главе 7

1. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
2. Nikiforov, A.Y. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts / A.Y. Nikiforov, A.I. Chumakov // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. – Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 165–184.
3. Коршунов, Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Минск: Наука и техника, 1986.– 254 с.
4. Никифоров, А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994. – 164 с.
5. Коршунов Ф.П., Белоус А.И., Богатырев Ю.В. Радиационная стойкость интегральных микросхем и пути ее повышения // Междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: тезисы докладов. – Минск, 13–16 мая 2003 г. – Минск, 2003. – С. 100–101.
6. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
7. Мырова Л.О., Попов В.Д., Верхотуров В.И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. – М.: Радио и связь, 1993. – 268 с.
8. Новиков Л.С., Панасюк М.И. Исследования космической радиации и ее воздействия на материалы и оборудование космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 3–13.
9. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. – 320 с.
10. Snow, E.H. Effects of Ionizing Radiation on Oxydized Silicon Surfaces and Planar Devices / E.H. Snow, A.S. Grove, D.J. Fitzgerald // Proc. IEEE. – 1967. – Vol. 55, № 6. – P. 1168–1185.
11. Mitchell, J.P. Radiation-Induced Space-Charge Buildup in MOS Structures / J.P. Mitchell // IEEE Trans. Electron Dev. – 1967. – Vol. ED-14, № 11. – P. 764–774.

12. Holmes-Siedle, A.G. The Physics of Failure of MIS Devices under Radiation / A.G. Holmes-Siedle, K.H. Zaininger // IEEE Trans.Reliability. – 1968. – Vol. R-17, № 1. – P. 34–44.
13. Witteles, A.A. Neutron Radiation Effects on MOS FETs: Theory and Experiment / A.A. Witteles // IEEE Trans.Nucl.Sci. – 1968. – Vol. NS-15, № 6. – P. 126–132.
14. Gwyn, C.W. Model for Radiation-Induced Charge Trapping and Annealing in the Oxide Layer of MOS Devices / C.W. Gwyn // J. Appl. Phys. – 1969. – Vol. 40, № 12. – P. 4886–4892.
15. Митчел Дж., Уилсон Д. Поверхностные эффекты в полупроводниковых приборах, вызванные радиацией. – М.: Атомиздат, 1970. – 82 с.
16. Мордкович В.Н. Влияние облучения на электрические свойства структуры диэлектрик–полупроводник // Электроная техника. Сер. 2: Полупроводниковые приборы. – 1970. – Вып. 6 (56). – С. 45–56.
17. Revesz, A.G. Defect Structure and Irradiation Behaviour of Noncrystalline SiO_2 / A.G. Revesz // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1971. – Vol. NS-18, № 6. – P. 113–116.
18. Revesz A.G. Chemical and Structural Aspects of the Behaviour of SiO_2 Films on Silicon / A.G. Revesz // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1977. – Vol. NS-24, № 6. – P. 2102–2107.
19. Байков В.Д., Гасман А.С., Кармазинский А.Н. Влияние радиационного излучения на компоненты МДП интегральных схем // Микроэлектроника. – 1972. – Вып. 5. – С. 66–78.
20. Gregory, B.L. Radiation Effects on Semiconductor Devices / B.L. Gregory, C.W. Gwyn // Proc. IEEE. – 1974. – Vol. 62, № 9. – P. 1264–1273.
21. Johnson, W.C. Mechanisms of Charge Buildup in MOS Insulators / W.C. Johnson // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2144–2150.
22. Литовченко В.Г. Трехслойная модель МДП-структуры // Физика и техника полупроводников. – 1972. – Т. 6. – № 5. – С. 802–809.
23. Литовченко В.Г. Природа радиационных эффектов в слоистых структурах МДП // Оптоэлектронная. и полупроводниковая техника. – 1982. – № 1. – С. 27–35.
24. Патрикеев Л.Н., Подлепецкий Б.И., Попов В.Д. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: МИФИ, 1975. – 128 с.
25. Sah, C.T. Origin of Interface States and Oxide Charges Generated by Ionizing Radiation / C.T. Sah // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1976. – Vol. NS-23, № 6. – P. 1563–1568.
26. Гуров К.П., Израилева Л.К., Коломийцев Л.И. Кинетика образования положительного объемного заряда в диэлектрике МДП-приборов при облучении // Микроэлектроника. – 1977. – Т. 6. – № 2. – С. 163–171.
27. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. – Минск: Наука и техника, 1978. – 231 с.
28. Кулаков В.М. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.
29. Burghard, R.A. Radiation Failure Modes in CMOS Integrated Circuits / R.A. Burghard, C.W. Gwyn // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1973. – Vol. NS-20, № 6. – P. 300–306.
30. Киллиани Дж.М. Радиационные эффекты в кремниевых приборах с зарядовой связью // Приборы с зарядовой связью: Сб. науч. ст. – М.: Мир, 1982. – С. 198–236.
31. Попов В.Д. Радиационная физика приборов со структурой металл–диэлектрик–полупроводник. – М.: Изд. МИФИ, 1984. – 80 с.
32. Пиз Р.Л., Джонстон А.Х., Азаревич Дж.Л. Радиационные испытания полупроводниковых приборов для космической электроники // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76. – № 11. – С. 126–145.
33. Holmes-Siedle, A. Handbook of Radiation Effects / A. Holmes-Siedle, L. Adams. – Second Edition. New York, 2002. – 500 p.
34. Вавилов В.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 184 с.

35. Braunig, D. The Effects of Radiation on Silicon Devices / D. Braunig, W.R. Fahrner // Instabilities in Silicon Devices. – Vol. 2. Amsterdam, 1989. – P. 751–803.
36. Hughes, H.L. Dependence of MOS Device Radiation-Sensitivity on Oxide Impurities / H.L. Hughes // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1972. – Vol. NS-19, № 6. – P. 256–263.
37. Fowkes, F.M. Sodium Mobility in Irradiated SiO_2 / F.M. Fowkes, F.E. Witherell // Ibid. – 1974. – Vol. NS-21, № 6. – P. 67–72.
38. Galloway, K.F. Simple Model for the Slope Change of C-V-Curves of Irradiated MOS Capacitors / K.F. Galloway // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, № 2. – P. 964–965.
39. Дутов А.Г. Нейтронно-активационный анализ материалов и тонкопленочных структур электронной техники: Дисс. докт. техн. наук: 02.00.02; 05.27.06. – Минск, 1991. – 296 л.
40. Pliskin, W.A. Structural Evaluation of Silicon Oxide Films / W.A. Pliskin, H.S. Lehman // J. Electrochem. Soc. – 1965. Vol. 112, № 10. – P. 1013–1019.
41. Болисов В.А., Попов В.Д., Сизов А.В. Кинетика накопления заряда в SiO_2 МОП-структуры // Кинетические явления в полупроводниках и диэлектриках. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 29–34.
42. Гуртов В.А. Иерархия в деградации электрофизических параметров МДП-приборов при действии ионизирующего излучения // Радиационная технология в производстве интегральных схем: Тезисы докл. Всесоюзн. семинара. – Воронеж: ВГУ, 1988. – С. 190–191.
43. Holmes-Siedle, A.G. Designing MOS Systems for Radiation Environments / A.G. Holmes-Siedle, K.H. Zaininger // Sol. State Technol. – 1969. – Vol. 12, № 5. – P. 40–49, 71.
44. Ma, T.P. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits / T.P. Ma, P.V. Dressendorfer. – New York, 1989. – 588 p.
45. Големинов Н.Г. и др. Радиационно-стимулированные отказы и сбои в МОП ИМС и СБИС // Обеспечение качества и надежности РЭА: Сб. науч. ст. – М.: МИФИ, 1989. – С. 28–39.
46. Мельникова Г.А., Попов В.Д. Физическая модель изменения пробивного напряжения подзатворного диэлектрика МОП-транзистора при накоплении объемного заряда // Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем: Тезисы докл. Всесоюзн. семинара. – Рязань: РРТИ, 1984. – С. 192–193.
47. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы / Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1985. – 432 с.
48. Алексенко, А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 416 с.
49. Гусаков В.М. Расчет динамических характеристик вентиля на комплементарных МДП-транзисторах // Электронная техника. Сер.: Микроэлектроника. – 1980. – Вып. 1(35). – С. 18–23.
50. Сраур Д.Р., Макгэррити Д.М. Воздействие излучения на микроэлектронные устройства в Космосе // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76. – № 11. – С. 44–74.
51. Muller, R.S. Device Electronics for Integrated Circuits, 2nd ed. / R.S. Muller and T.I. Kamins. – New York: Wiley, 1986. – 399 p.
52. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электронным излучениям. 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1988.– 296 с.
53. Мырова Л.О., Попов В.Д., Верхотуров В.И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. – М.: Радио и связь, 1993. – 268 с.
54. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969. – 312 с.
55. Larin, F. Radiation Effects in Semiconductor Devices / F. Larin. – New York.: John Wiley and Sons Incorporated, 1968. – 287 p.

56. Rickets, L.W. Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment / L.W. Rickets. – New York.: Wiley-Inlerscience, 1972. – 548 p.
57. Богатырев Ю.В. Прогнозирование работоспособности КМОП интегральных микросхем при внешних воздействиях // Петербургский журнал электроники. – 1995. – № 2(8). – С. 46–48.
58. Messenger, G.S. The effects of radiation on electronic systems / G.S. Messenger, S.A. Milton. – New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986. – 577 p.
59. Артамонов А.С., Зольников В.К. Исследования радиационной стойкости ИС серии 1554 // Радиационная стойкость электронных систем, «Стойкость-2001»: Сб. науч. ст. – Вып. 4. – 2001. – С. 43–44.
60. Юсов Ю.П. и др. Восстановление параметров МДП-приборов после воздействия ионизирующего излучения // Зарубежная электронная техника. – 1988, № 1(320). – С. 3–47.
61. Johnston, A.H. Super Recovery of Total Dose Damage in MOS Devices / A.H. Johnston // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1984. – Vol. NS-31, № 6. – P. 1427–1433.
62. Danchenko, V. Characteristics of the Thermal Annealing of Radiation Damage in MOS FETs / V. Danchenko, U.D. Desai, S.S. Brashears // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39, № 5. – P. 2417–2424.
63. Fleetwood, D.M. Trapped-Hole Annealing and Electron Trapping in MOS Devices / D.M. Fleetwood, R.A. Reber, P.S. Winokur // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 60, № 16. – P. 2008–2010.
64. Литовченко В.Г., Киблик В.Я., Литвинов Р.О. Влияние радиационно-термических воздействий на характеристики полупроводниковых структур // Оптоэлектронная и полупроводниковая техника. – 1982. – № 1. – С. 69–73.
65. Bhattacharya, P.K. Effects of Radiation and Annealing on n-Channel IGFETs with Implications for Space Applications / P.K. Bhattacharya, Sunil K. Andhole // Int. J. Electron. – 1994. – Vol. 76, № 2. – P. 233–240.
66. Zaininger, K.H. Electron Bombardment of MOS Capacitors / K.H. Zaininger // Appl. Phys. Lett. – 1966. – Vol. 8, № 3. – P. 140–142.
67. Churchill, J.N. Dynamic Model for e-Beam Irradiation of MOS Capacitors / J.N. Churchill, F.E. Holmstrom, T.W. Collins // Appl. Phys. Lett. – 1979. – Vol. 50, № 6. – P. 3994–4002.
68. Collins, T.W. Charge Distribution in MOS Capacitors for Large Irradiation Doses / T.W. Collins, F.E. Holmstrom, J.N. Churchill // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1979. – Vol. NS-26, № 6. – P. 5176–5179.
69. Герасимов Ю.М., Кармазинский А.Н. Кинетика накопления заряда в диэлектрике МДП-структуры // Радиотехника и электроника. – 1986. – № 6. – С. 1390–1397.
70. The Effects of Test Conditions on MOS Radiation-Hardness Results / P.V. Dressendorfer [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1981. – Vol. NS-28, № 6. – P. 4281–4287.
71. Ionizing Radiation Effects on Power MOS FETs during High-Speed Switching / D.L. Blackburn [et al.] // Ibid. – 1982. – Vol. NS-29, № 6. – P. 1555–1558.
72. Design and Performance of Two 1 K CMOS/SOS Hardened RAMs / G.J. Brucker [et al.] // Ibid. – 1983. – Vol. NS-30, № 3. – P. 1920–1925.
73. Rapid Annealing Response of the Hardened 1802 Bulk CMOS Microprocessor / J. Scarpulla [et al.] // Ibid. – 1980. – Vol. NS-27, № 6. – P. 1442–1448.
74. Gibbon, C.F. A Radiation-Hard Silicon Gate Bulk CMOS Cell Family / C.F. Gibbon, D.H. Hobing, R.S. Flores // Ibid. – 1980. – Vol. NS-27, № 6. – P. 1712–1715.
75. Temperature Effects on the Radiation Response of MOS Devices / J.R. Schwank [et al.] // Ibid. – 1988. – Vol. NS-35, № 6. – P. 1432–1437.
76. Синкевич В.Ф., Соловьев В.Н. Физические механизмы деградации полупроводниковых приборов // Зарубежная электронная техника. – 1984. – № 2(273). – С. 3–46.

77. Nielsen, R.L. Total Dose Effects of Ionizing Radiation on MOS Structures at 90 K / R.L. Nielsen, D.K. Nichols // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1973. – Vol. NS-20, № 6. – P. 319–325.
78. Harari, E. Low Temperature Irradiation Effects in SiO_2-Insulated MIS Devices / E. Harari, S. Wang, B.S. Royce // J. Appl. Phys. – 1975. – Vol. 46, № 3. – P. 1310–1317.
79. Гирий В.А. и др. Влияние температуры облучения на радиационные процессы в МДП-структурах // Оптоэлектронная и полупроводниковая техника. – 1982. – № 2. – С. 78–81.
80. Sander, H.H. Unified Model of Damage Annealing in CMOS from Freeze-in to Transient Annealing / H.H. Sander, B.L. Gregory // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2157–2162.
81. Srour, J.R. Radiation-Induced Charge Transport and Charge Buildup in SiO_2 Films at Low Temperatures / J.R. Srour // Ibid. – 1976. – Vol. NS-23, № 6. – P. 1513–1519.
82. Boesch, H.E. Charge Yield and Dose Effects in MOS Capacitors at 80 K / H.E. Boesch, J.M. McGarrity // Ibid. – 1976. – Vol. NS-23, № 6. – P. 1520–1525.
83. Saks, N.S. Radiation Effects in n-Channel CCDs at Low Temperatures / N.S. Saks, J.M. Modolot // Ibid. – 1983. – Vol. NS-30, № 6. – P. 4197–4204.
84. Hughes, R.C. Hole Transport in MOS Oxides / R.C. Hughes, E.P. EerNisse, H.J. Stein // Ibid. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2227–2233.
85. Fahrner, W.R. MOS and Thyristor Damage Parameters after 2,5 and 15 MeV High Temperature Electron Irradiation / W.R. Fahrner, D. Braunig, E. Borchert // Phys. Stat. Sol. (a). – 1982. – Vol. 22, № 1. – P. 79–88.
86. Исследование деградации электрофизических параметров интегральных схем и их элементов при воздействии дестабилизирующих факторов: отчет о НИР / Воронежск. Гос. ун-т; рук. работы С.Г. Кадменский. – Воронеж, 1988. – 98 с. – № ГР 0187.0040106.
87. Лавренцов В.Д., Хорохина Л.Н. Методы обеспечения работоспособности ИЭТ в аппаратуре в условиях длительного воздействия спецфакторов // Надежность и контроль качества ИЭТ: Материалы II межотрасл. конф. – М., 1992. – С. 44–45.
88. Зимин В.Н. и др. Образование заряда в диэлектрике МДП-структуры при воздействии различных видов радиации // Электронная техника. Сер.: Микроэлектроника. – 1972. – Вып. 2(36). – С. 21–23.
89. Chang, W. A Framework for Understanding Fast-Neutron Induced Defects in SiO_2 MOS Structures / W. Chang // J. Electron. Mater. – 1992. – Vol. 21, № 7. – P. 693–699.
90. The Search for Neutron-Induced Hard Errors in VLSI Structures / J.R. Srour [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1981. – Vol. NS-28, № 6. – P. 3968–3974.
91. Чайковский Н.Г., Корецкий В.П., Веселова Н.В. Исследование влияния спектрально-энергетического состава низкоинтенсивного излучения моделирующих установок на оценку стойкости ИС к воздействию электронного излучения космического пространства // Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов: Материалы I Всесоюзн. конф. – Томск, 1991. – С. 150–151.
92. The Damage Equivalence of Electrons, Protons and Gamma Rays in MOS Devices / G.J. Brucker [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1982. – Vol. NS-29, № 6. – P. 1966–1969.
93. Recovery of Damage in Rad-Hard MOS Devices during and after Irradiation by Electrons, Protons, Alphas and Gamma Rays / G.J. Brucker [et al.] // Ibid. – 1983. – Vol. NS-30, № 6. – P. 4157–4161.
94. Rattner, S. A Comparison of LINAC and Co^{60} Response of the CD4007UBE CMOS Inverter / S. Rattner, H.E. Boesch // Ibid. – 1986. – Vol. NS-33, № 2. – P. 1051–1052.
95. Dozier, C.M. Effect of Photon Energy on the Response of MOS Devices / C.M. Dozier, D.B. Brown // Ibid. – 1981. – Vol. NS-28, № 6. – P. 4137–4141.

96. Dozier, C.M. Photon Energy Dependence of Radiation Effects in MOS Structures / C.M. Dozier, D.B. Brown // Ibid. – 1980. – Vol. NS-27, № 6. – P. 1694–1699.
97. Zaininger, K.H. Irradiation of MIS Capacitors with High Energy Electrons / K.H. Zaininger // Ibid. – 1966. – Vol. NS-13, № 6. – P. 237–247.
98. Simons, M. Some Observations on Charge Buildup and Release in Silicon Dioxide Irradiated with Low Energy Electrons / M. Simons, L.K. Monteith, J.R. Hauser // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1968. – Vol. ED-15, № 12. – P. 966–973.
99. Maier, R.J. Dose-Rate Effects in the Permanent Threshold Voltage Shifts of MOS Transistors / R.J. Maier, R.W. Tallon // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2214–2218.
100. Long, D.M. Transient Radiation Response of JFETs and MIS FETs at Cryogenic Temperaturees / D.M. Long // Ibid. – 1974. – Vol. NS-21, № 6. – P. 119–123.
101. Snowden, D.P. Transient Response of MOS Capacitors to High-Energy Electron Irradiation / D.P. Snowden, T.M. Flanagan // Ibid. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2516–2521.
102. Золотов М.В., Гуртов В.А., Суриков И.Н. Влияние мощности дозы и температуры облучения на радиационные эффекты в МНОП структурах // Микроэлектроника. – 1993. – Т. 22. – Вып. 4. – С. 82–92.
103. Wilkin, N. Ionizing Dose-Rate Effects in Microprocessors / N. Wilkin, S.T. Self, H. Eisen // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1980. – Vol. NS-27, № 6. – P. 1420–1424.
104. Баринов Ю.В. и др. Влияние мощности дозы гамма-облучения на сдвиг порогового напряжения МОП-транзисторов // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19. – № 10. – С. 1883–1885.
105. Total Dose Radiation and Annealing Studies Implications for Hardness Assurance Testing / P.S. Winokur [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1986. – Vol. NS-33, № 6. – P. 1343–1351.
106. Derbenwick, G.F. CMOS Hardness Prediction for Low-Dose-Rate Environments / G.F. Derbenwick, H.H. Sander // Ibid. – 1977. – Vol. NS-24, № 6. – P. 2244–2247.
107. Winokur, P.S. Limitation in the Use of Linear System Theory for Prediction of Hardened MOS Devices Response in Space Satellite Environments / P.S. Winokur // Ibid. – 1982. – Vol. NS-29, № 6. – P. 2102–2106.
108. Brucker, G.J. Exposure Dose Rate Dependence for a CMOS/SOS Memory / G.J. Brucker // Ibid. – 1981. – Vol. NS-28, № 6. – P. 4056–4059.
109. Johnston, A.H. Total Dose Damage at Low Dose Rates / A.H. Johnston, S.B. Roeske // Ibid. – 1986. – Vol. NS-33, № 6. – P. 1487–1492.
110. Johnston, A.H. Super Recovery of Total Dose Damage in MOS Devices / A.H. Johnston // Ibid. – 1984. – Vol. NS-31, № 6. – P. 1427–1433.
111. Goben, C.A. Comparison of Effects of Ionizing Radiation at Twelve Dose Rates from 0,0015 to 100 Rad (Si)/s / C.A. Goben, W.E. Price // J. Electron. Mater. – 1990. – Vol. 19. № 7. – P. 609–615.
112. Сергиенко Р.А., Ковалевич С.Ф. Работоспособность МДП-приборов при воздействии ионизирующих излучений с учетом реальных условий эксплуатации // Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов: Материалы I Всесоюзн. конф. – Томск, 1991. – С. 73–74.
113. Емельянов В.В. и др. Корреляция радиационных эффектов в МОП-транзисторах и КМОП ИС при воздействии электронного излучения различной интенсивности // Микроэлектроника. – 1995. – Т. 24. – № 5. – С. 370–377.
114. Малышев М.М. и др. Методология оценки радиационной надежности ИЭТ в условиях низкоинтенсивных ионизирующих излучений // Петербургский журнал электроники. – 1994. – Прилож. № 2. – С. 4–16.
115. Fleetwood, D.M. Using Laboratory X-Ray and Cobalt-60 Irradiations to Predict CMOS Device Response in Strategic and Space Environments / D.M. Fleetwood, P.S. Winokur, J.R. Schwank // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1988. – Vol. NS-36, № 6. – P. 1497–1505.

116. Наумов Ю.Е. Интегральные логические схемы. – М.: Сов. радио, 1970. – 432 с.
117. Лавренцов В.Д., Хорохина Л.Н., Юсов Ю.П. Работоспособность МДП-приборов при воздействии ИИ в реальных условиях эксплуатации // Зарубежная электронная техника. – 1991. – № 1–2 (356–357). – С. 3–101.
118. Galloway, K.F. Important Considerations for SEM Total-Dose Testing / K.F. Galloway, P. Roitman // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1977. – Vol. NS-24. – P. 2066–2070.
119. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 464 с.
120. Nichols, D.K. A Comparison of the Ionizing Radiation Response of Microcircuits Manufactured by Five Different Technologies / D.K. Nichols, R.L. Nielsen // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1969. – Vol. NS-16, № 6. – P. 181–185.
121. Leavy, J.F. Radiation Induced Integrated Circuit Latch-up / J.F. Leavy, R.A. Poll // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1969. – Vol. NS-16, № 6. – P. 96–103.
122. Гребен А.Б. Проектирование аналоговых интегральных схем. – М.: Энергия, 1976. – 256 с.
123. Gates, H.T. Technique for Obtaining Hardened Semiconductor Devices by Irradiating Wafers / H.T. Gates, R.E. Darling // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1970. – Vol. NS-17, № 6. – P. 183–187.
124. Матисич Б. Вопросы расчета малошумящего интегрального предусилителя // Труды Ин-та инженеров по электротехнике и электронике. – 1965. – Т. 53. – № 6. – С. 753.
125. Хардман Д. Расширение фронта исследований и разработок малошумящих полевых транзисторов // Электроника. – 1972. – Т. 45. – № 2. – С. 66.
126. Huges, H.Z. Radiation-Induced Perturbations of the Electrical Properties of the Silicon-Dioxide Interface / H.Z. Huges // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1969. – Vol. NS-16, № 6. – P. 195–202.
127. Баранов Ю.Л., Круглов И.И. Повышение работоспособности полупроводниковых приборов в условиях воздействия ионизирующих излучений // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. – 1991. – Вып. 4(1643). – С. 1–33.
128. Емельянов В.А., Белоус А.И., Прибыльский А.В. Исследование динамики изменения уровня стойкости цифровых микросхем // Радиационная стойкость электронных систем: Сб. науч. ст. – М.: ПАИМС., 2000. – С. 41–43.
129. Зольникова А.Н., Ачкасов В.Н. Конструктивно-технологический базис для создания радиационностойких ИС // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 106.
130. Total Gamma-Dose Characteristics of CMOS Devices in SOI Structures Based on Oxidized Porous Silicon / V.P. Bondarenko [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1997. – Vol. NS-44, № 5. – P. 1719–1723.
131. Богатырев Ю.В. Воздействие ионизирующих излучений на структуры металл-диэлектрик-полупроводник и приборы на их основе: Дис. докт. техн. наук: 01.04.10; 05.27.01 . – Минск, 1998. – 308 с.
132. Claeys, C. Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices / C. Claeys, E. Simoen. – Berlin: Springer, 2002. – 402 p.
133. CMOS devices hardened against total dose radiation effects: US Pat. 6777753 / G. Summers, M. Xapsos, E. Jackson – (2004).
134. Способ разделения интегральных микросхем по радиационной стойкости и надежности. Пат. RU 2254587 C1 / В.С. Анашин, В.Д. Попов. 2003.
135. Прибыльский А.В. Конструктивно-схемотехнические методы проектирования, тестирования и контроля интегральных схем. – Минск: ЦНИИТУ, 2003. – 202 с.
136. Ачкасов В.Н., Зольников В.К., Фортинский Ю.К. Проектирование радиационностойких БИС // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2005»: Науч.-техн. сб. – М.: МИФИ. – Вып. 8. – С. 43–44.

137. Sogoyan, A.V. Method for Predicting CMOS parameter Degradation Due to Ionizing Radiation with Regard to Operation Time and Conditions / A.V. Sogoyan, A.I. Chumakov, A.Yu. Nikiforov // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28. – № 4. – С. 263–275.
138. Зольников В.К., Крюков В.П. Расчетно-экспериментальная оценка стойкости КМОП ИС к ионизирующим излучениям // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиац. возд. на радиоэлектрон. аппар. – 2002. – Вып. 4. – С. 104–105.
139. Lacoe, R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies / R. Lacoe // 2003 IEEE NSREC. Short Course «Radiation effects in advanced commercial technologies: how design scaling has affected the selection of spaceborne electronics». July 2003, Monteray, California. – P. 111–142.
140. Ngai K.L., White C.T. A model of interface states and charges at the Si–SiO_2 interface: its predictions and comparisons with experiments / K.L. Ngai, C.T. White // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 52, № 1. – P. 320–337.
141. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
142. Latent interface trap buildup and its implications for hardness assurance / J.R. Shwank [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1992. – Vol. NS-39, № 6. – P. 1953–1960.
143. Thermal and field dependencies of latent relaxation processes in irradiated MOS devices / V.V. Emelianov [et al.] // RADECS European Conference Abstracts. – 1997. – P. A16–A19.
144. Адонин А. Новые возможности технологии БИС со структурой «кремний на сапфире» // Электронные компоненты. – 2000. – № 3. – С. 2–6.
145. Костюков В.Е. и др. Материаловедческие проблемы создания специальной полупроводниковой элементной базы и возможные пути их решения // Журнал организаторов производства. – Журнал депонированных рукописей. – 2002. – № 10. – С. 1–5.
146. Barnaby, H.J. Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies / H.J. Barnaby // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2006. – Vol. 53, № 6. – P. 3103–3121.
147. Политика производства радиационностойких аэрокосмических компонентов [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: http://www.ineltek.ru/html.cgi/txt/publ/_ineltek/radiations.htm. – Дата доступа: 21.04.2007.
148. CollegeWafer.com. [Electronic resource] – 2007. – Mode of access: http://www.universitywafer.com. – Date of access: 28.10.2007.
149. Process for the fabrication of thin semiconductor materials films: U.S. Patent 5374564, H01L 21/762 / M. Bruel; Commissariat A l'Energie Atomique (FR) – № 91 11491; prior. 18.09.1991; publ. 20.12. 1994.
150. Попов В.А. и др. Способ изготовления структуры кремний-на-изоляторе: пат. РФ № 2164719. – Приоритет от 27.09.1999; опубл. 27.03.2001.
151. Гусев Н.Г. и др. Физические основы защиты от излучений. – М.: Атомиздат, 1969. – 472 с.
152. Lang, D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D.V. Lang // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, № 7. – P. 3023–3032.
153. Lox, B. Transient response of p-n-junction / B. Lox, S.T. Newstadter // J. Appl. Phys. – 1984. – Vol. 25. – P. 1148–1154.
154. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
155. Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. – М.: Наука, 1990. – 216 с.
156. Маркевич В.П., Мурин Л.И. Селективный захват межузельных атомов углерода в облученном кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22. – Вып. 5. – С. 911–914.
157. Defect reactions associated with divacancy elimination in silicon / V.P. Markevich [et al.] // J. Phys.: Condensed Matter. – 2003. – Vol. 15. – P. S2779–S2789.

158. Мильвидский М.Г., Челдышев В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. Обзор // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – Вып. 5. – С. 513–522.
159. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindstrцm [et al.] // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research: B. – 2002. – Vol. 186. – P. 121–125.
160. Бабич В.М., Блецкан Н.И., Венгер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. – Киев: Интерпрес ЛТД, 1997. – 240 с.
161. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
162. Романенко А.А. Влияние ионизирующего излучения низкой интенсивности на биполярные изделия электронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 121–132.
163. Modeling Ionizing Radiation Induced Gain Degradation of the Lateral PNP Bipolar Junction Transistors / D.M. Schmidt [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1996. – Vol. 43, № 6. – P. 3032–3039.
164. Implications of Radiation-Induced Dopant Deactivation for n-p-n Bipolar Junction Transistors / S.C. Witczak [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Vol. 47, № 6. P. 2281–2288.
165. Theory and Application of Dual Transistor Charge Separation Analysis / Fleetwood D.M. [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1989. – Vol. NS-36, № 6. – P. 1816–1824.
166. Oldham, T.R. Spatial Dependence of Trapped Holes Determined from Tunneling Analysis and Measured Annealing / T.R. Oldham, A.J. Lelis, F.B. McLean // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1986. – Vol. NS-33, № 6. – P.1203–1209.
167. The role of electron transport and trapping in MOS total-dose modeling / D.M. Fleetwood [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1999. – Vol. 46, № 6. – P. 1519–1525.
168. Bias and Frequency Dependence of Radiation-Induced Charge Trapping in MOS Devices / J.A. Felix [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2001. – Vol. 48, № 6. – P. 2114–2119.
169. Madrenas, J. Thin Oxide Reliability / J. Madrenas, A. Ivorra, E. Alarcon // Proc. of the 41-st IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. Indiana, USA, August 1998. – P. 348–351.
170. Яненко А.В. и др. Исследование влияния режимов работы и критериев годности на уровень стойкости КМОП КНС БИС ОЗУ // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость-2004»: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 1–2 июня 2004 г. – М.: МИФИ, 2004. – С. 65–66.
171. Лабунов В.А. и др. Состояние и перспективы развития КНИ технологии в Республике Беларусь // Актуальные проблемы физики твердого тела – ФТТ-2005: материалы Междунар. конф., Минск, 26–28 окт. 2005 г. / Издат. БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск, 2005. – Т. 1. – С. 9–10.
172. Бондаренко В.П. и др. КНИ-структуры на основе окисленного пористого кремния // Микроэлектроника. – 1994. – Т. 23. – № 6. – С. 61–68.
173. Total gamma dose characteristics of CMOS devices in SOI structures based on oxidized porous silicon / Bondarenko V.P. [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1997. – Vol. 44. – № 5. – P. 1719–1723.
174. Асеев А.Л. и др. Перспективы применения структур кремний на изоляторе в микро-, наноэлектронике и микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам: Сб. ст. под ред. Н.Н. Мальцева. – М.: Техносфера, 2005. – С. 305–314.
175. Першенков В.С. Роль поверхностных состояний в деградации коэффициента усиления биполярных транзисторов при воздействии излучений низкой интенсивности космического пространства // Научная сессия МИФИ-2007. – Т. 1. – С. 74–75.

176. Hughes, R.C. Hole Transport in MOS Oxides / R.C. Hughes, E.P. EerNisse, H.J. Stein // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1975. – Vol. NS-22, № 6. – P. 2227–2233.
177. Бечина И.А., Попов В.Д. Прогнозирование отказов КМОП ИС с помощью метода рабочих областей. – М., 1988. – 24 с. – (Препринт 084-88/МИФИ).
178. Bogatyrev, Yu.V. Current Annealing of Irradiated CMOS Integrated Circuits / Yu.V. Bogatyrev, F.P. Korshunov // Proc. of the 7-th European conf. «Radiation and Its Effects on Components and Systems» – RADECS 2003. – P. 163–174.
179. Горлов М.И. и др.Расчет надежности интегральных схем по конструктивно-технологическим данным. – Воронеж: ВГУ, 1996. – 79 с.
180. Элемент полупроводниковой ИС: заявка 60-128653. Япония / Я. Ясунори, С. Дзиро. – Опубл. в 1995.
181. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП ИС. – Минск, 1998. – 326 с.
182. Коршунов Ф.П. и др. Влияние электронного облучения на характеристики эпитаксиальных кремниевых p-n-структур // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2007. – № 3. – С. 113–116.
183. Коршунов Ф.П. и др. Влияние отжига радиационных дефектов на характеристики эпитаксиальных кремниевых *p-n*-структур // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 3. – С. 48–51.
184. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на биполярные транзисторные структуры // Радиационная физика твердого тела: труды XIV Междунар. совещания, Севастополь, 5–10 июля 2004 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2004. – С. 30–33.
185. Коршунов Ф.П. и др. Радиационные эффекты в биполярных транзисторных структурах, облученных гамма-квантами при различных электрических режимах // Радиационная физика твердого тела: Труды XV Междунар. совещания, Севастополь, 4–9 июля 2005 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2005. – С. 389–392.
186. Коршунов Ф.П. и др. Влияние ионизирующей радиации на параметры интегральных биполярных и МОП-структур // Материалы и структуры современной электроники: Сб. науч. тр. II Междунар. науч. конф., Минск, 5–6 октября 2006 г. / БГУ; редкол.: В.Б. Оджаев и др. – Минск, 2006. – С. 151–153.
187. Коршунов Ф.П. и др. Радиационные эффекты в биполярных и КМОП интегральных микросхемах // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 18-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2008), Севастополь, 8–12 сентября 2008 г. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т. 2. – С. 659–661.
188. Коршунов Ф.П. и др. Влияние ионизирующей радиации на параметры аналоговых интегральных схем // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 7–8 июня 2005 г. / МИФИ. – М., 2005. – С. 89–90.
189. Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Борисов А.А., Шведов С.В. Сравнительное исследование радиационного поведения ИС стабилизаторов напряжения // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 7–8 июня 2005 г. / МИФИ. – М., 2005. – С. 81–82.
190. Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Шведов С.В. Сравнительное исследование радиационного поведения аналоговых ИС // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2007: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 5–6 июня 2007 г. / МИФИ. – М., 2007. – С. 17–18.
191. Коршунов Ф.П. и др. Воздействие гамма-излучения на МОП-структуры при различных электрических режимах // Радиационная физика твердого тела: Труды XII Междунар. совещания, Севастополь, 1–6 июля 2002 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2002. – С. 451–454.

192. Коршунов Ф.П. и др. Радиационные эффекты в МОП-структурах при различных электрических режимах // Радиационная физика твердого тела: Труды XIII Междунар. совещания, Севастополь, 30 июня – 5 июля 2003 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2003. – С. 69–73.
193. Коршунов Ф.П. и др. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных структурах // Радиационная физика твердого тела: Труды XX Междунар. совещания, Севастополь, 5–10 июля 2010 г. – С. 768–773.
194. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на элементы субмикронных КМОП интегральных схем // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 20-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2010), Севастополь, 13–17 сентября 2010 г. – С. 925–927.
195. Никифоров А.Ю., Согоян А.В., Шведов С.В., Усов Г.И. Сравнительный анализ радиационного поведения КМОП ИС 1594ИД4 и сопутствующих тестовых структур // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2003: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 3–4 июня 2003 г. / МИФИ. – М., 2003. – С. 87–88.
196. Согоян А.В., Шведов С.В., Усов Г.И. Анализ радиационного поведения паразитных тестовых МОПТ // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 1–2 июня 2004 г. / МИФИ. – М., 2004. – С. 143–144.
197. Коршунов Ф.П. и др. Влияние электрического режима на радиационное изменение параметров МОП-транзисторов // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 7–8 июня 2005 г. / МИФИ. – М., 2005. – С. 163–164.
198. Коршунов Ф.П. и др. Процессы релаксации в облученных транзисторных биполярных и МОП-структурах // Радиационная физика твердого тела: Труды XVII Междунар. совещания, Севастополь, 9–14 июля 2007 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2007. – С. 678–684.
199. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на параметры различных транзисторных МОП-структур – элементов интегральных микросхем // Докл. БГУИР. – 2007. – № 1 (17). – С. 67–72.
200. Коршунов Ф.П. и др. Обеспечение работоспособности различных перспективных полупроводниковых приборов при радиационном воздействии // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 17-й Междунар. Крымской конф. (КрыМиКо'2007), Севастополь, 10–14 сентября 2007 г. – Севастополь: Вебер, 2007. – Т. 2. – С. 651–654.
201. Коршунов Ф.П. и др. Методы радиационных исследований КМОП ИС // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2003. – № 4. – С. 57–60.
202. Артамонов А.С., Малюгин С.Л., Шведов С.В., Усов Г.И. Исследование радиационной стойкости быстродействующих КМОП ИС серии 1594Т // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2003: материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 3–4 июня 2003 г. / МИФИ. – М., 2003. – С. 71–72.
203. Фигуров В.С. и др. Основные результаты радиационных испытаний микросхем серии 5584 // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2007: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 5–6 июня 2007 г. / МИФИ. – М., 2007. – С. 35–36.
204. Фигуров В.С., Байков В.В., Шелковников В.В., Шведов С.В. Экспериментальная оценка минимально возможного значения уровня бессбойной работы микросхем 5584ИЕ10Т по результатам испытаний на установках «БАРС-4» и «ГУ-200» // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2007: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 5–6 июня 2007 г. / МИФИ. – М., 2007. – С. 37–38.

205. Калашников О.А. и др. Исследования радиационной стойкости РПЗУ 1568РР1 // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2001: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 5–6 июня 2001 г. / МИФИ. – М., 2001. – С. 53–54.
206. Яненко А.В. и др. Результаты исследования радиационной стойкости тестовых БИС ОЗУ // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 1–2 июня 2004 г. / МИФИ. – М., 2004. – С. 71–72.
207. Яненко А.В. и др. Контроль времени выборки данных КМОП БИС ПЗУ при дозовом воздействии // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2005: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 7–8 июня 2005 г. / МИФИ. – М., 2005. – С. 209–210.
208. 1.2 mm CMOS/SOI on porous silicon / V.P. Bondarenko, Y.V. Bogatirev, L.N. Dolgyi, A.M. Dorofeev, A.K. Panfilenko, S.V. Shvedov, G.N. Troyanova, N.N. Vorozov, V.A. Yakovtseva // Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices / Ed. J.P. Colinge [et al]. – Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 1995. – P. 275–280.
209. Алиева Н.В. и др. Исследование БИС СОЗУ 8К на основе КНИ структур // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006 (МЭС – 2006): Сб. трудов II Всероссийской науч.-технич. конф., Москва, 9–13 октября 2006 г. / Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН. – М., 2006. – С. 289–294.
210. Киргизова А.В. и др. Сравнительная оценка уровней стойкости однотипных КМОП БИС ОЗУ на КНС и КНИ структурах к ионизирующим воздействиям // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 6–7 июня 2006 г. / МИФИ. – М., 2006. – С. 69–70.
211. Белоус А.И. и др. Фотолюминесцентные исследования КНИ структур // Актуальные проблемы физики твердого тела – ФТТ-2007: Материалы Междунар. конф., Минск, 23–26 октября 2007 г. / Издат. БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 12–15.
212. Алиева Н.В. и др. Сравнительные исследования КМОП БИС, изготовленных в КНИ и КНС структурах // Актуальные проблемы физики твердого тела – ФТТ-2007: Материалы Междунар. конф., Минск, 23–26 октября 2007 г. / Издат. БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 5–7.
213. Демченко А.И. и др. Исследование радиационностойкой элементной базы КМОП СБИС на КНИ подложках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 19-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2009), Севастополь, 14–18 сентября 2009 г. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 728–729.
214. Петров А.Г., Давыдов Г.Г., Киргизова А.В., Шведов С.В. Влияние уменьшения геометрических размеров на показатели стойкости КНИ транзисторов // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2008: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 3–4 июня 2008 г. / МИФИ. – М., 2008. – С. 41–42.
215. Белоус А.И., Богатырев Ю.В., Коршунов Ф.П., Артамонов А.С. и др. Радиационные эффекты в БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 2. – С. 139–149.
216. Гришин В., Еремеев П., Зубов Н., Муратов С. и др. Микросхемы приемопередатчиков для основных типов мультиплексных каналов информационного обмена // Компоненты и технологии. – 2002. – № 5. – С. 68.

ГЛАВА 8

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БИПОЛЯРНЫХ И КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

8.1. Методы прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИМС

В данном разделе представлены разработанные методы оценки (прогнозирования) радиационной стойкости тестовых МОП-транзисторов и логических КМОП ИМС, более детально рассмотренные в [1–5].

8.1.1. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости МОП-приборов

Методы прогнозирования радиационной стойкости обычно включают в себя следующие основные элементы:

- тестовое облучение испытательной выборки образцов МОП-приборов (для каждой партии пластин);
- контроль изменений основных параметров МОП-приборов при облучении;
- математическая обработка (аппроксимация) экспериментальных результатов испытаний с применением аппарата регрессионного анализа [6].

На рис. 8.1 показаны результаты аппроксимации дозовых зависимостей изменений порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов с p-каналом, а на рис. 8.2 – с n-каналом при различных электрических режимах. Соответствующие аппроксимирующие дозовые зависимости относительных изменений приведенной крутизны представлены на рис. 8.3 и 8.4.

Полученные аппроксимирующие зависимости параметров тестовых МОП-транзисторов от дозы гамма-излучения (рис. 8.1–8.4) описываются следующими выражениями:

$$\Delta U_{\text{п}} = -0{,}0424 - 0{,}0375x - 0{,}1028x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 0 \text{ В}, \qquad (8.1)$$

$$\Delta U_{\text{п}} = -0{,}0502 + 0{,}0802x - 0{,}0632x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = -3 \text{ В}, \qquad (8.2)$$

$$\Delta U_{\text{п}} = -0{,}0158 + 0{,}0367x - 0{,}0706x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = -5 \text{ В}. \qquad (8.3)$$

$$\Delta U_{\text{n}} = -0{,}0725 - 0{,}2898x + 0{,}0721x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 0 \text{ В}, \qquad (8.4)$$

$$\Delta U_{\text{n}} = [-17{,}01751 - 0{,}8337x + 3{,}1762(\ln x)^2]^{-1} \quad \text{при } U_{\text{з}} = 3 \text{ В}, \qquad (8.5)$$

$$\Delta U_{\text{п}} = -0{,}0535 - 0{,}0118x + 0{,}00065\,x^2 - 0{,}000113x^2\ln x \quad \text{при } U_{\text{з}} = 5 \text{ В}, \qquad (8.6)$$

$$K_{\text{р}}/K_{\text{р.о}} = 0{,}9797 - 0{,}0597x - 0{,}0466x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 0 \text{ В}, \qquad (8.7)$$

$$K_{\text{р}}/K_{\text{р.о}} = 1{,}0215 - 0{,}1971x + 0{,}0741x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = -3 \text{ В}, \qquad (8.8)$$

$$K_{\text{р}}/K_{\text{р.о}} = 0{,}9786 - 0{,}095x + 0{,}0467x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = -5 \text{ В}, \qquad (8.9)$$

$$K_{\text{п}}/K_{\text{п.о}} = 0{,}9705 - 0{,}0428x - 0{,}0634x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 0 \text{ В}, \qquad (8.10)$$

$$K_{\text{п}}/K_{\text{п.о}} = 1{,}0033 + 3{,}4694 \cdot 10^{-4}x - 0{,}0634x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 3 \text{ В}, \qquad (8.11)$$

$$K_{\text{п}}/K_{\text{п.о}} = 0{,}966 + 0{,}0593x - 0{,}0474x^2 \quad \text{при } U_{\text{з}} = 5 \text{ В}. \qquad (8.12)$$

В выражениях (8.1–8.4, 8.7–8.12): $x = \lg(D \cdot 10^{-5})$.
В выражениях (8.5–8.6): $x = D \cdot 10^{-5}$.

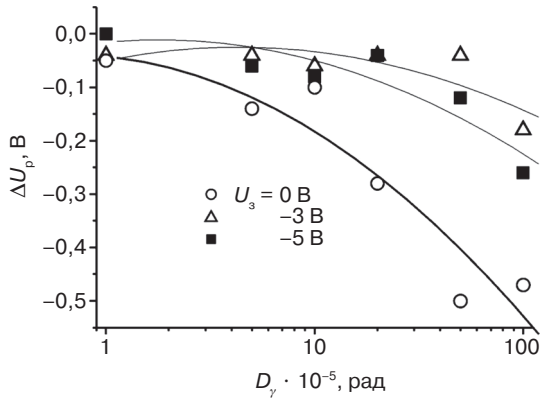


Рис. 8.1. Аппроксимации дозовых зависимостей изменений порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов с p-каналом при различных электрических режимах

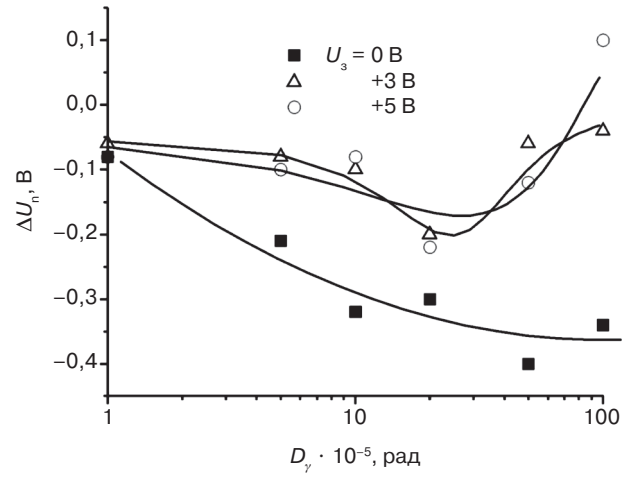


Рис. 8.2. Аппроксимации дозовых зависимостей изменений порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов с n-каналом при различных электрических режимах

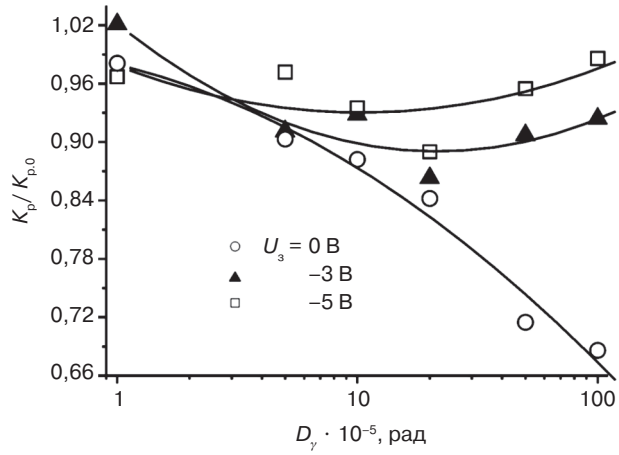


Рис. 8.3. Аппроксимирующие дозовые зависимости относительных изменений приведенной крутизны МОП-транзисторов с p-каналом при различных электрических режимах

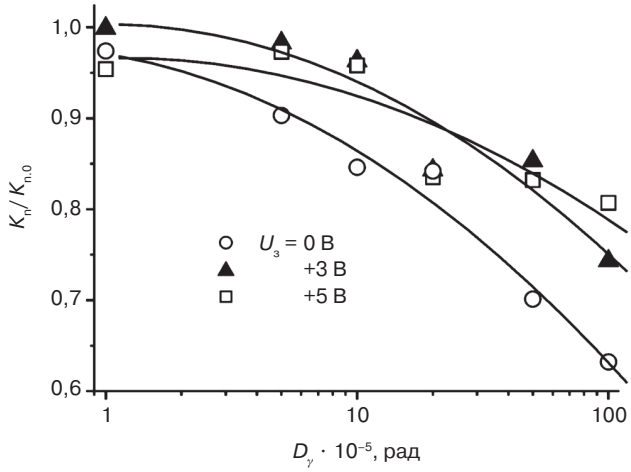


Рис. 8.4. Аппроксимирующие дозовые зависимости относительных изменений приведенной крутизны МОП-транзисторов с n-каналом при различных электрических режимах

При стационарном облучении изменения параметров логических элементов в КМОП ИМС обусловлены постепенным изменением пороговых напряжений U_n и U_p МОП-транзисторов и соответствующими значениями приведенной крутизны K_n и K_p. Экспериментальные исследования показывают, что основной вклад в изменение параметров логических КМОП элементов дает радиационный дрейф пороговых напряжений МОП-транзисторов.

Наиболее критическими параметрами КМОП ИМС при облучении обычно являются: ток потребления $I_{потр}$, напряжение переключения $U_{пер}$, задержки переключения из единицы в нуль $t^{10}_{зр}$ и из нуля в единицу $t^{01}_{зр}$.

Ток потребления КМОП ИМС включает в себя токи утечки через защитные диоды $I_д$ в цепи «питание – общая шина» и токи стоков закрытых n-канальных МОП-транзисторов [7]:

$$I_{потр} = I_{вх} M + I_с N_n/2, \tag{8.13}$$

где $I_{вх}$ – входной ток, примерно равный $I_д \le 0{,}1$ мкА, M – число входов ИМС, N_n – количество n-канальных МОП-транзисторов в ИМС. При $U_n < 0$ ток стока $I_с$ определяется выражением (8.13), а при $U_n \ge 0$

$$I_с = K_n (q\varphi_s/kT)^{1/2}\exp(-q\varphi_s/kT), \tag{8.14}$$

где q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, φ_s – поверхностный потенциал, соответствующий пороговому напряжению МОП-транзистора; $\varphi_s = 2\varphi_{Fi}$, где φ_{Fi} – уровень Ферми в объеме, отсчитанный от середины запрещенной зоны Si.

Поскольку в нашем случае после $D_\gamma = 10^7$ рад (рис. 8.1*а*) остается $U_n > 0$, то в подпороговом режиме можно принять $I_с \le 0{,}1$ мкА.

Тогда из (8.13) следует, что для логических элементов НЕ (при $M = 1$, $N_n = 1$) – $I_{потр} \le 0{,}15$ мкА.

Для логических элементов 2И-НЕ (при $M = 2$, $N_n = 2$) – $I_{потр} \le 0{,}3$ мкА.

Следовательно, ток потребления логических элементов КМОП ИМС 1594ЛН1 и 1594ЛА3 будет оставаться в пределах ТУ при облучении до $D_\gamma = 10^7$ рад.

Напряжение переключения $U_{пер}$ определяется как входное напряжение, при котором прямая $U_{вых} = U_{вх}$ пересекает статическую передаточную характеристику ИМС. При облучении происходит сдвиг статической передаточной характеристики. Тогда в общем случае при переключении по одному из M входов параметр $U_{пер}$ после облучения можно рассчитать из выражения [8]:

$$\begin{aligned} U_{пер} &= [(U_{пит} - |U_{р0} + \Delta U_р|)\alpha + U_{n0} + \Delta U_n]/(1 + \alpha), \\ \alpha &= \alpha_0[(K_р/K_{р0})/(K_n/K_{n0})]^{1/2}; \\ \alpha_0 &= A_\alpha(K_{р0}/K_{n0})^{1/2}. \end{aligned} \tag{8.15}$$

Величины $\Delta U_р$ и ΔU_n определяются из выражений (8.1–8.3) и (8.4–8.6); $K_р/K_{р0}$ и K_n/K_{n0} – из (8.7–8.9) и (8.10–8.12); $A_\alpha = 1$ для логических элементов НЕ; $A_\alpha = 1/2$ для логических элементов 2И-НЕ. В общем виде значения коэффициента A_α приведены в табл. 8.1.

До облучения напряжение переключения $U_{пер0}$ определяется по формуле:

$$U_{пер0} = [(U_{пит} - |U_{р0})\alpha_0 + U_{n0}]/(1 + \alpha_0). \tag{8.16}$$

Таблица 8.1. Значения коэффициентов A_α, A_n и $A_р$ (M – число входов)

Тип логических элементов	НЕ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ
$A_\alpha = A_n$	1	1/M	M
$A_р$	1	1	1/M

Отсюда изменение напряжения переключения $\Delta U_{\text{пер}}$ при облучении определяется из (8.15) и (8.16) как

$$\Delta U_{\text{пер}} = U_{\text{пер}} - U_{\text{пер0}}. \tag{8.17}$$

Быстродействие КМОП логических элементов определяется временами задержки распространения сигнала $t^{10}_{\text{зр}}$ и $t^{01}_{\text{зр}}$, которые рассчитываются с помощью выражений [7]:

$$t^{10}_{\text{зр}} = C\,U_{\text{пит}}/[2A_{\text{n}}K_{\text{n}}(U_{\text{пит}} - U_{\text{n}})^2]; \tag{8.18}$$

$$t^{01}_{\text{зр}} = C\,U_{\text{пит}}/[2A_{\text{p}}K_{\text{p}}\,(U_{\text{пит}} - |U_{\text{p}}|)^2], \tag{8.19}$$

где $C = C_{\text{вых}} + C_{\text{н}}$ – суммарная емкость на выходе ИМС ($C_{\text{н}}$ – емкость нагрузки); A_{n} и A_{p} – коэффициенты, зависящие от числа входов логических элементов (табл. 8.1).

Влияние облучения на динамические параметры КМОП ИМС удобнее рассматривать в виде их относительных изменений, учитывая выражения (8.18) и (8.19):

$$t^{10}_{\text{зр}}/t^{10}_{\text{зр0}} = [(U_{\text{пит}} - U_{\text{n0}})/(U_{\text{пит}} - U_{\text{n0}} - \Delta U_{\text{n}})]^2 K_{\text{n0}}/K_{\text{n}}; \tag{8.20}$$

$$t^{01}_{\text{зр}}/t^{01}_{\text{зр0}} = [(U_{\text{пит}} - |U_{\text{p0}}|)/(U_{\text{пит}} - |U_{\text{p0}} + \Delta U_{\text{p}}|)]^2 K_{\text{p0}}/K_{\text{p}}. \tag{8.21}$$

Полученные выражения (8.20) и (8.21) являются универсальными для расчетов времен задержки любых логических КМОП элементов, поскольку не содержат коэффициенты, зависящие от числа входов М в ИМС.

На рис. 8.5 показаны рассчитанные из выражений (8.15)–(8.17) дозовые зависимости изменений напряжения переключения $\Delta U_{\text{пер}}$ логических КМОП элементов НЕ, а на рис. 8.6 – элементов 2И-НЕ при различных электрических режимах.

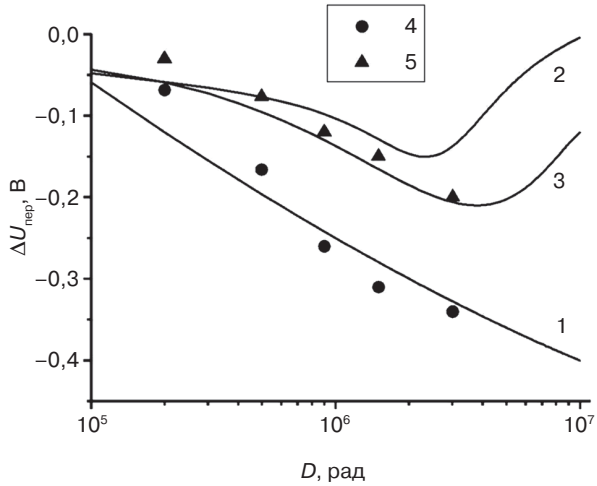


Рис. 8.5. Зависимости изменений порога переключения $\Delta U_{\text{пер}}$ от дозы гамма-излучения для логических КМОП элементов НЕ (1594ЛН1) при различных электрических режимах: 1–3 – расчет; 4 и 5 – эксперимент; 1 и 4 – $U_{\text{CC}} = 0$ В; 2 – 3 В; 3 и 5 – 5 В

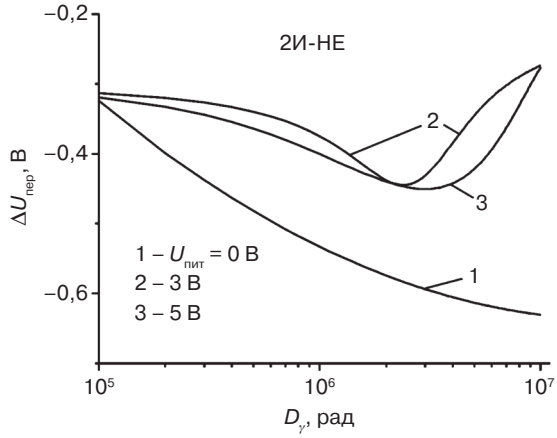


Рис. 8.6. Расчетные зависимости изменений D$U_{пер}$ от дозы гамма-излучения для логических КМОП элементов 2И-НЕ при различных электрических режимах

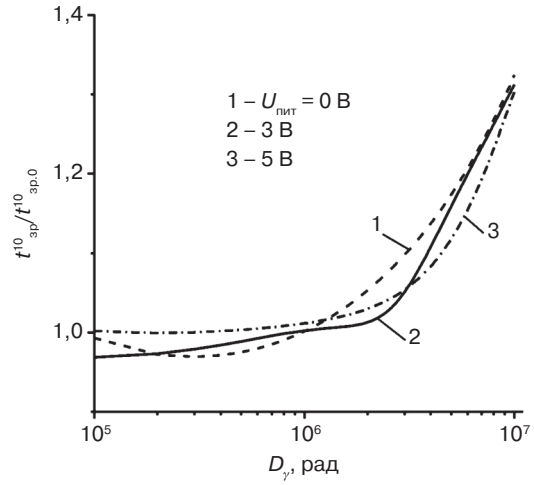


Рис. 8.7. Расчетные дозовые зависимости относительных изменений $t^{10}_{зр}/t^{10}_{зр.0}$ логических КМОП элементов при различных электрических режимах

На рис. 8.5 для сравнения представлены экспериментальные данные, полученные при облучении КМОП ИМС 1594ЛН1 гамма-квантами Co^{60}. Наблюдается достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Полученные из выражений (8.20) и (8.21) расчетные дозовые зависимости относительных изменений времен задержки любых логических КМОП элементов (НЕ, 2И-НЕ и др.) при различных электрических режимах показаны на рис. 8.7 и 8.8.

Таким образом, с помощью расчетно-экспериментального метода определены расчетные дозовые зависимости основных параметров тестовых n- и p-канальных транзисторных МОП-структур, а также двух типов КМОП ИМС: 1594ЛН1 (логические элементы НЕ) и 1594ЛА3 (логические элементы 2И-НЕ) при различ-

ных электрических режимах в диапазоне доз $D_\gamma = 10^5 \div 10^7$ рад. Полученные расчетные зависимости могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости КМОП ИМС серии 1594 в пределах каждой партии изделий одного типа.

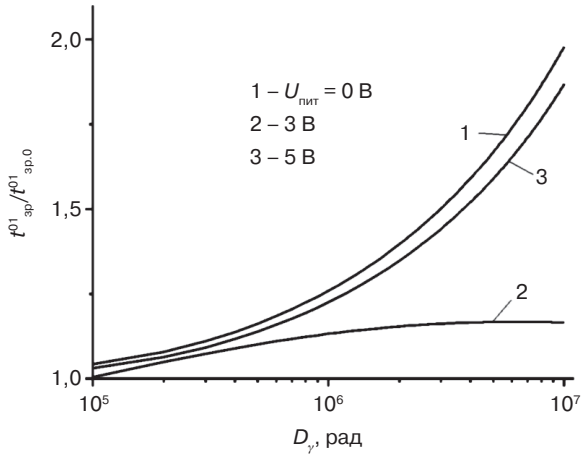


Рис. 8.8. Расчетные дозовые зависимости относительных изменений $t^{01}_{зр}/t^{01}_{зр.0}$ логических КМОП элементов при различных электрических режимах

8.1.2. Метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости

Рассмотрим рекомендуемый для практического использования метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового облучения и токового отжига.

Метод предназначен для индивидуального отбора КМОП ИМС с повышенной радиационной стойкостью, а также для прогнозирования изменений параметров ИМС в процессе облучения. Данный метод также может быть использован на входном контроле комплектации изделий на предприятиях-изготовителях радиоэлектронной аппаратуры, работающей в условиях воздействия ионизирующих излучений.

В результате применения метода из партии микросхем отбираются только изделия, радиационная стойкость которых превышает значение показателя стойкости по дозе D_o, установленное ТУ.

Структурная схема метода представлена на рис. 8.9. Метод включает следующие компоненты: тестовое облучение КМОП ИМС с контролем параметров; отбор ИМС с повышенной радиационной стойкостью; токовый отжиг облученных ИМС с контролем параметров; расчет дозовых зависимостей параметров ИМС; выборочный контроль результатов отбора (прогнозирования).

Тестовое облучение включает: маркирование изделий всей партии, облучение всех ИМС дозой (1–3) D_o и измерение критериальных параметров в процессе облучения.

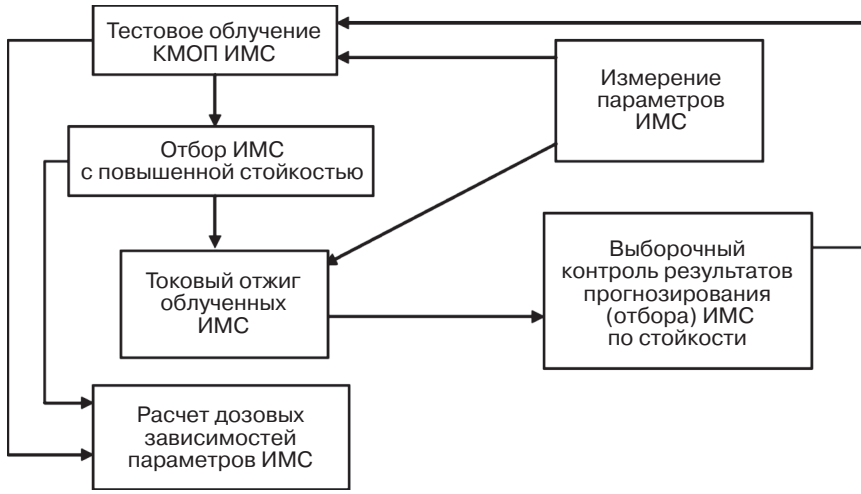


Рис. 8.9. Структурная схема метода прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового облучения

Отбор ИМС с повышенной радиационной стойкостью осуществляется таким образом, что изделия, критериальные параметры которых не соответствуют нормам ТУ при облучении, удаляются из классифицируемой партии и фиксируются дозы их отказов.

Токовый отжиг КМОП ИМС проводится для восстановления исходных параметров оставшихся после отбора облученных ИМС. Режим токового отжига определяется для каждого типономинала ИМС в соответствии со специальной методикой [9].

После токового отжига измеряются основные электрические параметры отобранных КМОП ИМС. Все микросхемы, у которых параметры соответствуют нормам ТУ, признаются годными для эксплуатации в условиях облучения при дозах (1–3) D_o.

Следует отметить, что при кратковременном токовом отжиге практически не снижается надежность микросхем по сравнению с длительным термическим отжигом, так как продолжительность токового отжига не превышает 60 с, а нейтрализация радиационно-индуцированных зарядов в КМОП ИМС эффективно происходит за счет комплексного инжекционного и теплового воздействия переменного тока, протекающего через структуру ИМС [9].

Расчет дозовых зависимостей параметров КМОП ИМС проводится по результатам испытаний микросхем, показавших повышенную радиационную стойкость, с помощью регрессионного анализа. В результате расчетов для данной партии ИМС прогнозируется их радиационная стойкость в пределах доз (0,1–3,0) D_o.

Выборочный контроль результатов отбора проводится для каждого типономинала ИМС. Объем выборки определяется в соответствии с ТУ. Микросхемы выборки облучают до значения дозы D_o. В процессе облучения измеряют критериальные параметры ИМС. Группу повышенной радиационной стойкости принимают, если все ИМС выборки удовлетворяют нормам ТУ.

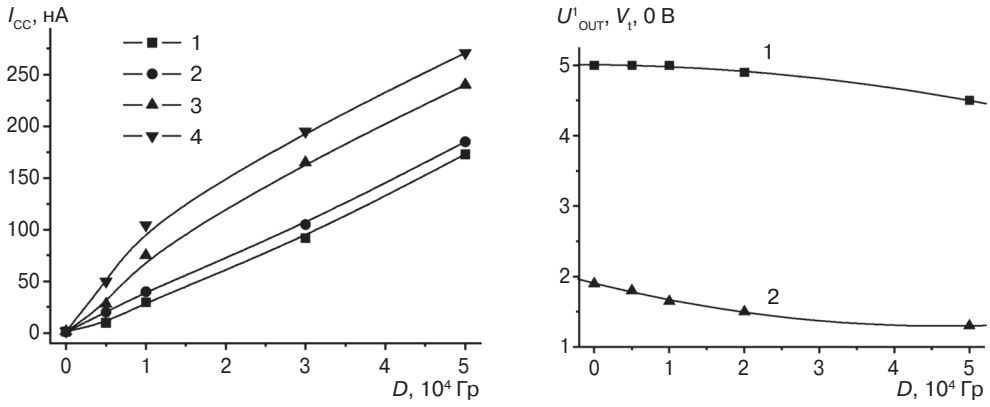


Рис. 8.10. Дозовые зависимости параметров КМОП ИМС 1554ЛН1: I_{CC} (1, 2, 3, 4 – номера образцов ИМС) (*а*); 1 – $U_{OUT}{}^1$, 2 – V_t (*б*)

В качестве примера рассмотрим результаты радиационного отбора ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового гамма-облучения пробной партии (4 шт.) КМОП ИМС типа 1554ЛН1 (логические элементы НЕ). Показатель радиационной стойкости КМОП ИС был определен на уровне дозы облучения $D_o = 1 \cdot 10^4$ Гр.

Облучение ИМС гамма-квантами Co^{60} проводилось на установке «Исследователь» в диапазоне доз (0,5÷5,0) D_o. Результаты тестового облучения образцов КМОП ИМС 1554ЛН1 представлены на рис. 8.10*а*, *б*.

В соответствии с ТУ в качестве критериев отказов были приняты: ток потребления $I_{CC} < 100$ нА, порог переключения $V_t > 1{,}5$ В.

В результате были отобраны следующие образцы ИМС с повышенной стойкостью: обр. № 1 (по параметру I_{CC} допустимая доза $D_Д = 3{,}2 \cdot 10^4$ Гр); обр. № 2 (по параметру $I_{CC} - D_Д = 3 \cdot 10^4$ Гр); обр. № 3 (по параметру $I_{CC} - D_Д = 1{,}6 \cdot 10^4$ Гр).

Токовый отжиг отобранных микросхем 1554ЛН1 проводился при величине переменного тока 500 мА, частоте 50 Гц, длительности воздействия 40 с.

Выборочный контроль результатов отбора проводился на примере образцов № 1 и 2. В табл. 8.2 приведены исходные значения параметров КМОП ИМС 1554ЛН1, значения параметров после первого облучения при $D_1 = 1 \cdot 10^4$ Гр, а также после токового отжига. Показаны также данные после повторного контрольного облучения ИМС при $D_2 = 1 \cdot 10^4$ Гр, где результаты оказались аналогичными с результатами после первого облучения.

Таблица 8.2. Изменение параметров КМОП ИМС 1554ЛН1 после гамма-облучения и токового отжига

Режим воздействия	**I_{CC}, нА**		**V_t, В**	
	Обр. № 1	**Обр. № 2**	**Обр. № 1**	**Обр. № 2**
До облучения	1,4	1,0	1,74	1,79
$D_1 = 1 \cdot 10^4$ Гр	29,6	40,0	1,54	1,55
Токовый отжиг	4,0	3,6	1,68	1,87
$D_2 = 1 \cdot 10^4$ Гр	32,8	44,2	1,56	1,65

Из табл. 8.2 следует, что для образца № 2 с максимальными изменениями параметров относительная погрешность прогнозирования по параметру V_t составила 6,1%, а по параметру I_{CC} – 9,5%.

Как уже отмечалось выше, применение токового отжига практически не влияет на надежность КМОП ИМС. Для предварительной оценки надежности КМОП ИМС 1554ЛН1 после облучения и токового отжига использовался дополнительный термический отжиг при 358 К в течение 168 ч. Параметры КМОП ИМС после термического отжига не ухудшились (I_{CC} = 1,5÷4,0 нА; V_t = 1,76÷1,9 В), т.е. можно заключить, что надежность ИС не снизилась.

Математическая обработка результатов испытаний отобранных образцов КМОП ИМС проводилась следующим образом. На основе экспериментальных данных были рассчитаны аналитические зависимости параметров КМОП ИМС от дозы облучения. Для расчетов использовалась программа регрессионного анализа [6], которая позволяет определять вид зависимости и вычислять коэффициент парной корреляции R между числовыми последовательностями. Расчетные данные считались достоверными, если выполнялось условие: $|R| > 0{,}8$.

В случае микросхемы 1554ЛН1 (образец № 1) для тока потребления I_{CC}, порога переключения V_t и выходного напряжения высокого уровня $U_{OUT}{}^1$ были определены следующие аналитические зависимости параметров от дозы гамма-облучения:

$$I_{CC}(D) = 0{,}269 + 24{,}988D + 1{,}908D^2; \tag{8.22}$$

$$V_t(D) = 1{,}905 - 0{,}262D + 0{,}0283D^2; \tag{8.23}$$

$$U_{OUT}{}^1(D) = 5{,}009 - 0{,}0111D - 0{,}0182D^2. \tag{8.24}$$

Таким образом, в пределах партии КМОП ИМС данного типа можно прогнозировать их радиационную стойкость для конкретных микросхем путем тестового облучения и отбора образцов ИМС с последующей математической обработкой результатов испытаний, применяя регрессионный анализ.

Испытания логических КМОП ИМС серий 564 и 1554 показали, что погрешность метода отбора (прогнозирования) КМОП ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового электронного или гамма-облучения не превышает 5–10%.

8.2. Расчетно-экспериментальные методы прогнозирования радиационной стойкости биполярных и БиКМОП приборов

В данном разделе представлены разработанные методы оценки (прогнозирования) радиационной стойкости тестовых биполярных транзисторов и БиКМОП БИС более детально рассмотренные в работах [10–13].

Оценка радиационного изменения параметров тестовых биполярных транзисторных структур проводилась с помощью расчетно-экспериментального метода с использованием регрессионного анализа [6]. Было получено выражение, описывающее изменение коэффициента усиления n-p-n-транзистора в зависимости от времени после облучения ($D = 10^4$ Гр) в пассивном электрическом режиме (рис. 8.7):

$$\Delta\beta = 191{,}553 - 5{,}255 \lg t. \tag{8.25}$$

С помощью расчетно-экспериментального метода проводилась также оценка изменения коэффициента усиления n-p-n- и p-n-p-транзисторов в зависимости от дозы облучения. В общем виде эти зависимости описываются полиномом второй степени:

$$Y = A + BX + CX^2, \tag{8.26}$$

где $Y = \Delta\beta$; X – доза облучения D; A, B и C – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 8.3 для каждого типа транзисторов.

Таблица 8.3. Значения постоянных коэффициентов в уравнении (8.26)

Тип транзистора	Пассивный режим			Активный режим		
	A	***B***	***C***	***A***	***B***	***C***
n-p-n	87,318	76,922	–24,532	125,087	95,118	–35,897
p-n-p	71,649	4,529	0	66,345	29,271	–14,288

На основе экспериментальных данных (рис. 8.12 и 8.16) с использованием методов регрессионного анализа [6] был выполнен расчет дозовых зависимостей параметров биполярных КН типа 1467СА2Р в виде полиномов третьей степени:

$$A_U/A_{U.0} = -0{,}072 + 0{,}506D + 3{,}264D^2 - 1{,}436D^3; \tag{8.27}$$

$$I_{oh}/I_{oh.0} = 0{,}772 - 0{,}167D + 0{,}682D^2 - 0{,}24D^3 \tag{8.28}$$

и биполярных ОУ типа 1473УД1Т в виде полиномов второй степени:

$$A_U/A_{U.0} = -4{,}946 + 18{,}939D - 1{,}375D^2; \tag{8.29}$$

$$K_{svr}/K_{svr.0} = -0{,}072 + 0{,}506D + 3{,}264D^2. \tag{8.30}$$

В ходе исследования БиКМОП БИС проводилось моделирование изменения величины тока потребления БИС 5559ИН2Т в зависимости от дозы стационарного излучения. Была выбрана регрессионная модель в виде полинома второй степени, которая достаточно хорошо отражает зависимость $I_{CC}(D)$ при дозах до $2{,}4 \cdot 10^5$ ед. Для нахождения коэффициентов линии регрессии использовался метод наименьших квадратов [6]. В результате были получены следующие аналитические зависимости тока потребления БИС (I_{CC}, мкА) от дозы облучения (D, 10^4 ед.).

Так, для облучения при $T = +25$ °С ток потребления высокого уровня определяется выражением:

$$I_{CC} = 611{,}257 - 3{,}252D + 0{,}123D^2; \tag{8.31}$$

а ток потребления низкого уровня:

$$I_{CC} = 357{,}571 - 2{,}674D + 0{,}105D^2. \tag{8.32}$$

Для облучения при $T = -60$ °С ток потребления высокого уровня определяется выражением:

$$I_{CC} = 496{,}086 - 2{,}645D + 0{,}129D^2; \quad (8.33)$$

ток потребления низкого уровня:

$$I_{CC} = 288{,}543 - 2{,}014D + 0{,}099D^2. \quad (8.34)$$

Полученные расчетные зависимости (8.27)–(8.34) могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости биполярных аналоговых ИМС, а также БиКМОП БИС данных типов к воздействию стационарного ионизирующего излучения.

В связи с различиями в технологии изготовления микросхем на разных предприятиях полученные расчетные зависимости могут дополнительно корректироваться для прогнозирования радиационной стойкости биполярных и БиКМОП ИМС в пределах каждой партии изделий одного типа. При этом для уточнения значений постоянных коэффициентов в уравнениях (8.27)–(8.34) проводится тестовое облучение испытательной выборки из отдельной партии изделий для каждого типономинала ИМС. Объем выборки ИМС определяется в соответствии с техническими условиями.

8.3. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования радиационной стойкости МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ

В данном разделе представлен расчетно-экспериментальный метод прогнозирования радиационной стойкости МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ по результатам их испытаний на надежность, разработанный авторами [1, 14].

С использованием регрессионного анализа на основе экспериментальных данных проводится расчет дозовых зависимостей порогового напряжения запоминающих элементов ЭСППЗУ при облучении. Зависимости $U_T(D)$ для состояний записи и стирания можно записать в следующем виде:

$$U_T = A + B \lg D; \quad (8.35)$$

$$U_T = A_1 + B_1 \lg D + C (\lg D)^2. \quad (8.36)$$

Таким же образом из экспериментальных результатов при воздействии циклов перезаписи информации соответственно можно получить следующие расчетные зависимости $U_T(N)$:

$$U_T = A_2 + B_2 \lg N + C_1 (\lg N)^2; \quad (8.37)$$

$$U_T = A_3 + B_3 \lg N + C_2 (\lg N)^2. \quad (8.38)$$

Здесь A, B, A_1, B_1, C, A_2, B_2, C_1, A_3, B_3, C_2 – постоянные коэффициенты.

Например, для ячеек памяти были определены следующие значения постоянных коэффициентов в уравнениях (8.32) и (8.34): $A = 3{,}701$; $B = -1{,}653$; $A_2 = 3{,}942$; $B_2 = 0{,}546$; $C_1 = -0{,}115$.

Полученные аналитические зависимости (8.35)–(8.38) могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости запоминающих элементов ЭСППЗУ. В частности, из уравнений (8.35) и (8.37) получим:

$$\lg D = [-A + A_2 + B_2 \lg N + C_1 (\lg N)^2]/B. \quad (8.39)$$

Следовательно, проведя предварительные испытания пробных выборок элементов ЭСППЗУ на радиационную стойкость и надежность, можно определить значения постоянных коэффициентов в уравнениях (8.35)–(8.39). Затем в пределах одной партии ЭСППЗУ по результатам испытаний при воздействии циклов перезаписи определяются предельные дозы радиации для допустимых значений U_T.

8.4. Методы повышения устойчивости ИМС к воздействию проникающей радиации

В данном разделе рассмотрим основные методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП микросхем [1, 13–23].

8.4.1. Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости КМОП и БиКМОП микросхем

Устойчивость логических КМОП ИМС и БиКМОП БИС к воздействию ионизирующих излучений, тиристорному эффекту (ТЭ) и статическому электричеству обеспечивается следующими решениями: применение кольцевых затворов МОП-транзисторов, охранных колец; использование низкотемпературного окисления под затвор (пирогенное окисление при температуре $T = 850$ °С), а также термообработки подзатворного окисла при $T \leq 850$°С.

На рис. 8.11 приведены эскизы топологии используемого в исследуемой БИС n-канального МОП-транзистора (*а*) и разрезы (*б*, *в*) его вертикальных сечений. Охранное кольцо p^+-типа с концентрацией примеси $N > 10^{18}$ см$^{-3}$, сформированное под локальным слоем SiO_2, исключает возможность инверсии типа проводимости в процессе облучения. Особенностью данного конструктивно-технологического решения является необходимость выполнения условия – область охранного кольца должна быть выполнена с зазором от области стока на величину $d_{min} \geq 2{,}6$ мкм (рис. 8.11*в*), что исключает вероятность возникновения эффекта снижения пробивных напряжений стока.

Для исключения образования проводящих каналов утечек типа «исток–сток» в области выхода затвора на локальный слой SiO_2 затвор выводится на область p^+ охранного кольца по тонкому подзатворному окислу.

На рис. 8.12 представлены эскиз топологии (*а*) и разрез топологии (*б*) конструкции n-канального МОП-транзистора с повышенной устойчивостью к ионизирующему излучению, где охранное p^+-кольцо формируется под тонким слоем подзатворного диэлектрика в технологическом процессе одновременно с формированием областей стока и истока p-канальных МОП-транзисторов. Такая конструкция транзистора используется в периферийных блоках кристалла БИС, поскольку кроме эффекта исключения утечек по цепям «исток–сток» в процессе

облучения с дозой до 10^6 рад эта конструкция обеспечивает более высокие (не менее 15 В) значения пробивных напряжений области стока.

Исследовалось две группы образцов МОП-структур и логических КМОП ИМС на их основе. Первая группа была изготовлена по стандартной эпитаксиально-планарной технологии. У второй группы устойчивость КМОП ИМС к воздействию ионизирующих излучений обеспечивалась приведенными выше конструктивно-технологическими методами.

На рис. 8.13 представлены дозовые зависимости порогового напряжения U_T p-канальных транзисторных МОП-структур, отличающихся технологией изготовления. Наблюдается более значительное увеличение значений U_T при облучении структур, изготовленных по обычной технологии, по сравнению с радиационно-стойкими МОП-структурами.

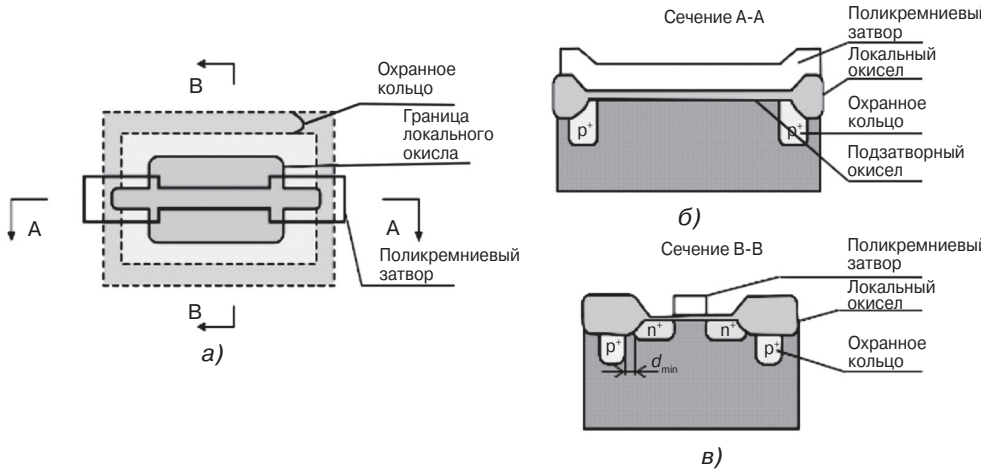


Рис. 8.11. Эскиз топологии n-МОП транзистора с повышенной устойчивостью к ионизирующим воздействиям (*а*) и разрезы (*б*, *в*) его вертикальных сечений

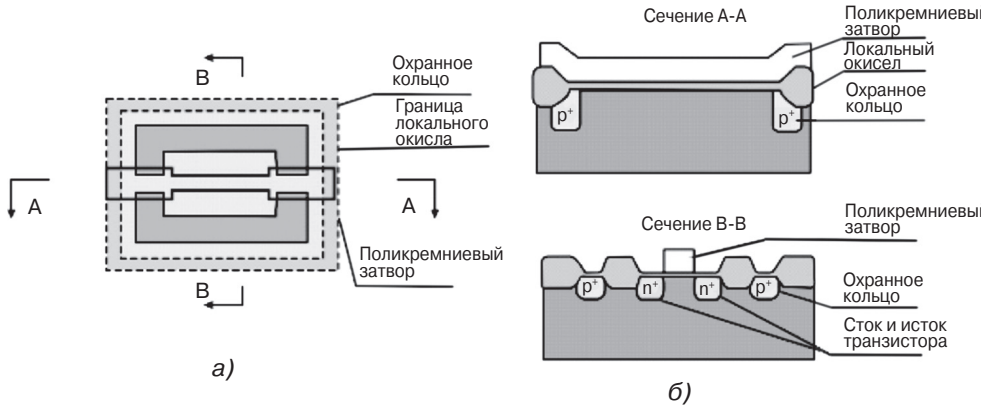


Рис. 8.12. Эскиз топологии (*а*) и разрез (*б*) конструкции n-канального МОП транзистора с повышенными значениями пробивных напряжений «сток–исток»

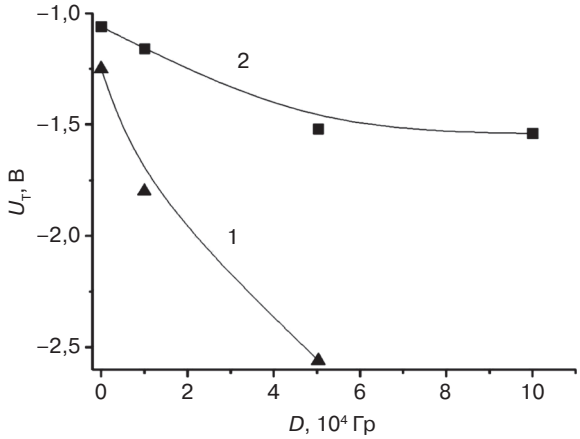


Рис. 8.13. Дозовые зависимости порогового напряжения p-канальных транзисторных МОП-структур, изготовленных по обычной технологии (1) и по радиационностойкой технологии (2)

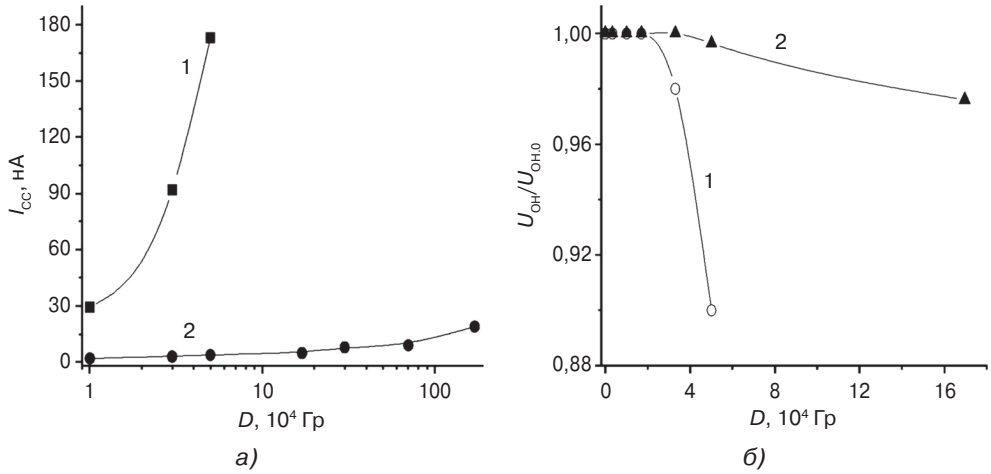


Рис. 8.14. Дозовые зависимости тока потребления (*а*) и относительного изменения выходного напряжения высокого уровня (*б*) КМОП ИМС, изготовленных по стандартной технологии (1) и по радиационностойкой технологии (2)

На рис. 8.14 представлены дозовые зависимости тока потребления I_{CC} (*а*) и выходного напряжения высокого уровня U_{OH} (*б*) КМОП ИМС (логических элементов НЕ), изготовленных по стандартной технологии (кривая 1) и по специальной радиационностойкой технологии (кривая 2). Видно, что в последнем случае величины I_{CC} и U_{OH} начинают незначительно изменяться только при дозе $D \geq 10^5$ Гр.

Таким образом, установлено, что радиационная стойкость транзисторных МОП-структур и КМОП ИМС на их основе в значительной степени определяется особенностями технологии изготовления. Использование конструктивно-технологической реализации КМОП ИМС, направленной на обеспечение их устой-

чивости к ионизирующим излучениям, позволили существенно (на 1–2 порядка) повысить уровень их радиационной стойкости. Новизна конструкции подобных радиационностойких КМОП ИМС подтверждена свидетельствами об официальной регистрации топологии интегральных микросхем [22, 23].

8.4.2. Стандартные конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИМС

Схемотехнические методы повышения радиационной стойкости ИМС предполагают введение в состав известных схемотехнических решений базовых элементов (триггеров, усилителей, компараторов, сумматоров и т.д.), новых элементов (транзисторов, диодов, конденсаторов) и новых связей, включая внутренние (в структуре полупроводника) обратные связи по току и/или напряжению, имеющие целью скомпенсировать отрицательные воздействия ИИ на работу этих элементов.

Создание новых схемотехнических решений, как правило, не требует больших временных затрат, проведения дорогостоящих и длительных экспериментов, дорогостоящего технологического оборудования и материалов. Большинство задач решается с помощью численных экспериментов и с помощью различных пакетов САПР.

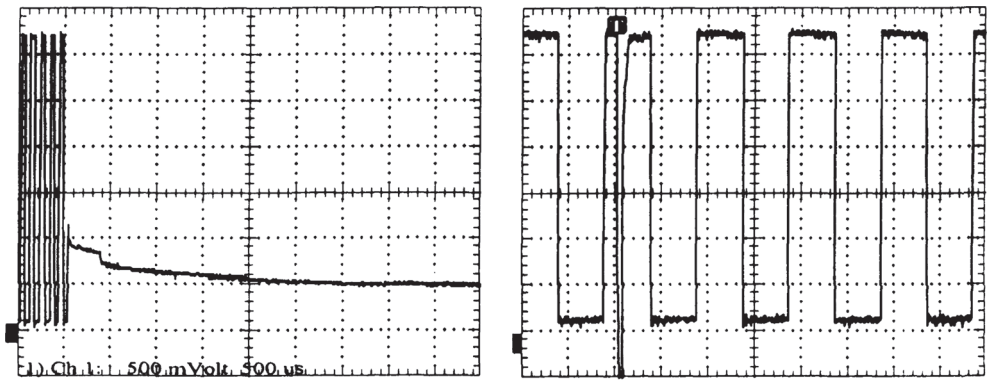
Разработка схемотехнического метода повышения радиационной стойкости ИМС четырехканального микромощного компаратора напряжения 1467СА3Т, изготовленного по биполярной технологии, проводилась при исследовании воздействия импульсного ионизирующего излучения (ИИИ) с использованием лазерного имитатора «РАДОН-5М» при температурах от +25 °С до +125 °С.

В результате экспериментальных исследований ИМС 1467СА3Т было обнаружено возникновение тиристорного эффекта (ТЭ) при воздействии ИИИ, что не характерно для биполярных ИМС (рис. 8.15*а*). Уровень возникновения ТЭ уменьшался на порядок при увеличении температуры облучения от комнатной до +125 °С.

В результате схемотехнического анализа было установлено, что тиристорный эффект возникает в схеме «токового зеркала», в области n-p-n-транзистора в диодном включении, подключенного контактом p-типа к источнику питания (рис. 8.16). Воздействие ИИИ переводит паразитную тиристорную структуру в низкоомную область передаточной характеристики, что вызывает протекание аномально больших (амперных) токов в цепи питания. Вывод ИМС из данного состояния возможен только путем кратковременного принудительного отключения питания.

После того как микросхема была переработана, а именно n-p-n-транзистор в диодном включении был исключен из электрической схемы и топологии, были проведены дополнительные экспериментальные исследования новых образцов, которые показали, что ТЭ в ИМС КН полностью исключен как при комнатной, так и при повышенной температуре (рис. 8.15*б*).

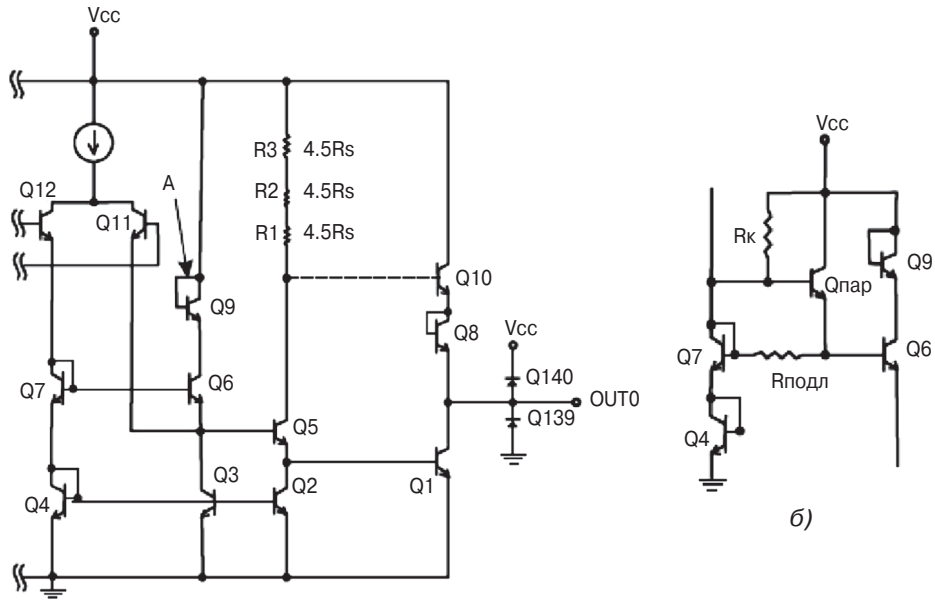
Результаты работы свидетельствуют о необходимости проведения исследований радиационного поведения биполярных ИМС в диапазоне температур, а также контроля ТЭ в ИМС независимо от технологии изготовления, так как неудачные схемотехнические решения могут приводить к ТЭ даже в ИМС, выполненных по относительно устойчивой к ТЭ биполярной технологии.



500 мВ/дел., 500 мкс/дел. 500 мВ/дел., 50 мкс/дел.

а) *б)*

Рис. 8.15. Осциллограммы выходного напряжения ИМС 1467СА3Т при воздействии ИИИ с уровнем $7{,}5 \cdot 10^{10}$ ед./с до (*а*) и после (*б*) исключения n-p-n-транзистора в диодном включении



а) *б)*

Рис. 8.16. Часть электрической схемы микромощного четырехканального компаратора напряжения (*а*) и паразитная тиристорная структура (*б*)

Рассмотрим подробнее новый способ повышения устойчивости микромощного БиКМОП элемента к эффекту защелкивания. Наличие дополнительных (по сравнению с КМОП триггерами) n-p-n-транзисторов и токозадающих резисторов в БиКМОП элементе кроме увеличения площади приводит к появлению эффекта защелкивания при увеличенных амплитудах выбросов напряжений и им-

пульсов тока в шинах питания и общей шине, обусловленных выходными токами n-p-n-транзисторов.

Новое конструктивно-схемотехническое решение базового микромощного БиКМОП-элемента (рис. 8.17) позволяет обеспечить устойчивость к эффекту защелкивания без увеличения площади кристалла: МОП-транзисторы VT1–VT3, два биполярных n-p-n-транзистора VT4, VT5 и токоограничивающий резистор R1 в цепи базы VT5 (рис. 8.17*а*).

На рис. 8.17*б* представлена эквивалентная электрическая схема этого же элемента, но уже с включением реально существующих в объеме полупроводника паразитных элементов, запускающих механизм защелкивания при протекании по шинам питания коммутируемых выходных токов нагрузки.

Здесь показаны эти паразитные транзисторы VT6 p-n-p-типа и VT7 n-p-n-типа тиристорной структуры, непосредственно ответственные за включение эффекта защелкивания.

Эквивалентный резистор R_{S1} представляет собой распределенное омическое сопротивление области n-типа, соединяющей карман p-канального транзистора с шиной питания. Этот резистор подключен параллельно переходу эмиттер-база паразитного p-n-p-транзистора VT6 тиристорной структуры. Именно через эту область, обозначенную как R_{S1}, протекает ток заряда емкости нагрузки БиКМОП элемента, необходимый для увеличения (или сохранения) быстродействия элемента при его переключении из состояния логического «0» в «1» и наоборот.

Физическая сущность данного решения заключается в том, что при выборе (расчете) определенных, ниже сформированных условий величина протекающего через R_{S1} тока при заряде/разряде емкости нагрузки $C_н$ не позволит создать величину падения напряжения, необходимую для отпирания p-n-p-транзистора и включения тиристорной структуры.

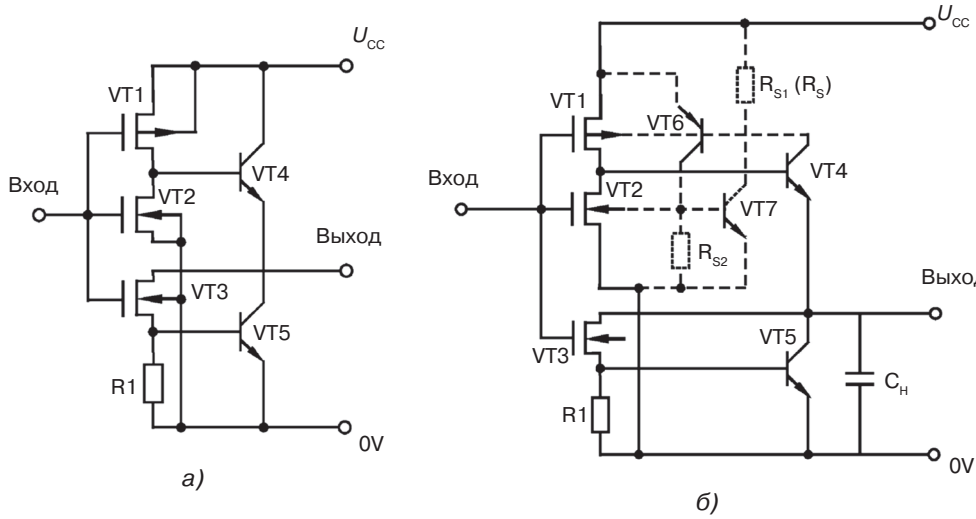


Рис. 8.17. Электрическая схема БиКМОП элемента (*а*) и эквивалентная схема с выделением паразитных элементов тиристорной цепи (*б*)

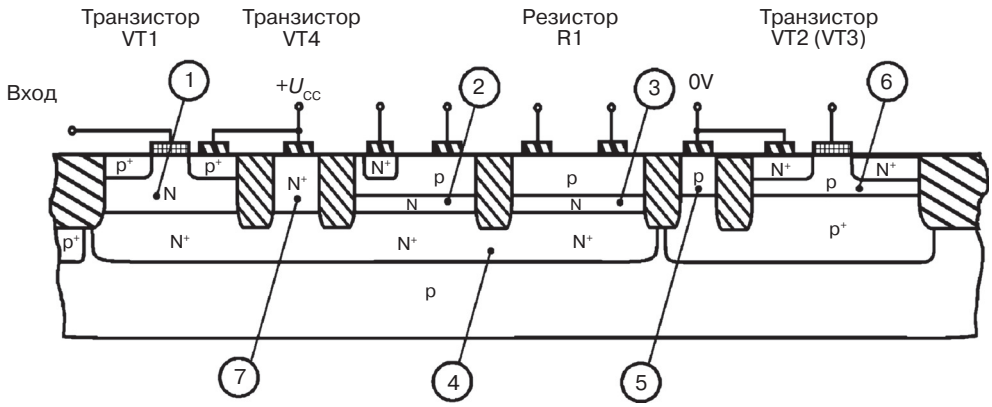


Рис. 8.18. Эскиз структуры БиКМОП элемента с повышенной устойчивостью к тиристорному эффекту

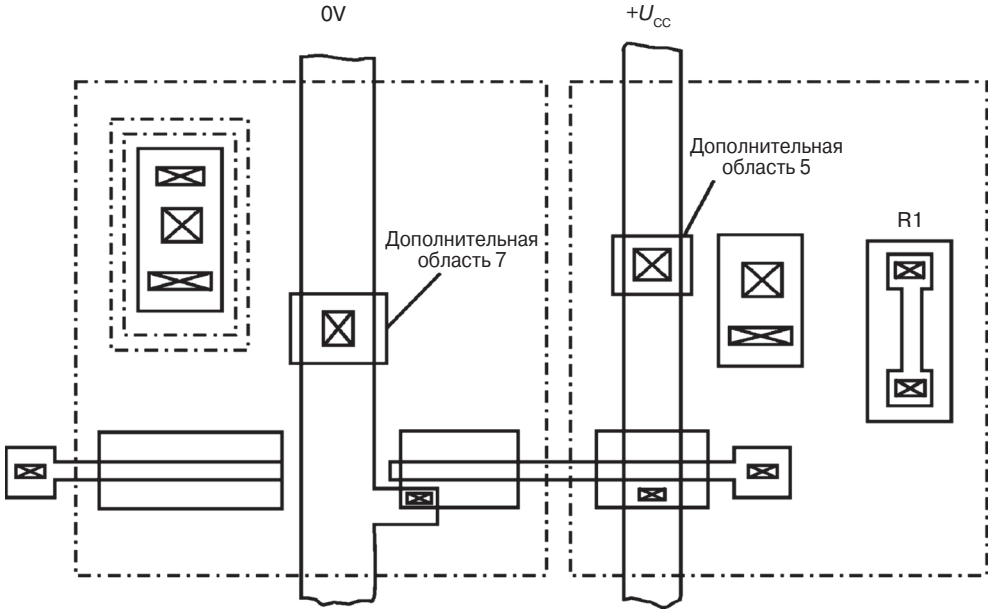


Рис. 8.19. Эскиз топологии БиКМОП элемента с повышенной устойчивостью к тиристорному эффекту

На рис. 8.18 представлен эскиз вертикальной структуры этого элемента, а на рис. 8.19 – эскиз его топологического решения в планарной плоскости.

В областях p-типа сформированы n-канальные транзисторы VT2 и VT3, в областях со скрытым слоем n-типа сформированы соответственно p-канальный транзистор VT1, резистор R1 и n-p-n-транзистор VT4. Второй n-p-n-транзистор VT5 сформирован в области со скрытым слоем n-типа.

Как видно из рис. 8.18, формирование одного общего скрытого слоя n^+-типа для трех компонентов схемы (VT1, VT4 и R1) позволяет использовать для контак-

та к нему только одну область 7 n^+-типа вместо трех, как это делается в известных решениях. Кроме того, подобное решение обеспечивает выполнение сразу трех функций:

1) подключение области 1 кармана VT1 к шине питания;

2) подключение источника питания U_{CC} к коллектору VT4;

3) обеспечение обратного смещения области кармана резистора R1.

Очевидно, что это позволяет существенно уменьшить площадь БиКМОП элемента за счет исключения ранее требовавшихся двух контактов к скрытому слою 4 n^+-типа.

Как видно из эквивалентной электрической схемы (рис. 8.17*б*), омическое сопротивление второй дополнительной p^+-области 7 подключено параллельно переходу эмиттер–база паразитного p-n-p-транзистора VT6 тиристорной структуры, и именно через это сопротивление протекает увеличенный выходной ток заряда емкости нагрузки в процессе переключения БиКМОП элемента.

Используя известные выражения, описывающие механизм включения тиристорной структуры [24, 25], легко вывести выражения для расчета предельного значения величины этого резистора, при котором тиристорный эффект еще не будет проявляться:

$$R_{S\max} = \frac{U^{p}_{ПСК}}{I^{p}_{C} \cdot \beta_{N}}, \tag{8.40}$$

где $U^{p}_{ПСК}$ – прямое падение напряжения на переходе сток–карман p-МОП транзистора VT1; I^{p}_{C} – ток стока транзистора VT1; β_{N} – коэффициент усиления тока базы n-p-n-транзистора VT4.

Только в случае превышения величины $R_{S\,max}$ при заданных $U^{p}_{ПСК}$, I^{p}_{C} и β_{N} паразитные транзисторы включаются, вводя БиКМОП элемент в нерабочее состояние.

Выражение (8.40) является необходимым, но не достаточным условием «подавления» тиристорного эффекта. Необходимо учитывать и влияние на работу элемента второй дополнительной области.

Для гарантированного исключения возникновения тиристорного эффекта в предложенном БиКМОП элементе необходимо поддерживать определенное соотношение между величинами омических сопротивлений двух введенных в структуру дополнительных областей 5 и 7 (p и n^+-типов). А именно, должно обеспечиваться выполнение следующего соотношения:

$$\left(\beta_{N}^{VT4} \cdot I_{C\,МАКС}^{VT1} - \frac{U^{p}_{ПИК}}{R_{S1}}\right) \cdot \beta_{p}^{VT6} \cdot R_{S2} < U^{n}_{ПИК}, \tag{8.41}$$

где $\beta^{VT4}{}_{N}$ – коэффициент усиления тока базы VT4; $I^{VT1}{}_{C\,МАКС}$ – максимальное значение тока стока VT1 при максимальных уровнях напряжения на затворе и стоке; R_{S1} – омическое сопротивление области 5 n-типа; R_{S2} – омическое сопротивление дополнительной области 7 p-типа; $\beta^{VT4}{}_{p}$ – коэффициент усиления тока базы паразитного транзистора p-n-p (исток p-МОП транзистора – n-карман p-МОП транзистора – p-карман n-канального транзистора); $U^{p}{}_{ПИК}$, $U^{n}{}_{ПИК}$ – прямое падение

напряжений «исток–карман» соответственно p-канального и n-канального транзисторов.

Используя выражения (8.40) и (8.41), при разработке БИС задаются соответствующие ограничения в подпрограмме топологического редактора используемой системы автоматического проектирования (САПР), которая автоматически обеспечит их выполнение для любой геометрической конфигурации расположения элементов на топологии БИС.

Исследования экспериментальных образцов тестовой БиКМОП микросхемы, спроектированной на основе данного конструктивно-технологического решения, подтвердили факт отсутствия паразитного эффекта включения тиристорной структуры во всем диапазоне входных и питающих напряжений. По результатам проведенных исследований и технологических испытаний разработанные на основе предложенной конструкции библиотеки топологических решений БиКМОП элементов, реализующих стандартные логические функции, введены в САПР разрабатывающих подразделений ОАО «Интеграл».

Повышение устойчивости к воздействию ИИ КМОП логических ИМС требует специальной структуры в сравнении с бытовыми и промышленными ИМС, обладающей конструкторско-технологическими ноу-хау, а также специфических электрических параметров компонентов ИМС [26]. Такие изменения активной структуры компонентов в значительной степени увеличивают паразитные емкости компонентов и ухудшают быстродействие ИМС, что вызывает необходимость в применении специальных схемотехнических решений для их компенсации.

Вначале рассмотрим некоторые общие вопросы схемотехнического проектирования серии ИМС.

Для обеспечения работоспособности, снижения «ухода» электрических параметров и обеспечения оптимального сопряжения как ИМС единой серии, так и ИМС разных серий в составе аппаратуры серия быстродействующих логических КМОП ИМС должна разрабатываться на основе единой схемотехнической библиотеки базовых элементов (БЭ). Такой подход позволяет также обеспечивать технологичность ИМС, конструктивно-технологические запасы по электрическим параметрам, предельные режимы эксплуатации и характеристики надежности [27].

В состав схемотехнической библиотеки БЭ входят:

1) базовые логические элементы (ЛЭ),
2) элементы памяти (ЭП),
3) входные элементы согласования (ЭС),
4) выходные элементы согласования,
5) элементы защиты ЭС от воздействия электростатического заряда (ЭСЗ).

При разработке и моделировании электрических схем быстродействующих КМОП ИМС особое внимание должно уделяться схемотехнической оптимизации, позволяющей устранить ограничения, накладываемые параметрами активных компонентов ИМС со специальной структурой, а именно:

1) оптимизация для достижения максимального быстродействия электрических параметров активных компонентов ИМС с высокими пороговыми напряжениями, обеспечивающими устойчивость к дестабилизирующим факторам,

2) оптимизация для достижения максимального быстродействия цепей прохождения сигналов и соотношений размеров МОП-транзисторов,
3) оптимизация электрических схем элементов ИМС для минимизации их площади на кристалле ИМС.

Базовые ЛЭ

В качестве базовых ЛЭ в ИМС необходимо использовать стандартные КМОП статические ЛЭ типа И-НЕ, ИЛИ-НЕ, электрические схемы которых должны оптимизироваться с учетом факторов, описанных выше.

Элементы памяти

ЭП серии быстродействующих логических КМОП ИМС обычно представляют собой элементы статического типа и спроектированы на базе R-S триггеров, построенных на ЛЭ типа ИЛИ-НЕ. Конструкции активных компонентов ЭП также должны быть оптимизированы для обеспечения устойчивого хранения информации при воздействии ИИ. Более сложные типы ЭП, тактируемые уровнем и фронтом D и Dt-типа, с целью повышения быстродействия должны быть построены на основе «проходных» ключей с парафазной синхронизацией.

Входные элементы согласования

В качестве базового входного ЭС в серии КМОП быстродействующих ИМС рекомендуется использовать стандартный КМОП инвертор (транзисторы VT1, VT2, рис. 8.20) с порогом переключения $U_{cc}/2$.

Конструкции транзисторов VT1, VT2 также необходимо оптимизировать на минимальный уход порогового напряжения $U_т$ КМОП ЭС при воздействии ИИ и температуры. Для согласования ИМС серии с другими типами ИМС, в первую ТТЛ, в ИМС рекомендуется использовать входной ЭС с ТТЛ входными уровнями.

С целью повышения устойчивости к помехам по входам в серии ИМС целесообразно использовать также входные ЭС с гистерезисом.

Выходные ЭС

Все ИМС серии должны быть буферизированы по выходу для обеспечения требований по выходным токам и напряжениям и оптимизированы для работы в условиях воздействия ИИ и расширенного диапазона температур.

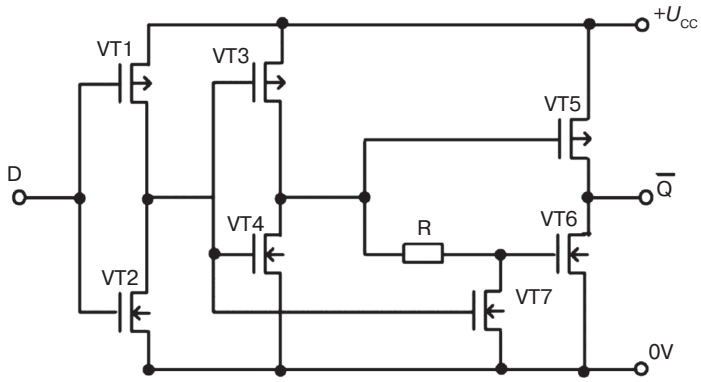


Рис. 8.20. Электрическая схема базового блока – инвертора ИМС «Шесть инверторов» с КМОП входными уровнями

Особую проблему для серии быстродействующих КМОП логических ИМС вследствие крутых фронтов выходных сигналов составляет проблема выбросов на выходных сигналах, генерируемых на паразитных индуктивностях цепей питания ИМС. Задача уменьшения выбросов на выходных сигналах должна решаться оптимизацией RC-цепей выходных каскадов для более плавного формирования фронтов выходных сигналов без существенного снижения быстродействия. Так, выходной ЭС с подавлением выбросов (рис. 8.19) содержит дополнительные компоненты VT7 и R, введение и оптимизация которых позволяет увеличить длительности фронтов выходных сигналов и снизить амплитуду выбросов с 2,3 до 1,6 В.

Другое немаловажное требование к КМОП интегральным схемам, которое диктуют современные условия их применения в космическом приборостроении – это устойчивость к воздействию статического электричества. Основным требованием, которое предъявляют к элементам защиты, является эффективность отвода заряда, характеризующаяся тем, что нарастание потенциала на входе в режиме воздействия статического электричества не должно приводить к необратимому пробою подзатворного диэлектрика или тепловому пробою p-n-переходов элементов схемы защиты. В связи с тем, что импульсные токи в момент разряда могут иметь большие значения (например, через схему защиты, устойчивую к электрическому разряду на уровне 3 кВ протекает импульсный ток 2 А), эффективность схем защиты во многом определяется их конструкцией, площадью и значением сопротивления.

Для обеспечения необходимого уровня стойкости микросхем к воздействию статического электричества рекомендуется использовать специально разработанный для этих целей ЭЗ (рис. 8.21). В этом случае защита входа ИМС состоит из двух ступеней. Первая ступень включает диоды VD1 и VD3 – вход–питание и VD2 – вход–земля. Для ограничения уровня потенциала на входах ЭС, который обусловлен физической инертностью по времени работы диодных структур последовательно диодам включен ограничивающий диффузионный резистор $R = 300 \pm 100$ Ом. В непосредственной близости от входного ЭС на кристалле ИМС расположена вторая ступень защиты, содержащая КМОП транзистор VT1 и n-МОП транзистор VT2 в диодном включении, стоки которых подключены к элементам входного буфера (затворам или стокам входных транзисторов). Элементы защиты выхода или входа–выхода имеют диодные структуры VD3 и VD4 большой площади, которые образованы стоками выходных транзисторов VT5 и VT6, а также транзистором VT7, расположенным между шинами U_{cc}, 0V, и обеспечивают эффективный и равномерный отвод статического электричества, препятствуя разрушению подзатворного диэлектрика и выхода ИМС прибора из строя. Новизна конструкции ЭЗ такого типа подтверждена авторским свидетельством [18].

ЭЗ ИМС серии должно обеспечивать устойчивость к воздействию статического электричества на уровне не менее 2000 В. Топологические решения элементов защиты от статического электричества стандартны для всех ИМС серии и должны быть включены в состав схемотехнической библиотеки элементов.

Таким образом, здесь рассмотрены некоторые общие вопросы проектирования схемотехники серии быстродействующих КМОП логических ИМС, устойчивых к дестабилизирующим факторам, приведены и описаны практические при-

меры электрических схем внутренних элементов серии быстродействующих логических КМОП ИМС, рассмотрены схемы защиты от воздействия ЭСЗ, а также схемы подавления помех на выходах ИМС.

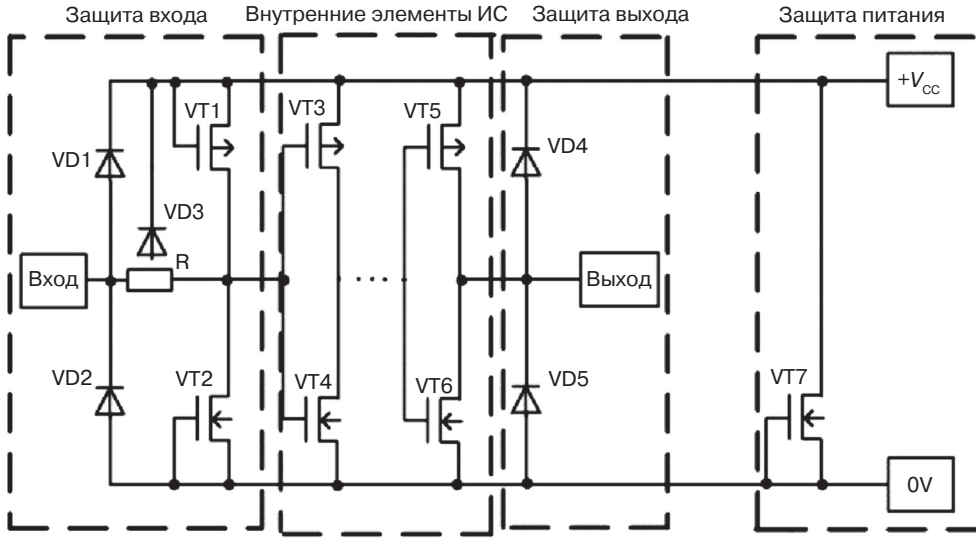


Рис. 8.21. Электрическая схема ЭЗ от воздействия статического электричества

8.4.3. Новые конструктивно-схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП БИС

Рассмотрим конкретный пример реализации одного из относительно новых методов повышения радиационной стойкости. В известную стандартную схему логического инвертора (рис. 8.22*а*) вводятся два новых дополнительных защитных транзистора Т3 и Т2, причем n-канальный транзистор Т3 имеет повышенный уровень легирования области канала, а p-канальный транзистор Т2 формируется с пониженным уровнем легирования канала. Транзисторы Т4, Т5 выполняют переключательные функции, осуществляя при необходимости замену (отключение) соответствующих рабочих транзисторов Т1 и Т6, причем уровни легирования областей каналов транзисторов VT4 и VT5 рассчитываются таким образом, чтобы при отсутствии ионизирующих излучений транзистор Т4 был всегда открыт, Т5 – закрыт [28]. Схема работает следующим образом. В процессе воздействия ИИ на микросхему, находящуюся в рабочем режиме, происходит нежелательное изменение пороговых напряжений основных рабочих транзисторов Т1 и Т6. При достижении пороговыми напряжениями этих транзисторов критических значений (с точки зрения помехоустойчивости) переключательный транзистор Т4 включает в рабочую цепь тока защитный p-канальный транзистор Т3, а в это же время переключательный транзистор Т5 выключает рабочий n-канальный транзистор Т6, и инвертор продолжает выполнять свои функции.

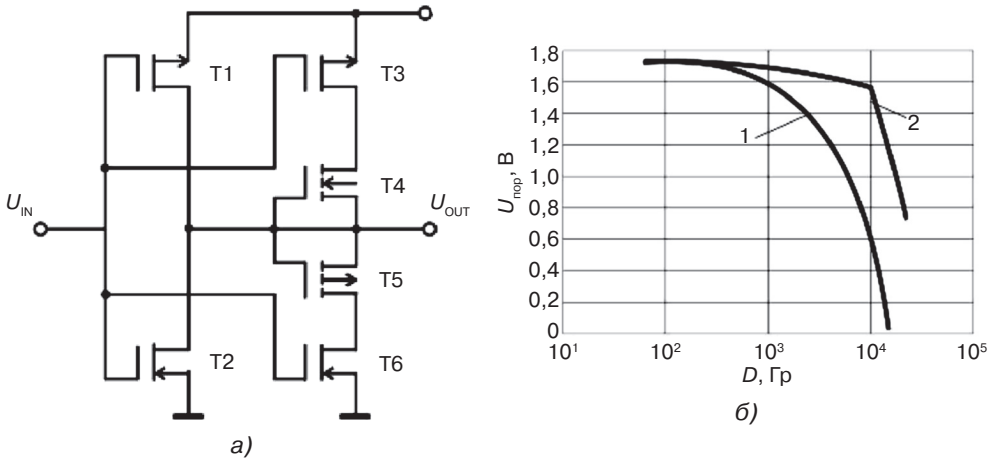


Рис. 8.22. КМОП-инвертор с повышенной радиационной стойкостью: схема радиационностойкого КМОП-инвертора (*а*); зависимость порога переключения от дозы: 1 – стандартный инвертор; 2 – инвертор с защитными транзисторами (*б*)

На рис. 8.22*б* представлена зависимость численных значений порога переключения КМОП инвертора $U_{пор}$ от величины дозы излучения D для случая питающего напряжения $U_{пит} = 3{,}3$ В. Как видно, введение защитных транзисторов Т3 и Т2 позволяет по сравнению с классическим инвертором (кривая 1) в 3–5 раз (кривая 2) увеличить значение общей дозы ионизирующего излучения, при которой инвертор еще сохраняет работоспособность.

Особый интерес для разработчиков высоконадежных радиоэлектронных систем, работающих в жестких условиях эксплуатации, включая воздействие различного рода ИИ, представляет ***использование современной сверхинтегрированной элементной базы, изготовленной по субмикронным проектным нормам (0,5; 0,35; 0,18 мкм).*** Однако в последние два года наблюдается необоснованное снижение этого интереса из-за появившихся случаев отказов ряда технических объектов, при конструировании которых использовались субмикронные БИС. Нами был предложен ряд новых технических решений, позволивших расширить область применения субмикронных БИС при воздействии ИИ, сущность одного из которых рассмотрим ниже.

Как известно, уменьшение геометрических размеров транзисторов позволяет улучшать технико-экономические параметры БИС в процессе их производства (уменьшать стоимость, увеличивать быстродействие, уменьшать величину потребляемой мощности и т.д.). Однако при уменьшении геометрических размеров транзисторов проявляется действие различного рода ***паразитных эффектов***, приводящих к снижению процента выхода, надежности и радиационной стойкости ИМС. В частности, при уменьшении длины канала МОП-транзистора возникает известный эффект горячих электронов [29], увеличение напряженности внутреннего электрического поля, что обуславливает увеличенную энергию носителей (электронов и дырок), проходящих через канал транзистора вплоть до образования лавинного процесса, при котором часть дополнительно генерируемых избыточных

носителей попадают в ловушки в области подзатворного окисла, создавая там так называемые «быстрые состояния», отрицательно влияющие на надежность и РС БИС. В частности, эти состояния ответственны за уменьшение коэффициента усиления транзистора, появление индуцированных токов утечки, снижение значений выходных напряжений, что в итоге и является одной из основных причин существенного снижения радиационной стойкости БИС.

Известный схемотехнический способ решения этой проблемы [30] – снижение величины питающего напряжения БИС не решает проблему в целом и не всегда применим в реальных случаях (например, разработчик высоконадежной аппаратуры не всегда может использовать напряжение питания 3,3 В вместо 5,0 В и т.д.).

Сущность нового схемотехнического метода повышения РС заключается в том, что в конструкцию базового логического элемента – КМОП-инвертора вводятся дополнительные защитные МОП-транзисторы и специальный вывод внутреннего защитного потенциала, которые компенсируют нежелательные изменения электрических характеристик основных (рабочих) транзисторов, обусловленные в основном действием горячих носителей и неизбежно возникающие при переводе процесса изготовления несубмикронных БИС на современные технологические процессы с более жесткими технологическими нормами.

На рис. 8.23 представлена электрическая схема простейшего логического КМОП-инвертора, поясняющего сущность предложенного решения, где исток защитного транзистора Т2 соединен со стоком первого транзистора Т1, сток транзистора Т2 соединен с истоком второго транзистора Т3, а на затвор защитного транзистора Т2 подается постоянное защитное напряжение $U_{\text{р}}$, как видно, транзисторы Т1 и Т2 представляют собой обычную комплементарную пару, известную как КМОП-транзистор. Напряжение входного логического сигнала U_{IN} подается от входа инвертора на затворы соответствующих транзисторов Т1 и Т3, а напряжение выходного логического сигнала U_{OUT} передается от стока р-канального транзистора Т1 и истока n-канального транзистора Т2 на выход инвертора. Поскольку n-канальные транзисторы более критичны к воздействию эффекта горячих носителей, чем р-канальные, дополнительный защитный транзистор Т2 должен обеспечивать такие условия, при которых потенциал стока n-канального транзистора Т3 ограничен настолько, чтобы не превысить заданное значение величины защитного потенциала $U_{\text{р}}$ даже в случае несанкционированного кратковременного превышения допустимого уровня положительного напряжения внешнего источника питания $+U_{\text{CC}}$.

Следует отметить, что здесь абсолютная величина выходного напряжения U_{OUT}, как и в известных решениях стандартных КМОП инверторов, также достигает величины питающего напряжения U_{CC}. Следовательно, когда на вход инвертора поступает входное напряжение логической единицы, р-канальный транзистор Т1 переходит в непроводящее состояние, а n-канальный транзистор Т3 открывается и обеспечивает на выходе напряжение логического нуля, при этом напряжение на затворе защитного транзистора Т2 обеспечивает его отпирание и создание низкоомной цепи протекания тока между выходом и общей шиной U_{SS}, что и требуется. И наоборот, при поступлении на вход низкого уровня напряжения (логический ноль) уже р-канальный транзистор Т1 открывается, а n-канальный транзистор Т3 закрывается, напряжение на выходе инвертора повышается до уровня потенциала напряжения питания U_{CC}.

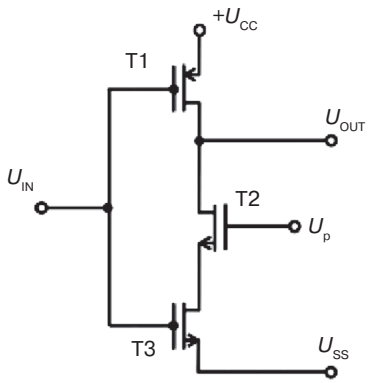


Рис. 8.23. Электрическая схема инвертора с защитным транзистором

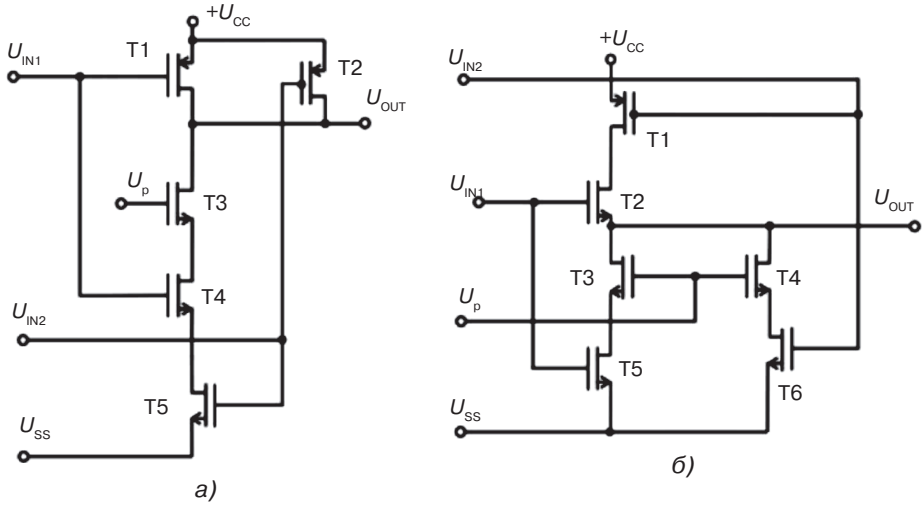


Рис. 8.24. Логические схемы с повышенной надежностью: «2И-НЕ» (*а*); «2 ИЛИ-НЕ» (*б*)

Следовательно, получая на выходе полный размах напряжения (от 0 В до 5,0 В при U_{CC} = 5,0 В и от 0 В до 3,0 В в случае U_{CC} = 3,0 В), мы одновременно достигаем и ***дополнительного положительного эффекта*** – ограничиваем значение напряжения, падающего на поперечном сечении тела канала транзистора Т3 (до значительно более низкого, чем $+U_{CC}$), ***ухудшая условия для возникновения паразитного эффекта накопления в ловушках подзатворного окисла неосновных носителей – горячих электронов и повышая тем самым надежность и радиационную стойкость микросхемы***. Предложенный схемотехнический метод легко использовать при построении более сложных интегральных микросхем.

На рис. 8.24 представлены примеры применения этого метода для реализации КМОП интегральных микросхем, реализующих логические операции типа «И-НЕ» (рис. 8.24*а*) и «ИЛИ-НЕ» (рис. 8.24*б*).

Конечно, введение дополнительного транзистора и дополнительных цепей формирования и доставки защитного потенциала приводит к увеличению общего количества элементов БИС и СБИС и, соответственно, к увеличению площади

кристаллов (в зависимости от сложности БИС увеличение площади составляет от 7 до 15%), однако спроектированные и изготовленные с использованием этого метода БИС, как показали проведенные в условиях серийного производства ОАО «Интеграл» испытания, обеспечивают более высокую надежность в условиях воздействия ионизирующих излучений и более высокий процент выхода годных в производстве.

Таким образом, основные итоги настоящей главы можно кратко сформулировать в следующем виде.

1. Представлен эффективный расчетно-экспериментальный метод оценки и прогнозирования радиационной стойкости, на основе которого определены расчетные дозовые зависимости основных параметров тестовых n- и p-канальных транзисторных МОП-структур, а также двух конкретных типов КМОП ИМС: 1594ЛН1 (логические элементы НЕ) и 1594ЛА3 (логические элементы 2И-НЕ) при различных электрических режимах в диапазоне доз $D_\gamma = 10^5 \div 10^7$ рад. Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости любых КМОП ИМС логических серий в пределах каждой партии изделий одного типа.
2. Детально рассмотрен метод прогнозирования (отбора) КМОП ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового облучения и токового отжига, где расчет дозовых зависимостей параметров КМОП ИМС проводится по результатам испытаний микросхем, показавших повышенную радиационную стойкость, с помощью регрессионного анализа. Испытания логических КМОП ИМС серий 564 и 1554 показали, что погрешность этого метода отбора (прогнозирования) КМОП ИМС по радиационной стойкости с помощью тестового электронного или гамма-облучения не превышает 5–10%.
3. Зависимости изменения коэффициента усиления n-p-n- и p-n-p-транзисторов от дозы облучения, полученные с применением расчетно-экспериментального метода, описываются полиномом второй степени.
4. Описана адекватная регрессионная модель изменения величины тока потребления БиКМОП БИС в зависимости от дозы стационарного излучения, представленная в виде полинома второй степени, которая достаточно хорошо отражает зависимость $I_{CC}(D)$ при дозах до $2{,}4 \cdot 10^5$ ед.
5. Рассмотрен новый расчетно-экспериментальный метод прогнозирования работоспособности МОП запоминающих элементов ЭСППЗУ в полях ионизирующей радиации по результатам их испытаний на надежность (при воздействии циклов перезаписи информации).
6. Результаты проведенных в серийном производстве ОАО «Интеграл» (г. Минск) испытаний серий микросхем показали, что рассмотренные в данной главе новые методы конструктивно-технологической реализации логических КМОП ИМС и БиКМОП БИС, направленные на обеспечение их стойкости к воздействию импульсного и стационарного излучения (оптимизация и введение в конструкции базовых элементов новых полупроводниковых слоев и областей), позволили гарантировать работоспособность всех базовых компонентов ИМС в условиях радиационных воздействий и существенно повысить (на 1-2 порядка) общий уровень радиационной стойкости микросхем.

7. Разработан новый схемотехнический метод исключения в биполярных микросхемах тиристорного эффекта при воздействии импульсного ионизирующего излучения.
8. Детально описано новое конструктивно-схемотехническое решение базового микромощного БиКМОП элемента, позволяющее обеспечить устойчивость к эффекту защелкивания без увеличения площади кристалла за счет оригинальной конструктивно-технологической разработки. Испытания экспериментальных образцов тестовой БиКМОП микросхемы, спроектированной на основе данного конструктивно-технологического решения, подтвердили факт отсутствия эффекта включения паразитной тиристорной структуры во всем диапазоне входных и питающих напряжений.
9. Рассмотрены основные правила организации схемотехники библиотечных элементов при проектировании быстродействующих КМОП логических ИМС, устойчивых к дестабилизирующим факторам. Приведены и описаны практические примеры электрических схем внутренних элементов серии быстродействующих логических КМОП ИМС. Предложены схемы защиты от воздействия электростатических зарядов, а также схемы подавления помех на выходах ИМС.
10. Рассмотрен ряд новых конструктивно-схемотехнических методов повышения радиационной стойкости КМОП БИС. Показано, что введение защитных МОП-транзисторов позволяет по сравнению с классическим КМОП инвертором в 3-5 раз увеличить значение общей дозы ионизирующего излучения, при которой инвертор еще сохраняет работоспособность. В конструкцию базового КМОП инвертора вводятся дополнительные защитные МОП-транзисторы и специальный вывод внутреннего защитного потенциала, которые компенсируют нежелательные изменения электрических характеристик основных (рабочих) транзисторов, обусловленные действием горячих носителей в субмикронных КМОП БИС.

Применение этих методов и технических решений позволит разработчикам современных микросхем для космических применений существенно увеличить их надежность уже на стадии проектирования до этапа организации производства.

Литература к главе 8

1. Коршунов Ф.П. и др. Обеспечение работоспособности различных перспективных полупроводниковых приборов при радиационном воздействии // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 17-й Междунар. Крымской конф. (КрыМиКо'2007), Севастополь, 10–14 сентября 2007 г. – Севастополь: Вебер, 2007. – Т. 2. – С. 651–654.
2. Коршунов Ф.П. и др. Методы радиационных исследований КМОП ИС // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2003. – № 4. – С. 57–60.
3. Коршунов Ф.П. и др. Метод прогнозирования радиационной стойкости КМОП интегральных схем // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2008: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 3–4 июня 2008 г. МИФИ. – М., 2008. – С. 103–104.

4. Коршунов Ф.П. и др. Метод прогнозирования радиационной стойкости КМОП интегральных схем // Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – Вып. 1. – С. 45–49.
5. Коршунов Ф.П. и др. Прогнозирование радиационной стойкости КМОП интегральных микросхем // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 19-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2009), Севастополь, 14–18 сентября 2009 г. – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 721–723.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
7. Мырова Л.О., Попов В.Д., Верхотуров В.И. Анализ стойкости систем связи к воздействию излучений. – М.: Радио и связь, 1993. – 268 с.
8. Бечина И.А., Попов В.Д. Прогнозирование отказов КМОП ИС с помощью метода рабочих областей. – М., 1988. – 24 с. – (Препринт 084-88/МИФИ).
9. Bogatyrev, Yu.V. Current Annealing of Irradiated CMOS Integrated Circuits / Yu.V. Bogatyrev, F.P. Korshunov // Proc. of the 7-th European conf. «Radiation and Its Effects on Components and Systems» – RADECS 2003. – P. 163–174.
10. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на биполярные транзисторные структуры // Радиационная физика твердого тела: Труды XIV Междунар. совещания, Севастополь, 5–10 июля 2004 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2004. – С. 30–33.
11. Коршунов Ф.П. и др. Радиационные эффекты в биполярных и КМОП интегральных микросхемах // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 18-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2008), Севастополь, 8–12 сентября 2008 г. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т. 2. – С. 659–661.
12. Коршунов Ф.П. и др. Процессы релаксации в облученных транзисторных биполярных и МОП-структурах // Радиационная физика твердого тела: Труды XVII Междунар. совещания, Севастополь, 9–14 июля 2007 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2007. – С. 678–684.
13. Белоус А.И. и др. Радиационные эффекты в БиКМОП БИС интерфейсного приемопередатчика // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 2. – С. 139–149.
14. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на параметры различных транзисторных МОП-структур – элементов интегральных микросхем // Докл. БГУИР. – 2007. – № 1 (17). – С. 67–72.
15. Коршунов Ф.П. и др. Влияние предварительной радиационно-термической обработки на устойчивость МОП-структур к ионизирующим излучениям // Радиационная физика твердого тела: Труды XVI Междунар. совещания, Севастополь, 3–8 июля 2006 г. / НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ); редкол.: Г.Г. Бондаренко и др. – М., 2006. – С. 625–629.
16. Коршунов Ф.П. и др. Влияние гамма-излучения на интегральные МОП-структуры при различных электрических режимах и конструктивно-технологических параметрах // Актуальные проблемы физики твердого тела – ФТТ-2007: Материалы Междунар. конф., Минск, 23–26 октября 2007 г. / Издат. БГУ; редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 75–78.
17. Кессаринский Л.Н., Бойченко Д.В., Ванжа М.М., Шведов С.В. Исследование тиристорного эффекта в микромощных компараторах напряжения // Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2006: Материалы Всеросс. науч. конф., г. Лыткарино, Россия, 6–7 июня 2006 г. МИФИ. – М., 2006. – С. 73–74.
18. Элемент защиты выходного МОП транзистора интегральной схемы от статического электричества: Пат. 4988 Респ. Беларусь, МПК H01L 29/06 / Усов Г.И., Лемешевская А.М., Силин А.В., Шведов С.В., Пономарь В.Н., Емельянов В.А.; заявитель УП «Белмикросистемы». – № a20000232; заявл. 03.15. 2000; опубл. 03.30. 2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.

19. Емельянов В.А., Калошкин Э.П., Силин А.В., Шведов С.В. Схемотехника серии быстродействующих КМОП логических ИС, устойчивых к специальным внешним воздействиям // Докл. БГУИР. – 2007. – № 4 (20). – С. 85–92.
20. Белоус А.И., Лемешевская А.М., Сякерский В.С., Шведов С.В. Микромощный БиКМОП элемент с повышенной устойчивостью к эффекту защелкивания // Петербургский журнал электроники. – 2009. – № 3(60)–4(61). – С. 93–100.
21. Шведов С.В. Схемотехнические методы повышения радиационной стойкости КМОП БИС // Докл. БГУИР. – 2009. – № 7 (45). – С. 26–32.
22. Восьмиразрядный сдвиговый регистр с асинхронным сбросом и выходом на три состояния (1554ИР24 ТБМ): Свид. офиц. регистрации топологии интегральной микросхемы № 2003630025 РФ / Семашко М.В., Юрьев Н.Г., Лемешевская А.М., ДроздС.Е., Шведов С.В.; заявитель УП «Белмикросистемы». – № 2003630007; заявл. 18.03.2003; опубл. 07.05.2003.
23. Четырехразрядный реверсивный двоично-десятичный счетчик (1594ИЕ6 Т): Свид. офиц. регистрации топологии интегральной микросхемы № 2005630016 РФ / Трасковский В.А., Пономарь В.Н., Лемешевская А.М., Усов Г.И., Шведов С.В.; заявитель УП «Белмикросистемы». – № 2005630013; заявл. 19.04.2005; опубл. 15.06.2005.
24. Горлов М.И. и др. Расчет надежности интегральных схем по конструктивно-технологическим данным. – Воронеж: ВГУ, 1996. – 79 с.
25. Элемент полупроводниковой ИС: заявка 60-128653. Япония / Я. Ясунори, С. Дзиро. – Опубл. 1995.
26. Прибыльский А.В. Конструктивно-схемотехнические методы проектирования, тестирования и контроля интегральных схем. – Минск: ЦНИИТУ, 2003. – 202 с.
27. Емельянов В.А. Быстродействующие цифровые КМОП ИС. – Минск, 1998. – 326 с.
28. Gregory, B.L. Radiation Effects on Semiconductor Devices / B.L. Gregory, C.W. Gwyn // Proc. IEEE. – 1974. – Vol. 62, № 9. – P. 1264–1273.
29. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
30. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. – 320 с.