

Die Anregung p_{N_2} kann nun stets als proportional zur Pumpleistung angenommen werden; verglichen mit der Anregung im Fall 2 ist also

$$p_{N_2}^3 = \frac{I^3}{I^2} p_{N_2}^2. \quad (3)$$

Im Fall 2 besteht aber thermisches Gleichgewicht (bei vernachlässigbarer induzierter Emission), d. h. die Anregung $p_{N_2}^2$ ist gleich der spontanen Emission

$$p_{N_2}^2 = N_2^2 / \tau. \quad (4)$$

Im Fall 3 [Gl. (1)] ist ferner nicht nur N_2^3 die Schwellwertsbesetzung für das Anschwingen des Lasers auf der 10 652 Å-Linie, sondern es ist gleichzeitig N_1^3 die Schwellwertsbesetzung für das Anschwingen auf der kürzerwelligen Linie. Dies folgt daraus, daß sich die Gleichgewichtsbesetzung in einem schwingenden Laser nicht mit der Pumpleistung ändert⁷.

In den Fällen 1 und 2 ist jeweils die Besetzung eines der Terme gleich der Schwellwertsbesetzung, d. h. es ist $N_1^1 = N_1^3$ und $N_2^2 = N_2^3$. Ferner gilt

$N_1^1 = N_2^1 e^{-\Delta E/kT}$ und entsprechend $N_1^2 = N_2^2 e^{-\Delta E/kT}$, da in beiden Fällen thermisches Gleichgewicht⁸ besteht. Im Gleichgewicht ist außerdem das Besetzungsverhältnis N_2^1/N_2^2 gleich dem Verhältnis der Pumpleistungen I^1/I^2 . Man erhält also

$$N_1^3 = N_2^3 \frac{I^1}{I^2} e^{-\Delta E/kT}. \quad (5)$$

⁷ R. DUNSMUIR, J. Electr. Control **10**, 453 [1961].

⁸ Die Lebensdauer in den beiden Termen wird als gleich und die durch strahlungslose Übergänge aus den Pumpbändern erfolgende Nachlieferung als ungefähr dem Besetzungsverhältnis (BOLTZMANN-Faktor) entsprechend angenommen. Bei gleicher Nachlieferung in die beiden Terme ergibt die erweiterte Rechnung das geringfügig gegenüber

Mit Hilfe von (1) bis (5) läßt sich nun eine auswertbare Beziehung für die thermische Relaxationszeit T_{21} gewinnen, es ergibt sich

$$T_{21} = \tau \frac{I^2 - I^1}{I^3 - I^2}. \quad (6)$$

Zur Messung von I^1 , I^2 und I^3 wurde, wie schon in einer früheren Arbeit⁹, die Pumpleistung durch Verwendung einer Kombination von Induktivitäten und Kapazitäten an Stelle einer einfachen Kondensatorbatterie für eine Zeitdauer von etwa 150 µs konstant gehalten. Das Verhältnis der Pumpleistungen ergab sich zu

$$I^1/I^2 = 0,80 \quad \text{und} \quad I^3/I^2 = 1,37.$$

Damit folgt aus (6)

$$T_{21} = 0,5 \tau = 9 \cdot 10^{-5} \text{ s}. \quad (7)$$

Dieser Wert liegt relativ hoch, verglichen mit der Zeit, in der sich bei Rubin das Besetzungsgleichgewicht zwischen den beiden ²E-Termen einstellt. Für Rubin liegt eine Abschätzung schon vor¹⁰, wonach die Relaxationszeit kleiner als 10^{-7} s ist. Der Unterschied in den Relaxationszeiten macht verständlich, daß man bei Neodym in Calciumwolframat ohne Eingriffe in den Rückkopplungsweg des Lasers bei höherer Pumpleistung eine gleichzeitige Emission auf den beiden in Frage kommenden Linien erhält, während bei Rubin stets nur die R_1 -Linie anschwingt.

(7) abweichende Resultat $T_{21} = 0,6 \tau$. — Eine Messung der spontanen Emission ergab bei dem verwendeten Kristall auf den beiden betrachteten Linien eine Abklingzeitkonstante von $\tau = (170 \pm 5) \mu\text{s}$.

⁹ K. GÜRS, Z. Naturforschg. **17a**, 883 [1962].

¹⁰ F. J. McCLUNG u. R. W. HELLWARTH, Proc. I.E.E.E. **51**, 46 [1963].

Doppel-Diffusion in GaAs

Von P. GANSAUGE und W. v. MÜNCH

IBM-Laboratorien, Böblingen/Wttbg.

(Z. Naturforschg. **19a**, 516—517 [1964]; eingegangen am 25. März 1964)

Die hohe Elektronenbeweglichkeit und der große Bandabstand lassen einige Vorzüge des Galliumarsenids als Transistormaterial gegenüber Silicium und Germanium erwarten, vor allem eine höhere Grenzfrequenz und einen größeren nutzbaren Temperaturbereich.

Grundlage der Transistorherstellung ist die Kenntnis der Diffusion von Akzeptoren und Donatoren, insbesondere, wenn der Transistor in der sogenannten Planartechnik ausgeführt werden soll.

Diffusionstechnik: Wegen des merklichen Arsen dampfdruckes des GaAs läßt man vorzugsweise in abgeschlossenen Systemen diffundieren. Durch Zugabe von Arsen kann die Zersetzung des GaAs weitgehend verhindert werden. Das GaAs-Plättchen, Dotierungssub-

stanz und Arsen werden in einer auf 10^{-6} Torr evakuierten Quarzampulle eingeschmolzen und auf die erforderliche Temperatur gebracht. Die Diffusionstemperaturen liegen im Bereich von 700 bis 1150 °C. Um jeden Materialtransport in der Ampulle zu vermeiden, muß der Diffusionsofen ein sehr flaches Temperaturprofil haben, etwa $\pm 0,5$ °C über die Ampullenlänge.

Akzeptoren: Als p-dotierende Stoffe kommen die Elemente der Gruppe II in Frage, besonders Zink wegen seines hohen Diffusionskoeffizienten¹. Hohe Oberflächenkonzentrationen (10^{20} cm^{-3}) erhält man bei Verwendung von elementarem Zink oder ZnAs_2 als Quellmaterial. Durch Herabsetzen des Zn-Dampfdruckes mittels geeigneter Zn-Ga-Legierungen lassen sich auch die beispielsweise für n-p-n-Transistoren benötigten Oberflächenkonzentrationen in der Größenordnung 10^{17} bis 10^{18} cm^{-3} erzielen. Durch den Prozentsatz von Zn in Ga läßt sich der Zinkdampfdruck und damit die Oberflächenkonzentration im GaAs kontrollieren, während

¹ B. GOLDSTEIN, Phys. Rev. **118**, 4 [1960].



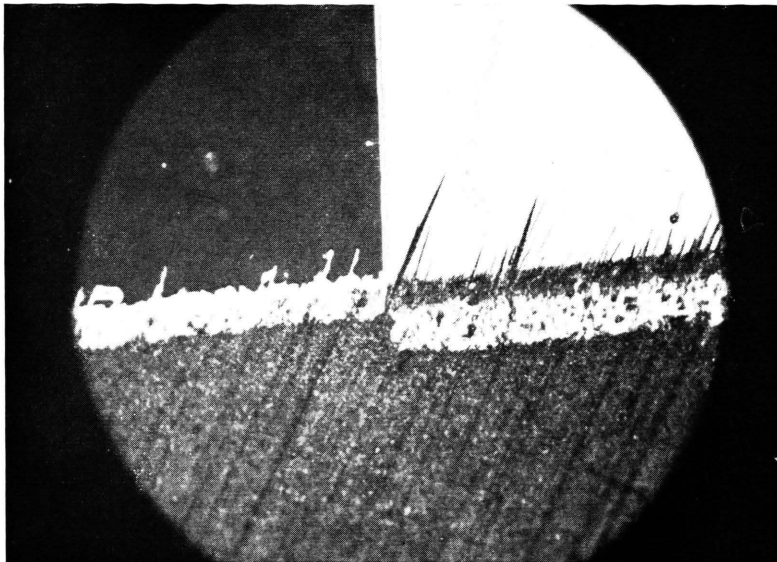


Abb. 1. p-n-p-Struktur.

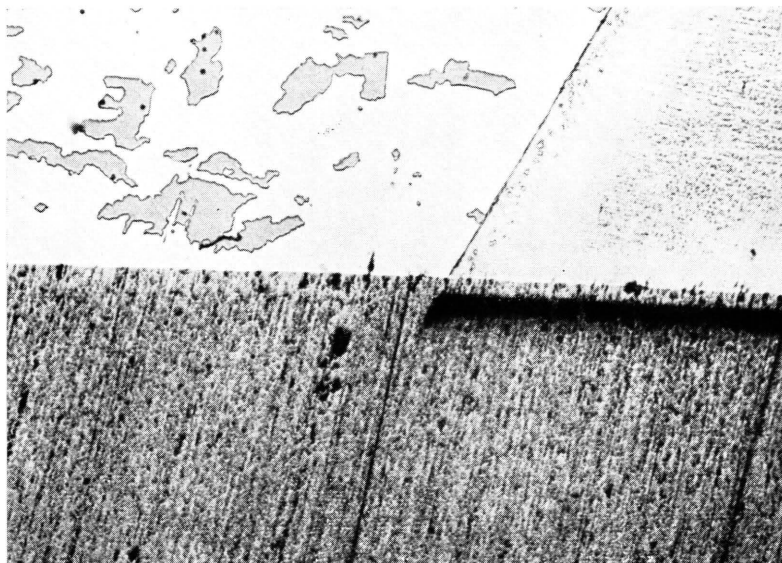


Abb. 2. n-p-n-Struktur.

die Eindringtiefe durch die Länge der Diffusionszeit bestimmt wird.

Donatoren: Die Elemente der VI. Gruppe, die eine n-Dotierung im GaAs hervorrufen, eignen sich schlecht, da sie mit dem Ga Verbindungen eingehen und damit den GaAs-Kristall zerstören. Jedoch ist Zinn, das vorwiegend die Ga-Atome des GaAs substituiert, ein Donator, der ohne Zerstörung der GaAs-Oberfläche nach einer Methode von FANE und GOSS² zur Diffusion geeignet ist. Es konnten Diffusionskoeffizient und Oberflächenkonzentration für Zinn als Funktion der Temperatur ermittelt werden. Durch Vergleichsmessungen mit radioaktivem Sn wurde festgestellt, daß nur ein Teil des eindiffundierten Zinns elektrisch aktiv ist.

Maskierung: Im Hinblick auf die Transistorentwicklung tritt gleichzeitig das Problem der Maskierung auf, d. h. das Problem, das GaAs mit Schutzschichten zu versehen, die gegen Diffusion abschirmen und damit den Transistor begrenzen. Es wurden SiO₂- und SiO-Schichten untersucht. SiO₂ zeigt eine nur teilweise Abschirmwirkung gegen Zink und Zinn, wirkt daher nur bei sehr kurzer Diffusion als Maske, während SiO vollständig gegen Zink, aber auch nur teilweise gegen Zinn maskiert.

Abb. 1* und 2 zeigen Anwendungsbeispiele für die Diffusion, Abb. 1 eine durch Doppel-Diffusion hergestellte p-n-p-, Abb. 2 den umgekehrten Fall einer n-p-n-Struktur. Von den GaAs-Scheibchen wurden Schräg-

schleife unter 2° hergestellt und die Zonen durch Ätzen in Salpetersäure sichtbar gemacht. p-Gebiete erscheinen dunkel, n-Gebiete hell.

Die technischen Daten zu diesen Abbildungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

		Quelle	Diff.-Temp. °C	Diff.-Zeit h	Tiefe μ
p-n-p	1.	Sn	1000	4	2,9
	2.	1% Zn in Ga	900	0,75	1,3
n-p-n	1.	0,1% Zn in Ga	1000	1	5
	2.	Sn	1050	2	2,3

Ähnliche Strukturen konnten hergestellt werden bis zu einer „Basisweite“ von 0,3 μ . Weiterhin zeigen die Abbildungen die Maskierungswirkung des SiO. Die Hälfte des Scheibchens ist mit einer solchen Schicht bedeckt. Unter der Oxydschicht ist keine Eindiffusion von Zink festzustellen, während die Eindringtiefe des Zinns etwa die Hälfte beträgt.

Die Beispiele zeigen, daß es möglich ist, die Planartechnik, die in Silicium heute weite Anwendung findet, auf GaAs zu übertragen. Auf diese Weise wurden doppelt diffundierte n-p-n-GaAs-Transistoren mit Stromverstärkungen bis zu $\beta = 25$ hergestellt.

* Abb. 1 und 2 auf Tafel S. 516 a.

² R. W. FANE u. A. J. GOSS, Solid State Electronics **6**, 383 [1963].

Das L/K-Einfangverhältnis von Chrom 51

Von W. HEUER und E. HUSTER

Institut für Kernphysik, Universität Münster

(Z. Naturforschg. **19 a**, 517—518 [1964]; eingegangen am 1. April 1964)

DREVER und MOLJK¹ benutzten 1957 erstmals ein „wandloses“ Proportionalzählrohr zur Messung des Verhältnisses N_L/N_K von L- und K-Einfängen (an gasförmigen Präparaten). Damit verbesserten sie die Meßgenauigkeit, die vorher bestenfalls 10% betragen hatte, auf 3 bis 4%. Die Ergebnisse ihrer Messungen an ⁷¹Ge und Messungen anderer an ³⁷Ar² und ⁵⁵Fe³ wichen beträchtlich von den theoretischen Werten von BRYSK und ROSE⁴ ab. Weitere Messungen erschienen deshalb erwünscht.

Wir haben nach der Methode von DREVER und MOLJK das L/K-Einfangverhältnis von ⁵¹Cr gemessen. Bei diesem Kern führen 91% der Zerfälle in den Grundzu-

stand, 9% in einen angeregten Zustand (320 keV) des ⁵¹V⁵. Gemessen wurde N_L/N_K für beide Übergänge gemeinsam und außerdem für den Übergang in den angeregten Zustand allein in Koinzidenz mit der γ -Strahlung.

Als Präparat diente der Dampf von ⁵¹Cr(CO)₆, das durch Bestrahlen von festem Cr(CO)₆ mit Neutronen hergestellt worden war⁶.

Der Druck des Zählgases (Argon mit 7 bis 8% Methan) betrug 10 bis 11 Atmosphären. Für Verluste von K-Quanten brauchten deshalb die Meßergebnisse bei der gemeinsamen Messung beider Übergänge nur um 0,5% korrigiert zu werden. Bei der Koinzidenzmessung war keine Korrektur erforderlich. Hierbei wurden die γ -Quanten durch sechs Szintillationszähler nachgewiesen, die sternförmig um die Mitte des Zählrohrs angeordnet waren. So wurden nur Zerfälle nahe der Mitte des Rohres erfaßt, bei denen Quantenverluste praktisch nicht auftraten.

¹ R. W. D. DREVER u. A. MOLJK, Phil. Mag. **2**, 427 [1957]; s. auch: S. C. CURRAN, Handbuch der Physik, Bd. XLV, S. 217.

² A. G. SANTOS OCAMPO u. D. C. CONWAY, Phys. Rev. **120**, 2196 [1960].

³ J. SCOBIE, R. B. MOLER u. R. W. FINK, Phys. Rev. **116**, 657 [1959].

⁴ H. BRYSK u. M. E. ROSE, ORNL 1830 (1955), unveröffentlicht; Rev. Mod. Phys. **30**, 1169 [1961].

⁵ S. OFER u. R. WIENER, Phys. Rev. **107**, 1639 [1957].

⁶ Das Herstellungsverfahren wurde von Prof. W. HERR und Dr. B. G. SCHMIDT, Köln, vorgeschlagen und für uns erprobt. Ihnen gilt unser besonderer Dank. — Für die Überlassung von Cr(CO)₆ sind wir Prof. W. HIEBER und Prof. E. O. FISCHER, München, und für die Bestrahlung Prof. MAIER-LEIBNITZ, München, zu großem Dank verpflichtet.