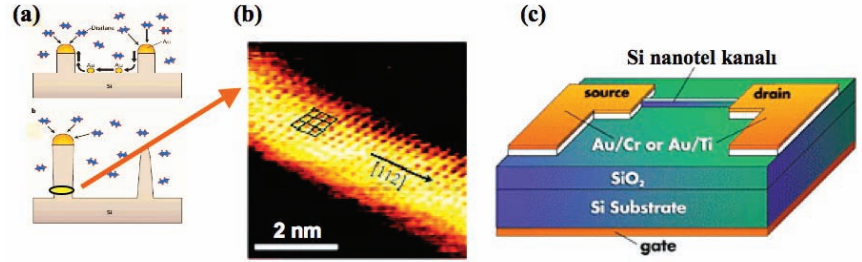


# SİLİSYUM NANOTELLER

Silisyum mikroelektronik aygıt boyutlarının belli ölçülerin altına düşürülebilmesi ve işlem hızlarının iletişim-bilişim teknolojilerinden gelen talepleri karşılayamaması önümüzdeki yıllarda sorun yaratmaya aday. Çok yüksek işlem hızına sahip olan ve çok az yer kaplayan minyatürize edilmiş süper bilgisayarlar için yeni paradigmalara aygıt tasarımı, nanoelektronik aygıtları gündeme getirmiş bulunuyor. Ancak, bu aygıtlar geliştirilmiş olsa bile, bir işlemcide bunları birbirine bağlamak için gerekli iletken tel çaplarının nanometre mertebesinde olması gerekiyor. Bu gereklilik atom zincirlerinden başlayarak nanometre (metrenin milyarda biri) çapında metal tellerin tasarımı ve fabrikasyonu alanında kapsamlı araştırmaları tetikledi. Bu bağlamda fizikçiler iki altın elektrot arasında asılı durumda bulunan altın atom zincirini sentezlemeyi ve bu 'gerçek bir boyutlu' iletkenin sahip olabileceği en düşük değerdeki direnç kuantumunu ölçmeyi başardılar. Titanyum kaplanmış karbon nanotüplerin sentezlenebilmesi, nanometre boyutlarında iletken tel üretiminde ümitleri artırmış olmasına karşın, nanotüp çaplarının kontrol edilememesi hayal kırıklığı ile sonuçlanmış bulunuyor.

Son zamanlarda, karbon nanotüplerin yerini alabilecek olan silisyum nanotellerin sentezlenmesi, lazerle aşındırma, tozlarının ısı yoldan buharlaştırılması, VLS (buhar-sıvı-katı) büyütme, katalizör kullanılmayan oksit destekli teknikler ve solüsyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirildi. Çapı 1.3 ile 7 nm arasında değişen, yüzeyindeki oksit tabakası hidroflorik asit yardımıyla temizlenmiş ve üç bağ yapmış silisyum (Si) atomları hidrojenle doyurulmuş tellerin fabrikasyonu ve bunların sahip olduğu olağanüstü özellikler, silisyumu tekrar gündeme getirdi.

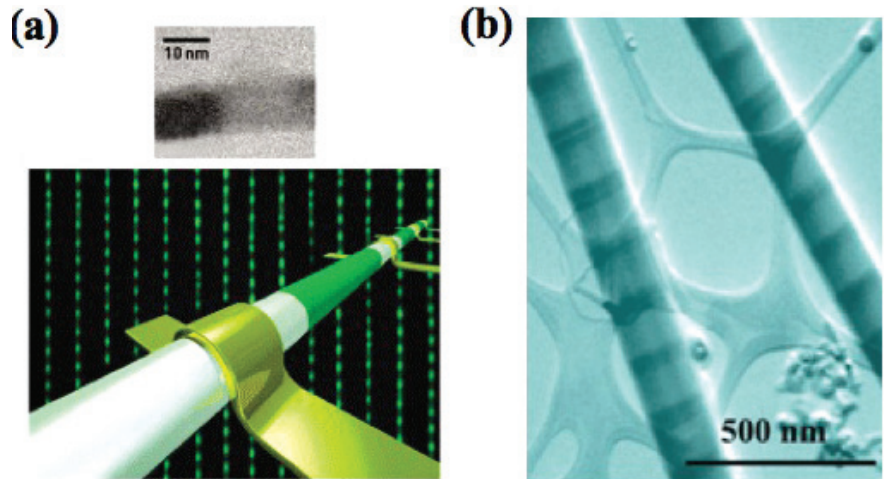
Geçmişte ne zaman galyum arsenit (GaAs) gibi yeni bir malzeme mikro-



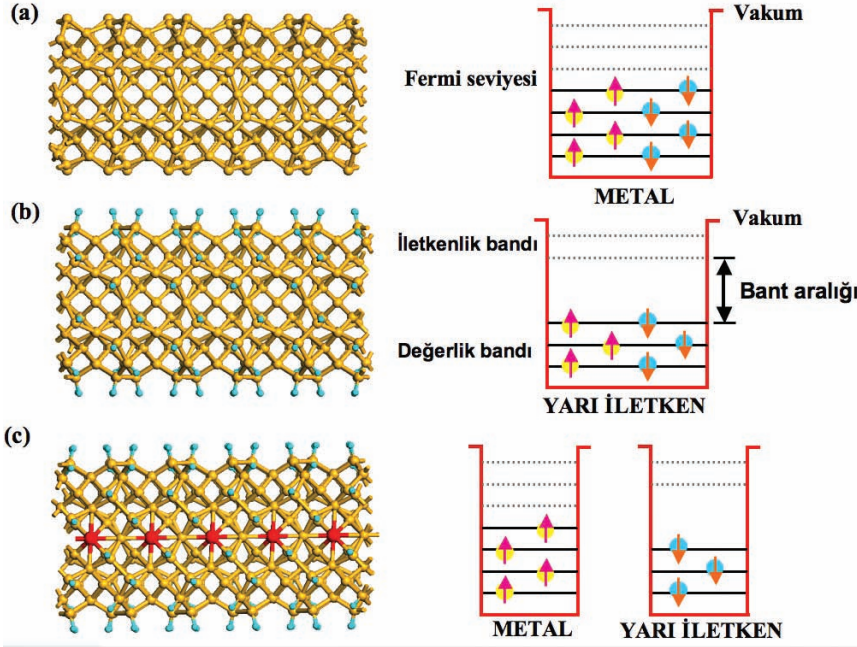
Şekil 1. (a) Silisyum bir taban üzerinde silisyum içeren  $\text{SiH}_4$  ve  $\text{Si}_2\text{H}_6$  buharından Si nanotellerin VLS yöntemi ile büyümesi. Si atomları (sarı) altın damlacıklar içinden Si tellere geçip büyüme gerçekleştiren, altın damlacıkları küçülüp kaybolduğunda telin büyümesi durmaktadır. (b) Büyütülen bir Si nanotelin Taramalı Tünelleme Mikroskobu ile elde edilen görüntüsü (D.D.D. Ma et al. Science, 299, 1874 (2003)). (c) Nanotelden yapılan bir transistör.

elektronikte önem kazanmaya başlasa, silisyum teknolojisi hemen atağa kalkıp bu güne kadar sürdürdüğü öncülüğünü korudu. Çeşitli çaplarda sentezlenebilen çıplak silisyum nanoteller, yarıiletken kristalinin tersine yüksek iletkenliğe sahip bir metal gibi davranıyor. Ancak nanotel, yüzeyinde bulunan doymamış bağlar hidrojen atomu ile doyurulduğunda yarıiletken özelliğini tekrar kazanıyor. Telin elektronik yapısı, özellikle enerji bant aralığı, telin çapına bağlı olarak değişmekte. Çalışmalar silisyum nanotellerin optik ve elektronik uygulamalarda ışık saçan diyot,

alan etkili transistör, lazer ve iletken tel olarak kullanabileceğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca silisyum-germanyum kristal alaşımlarından, eklemler ve süper örgüler yoluyla elde edilen benzer yapılar nanotellerde de gerçekleştiriliyor. Örneğin, silisyum nanotellerinin yüzeyinin yan yana hidrojen ve metal atomlarıyla kaplanması, yarıiletken-metal eklemlerini oluşturmaktadır. Benzer şekilde, ayarlanabilen bant aralığına sahip silisyum-silisyum-germanyum süper örgüsü ya da çekirdek-kabuk sistemleri de yapılabilmiş durumda. Bu özelliklerine ek olarak, yabancı atom-



Şekil 2. (a) Kimyasal bir süreçle Si nanotel hidrojenle doyurulmuş Si (yarıiletken) ve NiSi (metal) ardışık bölgelerinden oluşan eklemlere dönüştürülmektedir (C.M Lieber, Harvard). (b) Taramalı Elektron Mikroskobu ile elde edilen  $\text{Si-Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  süper örgüsünün görüntüsü. Tel üzerinde açık ve koyu kısımlar Si ve  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  bölgelerini göstermektedir (P. Yang, UC Berkeley).

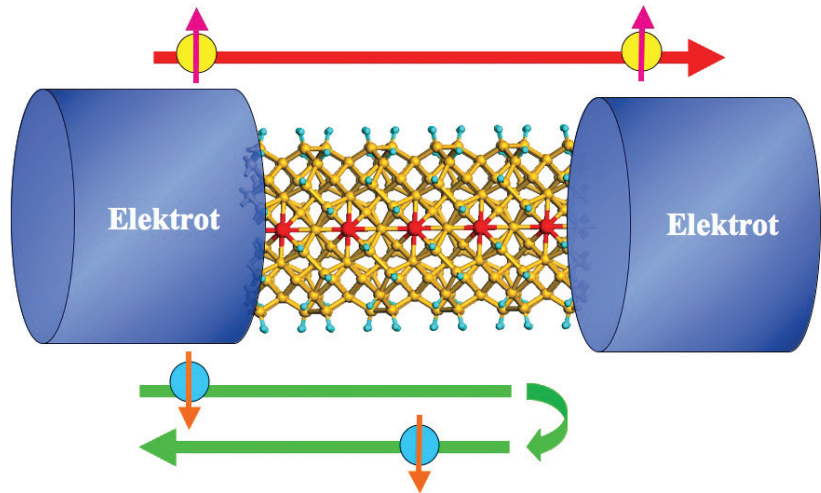


Şekil 3. (a) Birim hücrede 57 (sarı toplarla gösterilen) silisyum atomuna sahip olan ve [100] yönünde büyüyen çıplak silisyum nanotelinin hesaplanan atom geometrisi ve metalik elektron bant yapısı. İletkenlik bandının Fermi seviyesine kadar olan her durum zıt yönde spine sahip olan iki elektrona dolduruluyor Fermi düzeyinin üstünde kalan durumlar ise boş halde bulunmaktadır. (b) Aynı silisyum nanotelinin yüzeyinde bulunan silisyum atomları (açık mavi) hidrojen atomları ile doyurulunca, nanotel yarıiletken özellik kazanmakta. Değerlik bandındaki durumlar, zıt spin yönlerine sahip iki elektron ile doldurulurken, iletkenlik bandı yasak bir enerji aralığı ile ayrılmakta ve bütün durumları çok düşük sıcaklıkta boş halde bulunmaktadır. (c) Silisyum nanoteli (kırmızı toplarla gösterilen) krom atomlarıyla katkılanınca, kalıcı bir manyetik moment ve yarı metal özelliğini kazanmakta. Aynı tel belli bir spin yönündeki elektronlar için iletken (metalik), aksi spin yönündeki elektronlar için yarı iletken özellik göstermektedir.

larla kolayca katkılanıp işlevsel hale getirilmesi ve çok gelişmiş bir teknolojiye sahip olması dikkate alındığında, silisyum nanotelleri geleceğin nano-malzemesi olarak öne çıkmaktadır.

Son zamanlarda Bilkent'te UNAM - Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde yapılan kuantum mekaniğine dayalı hesaplamalar silisyum nanotellerinin uygulamalarda çok önemli olabilecek bir özelliğini ortaya çıkardı. Yüzeyleri hidrojen atomu ile doyurulmuş çeşitli çaplardaki silisyum nanotelleri demir, manganez, titanyum, krom ya da kobalt gibi geçiş elementi atomlarıyla periyodik olarak katkılандığında çapına ve katkılanan atomun tipine bağlı olarak ya ferromanyetik yarı iletken ya da yarı-metal özellikleri göstermekte ve kalıcı bir manyetik momente sahip olmaktadır. Elektronlar, yükleri, enerjileri ve kendilerine bağlı spin açısal momentumları ile tanımlanırlar. Kuantumlaşmış spin açısal momentumu, elektronun adeta eksenini etrafında belli yönlerde dönmesi olarak simgelebilir. Bu tanıma göre elektron belli bir eksen etrafında ya sağa ya da sola doğru dönmektedir. Manyetik momente sahip olmayan bir aygıtta elektronların

spinleri belirlenemediğinden, bilgi yalnızca elektronların yükleriyle taşınabiliyor. Aslında ferromanyetik olan yarı metal aygıtlarsa elektronların bir spin yönü için yarı iletken, aksi spin yönü içinse metal gibi davranmakta, böylece bilgi belirgin hale gelen elektronların spinleri ile taşınabilmektedir. Böylece, spine bağlı olan elektronikte, yani kısaca spintronikte, aygıtın işlem kapasitesi ikiye katlanıyor.



Şekil 4. İki (mavi renkli) elektrot arasında krom katkılanmış yarı metal bir silisyum nanotelden spini bir yönde olan elektronlar geçemezken, aksi spin yönünde elektronlar kolaylıkla geçebiliyor.

Yarı-metaller, spin-vanası, kalıcı bellek aygıtı ve çeşitli “dev-manyetodirenç” uygulamalarına olanak tanıyor. Yıllar süren çabalara karşın makroskopik ölçütlerde yarı-metal özelliği gözlenmezken, katkılanmış silisyum nanotellerde oda sıcaklığında bile kararlı olabilecek yarı metal davranışın öngörülmesi, bir sürpriz oldu. Çünkü, tasarlanan bu aygıt bilinen silisyum teknolojisi yardımıyla kolaylıkla fabrikasyon şansına sahip bulunuyor. Si nanotellerin periyodik katkılanması ve aygıt boyunun yeterli uzunlukta olması koşulu yerine getirilmese bile, spintronik uygulamalar için gerekli olan Fermi seviyesinde yüksek spin polarizasyonu, bu tellerde elde edilebiliyor.

UNAM yüksek verimli bilgisayarlarında yapılan hesaplar, kısa silisyum nanotellerin kalıcı yüksek manyetik momente sahip güçlü nanomıknatıslar oluşturabileceğini de öngörmekte. Bu tür mıknatıslara dokuların manyetik görüntülenmesinde ve bilgi depolamada gereksinim duyulacak. Şimdi, silisyum dışında galyum arsenit, galyum nitrat gibi nanoteller de yoğun kuramsal ve deneysel araştırmalara konu olmaktadır.

Bu gelişmeler, mikroteknolojiden nanoteknolojiye geçiş döneminde, 20. yüzyıla damgasını vuran silisyum kristalinin tahtını bırakmaya niyetinin olmadığını gösteriyor.

Engin Durgun, Nurten Akman,  
Salim Çıracı

UNAM - Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi  
Fizik Bölümü, Bilkent Üniversitesi, Bilkent Ankara