

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

BİLİM ve TEKNİK



YENİ UFUKLAR

TÜRKİYE'DE NANOTEKNOLOJİ

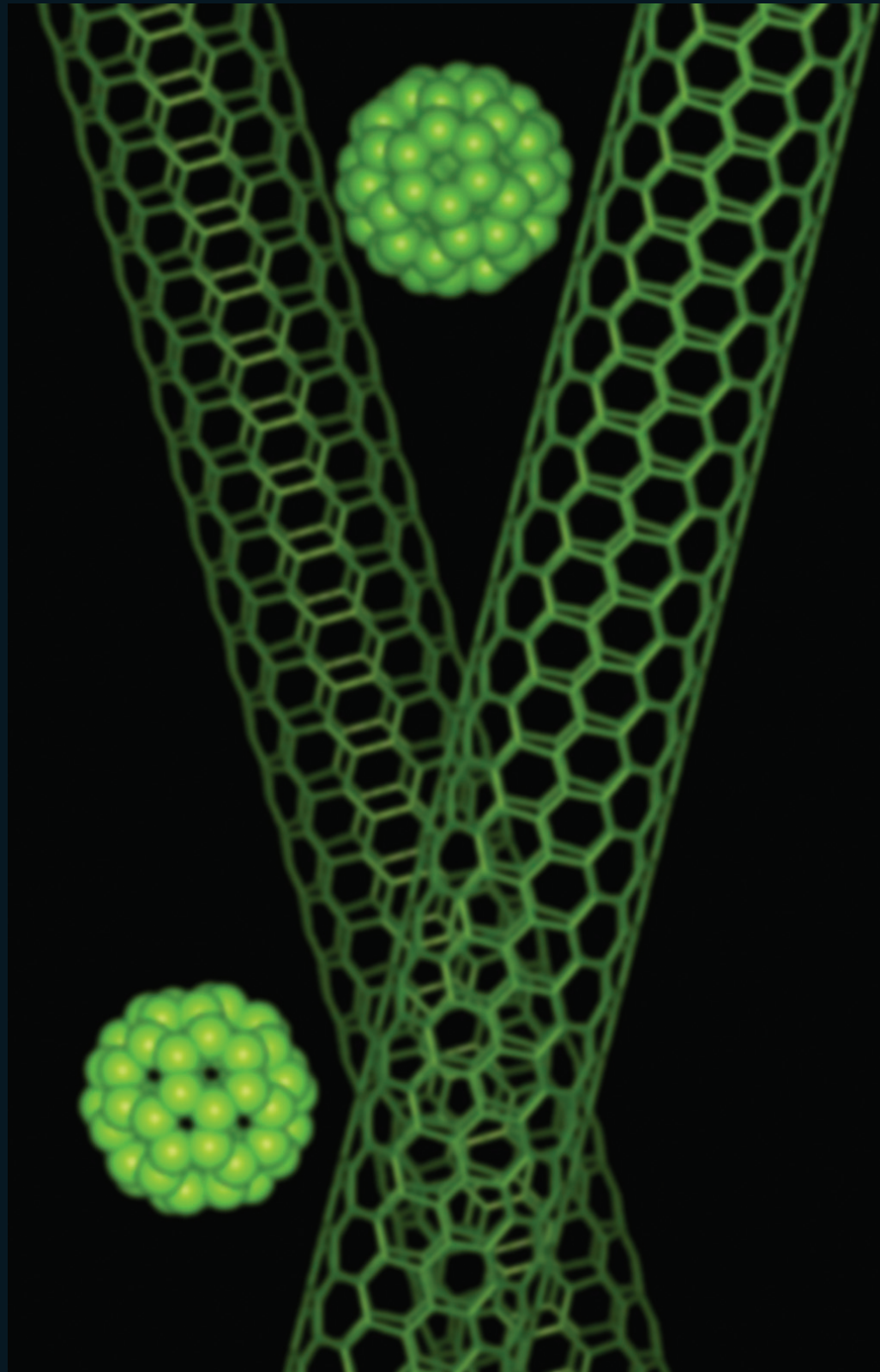
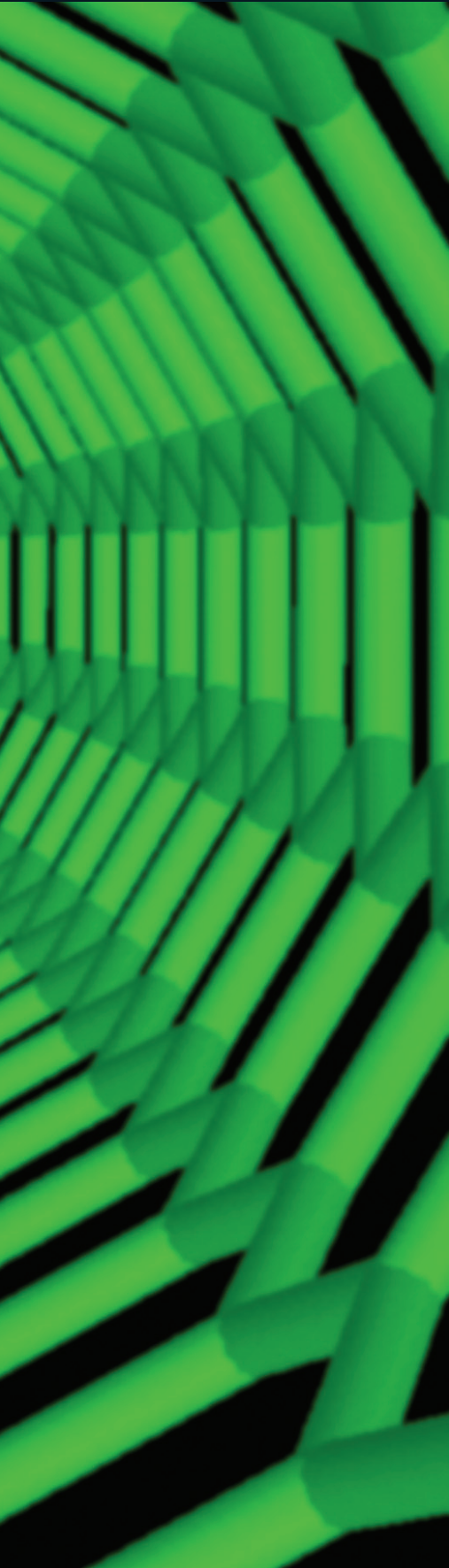
AĞUSTOS 2005 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYANLAR : Bilkent Üniversitesi - Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
Prof. Dr. Salim Çıracı - Prof. Dr. Ekmel Özbay - Doç. Dr. Oğuz Gülseren - Yrd. Doç. Dr. Hilmi Volkan Demir
Dr. Mehmet Bayındır - Ahmet Oral - Tuğrul Senger - Atilla Aydınli - Aykutlu Dana

NAN

Ülkemizi
çağdaş uygarlık düzeyine
ulaştıracak sıçrama tahtası bir
nanoteknoloji üssü olarak Bilkent
Üniversitesi'nde kuruluyor. Öteki üniversite
ve araştırma kurumlarında yürütülen
çalışmalarla Türkiye'nin bu ileri
teknolojinin ürünlerini kısa sürede
elde etmesi bekleniyor.

NOTEKNOLOJİ



BİLKENT ULUSAL NANOTEKN



Günümüzde nanoteknoloji ülkeler için stratejik bir önem taşımaya başlamış durumda. Gelişmiş ülkeler öncelikli alanlarını belirleyip çalışma ve eğitim programlarını geliştirirken, ülkemizde nanoteknoloji araştırmalarının çoğu kuramsal ve bireysel düzeyde. Avrupa Birliğinin 6. Çerçeve Programı sayesinde nanoteknoloji araştırmalarımız yeniden yapılanma ve ivme kazanmış bulunuyor. Bu arada nanoteknoloji, TÜBİTAK tarafından hazırlanan Vizyon 2023 Programı'na öncelikli alanlardan biri olarak alınmış bulunuyor. Bu yıl ilki Bilkent'te düzenlenen Nanoteknoloji Konferansı'na ise geniş bir katılım oldu ve nitelikli bilimsel bildiriler sunuldu.

Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü'nde 1989 yılından beri nanoteknolojiyle ilgili düşük boyutlu kuantum yapılarında elektron taşınımı, tarayıcı tünelleme mikroskopu (TTM) ve atomik kuvvet mikroskopu (AKM) uç-yüzey arası etkileşimler ve nanotriboloji,

nanotüp ve atom zincirleri konularında yoğun kuramsal araştırmalar yapılmaktaydı. Ayrıca, 2 boyutlu elektron sistemlerinin özelliklerini kullanan Ga-As teknolojisi zaman kaybedilmeden yakalanmış, T.C. Savunma Sanayii Müsteşarlığı tarafından desteklenen İleri Araştırmalar Laboratuvarı kurulmuştu. Günümüzde, bu laboratuvar, teknolojinin sınırında çok önemli optoelektronik ve elektronik aygıtlar yapılmakta, TTM ve AKM bazlı mikroskoplarda yeni teknolojiler geliştirilmekte.

Nanoteknolojide uygulamaların önem kazanması sonucu, kuramla deneysel çalışmaların sıkı bir işbirliği yapması ve belli hedeflere odaklanan disiplinlerarası araştırma çalışmalarının yapılması zorunlu hale geldi. Bunun yanında iyi yetişmiş deneyimli uzman gereksinimi de ortaya çıktı. Nanoteknoloji konusunu geniş bir kapsamda ele almak, bazı kritik konularda gerekli teknolojiyi geliştirmek, uzman yetiştirmek üzere hazırlanan Ulusal Na-

noteknoloji Araştırma Projesini T.C. Devlet Planlama Teşkilatı 11 milyon YTL kaynakla desteklemeye karar vermiş bulunuyor. Projeye, Bilkent Üniversitesi ve diğer özel kuruluşlar yaklaşık 4 milyon YTL kaynak sağlayacak. Toplam maliyetinin 30 milyon YTL olacağı öngörülen proje, yeni inşa edilecek 4000 m²'lik laboratuvar binasında faaliyete geçecek. Ayrıca Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü'nde mevcut 15 milyon YTL değerindeki araştırma alt yapısı ve teçhizat, proje araştırmalarında kullanılacak. Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Projesi, Prof. Dr. Salim Çıracı tarafından yönetilecek.

Projede prototipler geliştirmeye yönelik araştırma konuları belirlendi. Kuramsal çalışmalar nanobilimin temel problemlerinin çözümleriyle uğraşarak uygulamalı çalışmalara destek verecek, çok parçalı sistemlerinin kuantum mekaniğine dayalı hesaplama yöntemleriyle yeni nano yapılar (tüpler, teller, kuantum noktaları, manyetik

NOLOJİ ARAŞTIRMA MERKEZİ

moleküller, sürtünmesiz yüzeyler vb) geliştirilecek, spin ve enerjinin denge dışı kuantum istatistik fizik kuramıyla taşınması ve tutarlılığı incelenecek. Kuramsal çalışmalar merkezde kurulacak süper bilgisayarlarla sayısal hesaplara dönüştürülecek, elde edilen sonuçlar yeni aygıt ve detektörlerin tasarlanmasında kullanılacak. Uygulamalı alanda çalışmalar, nanoelektronik ve algılayıcılar (sensörler), nanofotonik, nanofiber ve akıllı tekstil, atom manipülasyonu, yüksek çözünürlüğe sahip ölçü aletlerinin geliştirilmesi ve lazer konularına odaklanacak. Projede ülkemizin tekstil sanayiine teknolojik destek sağlamak, öncelikle kir ve su tutmayan, nemi uzaklaştıran, zararlı ışınımı soğuran, renk tutabilen polimerleri geliştirmek için yoğun araştırma programları uygulanacak.

Sürtünme günümüzde halen güncelliğini ve önemini koruyan konulardan biri. Sürtünme nedeniyle enerji ve malzeme kayıpları çok önemli değerlere ulaşmakta. Triboloji ya da sürtünme bilimi kapsamında çeşitli disiplinlerde (fizik, kimya, makine ve malzeme mühendisliği vb) yoğun araştırmalar yapılıyor. TTM ve AKM'nin gelişmesi, sürtünmeyi atomal düzeyde inceleyebilmemize ve tribolojinin hızla ilerlemesine zemin hazırlamış bulunuyor. Sanayinin değişik sektörlerinin sürtünmeden değişik beklentileri var. Birçok sanayi dalı sürtünmeyi azaltmak ya da tümüyle ortadan kaldırmak isterken, taşıt vasıtalarında lastiğin daha iyi yol tutması ve sürtünme katsayısının artırılması için geniş kaynaklar ayrılıyor. Projemizde sürtünmeyi atomal düzeyde incelemek ve sürtünmesiz yüzeyler

geliştirmek üzere nanotriboloji araştırmaları kuramsal düzeyde başlayacak, daha sonra sağlanacak yeni kaynaklarla deney laboratuvarları kurulacak.

Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı'nda ilgilendiğimiz başka bir önemli konu, hidrojen depolanması ve yakıt hücreleri. Fosil yakıtlarının gün geçtikçe artan fiyatları, çevreye verdikleri büyük zarar, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme gereksinimini ortaya çıkardı. Yakıldığında atık olarak su verecek olan hidrojen molekülü, en ideal ve temiz enerji kaynağı olarak görülüyor ve hidrojenin depolanması ve yakıt hücrelerinde elektrik enerjisi elde etme konusu yoğun bir şekilde araştırılıyor. Projedeysse hidrojen depolanması konusunu kuramsal olarak araştırıp daha sonra deneysel ve uygulamalı çalışmaları başlatmayı planlamaktayız.

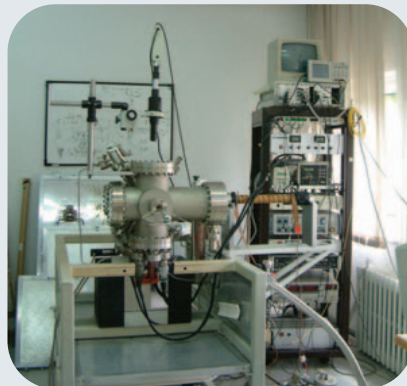
Nanoteknoloji, disiplinlerarası bir konu olduğundan projenin daha etkin yürütülebilmesi için, Bilkent'te Nanoteknoloji ve Malzeme Bilgisi doktora programının projeye paralel olarak başlaması da planlanmakta. Bu programa Fizik, Kimya, Matematik, Moleküler Biyoloji ve Genetik, Malzeme Bilgisi, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümlerinden öğrenciler doktora yapmak üzere katılabilecekler. Merkezde yapılan doktora çalışmaları, öğrencilerin nanoteknolojide uzmanlaşmalarına ve doktora sonrasında kolaylıkla iş bulmasına yardımcı olacak. Ayrıca diğer üniversitelerimizin ilgili bölümlerinden doktora öğrencileri ve öğretim elemanları da çeşitli araştırma programlarına katılabilecek ve merkezde nanoteknoloji konusun-

da deneyim kazanacaklar. Araştırmalarımızda yurt dışında tanınmış biliminsanlarının deneyimlerinden ve danışmanlığından da yararlanılacak ve çeşitli araştırma merkezleriyle işbirliği içinde ortak araştırma projeleri gerçekleştirilecek. Merkez, yurt dışında çalışan çok değerli biliminsanlarımızın deneyimlerini bizlerle paylaşacakları ve ortak araştırmalar yapacakları bir ortam yaratacak. Merkezde elde edilen bilgi ve uzmanlık, çeşitli şekillerde bilim ve sanayi çevreleriyle paylaşılacak.

Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde yapılan buluşların ve geliştirilen yeni yöntem ve teknolojilerin sanayiye aktarılması, prototiplerin daha da geliştirilerek pazarlanabilmesi, bu yolla yeni çalışma alanlarının yaratılması ve ekonomimize katkı sağlanabilmesi için T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Bilkent Üniversitesi ve Cyberpark, birlikte "Nanoteknoloji Kuluçka Merkezi" kuruluş çalışmalarını yürütmektedir. Avrupa Birliğinin maddi desteğiyle gerçekleştirilecek bu projede ilginç bir fikir ve buluş sahibi olan girişimci doktora öğrencilerinin, kendi iş ve işyerlerini kurmalarına destek verilecek. Böylece beyin göçünün de önüne geçilmiş olacak.

Özet olarak 2005 yaz sonunda Bilkent'te inşaat ve tesisat planlaması, inşaat çalışmaları, teçhizat alımları ve yeni eğitim programlarıyla başlayacak Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi projesiyle, nanoteknoloji araştırmalarında zaman kaybetmeden yol almaya başlayacağız.

Prof. Dr. Salim Çıracı
Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
Proje Yöneticisi
Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü



METRENİN BİR MİLYARDA BİRİ

Nanoteknolojinin Doğuşu

“Nano” sözcük olarak, bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelir. Bir nanometreyse, metrenin bir milyarda birine eşit bir uzunluk birimi. İnsan saç telinin çapının yaklaşık 100.000 nanometre olduğu düşünülürse ne kadar küçük bir ölçekten bahsedildiği daha rahat anlaşılır. Bir başka deyişle, bir nanometre içine yanyana ancak 2-3 atom dizilebilir; yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nanoölçeklerde bir nesneyi oluşturur. Bildiğimiz birçok molekül de nanoyapı tanımına giriyor. 20. yüzyılın başlarında maddeyi oluşturan parçacıklardan, örneğin elektronların hem parçacık hem de dalga gibi davrandığı, yine bu ölçeklerde belirsizlik kuramının geçerli olduğu saptandı. Bu temel öğelerden doğan kuantum mekaniği sayesinde atom ve moleküller doğru olarak algılanıp anlaşıldı, temel bilimler ve ilgili teknolojiler hızla gelişti. Kuantum mekaniği sayesinde, atomun enerji durumlarının neden kesikli olduğu, katıların klasik parçacık kuramı kullanarak hesaplanan bazı temel elektronik ve manyetik özelliklerinin neden gözlemlerden büyük sapmalar gösterdiği, artık bir bilmece olarak kalmaktan kurtuldu.

Kuantum mekaniğine paralel olarak 20. yüzyılın ilk ve ikinci çeyreğinde makine imalat sanayiinde de önemli gelişmeler yaşandı. Bu gelişmelerden daha sonra yeni bir sanayi devrimi ortaya çıktı. Klasik mekaniğin geçerli olduğu imalat sanayiinde kullanılan malzemelerin atomsal yapısı, mekanik, elektronik ve manyetik özellikleri ancak kuantum mekanik sayesinde anlaşıldı. Bu bilgiler ışığında yeni malzemeler de geliştirildi. En önemlisi, yarıiletken malzemeler, özellikle silisyum teknolojisi önem kazanıp, mikroelektronik sanayi hızla gelişmeye başladı. Mikroelektronik, iletişim teknolojilerinden başlayıp her alanda uygulama buldu. Özellikle bilgisayarların ve bilişim teknolojilerinin yaygın kullanımı, mikroelektronik başta olmak üzere, optoelektronik, fo-

tonik teknolojilerinin gelişmesinde itici kuvvet rolünü üstlendi. Bilgisayar kullanımının her alanda getirdiği hız, daha hızlı ve daha küçük bilgisayarlarla olan talebi canlı tuttu. Bu sayede bilgisayarlar yaklaşık her 18 ayda işlemci hızlarını ikiye katlayarak gelişmelerini sürdürmekte. Günümüzde bilgisayarlarda aygıt boyutları 50 nanometrenin altına inerken, mevcut teknolojilerin çözemeyeceği ısınma problemleri ortaya çıkmakta. Bunun yanında daha küçük boyutlarda elektronik aygıtların işleyişindeki yarı-klasik fizik kuramları geçerliliğini yitirip, kuantum olaylar önem kazanmaya başlamakta.

Bilgisayarın, daha sonra İnternet’in yaygın kullanımı, yaşam tarzımızı da çeşitli yönlerden etkiledi ve zamanla kullanılan teknolojiler yetersiz kalmaya başladı. Yaşam tarzımızı ve sağlığımızı yakından ilgilendiren, fakat daha önce hayal bile edilemeyen birçok gelişmenin kişisel kullanıma sunulması gündeme geldi. Yeni teknolojilerin sağlık hizmetlerinde başarıyla uygulanması, DNA’yla ilgili teknolojilerin gelişmesi biliminsanları ve mühendisleri her gün daha küçük boyutlara inmeye, daha az yer kaplayan, daha az enerji harcayarak daha hızlı çalışabilen aygıtlar yapmaya zorladı.

Bir aygıtta kullanılan malzemenin boyutu küçüldükçe çalışma hızı da artıyor ve o malzemenin yeni özellikleri ortaya çıkıyor. Boyutlar nanometre ölçeklerine yaklaşırken malzemenin fiziksel özellikleri kuantum mekaniğinin kontrolüne giriyor, elektron durumlarının fazı ve enerji spektrumunun kesikli yapısı daha belirgin hale geliyor. Daha da önemlisi, malzemeyi oluşturan atom sayıları 100’ler düzeyine inince, atomsal yapının geometrisi, hatta atom sayısının kendisi bile fiziksel özelliklerin belirlenmesinde etken oluyor. Nanoölçeklerdeki bir yapıya yeni eklenen her atomun fiziksel özelliklerde neden olduğu değişiklikler, bu atomun cinsine, nanoyapının türüne ve geometrisine bağlı olarak belirginleşiyor. Örneğin, nanoyapının iletkenliği, o yapıya tek bir atom eklense bile değişebilmekte. Benzer şekilde, nanoölçeklerde atomlararası

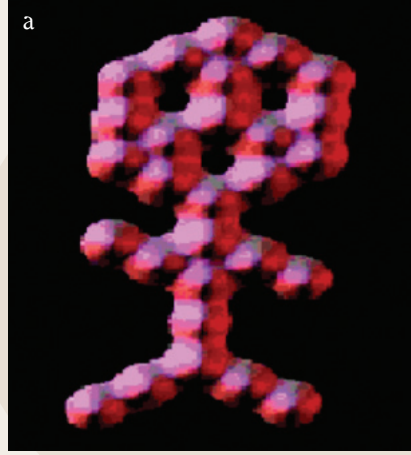
bağ yapısı da değişikliğe uğrayabilmekte; mekanik olarak malzeme güçlenirken ya da zayıflarken, elektronik olarak iletkenlik özelliği tümüyle değişebilmekte. Örneğin, yarıiletken olarak bilinen ve çağımızın en önemli malzemesi olan silisyumdan yapılan bir telin çapı nanometreye yaklaşırken tel iletken bir karakter sergiliyor. Diğer ilginç bir malzeme de karbon elementi. Yapıtaşını karbon atomunun oluşturduğu elmas kristali, bilinen en sert ve yalıtkan malzeme. Kurşunkalemlerden tanıdığımız, 2 boyutlu, düzlemsel grafit tabakalarıysa karbon atomunun yumuşak ve iletken bir yapısı. Bir boyuttaysa, karbon atomları çelikten çok daha yüksek bir çekme mukavemetine sahip olan ve normal koşullarda çok iyi bir iletken olan kararlı sicimleri (atom zincirlerini) yapıyorlar. Teknolojinin yeni taleplerine yanıt verebilen bu olağanüstü özellikler, nanometre boyutlarında yapay malzeme sentezlenmesini özendiyor.

Nanoyapıların olağanüstü özellikleri çok öncelerden tahmin edilmekteydi. Nitekim 1960’lı yıllarda, Feynman nanoyapıların bu yönünü vurgulayarak biliminsanlarının dikkatlerini nanometre boyutlarına çekmek için çaba gösterdi. O sıralarda kimyacılar da mikroelektronik sanayiine seçenek oluşturmak üzere moleküllerden transistör yapmayı önerdiler. Moleküller transistör yapımının başarılması, Bell Laboratuvarları’nda 1940’lı yıllarda Shockley, Bardeen ve Brattain tarafından yapılan ve bir yumruk büyüklüğünde olan katıhal transistörün boyutunun, yaklaşık yüz milyonda bir küçülmesi anlamına gelmekte. Ancak, moleküler transistörlerin birbirlerine iletken tellerle bağlanmaları ve bu transistörlerden bütünlük devre yapılması, çözümü zor problemleri de beraberinde getirdi. Bu nedenle silisyum mikroelektronik teknolojisi hâlâ egemenliğini sürdürebilmekte.

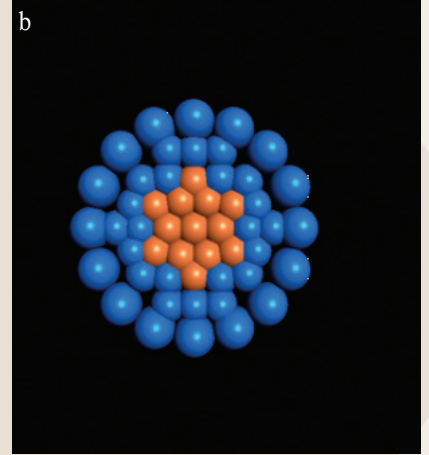
1980’li yıllarda peşpeşe gelen Nobel Fizik Ödüllerine konu olan çeşitli bilimsel çalışmalar hem nanometre ölçeklerinde saklı yeni davranışları ortaya çıkardı, hem de atomu görüp onu istediğimiz yere taşıyabilmemizi

İRİNDE BİLİM VE TEKNOLOJİ

olanak verecek yeni gelişmelere yol açtı. Kuantum Hall etkisi ve düşük boyutlu elektron sistemlerinde gözlenen yeni kuantumlaşmalar, yeni süperiletkenlik mekanizmaları, bilimsel araştırmaları kuantum kuyularına, kuantum telleri ve noktalarına yöneltti. Bu araştırmalar, büyüklükler nanometre düzeyine inince elektron enerjinin kuantumlaşmasının elektrik ve ısı iletkenliği gibi fiziksel özelliklere yansımacağını ve yeni kuantumlaşmalara neden olacağını gösterdi. Önce taramalı tünelleme mikroskopunun (TTM) daha sonra atomik kuvvet mikroskopunun (AKM) keşfi, yüzeyde bulunan atomların ve moleküllerin gözlenmesine, atomsal düzeyde tepkimelerin izlenmesine olanak tanıdı. Dr Eigler yüzeyde bulunan bir atomun TTM ucuyla başka bir yere nasıl taşınabileceğini, yüzeyle uç arasında atomun isteğe bağlı olarak hareket ettirilerek nasıl akım şiddetini ayarlayan atom-anahtarı yapılacağını gösterdi. Böylece 20. yüzyılın son çeyreğinde, doğada bulunmayan yeni nanoyapıların atomsal düzeyde tasarlanarak sentezlenmesi devri başladı. İnsanlık, 60 yıl içinde metre-milimetre büyüklüğünde malzemeyi kesici takımlarla işleyen ya da yüksek sıcaklıklarda kalıplara dökerek ya da döverek şekillendiren imalat teknolojisinden, atomsal düzeyde malzemeyi tasarlayıp yeni moleküller oluşturmaya yönelik bir imalat yöntemine geçti ve nanoteknolojiyle tanıştı. Nanoteknoloji nanoölçeklerde malzeme tasarlayıp üretmeyi, bu malzemelerden yeni yöntemlerle aygıt, alet üretmeyi amaçlar. Bu bağlamda nanoteknolojide kullanılan yöntemler, bilinen yöntemlerden çok farklı olabiliyor. ABD’de mevcut teknolojiler doyum noktasına yaklaşırken ve uluslararası rekabet karşısında kâr marjları düşerken, nanoteknolojide oluşabilecek pazar ve elde edilecek kârı çok iyi değerlendirebilen ekonomistler, Başkan Clinton’a baskı yapıp nanoteknolojiyi öncelikli alan olarak ilan ettirdiler. O günden bu günlere gelirken ABD’de kurumlar yeniden yapılanmaya giderek yeni yatırımlar yapıldı, çok sayıda laboratuvar kuruldu. 2015 yılında ABD’de nanotekno-



(a) Bir yüzey üzerine atomlar teker teker dizilerek yapılan Atom Adam’ın görüntüsü. (b) Ga ve As atomlarından oluşturulan bir süperatom. Ga ve As atomlarından oluşan kürelerin çapına bağlı olarak süperatomun elektronik enerji yapısı, istenildiği gibi ayarlanabilmekte.

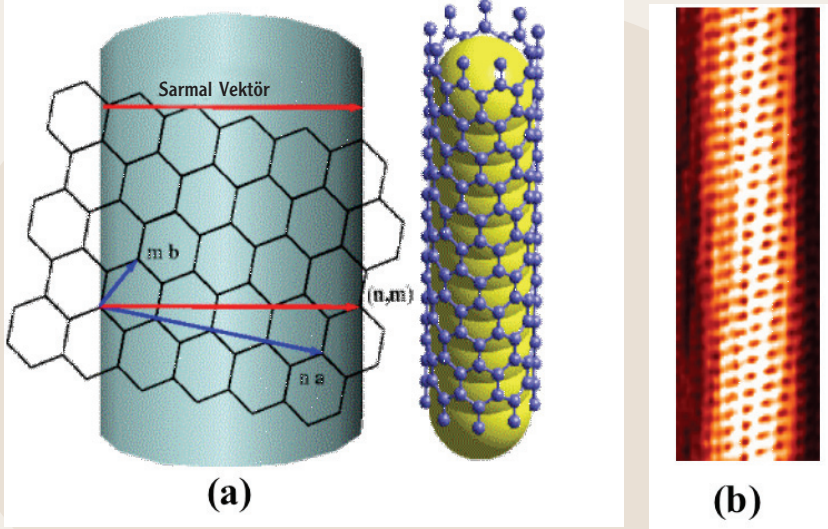


loji ürünlerinin satışlarının 1-3 trilyon dolar dolaylarında gerçekleşeceği tahmin edilmekte. ABD’de üniversite ve araştırma merkezleri kendi aralarında örgütlenerek kaynakları daha etkin kullanmak üzere “araştırma üçgenleri” oluşturmuş bulunuyorlar. Günümüzde ABD dışında Japonya, Avrupa Birliği ülkeleri, İsrail, Çin ve Kore’de de nanoteknolojiye önem verilmekte. Çin’de nanoteknoloji konusunda bir milyon uzman ve araştırmacı yetiştirmek üzere yeni bir program başlatılmış durumda. Avrupa Birliği 2010 yılında ABD ve Japonya’yı yakalamak için 6. Çerçeve Programında nanoteknolojiyi öncelikli alan ilan etti. Son zamanlarda ABD ve Avrupa’da çok sayıda nanoteknoloji araştırma merkezi, ayrıca üniversitelerde bu alanda yüksek lisans programları açıldı.

Nanoteknolojide Son Gelişmeler

Nanoteknolojinin önümüzdeki 10-15 yıl içinde yeni bir teknoloji devrimi olarak ortaya çıkacağına inanılıyor. Teknolojide ilerlemiş ülkeler nanoteknolojiye odaklanarak, bu devrimin içinde yer almalarını sağlayacak programlar üzerinde ciddi çalışmalar yapmaktalar. Bütün bu çabaların altında teknoloji yarışında geri kalma endişesi yatıyor. 20. yüzyılın başından beri gelişmekte olan ve her alanda, bilgi iş-

lemden akıllı malzemelere ve mikroelektronığe kadar çok gelişmiş teknolojileri kullanan otomotiv endüstrisinde rekabet nedeniyle son yıllarda kâr marjları çok düşmüş durumda. Gelişmiş ülkeler otomotiv sanayii ve benzer sanayileri daha az gelişmiş ülkelere bırakıp rekabetsiz bir ortamda yüksek kârlı teknolojilere yönelmekteler. Nanoteknoloji bu bağlamda (kozmetikte reflektan boyalardan tıp dalında kanser tedavisine kadar) geniş bir alanı kapsayan uygun bir konu olarak ortaya çıktı ve bu nedenle de bütün önceliklere sahip oluverdi. Günümüzde tekstil sanayii de benzer sıkıntıları yaşamakta. İşçiliklerin çok yüksek olduğu gelişmiş ülkelerin tekstil sanayii, gelişmekte olan ülkelerin, özellikle Çin’in ucuz iş gücüne dayalı rekabeti karşısında yok olmaya yüz tutmakta. Şimdi İngiltere ve ABD’de yüksek teknoloji kullanılarak tekstil sanayilerinin yeniden canlandırılması için ciddi adımlar atılıyor. Ancak, Çin’de de tekstil sanayiinde uygulanacak nanoteknoloji ürünleri hızla geliştiriliyor. Çin’de geliştirilen kirlenmeyen kumaşlar ve dokuma ürünleri nedeniyle, çamaşır makinası üreten kuruluşların stoklarını eritip kapasite indirimine gideceklerinden bahsediliyor. Aslında nanoteknolojinin tekstil sanayinde çok önemli işlevinin olacağı biliniyor. Dokumada kullanılacak elektronik fiberler sayesinde, istenildiğinde renk değiştirebilen, vücudumuzu zararlı



Karbon tütün atom yapısı. (a) Grafitin bal peteği görünümünde atom tabakası. Karbon atomları altıgenlerin köşelerinde yer alıyor. Karbon nanotüp, bu tabakanın bir silindiri üzerine sürekli bir şekilde sarılmasıyla elde edilir. Kırmızı renkle gösterilen sarmal vektörü C, onun uzunluğunu ya da tütün çevresini ve sarmal açısını belirleyen (n,m) ikilisiyle tanımlanmaktadır. (b) Bir karbon nanotütün TTM görüntüsü.

ışınlardan koruyan, güneş enerjisinden elektrik üretmek için soğutan, kışın ısıtılabilen giysilerin yakın bir zamanda vitrinlere çıkması beklenmektedir. Özel polimerler sayesinde terin emilip vücudumuzun kuru kalmasını sağlayan, su tutmayan giysiler şimdi geliştirildi.

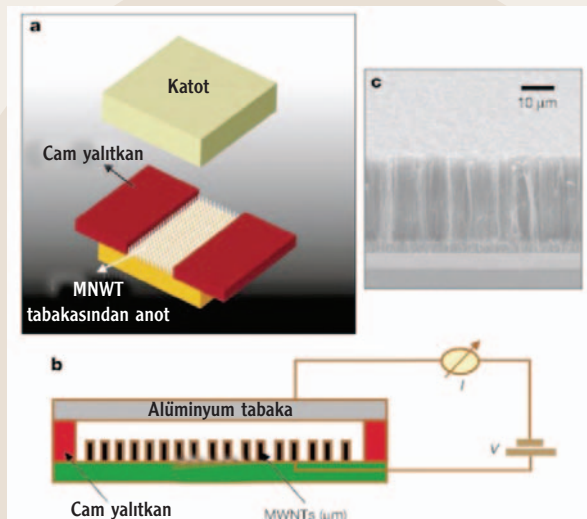
Nanobilim ve nanoteknolojide araştırma çalışmaları çok çeşitli alanlarda sürdürülüyor. Son zamanlarda nanometre boyutlarında ortaya çıkan çeşitli kuantum olaylar, ısı ve elektrik iletkenliğinin kuantumlaşması, spine bağlı elektron taşınması, faz tutarlılığı, kararlılık ve denge dışı fiziksel olaylar çok sayıda kuramsal ve deneysel çalışmalara konu oldu. Nanotellerde kuantum iletkenlikle tel kesiti arasında gözlemlenen ilginç ilişkiler, nanoölçeklerde tel çapının ve bir bakıma kesitte bulunan atom sayısının bile kesikli olarak değişeceğini gösteriyor. Böylece nesne büyüklüklerinin de kuantumlaşabileceği sorusu gündeme geliyor.

Karbon Nanotüpler

1991 yılında karbon nanotüplerin sentezlenmesiyle bazı nanoyapıların ne kadar farklı davranabilecekleri ve bu farklılıklardan çok değişik işlevlerin elde edilebileceği

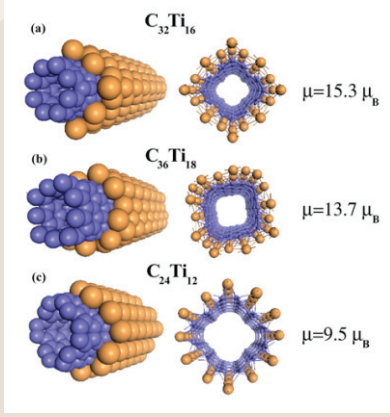
anlaşıldı. Karbon nanotüp, grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindiri üzerine hiç bir kusur oluşturmada kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir. Yukarıdaki şekilde de görülebileceği gibi, karbon nanotüpler (n,m) tam sayılarıyla tanımlanmaktadır ve elektronik özellikler n ve m sayılarının değerine bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak, (n,0) yarıiletken tüpte bal peteği altıgenleri iki kenarı tütün eksenine paralel olacak şekilde yönelmiş. (n,n) tüplerinin tümüyle iletken bir karakter

ter göstermekte. Kısaca çaplarına ve (n,m) değerine bağlı olarak karbon nanotüpler çok farklı elektronik yapıda olabiliyor, yarıiletken olanların bant aralıkları da geniş bir aralıkta değişiyor. Ayrıca (n,0) yarıiletken tüpler radyal deformasyon altında iletken dönüşmekte. Bu özellik, normalde yarı iletken olan bir nanotüp boyunca çeşitli yerlere deformasyon uygulayarak metal-yarıiletken eklemleri gibi değişik elektronik aygıt yapımında kullanılabilir. Karbon nanotüplerin bir başka ender özellikler de, eksenleri boyunca çelikten bile kat kat dirnençli, radyal yönde yüksek elastik özelliklere sahip olmalarıdır. Bu özellik, karbon nanotüplerin uzay asansöründe halat olarak kullanılması gibi fikirleri çağrıştırmışsa da, daha gerçekçi uygulamalar üzerine çalışmalar hızla artmakta. Karbon nanotüpler üzerinde çok sayıda kuramsal ve uygulamalı araştırmalar yapılmakta, ilginç prototipler geliştirilmekte. Bunlardan biri, ortamda bulunan zehirli gazları algılayabilen nanotüp kullanarak yapılan bir gaz dedektörü. Bu sayede, kilolarca ağırlığa sahip bir cihaz milimetre boyutlarına indirgenebilmiş. Karbon nanotüplerin nanometre ölçeğindeki sivri uçlarında oluşan yüksek elektrik alanında kolaylıkla iyonize olabilen gaz atomlarının iyonizasyon enerjilerinden, gazın türü tayin ediliyor. Böyle bir dedektör



Cam üzerine dikine dizilen karbon nanotüpler ve onların üstünde alüminyum plakadan oluşan gaz dedektörü. Sivri karbon nanotüplerle plaka arasında normal gerilim farkında bile oluşan yüksek elektrik alanında, atomların iyonizasyon enerjilerinden gazların cinsi belirlenebiliyor. Bu mikrodedektör hareketli kullanımlarda büyük kolaylık sağlaması beklenmektedir. (Nature 424, 171 2003.)

pille çalışabiliyor ve elbise yakasında taşınabiliyor. Diğer bir uygulamada iki platin tel üzerine konulan bir nanotüp, platin telle arasında oluşan kontak potansiyeli aracılığıyla transistör işlevi görüyor. Benzer yöntemlerle nanotransistör yapılması değişik gruplar tarafından başarmış olmasına karşın, bu transistörlerin birbirleriyle bağlanıp bütünleşik devre yapılmasında henüz sorunlar var. Bu probleme İsrail'den ilginç bir çözüm önerildi: Buna, DNA'ya dayalı olarak yapılan transistörlerin kendi kendilerine yapılıp çoğalabilme yeteneklerinin, bir şekilde aygıt entegrasyonunu sağlayabileceği düşünülüyor.



Ti atomlarla kaplanmış karbon nanotüpler ve bu tüplerin kalıcı manyetik momentlerinin değerleri.

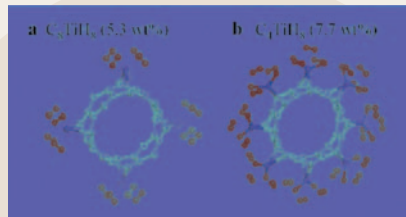
Bütün olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında, dış ya da iç cidarlarına atom ya da moleküller soğurarak daha işlevsel hale getirilmeleri, karbon nanotüpleri araştırmada ilgi odağı haline getirmiş durumda. Nanopayların işlevsel hale getirilmesinin nanoteknolojide taşıdığı önemi Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü'ndeki araştırma grubumuzda kuantum mekaniğine dayalı olarak yaptığımız bazı kuramsal çalışma sonuçlarımızı özetleyerek göstermeye çalışacağım. Bunun için yarıiletken bir karbon nanotüp dış cidarına soğurulan titanyum (Ti) atomunu ele alalım. Bir geçiş elementi olan Ti kolaylıkla nanotüp cidarına bağlanıp güçlü bir bağ oluşturabiliyor. Bu güçlü bağ sayesinde Ti atomu, nanotüp yüzeyini düzgün olarak kaplayabilen ender bir element. Diğer elementlerse oluşturdukları zayıf bağlar nedeniyle tüp yüzeyinde topaklar oluşturuyorlar. Cidarlarını düzgün olarak kaplayan Ti atomları sayesinde, karbon nanotüp, teknolojik olarak önemli özellikler sergiliyor. Öncelikle, Ti atomları üzerinden taşınabilen akım sayesinde tüp, yüksek bir iletkenlik kazanıyor. Çapları nanometreden küçük olan bu iletken teller, aygıtların birbirine bağlanmasında kullanılabilir. Ayrıca Ti atomlarıyla kaplanan bir tüp, yüksek değerlerde manyetik momente sahip oluyor. Daha da önemlisi, tüpün toplam manyetik momenti, tüpe eksen boyunca elastik deformasyon uygulayınca ya da tüp üzerine yeni Ti atomları soğurunca önemli değişiklikler gösteriyor. Yüksek manyetik momen-

te sahip olan Ti kaplanmış tüplerin nanomiknatis, yüksek yoğunluklu bilgi depolayan küçük ölçekli sabit disk ve deformasyon ölçmeye yönelik ölçü aletleri yapımında kullanılması bekleniyor.

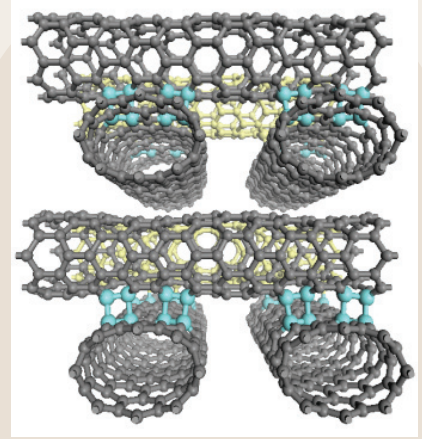
Karbon nanotüpler, yüksek yüzey-hacim oranları nedeniyle hidrojen depolama için ideal malzeme konumundalar. Ancak hidrojen molekülü H_2 , nanotüp yüzeyine bağlanamamakta. Çok ilginçtir ki, nanotüp yüzeyine soğurulan her Ti atomu, dört H_2 molekülünü aynı anda bağlayabiliyor; istenildiği zaman da serbest bırakabiliyor. Tüpün iç ve dış cidarlarına Ti atomu kaplayarak H_2 depolama kapasitesinin çok yüksek değerlere çıkarmak mümkün. Kuramsal çalışmalardan, ABD'de NIST'ten (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) Dr. Taner Yıldırım ile birlikte elde ettiğimiz bu sonuç, hidrojen depolama ve yakıt hücresi araştırmalarında adeta bir dönüm noktası oldu.

Ti kaplanmış iletken tüplerden 2 ya da 3 boyutlu örgüler ya da ızgaralar oluşturularak, nanoaygıt ve transistörlerden bütünlük (entegre) devre yapımında kullanılması öneriliyor. Ayrıca tüpleri eklem yerlerinden Ti atomuyla birbirine kaynatarak taç geometrisinde aygıtlar da yapılabilir.

Kuramsal çalışmalarımız, karbon dışında alüminyum, silisyum, altın gibi elementlerin ve galyum arsenit gibi bileşiklerin de tüp yapısında kararlı kalabileceklerini göstermişti. Bu öngörülerin bir kısmı deneysel olarak gerçekleştirildi. Özellikle silisyum tüplerin moleküler elektronikte uygulama bulması beklenmiyor. İletken sarmal tüplerde oluşacak dönel akımların, tüpün merkezinde çok yüksek manyetik alanlar endüklemesi ve



Karbon nanotüp yüzeyine soğurulan Ti atomlarına hidrojen moleküllerinin bağlanması. Şekildeki sistem yakıt hücreleri için yüksek kapasiteli hidrojen depolayabilecek bir ortam oluşturmaktadır. Resimde mavi küreler nanotüp cidarına soğurulmuş Ti atomlarını, kırmızı küreler hidrojen molekülünü temsil ediyor.



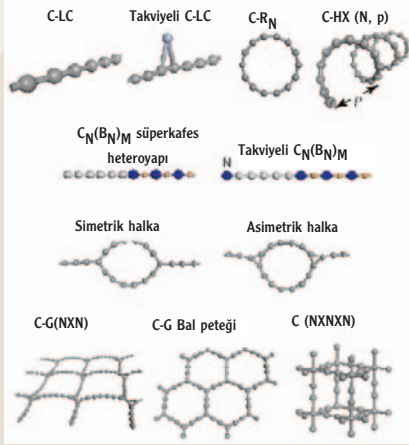
Karbon nanotüplerden yapılan 3 boyutlu ızgara ya da örgü. Basınç altında birbirine yapışan tüpler Ti ya da karbon atomu kullanarak birbirine kaynayabilmekte. Aygıtların tüplerin eklemelerine yerleştirilmesiyle bütünlük devreleri de oluşturmak mümkün olabilecektir.

elektromiknatis yapımına olanak vermesi düşünüyor.

Atom Zincirleri

Her karbon atomu en yakın iki komşusuyla çift bağ yaparak bazıları deneysel olarak da gözlemlenmiş olan sicimleri oluşturur. Normal koşullarda söz konusu çift bağ sayesinde karbon sicimi, altın atomunun zincirinden daha iyi bir iletkenliğe sahiptir. Yine çift bağ sayesinde, çekmeye karşı nanotüpten yaklaşık iki kat daha yüksek bir direnç gösterirken, bükülme esnekliği sayesinde halka, helis, örgü ve ızgaralar da yapabilmekte. İlke olarak, arzu edilen herhangi bir geometriye göre tasarlanan örgülerin düğüm noktalarına moleküler aygıt yerleştirilerek, nanoölçülerde bütünlük devre yapmak mümkün olabilecektir. Sonlu sayıda karbon atomundan oluşan sicimin iki metal elektrot arasında iletkenliği, atom sayısına, hatta bu sayının tek ya da çift olmasına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterir. Kuantum etkisinin bir sonucu olarak doğrusal sicimin uzunluğu artarken direnci azalabilir.

Başka bir ilginç durumda Cr, Co, hatta Ti atomlarıyla periyodik olarak katılan C_nCo ya da C_nCr ($n=3-4$) zincirleri, olağanüstü bir elektronik özellik gösterir. Farklı spin yönüne sahip bantlar ayrılarak zincire ferromanyetik bir yapı kazandırır. Bunun da ötesinde, bir spin yönünün



Karbon sicimlerinden oluşturulabilecek çeşitli kararlı yapılar. İdeal doğrusal zincir iyi bir iletkenlik seçerken, asimetrik halka yalıtkan olabilir. Periyodik $C_n(BN)_m$ eklemleri süperörgü gibi davranır.

elektronik enerji bandı metal gibi davranırken, tersi spin yönünde bantlar, yalıtkan ya da yarıiletken gibi davranır. Normalde kristaller metal ya da yarı iletken olabilirken, Co ya da Cr ile periyodik olarak katılan atom zincirin aynı anda hem metal hem de yarı iletken gibi davranışı, akımı ileten elektronların mutlak spin kutuplanmasına sahip olduğunu gösterir. Bir başka deyişle, böyle bir aygıt ancak bir yönde spine açık, ters yönde kilere kapalı kalır. Elektronların spinlerine bağlı olan bu tür elektroniğe “spintronik” adı veriliyor. Spintronikte iletişim kapasitesi artırılıp değişik elektronik ve manyetik aygıtlar yapmak amaçlanıyor.

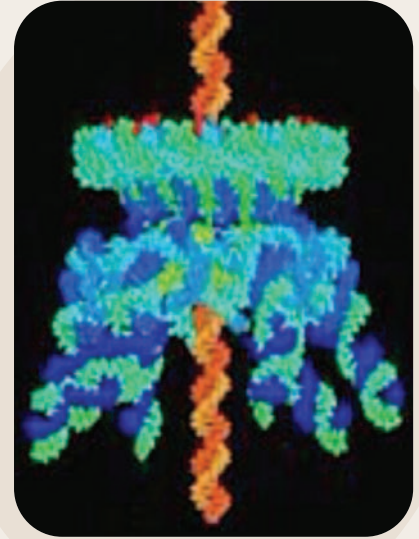
Birkaç karbon atomundan oluşan zincir parçaları uçlarından Co ya da

Cr atomlarıyla kapanınca, yapay ve doğrusal CoC_nCo ya da CrC_nCr molekülleri ortaya çıkar. Kuantum mekanığına dayalı duyarlı hesaplar, bu moleküllerin de kalıcı manyetik özelliklere sahip olduğunu gösteriyor. Örneğin, CrC_nCr zincirinde karbon atomunun sayısı n , tek bir sayıysa zincir “ferromanyetik” (yani her iki Cr atomunun spinini de aynı yönde), çift sayı olduğundaysa “antiferromanyetik” (yani Cr atomlarının spinleri farklı yönde) olur. Antiferromanyetik yapının iletkenliği her iki spin yönünde elektronlar için de zayıf bir değerde seyrederken, antiferromanyetik yapı dışarıdan etkiyen manyetik alanla ferromanyetik yapıya dönüşür ve iletkenlik artar. Böylece sistemden geçen akım kolaylıkla kontrol edilebilir. Bu şekilde çalışan aygıtta “spin vanası” deniyor.

Co, Cr gibi atomlarla katılan ve birkaç karbon atomunu içeren manyetik moleküllerin gelecekte ilginç bir uygulama alanı, çok yoğun bilgi depolanmasında görülebilecek.

Bütün dünyada bir yılda yaklaşık 10^{19} bit bilgi üretiliyor. Bu kadar bilgiyi günümüz teknolojisiyle depolayan CD’ler üstüste dizilse 6000 km yüksekliğinde bir sütun oluştururdu. İlkece, nanoteknoloji kullanarak tüm bu bilginin yaklaşık 1 cm^3 ’lük bir hacim içerisinde depolanabileceği öngörülüyor. Aşağıdaki şekil, bunun nasıl gerçekleşebileceği konusunda bir model sunmakta.

Yukarıda sunulan çok dar bir kesitle nanobilim ve teknolojinin yaşantı-

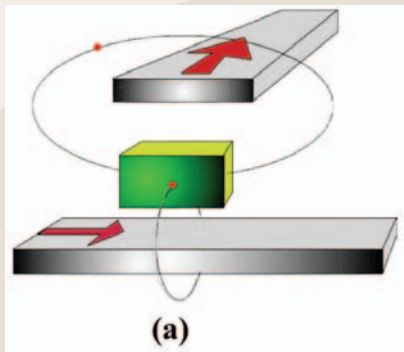


Viral RNA ve DNA’dan yapılan savaşı bir nanorobot.

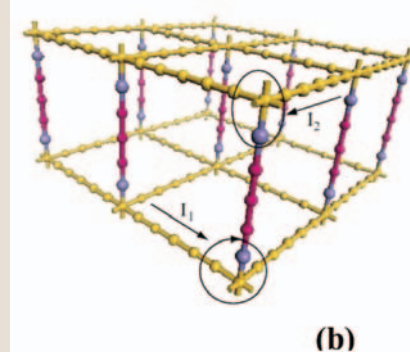
mıza neler getirebileceği, dünyamızı kısa bir zaman diliminde nasıl değiştireceği açıkça görülüyor. Günümüzde biliminsanları her bilim dalına, her teknoloji alanına nanoölçekleri sokmak, olası sıradışı özellikleri ortaya çıkarıp yeni bir teknoloji ürünüde kullanabilmek için hayalleri zorlayan yöntemler keşfediyorlar. Karbon nanotüplerin otomobil lastiklerinde kullanılmasıyla, çelikten elde edilen dayanıklılığın ve güvenilirliğin çok daha fazlasının elde edilmesi bekleniyor. Viral RNA ve DNA’dan yapılan nanorobotlar yakıt olarak kimyasal bileşenleri kullanarak, hücre içindeki sarılık virüsüne saldırabiliyorlar. Diğer yandan genetik yapısıyla oynanan virüsler, kuantum noktalarını mükemmel olarak dizibilen kölelere dönüştürülüyorlar. Bir başka alandaysa, nanoteknoloji kullanarak kuantum bilgisayarlarının işlemcilerini geliştirmek için uğraş veriliyor. Böylece mevcut en hızlı bilgisayarlardan binlerce kat daha hızlı bilgisayarların yapılması planlanıyor. Böyle bir bilgisayar, şifreleri kolaylıkla kırarak dünyadaki bütün gizli bilgileri elde edebilecek.

Kısaca uzmanlar, geleceğin teknolojisini geliştirmek için gece gündüz çalışıyorlar. Bugün çok küçük şeylerle uğraşanlar yarının sanayi devleri olmak yolunda emin adımlarla ilerliyorlar.

Prof. Dr. Salim Çıracı
Fizik Bölümü, Bilkent Üniversitesi



(a) Bilgisayarlarda RAM belleğinin kapasitesini artırmak üzere yakında uygulamaya sokulacak olan MRAM belleğinin basit anlatımı. Yeşil manyetik malzemenin üst ve altındaki iletkenlerden oklarla gösterilen yönde akım geçtiğinde, manyetik alan yönü değişebiliyor, yani veri yazılabilir; yalnızca bir iletkenle akım geçmesi durumunda manyetik alanın yönü okunabilir, yani yazılan veri okunabilir. (b) İlke olarak benzer şekilde karbon atomlarından yapılan bir örgüde aynı yönde yerleştirilen ferromanyetik CrC_3Cr zincirlerinde manyetik alanın yönü değiştiriliyor ya da alan yönü okunabilir.



NANOTEKNOLOJİ DESTEKLİ AKILLI ELBİSELER

“Yıl 2015, küresel ısınmanın da etkisiyle yaz ayları boğucu sıcaklığıyla bu yıl daha erken geleceğinin işaretini veriyor; güvercinler, serin bir ağaç gölgesi arıyorlardı. Özel kuvvetlere bağlı bir grup asker çölleşmeye yüz tutmuş uçsuz bucaksız ovada hızla hedefine doğru ilerliyordu. Güneşin yakıcı ışınları askerlerin üzerlerindeki üniformalarda enerjiye dönüştürülüp, bir kısmı üniformanın iç yüzeyinin soğutulmasında harcanıyor, böylece askerler sıcağından etkilenmiyordu. En önde yıldırım hızıyla hareket eden komutanın uyarısına karşın yanlışlıkla basılan bir mayın zincirleme patlamalara neden olmuş, ortalık bir anda savaş alanına dönmüştü. 20 kilometre gerideki komuta merkezindeki bilgisayar ekranında, bütün askerlerin son durumlarına ilişkin bilgiler geliyordu. Durum oldukça vahim gözüküyordu. Komutanın kalp atışı düzensizleşmiş ve kalbi bir iki dakika içinde durabilirdi. Birkaç askerin karın bölgelerinde kanamalar başlamış, hızla kan kaybediyorlardı. Diğerlerinin de durumu çok iyi olmadığından, ölümle pençeleşen arkadaşlarına yardım edemiyorlardı.

Askerlerin üzerlerine giydikleri akıllı elbiseler ilk görevlerini başarıyla yapmış, askerlere ait kalp atışı, vücut ısı, kanama bölgeleri ve sayısına ait bilgileri merkeze göndermiş, ve göndermeye devam ediyordu. Bununla da yetinmeyip, hızla kan kaybeden askerlerin kanama bölgelerine baskı yapıp kanamaları durduran akıllı elbiseler, kalp atışı duran komutana kalp masajı uygulamaya başlamış, kısa süre sonra



Süper asker: Bir asker düşünün; üzerine giydiği akıllı üniforma, düşman askeri lazer silahıyla nişan aldığı anda haber verecek, enerjiye ihtiyacı olduğunda güneş pili gibi çalışacak, zehirli biyolojik ve kimyasal gazları tesbit edecek, ve gece karanlığında kendi askeri tarafından tanınabilecek, ama aynı zamanda çok hafif ve ucuz olacak. Eskiden yalnızca filmlerde tanık olduğumuz bu akıllı elbiselerin yakın bir gelecekte kullanılmaya başlanması bekleniyor.

onu hayata geri döndürmüştü. 5 dakika içinde olay yerine ulaşan ilkyardım ekibi, merkezi bilgisayara ulaşan veriler ışığında yaralanan askerlere tanılarını koymuş, zaman kaybetmeden duruma müdahale edebilmişti.”

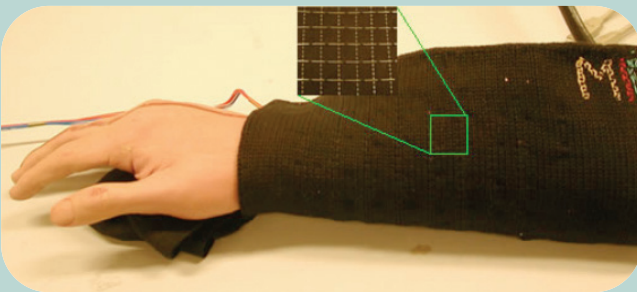
Yukarıdaki senaryo bazıları için hayal gibi görünse de, kısa zaman içinde bunların gerçeğe dönüşeceği umudu-

nu besliyoruz. Nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki hızlı gelişmeler; hafif, alabildiğince esnek ve çok fonksiyonlu termal, mekanik, akustik, ve opto-elektronik özelliklere sahip kumaşların üretilmesini mümkün kılıyor.

Geçen birkaç yıl içerisinde MIT’de geliştirdiğimiz ve günümüzde çiplerin yapımında kullanılan yöntemle seçenек bir teknoloji, çok fonksiyonlu dedektörlerin, güneş enerjisi pillerinin fiber üzerinde üretilmesine olanak sağlamakta. Yeni yöntemin ana hatları şöyle özetlenebilir: İletken, yalıtkan ve yarıiletken üç farklı madde kullanılarak istenen çok fonksiyonlu aygıt, makroskopik boyutta yapılıyor. Daha sonra bu yapı, geometrisi hiç bozulmadan birkaç saç teli kalınlığına kadar küçültülünce, kilometrelerce uzunlukta işlevsel aygıtlar elde ediliyor. Gelecek yıllarda, ülkemize de taşınması umud edilen bu yeni teknolojinin, kritik tıbbi ve askeri uygulamalarda kullanılması düşünülmekte.

Öte yandan, nanoteknoloji destekli yeni malzemelerin ülkemizin en önemli ihracat ürünlerinden biri olan tekstil endüstrisinde kullanılmaya başlanması, uluslararası rekabet gücümüzü ciddi ölçüde artıracak. Ayrıca, geliştireceğimiz nanoteknoloji destekli patentlenmiş ürünler, ülkemizi ucuz iş gücüne dayalı ekonomik yapıdan hızla uzaklaştıracak, yüksek katmadegere sahip ulusal markalarımızın dünya pazarında yerlerini almalarını sağlayacak.

Dr. Mehmet Bayındır
Massachusetts Teknoloji Enstitüsü/ABD



Gören, duyan ve hisseden kumaşlar: Çok ince ve hafif fiberler üzerinde üretilen ışık, ısı ve titreşim algılayıcıları, kumaş halinde dokunabiliyor. Algılama elementleri kumaş üzerinde her bölgeye dağıtıldığından, yüksek çözünürlük elde edilebiliyor. MIT’de geliştirdiğimiz bir yöntemle üretilen fiber tabanlı yeni nesil dedektörler; ölümleri azaltacak askeri elbiselerin, hissedilen robot uzuvlarının, deprem tespiti yapabilecek aygıtların tasarımında kullanılacak.

“Nano” sözcüğü, herhangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına geliyor. Nanoyapılar, yaklaşık 10-100 atomluk sistemlere (10^{-9} metre) karşılık geliyorlar. Bu boyutlarda sistemlerin fiziksel davranışları, normal sistemlere kıyasla farklı özellikler taşıyor. “Nanobilim” ve “nanoteknoloji” sözcükleri altında toplanabilecek bu farklılıklar yaklaşık 10 yıldan beri dünya ülkelerinin sivil-askeri bilim ve teknoloji stratejilerini belirler hale gelmiş bulunuyor. Yoğun madde fiziği, kimya, mühendislik bilimleri, moleküler biyoloji ve genetik ve malzeme biliminin arakesitindeki nanobilimin gelmiş olduğu son durum ve yeni gelişmeler üzerine bir fikir verebilmek amacıyla nano-aygıtlardan bazı örnekler derlenerek aşağıda sunulmuştur.

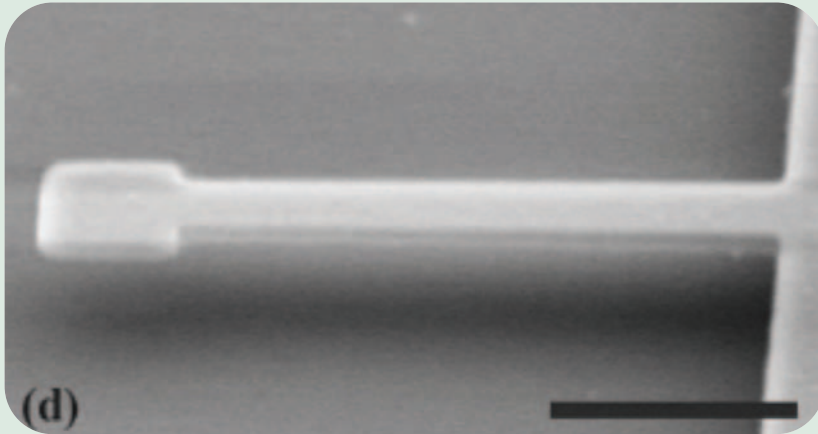
Nano-aygıtlar Virüsleri Hedefliyor:

Araştırmacılar nanoelektromekanik (NEMS) aygıtları, virüsleri ortaya çıkarmak üzere kullanmaya başladılar. Bir araştırma grubu silisyum dirseklere (cantilever) dayanan aygıtlarla böcek baculovirusleri yakalarken diğer bir araştırma grubu da nanotel alan-etki tranzistörleriyle grip virüslerini gözlemeyi başardı. Bu teknikler kolaylıkla tıp uygulamaları ya da biyolojik silahların ortaya çıkartılması için kullanılabilir.

Cornell Üniversitesi'nden Harold Craighead ve iş arkadaşları, 10^{-18} gram gibi küçük kütleleri ölçebilen bir nanoelektromekanik aygıt tasarladılar. Şekilde görüldüğü gibi bu aygıt 500 nanometre genişliğinde, 4 mikron uzunluğunda bir silisyum alttaşın titreşimlerine dayanıyor. Küçük bir parçacık bu alttaş üzerine yerleştirildiğinde, bunun titreşim frekansı

nı değiştirebiliyor. Bu frekans değişimi alttaş üzerinden yansıtılan lazer ışığının gözlemlenmesiyle ölçülebilir ve böylece parçacığın kütlesi hesaplanır. Cornell grubu, bu dirseği belli virüslere karşı duyarlı antikorlarla kaplayarak, aygıtı virüsleri ortaya çıkarmak için başarıyla kullanmış bulunuyor.

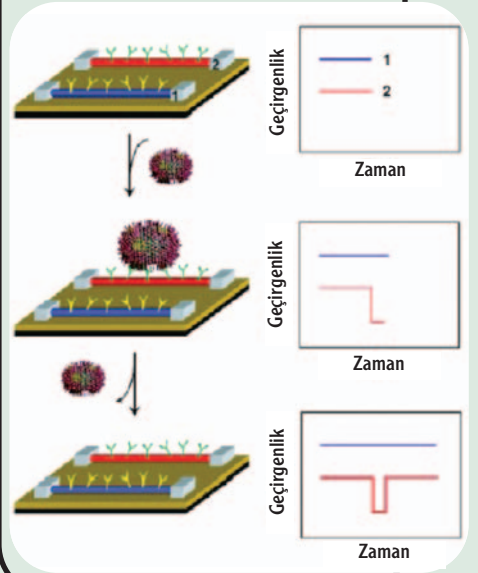
Bu arada Harvard Üniversitesi'nden Charles Lieber ve ekibi, nanotellerden yapılan alan-etki tranzistörlerinin (FET) yüzeylerini antikorlarla kaplayarak virüslü ortama koydular. Virüsler yüklü parçacıklar oldukları için, nanotellere yapıştıklarında yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu değiştirirler; böylece FET tranzistörlerden geçen akım da değişir. Değişen akımın gözlemlenmesiyle virüslerin varlığı ortaya konulabilir. Harvard'lı araştırmacılar aynı anda 100 değişik virüsü algılayabilecek aygıtların geliştirilmesi üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler.



Moleküler Dişliler: DNA Nano-Makinaların Dişlileri Oluyor

Purdue Üniversitesi'nden Ye Tian ve Chengde Mao, dişlerinin DNA kullanılarak yapıldığı bir vites sistemi gerçekleştirdiler. Her çark, dört DNA iplikçiginden oluşuyordu. Orta çember çarkın ana yapısını oluştururken üç doğrusal iplikçik de, dişleri yapmak için kullanılmıştı.

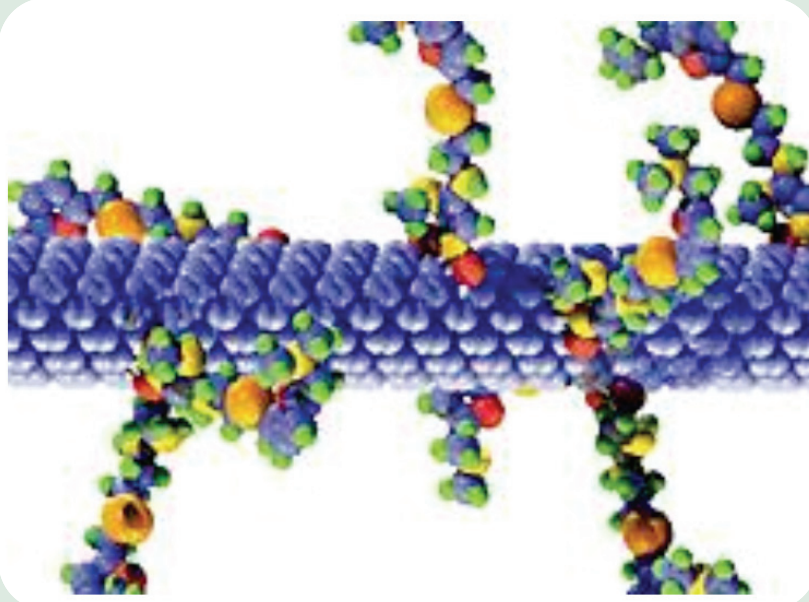
Şekilde görüldüğü gibi değişik organik molekülleri nanotüp üzerine yapıştirarak da vites sistemleri yapmak mümkün.



Nanotüpler Kuvveti Hissediyor

Oldukça küçük kuvvetleri ölçebilen nanoelektromekanik (NEMS) rezonatörler geliştirildi. İki altın elektrot arasında 1,2 ile 1,5 mikron genişliğinde ve 500 nanometre derinliğinde bir hendek üzerinde asılmış tek bir nanotüpten oluşmakta.

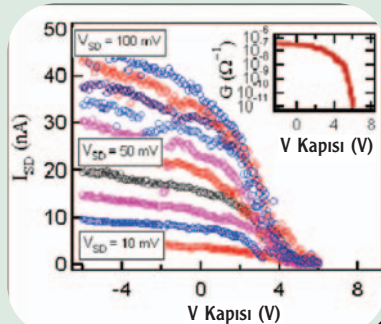
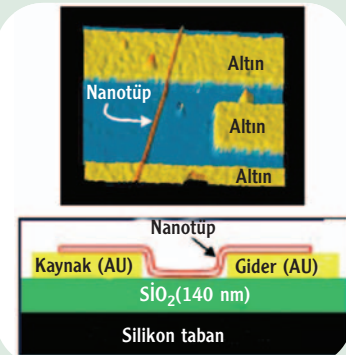
McEuen ve ekibi, yalnızca kapı potansiyelini (gate voltage) değiştirerek 3'ten 200 megahertze kadar çok geniş bir aralıkta nanotüp rezonans frekansını hem ayarlamayı hem de ölçmeyi başarmışlar. 0,5 nanometre gibi çok küçük hareketlerin ölçülmesiyle, kuvvet ölçümleri, bugüne kadar oda sıcaklığında ölçülen en iyi değerden 10 kat daha duyarlı biçimde yapılmış bulunuyor.



Karbon Nanotüp Alan-Etki Tranzistörleri

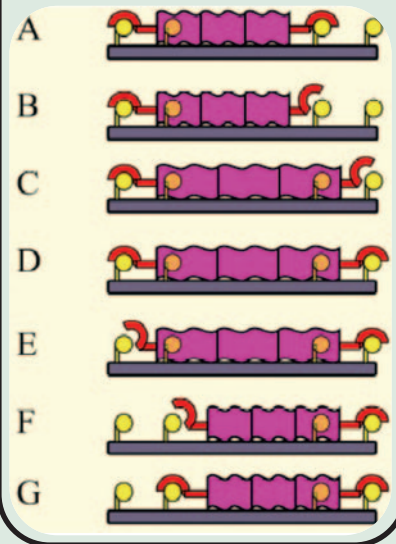
Tranzistörler tümleşik devrelerin en temel yapıtaşı. Nanotüpleri geleceğin devrelerinde kullanabilmek

için bunları kullanarak da tranzistör yapılması bu açıdan çok önemli. IBM'den Avouris ve ekibinin karbon nanotüpleri kullanarak başarıyla üretim testlerini yaptıkları bir alan-etki tranzistörün (FET) yapısı ve akım-potansiyel ölçümleri, şekilde görülebilir.



Moleküler Lokomotif

Çalışılabilir en küçük ölçekte malzeme tasarlayanlar için en büyük hayal, nanomakinalara yapıtaşlarını taşıyacak olan nanolokomotiflerin yapılması. Texas A&M Üniversitesi'nden Zhisong Wang tarafından önerilen lazerle işletilen moleküler lokomotifler bu yönde atılan çok önemli bir adım. Bu tasarımda her bir vagon doğrusal polimer zincirlerinden, ray sistemiyse örneğin, biyolojide bulunan mikrotüpler ve bunlardaki özel moleküler gruplardan oluşmakta. Trenin her iki ucuna yerleştirilen ve kimyasal olarak tasarlanmış "baş" gruplarıysa raydaki özel moleküler gruplarla bağ yapabilir ya da bu bağlar kırılabilir. Trenin hareketi lazer darbeleriyle sağlanıyor: İlk ışık darbesiyle trenin uçlarındaki bağlar kırılırken, ikinci ışık darbesiyle polimerin moleküler biçimlenmesi değişiyor. Böylece boyu uzatılarak ray üzerinde bir sonraki noktaya ulaşması ve orada yeniden bağ yapması sağlanıyor.



Doç. Dr. Oğuz Gülseren
Bilkent Üniversitesi
Fizik Bölümü

NANOFOTONİK: FO

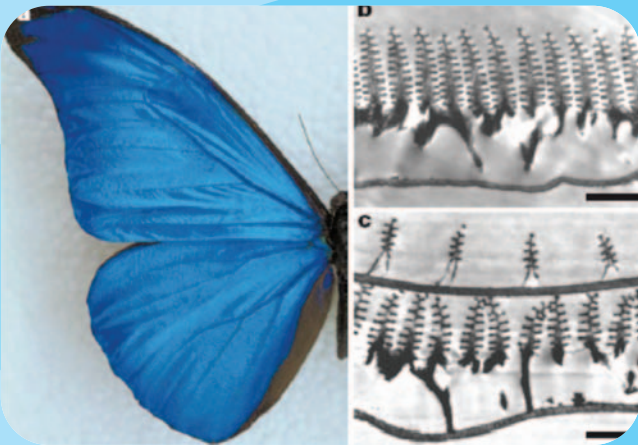
Fotonik bilimi, ışık ve maddenin birbiriyle etkileşimini inceleyen bilim dalı. Bu anlamda “nanofotonik” fotonik ve nanoteknolojinin bir arada yer aldığı, yani boyutları 1-100 nm arasında değişen nanoyapıların ışıkla etkileşimini inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır. Bu boyutlarda tek bir atomun ya da molekülün tek bir fotonla etkileşimi sözkonusu. Kuantum mekaniğinin kurallarının geçerli olduğu bu boyutlarda ışığın bölünemez en küçük miktarına karşılık gelen fotonlar, bir anlamda maddeyi oluşturan atom ve moleküllerle dans ederler. Bu etkileşimin kontrol altına alınmasını hedefleyen nanofotonik sayesinde birçok alanda önemli ilerlemeler sağlanacak. Nanofotonik kristaller, nanoplazmonik yapılar ve nano-metamalzemeler, nanofotonik günümüzde en yoğun biçimde çalışılan dalları. Bu nanofotonik teknolojilerin kullanıma girmesiyle bilgisayarların daha da hızlanması, İnternet’in yüzlerce kat hızlanması, DVD’lerin bilgi saklama kapasitesinin yüzlerce kat artması, nanoelektronik entegre devrelerin optik yöntemlerle üretimi mümkün olacak.

1987 yılında Eli Yablonovitch tarafından keşfedilen fotonik kristaller, periyodik bir yapı içinde ışığın yayılmasını engelleme özelliğine sahiptir. Bir kelebeğin ya da tavuskuşunun kanatlarında yer alan renklerin temel nedeni, bu yapılarda doğal olarak bulunan fotonik kristaller. Fotonik kris-

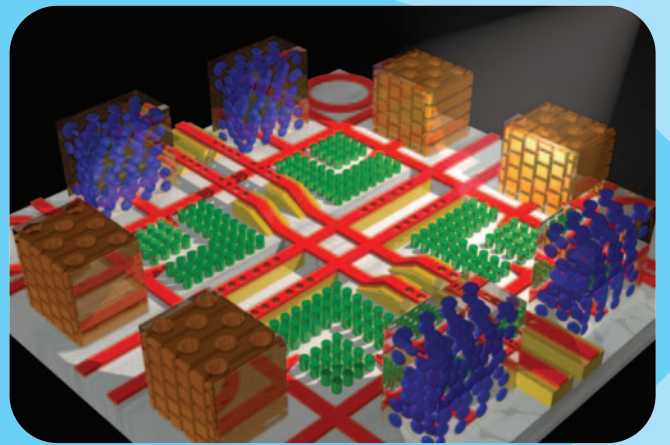
talleri nanolitografi yardımıyla yarı iletkenler kullanarak da üretmek mümkün. Işığın dalgaboyunun onda biri inceliğinde (30-50 nm) olan bu yapılarda oluşturulan düzensizlikleri kullanarak, ışık çok küçük bir alana sıkıştırılabilir. Bu yaklaşımla dünyanın en küçük çınlaçları, yani ışığı çok küçük bir hacimde sıkıştırabilen yapılar tasarlandı ve üretildi. Bu yapıların boyutları bir dalgaboyu küp hacminin 30’da biri kadar. Bu kadar küçük boyutlara inebilen bu yapıları kullanarak dünyanın en küçük lazerleri yapıldı. Boyutları bu kadar küçülen lazerlerden milyonlarcası aynı malzemeden yapılabildiği için bu fotonik kristal lazerlerin maliyeti çok düşük. Nanofotonik kristal temelli bu lazerlerden çıkan fotonlar yine fotonik kristaller aracılığıyla yönlendirilerek ışığın bir devrenin değişik noktalara ulaşmasını sağlayabilir. Günümüzde 4-5 GHz’de tıkanma seviyesine gelmiş silikon temelli mikroilemcilerin en büyük sorunu, transistörler arasındaki elektronik iletişimin yavaşlığı. Boyutları 2 cm’e varan bu entegre devrelerde bilginin elektronik olarak bir uçtan diğerine taşınması çok uzun bir süre alıyor. Oysa hepimizin bildiği gibi evrende ışıktan hızlı bir şey olamaz. Bu durumda bu bilginin optik olarak nanofotonik kristaller aracılığıyla taşınması, günümüzdeki bu sınırlamayı ortadan kaldıracak ve bilgisayarların yüzlerce kez daha hızlı ça-

lışmasına olanak tanıyacak. Benzer şekilde günümüzde İnternet’in hızını belirleyen, temel olarak elektronik devrelerdir. Bu elektronik devrelerin optik devrelerle değişimi sayesinde bilgi ileme hızında yüzlerce katlık bir hızlanma olacak. Bu optik entegre devreleri oluşturan lazer, modülatör ve detektörlerin yapımında ayrıca ışığın bu devre içinde yönlendirilmesinde nanofotonik kristaller önemli avantajlar sunuyor ve bu tür devrelerin boyutlarının çok küçülmesini sağlıyorlar.

Nanoplazmonik aygıtlar, metal ve yalıtkan malzemelerin bir araya geldiği ara yüzeyde oluşturulan ve nanometre boyutlarına sahip olan yapıları içeriyorlar. Bu yapılarda ışık yalnızca bu ara yüzeyde yer alıyor ve bu bölgede ışığın dalgaboyu, havadaki dalgaboyundan 20-30 kat daha kısa olabiliyor. 10 nm’ye inen dalga boylarında moleküler düzeyde etkileşim ya da görüntü almak mümkün. Optik-anten adı da verilen yapılarla, normal yöntemlerle mümkün olmayan optik görüntüleme çözümlerine erişilebiliyor. Bir molekülün optik yöntemlerle görüntüsünün alınması yanında bu moleküle optik erişim de sağlandığı için bu yöntemin özellikle optik temelli bellek uygulamalarında önemli bir avantaj sağlaması beklenmekte. Günümüzde bir DVD’nin bilgi saklama kapasitesini belirleyen, yazılan ışığın dalgaboyudur. Nanoplazmonik ya-

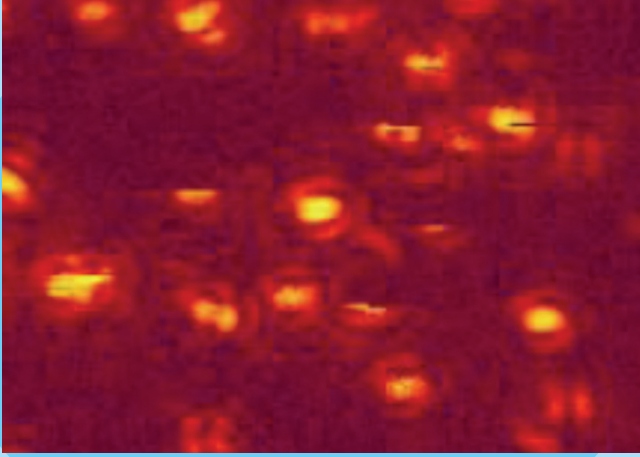


Bir kelebeğin kanatlarında bulunan renk çeşitliliği kanat üzerinde bulunan doğal nanofotonik kristallerden kaynaklanmaktadır.



Nanofotonik kristal temelli optik entegre devrelerin kullanımıyla iletişim hızları yüzlerce kat hızlanacak.

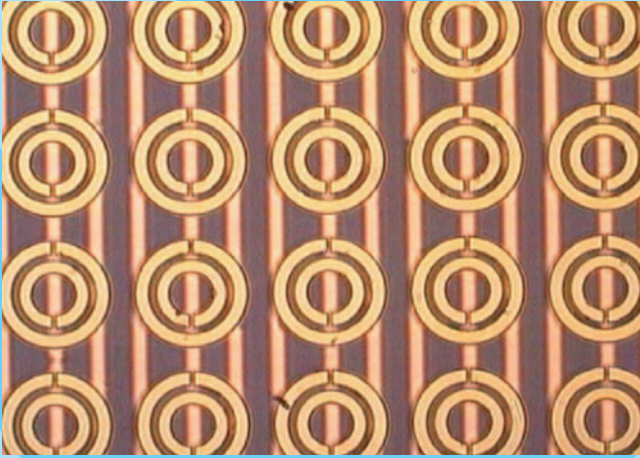
OTONLARLA DANS



Nanoplazmonik yapılarda ışığın dalgaboyunun çok kısa olması nedeniyle moleküler düzeyde optik görüntü almak mümkün.



Nanofotonik yöntemler ile üretilen yeni nesil DVD'lerin kapasiteleri bin kat artacak.



Bilkent Üniversitesi'nde dünyanın en küçük boyutlarına sahip negatif kırılma indeksli metamalzemeler üretilmiş bulunuyor.



Nanofotonik yöntemlerle üretilen 10 nm boyutlarında nanoelektronik devreler, gelecek kuşak bilgisayarların yapımında kullanılacak.

pılarda bu dalgaboyunun 30 kat küçüldüğü düşünülürse, bu yapıların DVD yazma ve okumada kullanılması DVD'lerin kapasitesini 1000 kat arttırabilecek ve 100 terabyte (10^{14}) bilginin tek bir diske yazılması mümkün olacak. Bu, yaklaşık olarak 25.000 sinema filminin tek bir DVD'de saklanması demek.

Metamalzemeler 1999 yılında Londra Imperial College'da çalışan Prof. Sir John Pendry tarafından kuramsal olarak ortaya atıldı. Daha sonra San Diego, Girit ve Bilkent Üniversitelerinde ortak olarak yapılan çalışmalarla bu malzemeler deneysel olarak da üretili. Metamalzemelerin en önemli özelliği, ışık özelliklerinin negatif olması. Örneğin, havadan gelen bir ışık

demeti suya girerken belirli bir açıda kırılır. Oysa bu kırılım metamalzemelerde negatif yönde olur. Yani, bu malzemelerde ışığın kırılma indisi negatiftir. Faz hızı, ışık-basıncı, Doppler etkisi, Cherenkov radyasyonu gibi optik özellikler de bu malzemelerde negatif olarak ortaya çıkar. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde yapılan çalışmalar sonucunda, dünyanın en küçük boyutlarına sahip negatif kırılma indisli metamalzemeler üretilmiş bulunuyor. Günümüzde entegre devrelerin minimum boyutlarını sınırlayan en önemli faktör, bu devreleri yapmak için kullanılan merceklerin optik çözünürlüklerinin yetersiz kalması. Oysa nanoboyutlarda sahip nanometamalzemeler

kullanarak, geleneksel merceklerden çok daha yüksek çözünürlüğe sahip süper mercekler yapmak mümkün. Bu süper merceklerin çözünürlüğü geleneksel merceklerden 20-30 kat daha üstün. Entegre devre yapımında süper merceklerin kullanımıyla, günümüzde ancak 1 milyar transistörün sığabildiği bir alana 1 trilyon transistör sığdırmak olası. Metamalzemelerle üretilen ve 3-10 nm boyutlarında nanotransistörlerden oluşan nanoelektronik entegre devrelerse günümüzdeki bilgisayarlardan binlerce kat daha hızlı ve kapasiteli yeni nesil bilgisayarların yapılmasında kullanılacak

Prof. Dr. Ekmel Özbay
Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
Bilkent Üniversitesi

NANO OPTOELEKT

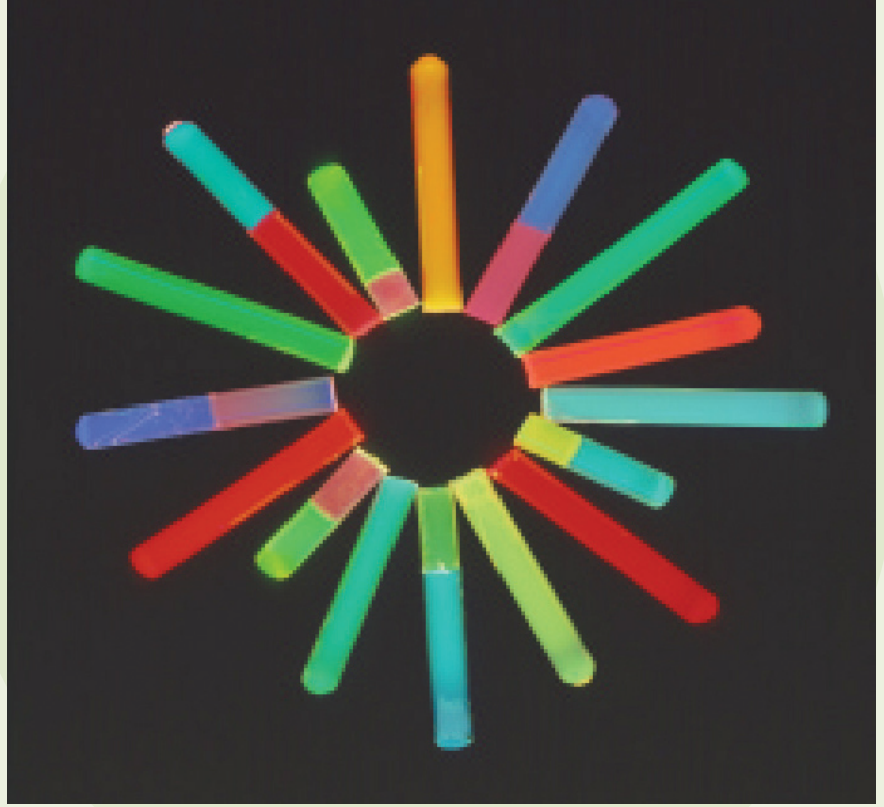
Fotonlarla Elektronlar El Ele, Yaşantımızın İçinde

Optoelektronik, günümüz ileri teknolojisinde önemli ve etkin bir yer tutuyor. Yaygın olarak kullandığımız yariletken lazer, LED, fotodetektör ve optik modülatör gibi aygıtlar, optoelektronik ürünleri. Bu optoelektronik aygıtlar, modern yaşantımızın doğal birer parçası olmuş durumda. Ama çoğumuz, günlük yaşantımızda bunların boyutlarının farkında bile olmayabilir.

Bugün kaçımızın optoelektronik aygıtı var dersiniz? Bu sorunun yanıtının boyutları bazılarımızı şaşırtabilir: örneğin, günümüzde bilgisayarında CD okuyucusu olan herkesin bir lazeri var! Peki, optoelektronik aygıtları günlük yaşamda sık kullanıyor muyuz? Bu sorunun yanıtı da bazılarımız için şaşırtıcı olabilir. Örneğin, süpermarketlerde alışveriş yaptığımızda, barkod okuyucularında bir lazer diyotu kullanıyoruz. İnternet kullandığımız zaman (örneğin, okyanuslararası bir elektronik posta yolladığımızda), ürettiğimiz elektronik bilginin lazer ya da optik modülatör tarafından optik bilgiye dönüştürülmesinde ve fiberlerden iletilen optik bilginin, vardığı noktada fotodetektör tarafından elektronik bilgiye geri dönüştürülmesinde sözü geçen optoelektronik aygıtları kullanıyoruz.

İşte, optoelektronik her geçen gün yaşantımıza daha çok giriyor, sivil ve askeri ileri teknolojilerin önemli bir parçası olmaya devam ediyor. Optoelektronik bu gelişimde, daha öncesinde yapılmamış, yapılamamış aygıtların icat edilmesine, geliştirilmesine ve üretilmesine olanak sağlayan nanoteknolojinin, kritik bir katkısı var.

Işığın en küçük bölünmez parçası olan fotonlar, maddeyle elektronlar üzerinden etkileşir. Nano-optoelektronik aygıtlar, bu madde-foton etkileşiminin nanometre ölçekli kuantum yapılarında kontrol edilebilme yetisine ve bu yetinin işlevsel kullanılması fik-

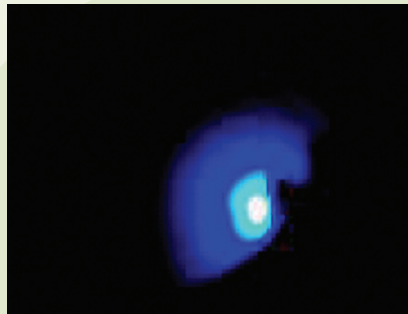


Farklı boyutlarda sentezlenen CdSe kuantum noktacıklarını içeren yapıların, farklı optik dalgalı boyullarında ışıması sağlanabilir.

rine dayanır. Bu aygıtlar, istenilen işlevi fotonlarla elektronları ortak çalıştırarak yerine getirirler-başka bir deyişle, bu aygıtlarda fotonlar ve elektronlar el ele iş görür.

Nano-optoelektronik aygıtlar, içerdikleri kuantum yapılarında elektronları nanometre düzeyinde sınırlandırır ve bu yapılar içine hapsederler. Bunun sonucunda, kuantum etkileri diye adlandırdığımız olağandışı etkiler gözlenir: Makroskopik sistemlerde sürekliymiş gibi görünen elektronik

enerji spektrumları, nanoyapılarda kuantumlaşmanın belirgin hale gelmesiyle ayrık enerji spektrumu gösterirler. Böylece elektronlar, optik işlemlerde (örneğin, optik ısıma ve optik soğutulma işlemlerinde) makroskopik yapılarda görülmeyen farklı ve duyarlı optik özellikler sergilerler. Önemli bir nokta, bu optik özelliklerin kuantum yapılarının boyutlarına, şekil ve dizilişlerine bağlı olması ve bu şekilde istenilen optik işlevlere göre farklı nanomimarilerin tasarlanabil-



Türkiye'de ilk kez üretilen mavi ışık (Bilkent Üniversitesi).

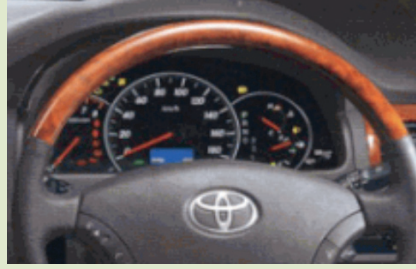


Mavi ışık kaynağı üretiminde kullanılan kristal büyüme sistemi: Metallo Organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD) sistemi.

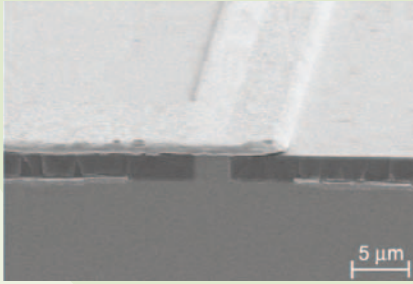
TRONİK AYGITLAR



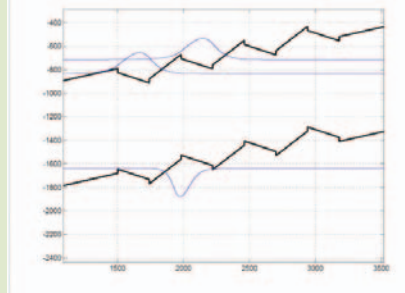
Cep telefonları, mavi LED aygıtlarının en çok kullanıldığı alanlardan biri.



Otomobil endüstrisinde mavi LED'ler, aydınlatma için sıklıkla kullanılıyor.



İçinde kuantum yapıları içeren bir optik modülatörün kesit görüntüsü.



Mor ötesinde çalışmak üzere tasarlanan kuantum yapılarının potansiyel profili ve örnek elektron-hol dalga fonksiyonları.

mesi.

Optik ışıma işleminde görülen bir kuantum etkisi yukarıdaki şekilde gösterilmekte. Bu fotoğrafta, hepsi aynı yarı iletken (CdSe'den) sentezlenmiş kuantum noktalarının, yalnızca boyutlarının değiştirilmesiyle farklı optik dalgaboylarında ışımaları görülüyor. Bu olağandışı özellik, makroskopik CdSe malzemesinde yok. Nanoyapılarda aynı malzemeden kontrollü bir şekilde başka dalga boylarında ışıma elde etme olanağı, yeni optoelektronik aygıtların (örneğin, kuantum noktacık katkılı organik LED [light emitting diode / ışık yayan diyot]) yapılmasını mümkün kılar. Yine kuantum noktacık yapılarında kısa optik dalgaboylarına erişmek ve yeni ışık kaynakları yapmak da mümkündür; örneğin, son yıllarda GaN tabanlı yapılarda, InGaN kuantum noktacıkları kullanılarak mavi LED ve lazer elde edildi. Sol alttaki şekiller, Bilkent Üniversitesi'nde bu şekilde elde edilen Türkiye'nin ilk mavi ışığını ve bu yapıların üretildiği sistemi gösteriyor. Mavi ışığın büyük ekranlı göstergeler, trafik ışıkları, aydınlatma, tıbbi tanı ekipmanları ve fotolitografi sis-

temleri gibi birçok uygulama alanı var. DVD üreticileri, mavi ışık kullanan "Blue Lazer" ya da "Blu-ray" adı verilen yeni teknolojiye geçerek DVD kapasitelerinin 40 GB ve üstüne çıkmasını hedefliyorlar; önümüzdeki 10 yıl içinde, dünyadaki 600 milyonu aşkın bilgisayarın mavi lazer kullanan DVD yazıcıları içermesi bekleniyor.

Nanoyapılarda kuantum etkisine başka bir örnek, optik soğrulma işleminin elektrik alanına bağlı değişme yetisi (elektrosoğrulma). Farklı elektrik alanları altında, nanoyapılarının potansiyel profilleri değişince, ayrı elektron enerjileri arasındaki soğrulma foton enerjileri ve soğrulma katsayıları büyük değişiklikler gösterir. Bunun yanı sıra, kuantum yapısında optik soğrulma sonucu oluşan elektron-hol çiftinin aralarında Coulomb etkileşimi olması, aynı kuantum yapısında hapsedilmesi ve çevrelerindeki kuantum enerji bariyerleri sayesinde birbirinden daha zor ayrılmalrı nedenleriyle, bu kuantum etkileri çok daha güçlü görülür. Farklı nanoyapılar (çoklu kuantum kuyuları, kuantum noktacık dizileri, kabuklu nanokristaller vs.) tasarlayarak farklı kuantum

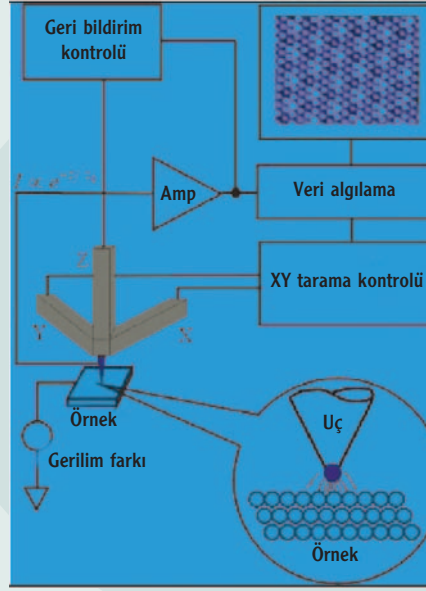
etkilerini (örneğin, kuantum sınırlı Stark etkisi, kuantum Stark merdiven etkisi vs.) ön plana çıkarıp, yeni optoelektronik aygıtlar geliştirmek mümkündür. Bu kuantum işlemleri pikosaniye altında olduğundan, bu etkilere dayanan optoelektronik aygıtlar, ilkece yüzlerce GHz hızında çalıştırabilir. Örneğin, kuantum modülatörleri üzerilerine uygulanan gerilimin değiştirilmesiyle, ışığın geçiş (ya da yansıma) miktarları değiştirilerek yüksek hızlı (örneğin, 500Gb/s'de) optik sinyal üretilebilir. Ülkemizde, mavi dalgaboyundan morötesine uzanan dalgaboyu aralığında çalışan kuantum modülatörleri geliştirilmekte; bildiğimiz kadarıyla, dünyada bugüne kadar bu tür modülatörler yapılmış değil. Bu aygıtların Si CMOS çiplerine doğrudan 10Gb/s'den hızlı optik sinyal besleme, noktadan noktaya güvenli optik haberleşme (örneğin, uzay haberleşmesi), biyolojik ve kimyasal madde tespiti için zaman-çözünürlü spektroskopi (örneğin, yurt güvenliğini tehdit eden antraks ve SARS gibi salgınların tespiti) ve Mavi Işın DVD üzerine (ultra-kısa mavi optik mermileri kullanılarak) yüksek hızlı, yüksek kapasiteli veri depolama gibi uygulama alanları olması bekleniyor.

Kısaca, nano-optoelektronik, nanoölçekli kuantum yapılarının olağanüstü optik özelliklerini işlevsel olarak kullanarak daha küçük, daha hızlı, daha verimli işlevsel optoelektronik ürünler geliştirmeyi amaçlar; bize doğanın sunduğu optoelektronik malzemelerin sınırlarını aşarak özgün optoelektronik yapılar, işlevler ve aygıtlar gerçekleştirmemize olanak sağlar. Bu, nano-optoelektronik stratejik önemini vurguluyor. Dünya çapında birçok farklı ve yeni nano-optoelektronik aygıt çalışması yaygın olarak sürdürülmekte; ülkemizde de hali hazırda optik anahtarlar, Si fotonik, nano RF bio-implant ve yukarıda değinilen aygıtlar gibi nanoteknolojiye dayalı aygıt geliştirilmesine yönelik farklı araştırma çalışmaları bulunmaktadır.

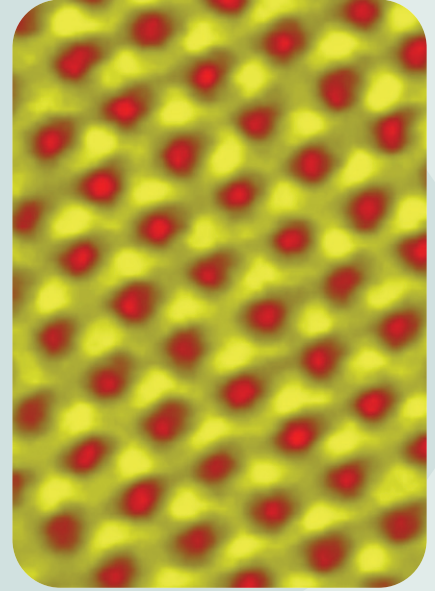
Yrd. Doç. Dr. Hilmi Volkan Demir

TARAMALI UÇ ATOMLARDAN MANYETİK G

Atomların fotoğrafını çekebilen taramalı tünelleme mikroskobu (TTM) 1981 yılında Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından İsviçre’de IBM laboratuvarlarında icat edildi. Tünelleme mikroskobunun çalışma ilkesi, çok önemli diğer buluşlar gibi aslında oldukça basit. En uç kısmında tek atom kalacak kadar sivriltilmiş bir metal iğne yüzeye yaklaştırılır, iğne yüzeye 0,3-0,4 nm kadar yaklaştığında iğneden elektronlar (iğne yüzeye değmediği halde) atlamaya başlarlar. Tünelleme denen bu olayda geçen akım, yani birim zamanda iğneden yüzeye akan elektron sayısı, iğneyle yüzey arası uzaklığın üstel bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon o kadar hızlı değişir ki, iğne yüzeye 0,1 nm daha yaklaştırılırsa, tünelleme akımı on kat artar!.. Bir geri besleme devresi akımı sabit tutmak için sürekli olarak iğneyle yüzey arasındaki mesafeyi korumaya çalışır. İğneyi 0,001 nm duyarlılıkla kontrol etmek için piezoelektrik kristaller kullanılır. Bu malzemeler voltaj uyguladığımızda çok az miktarda uzayıp kısalma özelliğine sahiptir. Bu geribesleme devresi çalışırken biz iğneyi yüzeyde yine piezo malzemelerle tararsak, iğnenin aşağı yukarı hareketi yüzeydeki atomları izleyecektir. Çünkü atomların çevresinde elektron yoğunluğu genellikle daha fazladır. Bir bilgisayar denetiminde çalışan bu mikroskoplarda alınan atomların pozisyon bilgileri, bilgisayarda işlenip, 2 ve 3 boyutta gösterilerek atomlar görünür hale getirilir. Ülkemizde ilk taramalı tünelleme mikroskoplari 1989 yılında iki yüksek lisans tezi kapsamında üretildi. Bazı parçaları hurdacılardan temin edilen, geribesleme devresinden, denetleme yazılımına kadar herşeyiyle Türkiye’de yapılan ve atmosferde çalışan bu ilk mikroskoplari alınan karbon atomları görüntüsü sağ üstteki şekilde veriliyor. Türkiye’de ultra yüksek vakumda (10^{-10} mbar, karşılaştırmak için 1 Atm=1000 mbar) çalışan ilk TTM de 1993 yılında bir doktora tezi kapsamında yine Bilkent Üniversitesi’nde



TTM çalışma şeması



TTM ile grafit görüntüsü

üretildi.

Bu güçlü mikroskoplari ilk defa atomları yüzeyde tek tek görüntülemek, daha sonra atomları, molekülleri yüzeyde istediğimiz gibi tek tek dizmek, tek atom üzerinde deneyler yapmak ve onlarla futbol oynamak bile mümkün oldu! Bu önemli buluşun mucitleri oldukça kısa bir süre içinde, 1986 yılında Nobel Fizik Ödülü’nü kazandılar.

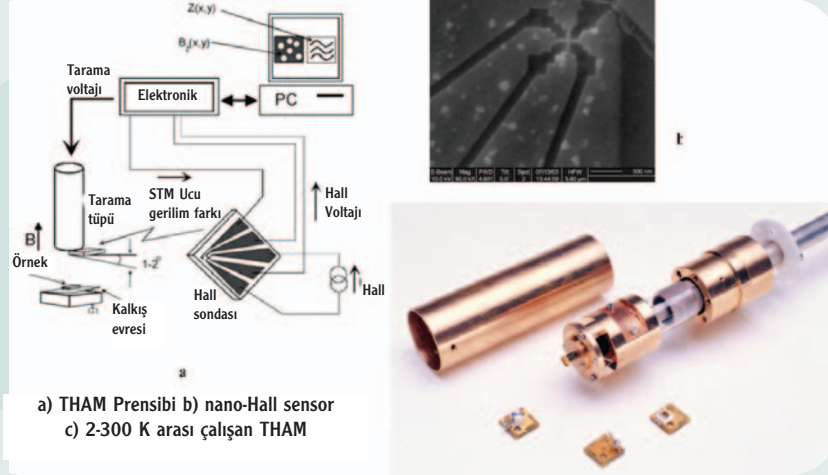
TTM’lerin tek kusuru, yalnızca iletken ve yarıiletken yüzeylerde atomları görüntüleyebilmesiydi ve yalıtkanlarda çalışmıyordu. Binnig bu kısıtlamayı kaldıran değişikliği de yaptığında yıl 1986 idi. Binnig bu sefer ucunda tek atom olan iğneyle yüzey atomları arasındaki kuvveti ölçebilecek kadar duyarlı bir cihaz olan atomik kuvvet mikroskobunu (AKM) geliştirdi. Atomlar arası kuvvetler, kimyasal bağların oluş-

masını sağlar. Eğer iki atomu birbirine yaklaştırsak (örneğin iki oksijen atomu) birbirleri arasında bir çekim kuvveti oluşur ve bir süre sonra oksijen molekülü ortaya çıkar. Atomlararası kuvvetler hep çekici değildir. Eğer aynı oksijen molekülünü alıp, oksijen atomlarını birbirine doğru yaklaştırmaya çalışırsak, bu sefer birbirlerini itmeye başlayacaklardır. AKM’de ölçülen kuvvetler pikco-Newton ile nano-Newton düzeyindedir. Bu kadar küçük kuvvetleri ölçmek için, babadan kalma yöntemler (Hooke kanunu!!!, $F = -kx$) biraz da günümüze uyarlanarak kullanılmakta!.. Sivri iğneler çok küçük silikon yaylar üzerine mikrofabrikasyon teknolojisiyle yerleştiriliyor ve iğneyle yüzey arasındaki kuvvet nedeniyle bükülen yayın sapması, yani kuvvet, genellikle yayın arkasına odaklanan lazer ışığının sapmasının, bir fotodetek-



Atomlarla futbol

MİKROSKOBU: İRDAPLARA GÖRÜNTÜLEME

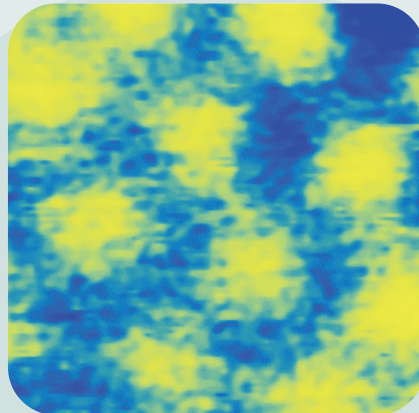


tör sayesinde çok duyarlı bir şekilde ölçülmesiyle belirleniyor. Bir geribesleme devresi yine TTM'deki gibi iğneyle yüzey arasındaki kuvveti sabit tutuyor; iğne yüzeyde taranırken ölçülen iğne hareketi, bize yüzeyin fotoğrafını atomik çözünürlüğe kadar verebiliyor. AKM ile atomik çözünürlük şu anda yalnızca ultra yüksek vakumda elde edilebilmekte. İlkece, atomik çözünürlük atmosferde ve sıvıda da elde edilebilir, fakat mikroskopların kuvvet çözünürlüğü henüz bu iş için tam olarak yeterli değil. AKM'leri sıvıda atomik çözünürlüğe ulaştığı zaman, biyolojide çok büyük bir yenilik getirebilir; protein, DNA vb gibi hayatın temel yapıtaşlarını atom atom incelemek, sonra da değiştirmek belki bir gün mümkün olabilir.

AKM'nin başarısı, başka mikroskop çeşitlerinin doğmasına yol açtı. Manyetik kuvvetleri ölçen manyetik kuvvet mikroskobu (MKM), sürtünme kuvvetlerini ölçen sürtünme kuvveti mikroskobu (SKM), optik mikroskopların çözünürlüğünü 10 kat artıran yakın alan optik mikroskobu (YAOM), yüzey sıcaklık mikroskobu (YSM) ve yüzeyin manyetik alan haritasını çıkaran taramalı Hall aygıtı mikroskobu (THAM) benzer yöntemler kullanılarak geliştirildiler. Bir uçla yüzey arındaki fiziksel etkileşimi ölçtüklerinden, bu mikroskop ailesine artık taramalı uç mikros-

kopları (TUM) deniyor.

TUM ailesinin üyelerinden birisi olan taramalı Hall aygıtı mikroskobu (THAM), çok küçük bir nano-Hall algılayıcısı yüzeye yaklaştırılıp yüzeyde dolaştırıldığında yüzeyin manyetik alan haritasını manyetik alanı etkilemeden ve manyetik alan şiddetini doğrudan ölçerek yapabilmekte. Bu mikroskopla 50 nm'ye kadar çözünürlük elde edilebiliyor ve çok duyarlı manyetik alan ölçümleri yapılabilmekte. Yıllık cirosu dünya çapında yaklaşık 200milyar dolar olan bilgisayar donanım endüstrisi, kapasite artırımı için malzemelerin manyetik yapılarını her yıl daha küçük boyutlarda üretmek zorunda. THAM, endüstrinin bu ihtiyaçlarına ve bilim insanlarına büyük ko-



THAM ile alınmış Abrikosov girdaplarının görüntüsü

laylık sağlıyor.

Manyetik akı (manyetik alan x yüzey alanı) elektrik yükü gibi tamsayı değerleri alabilen (manyetik akı kuantumu, $\Phi_0 = 20,7 \text{ Gauss} \cdot \mu\text{m}^2$) bir fiziksel niceliktir. Elektrik akımına belli sıcaklıklar altında direnç göstermeyen süperiletkenlere manyetik alan uyguladığımızda, manyetik akı örneğe tek akıkuantumları şeklinde girer. Manyetik akının süperiletkenlerde tamsayı değerler alması gerektiğini 1950'li yıllarda öngören ve 2003 yılında Nobel Fizik Ödülü alan Abrikosov'un adıyla anılan bu akı kuantumuna, manyetik girdap da denir. Çünkü süperiletken içinde, bir ip şeklindeki akı demeti çevresinde dolaşan süperakımlar oluşur. Birbirlerini iten bu girdapları küçücük birer mıknatıs gibi de düşünebiliriz. Manyetik rezonans görüntüleme cihazlarında, MAGLEV trenlerde kullanılan bu süperiletkenlerin daha da kuvvetli üretilmesi, bu girdapların dinamiğine ve bağlanmasına bağlıdır. THAM bu girdapları hareket ederken bile gözleyebilir.

Geçen 24 yıl içinde TUM'lar, büyük bir araştırma alanı oluşturup diğer bilim dallarına önemli katkılarda bulundular. Nanoteknolojinin gelişmesinde büyük bir kilometre taşı olan TUM'ların potansiyeli hâlâ tam olarak ortaya çıkmamış durumda. Bu alandaki önemli gelişmelerse, bilim ve teknolojinin ilerlemesine vazgeçilmez katkılar sağlayacak.

1987'de Bilkent'te çok küçük bütçelerle başlatılan TTM araştırmaları zaman içinde büyük bir gelişme göstererek, AKM ve THAM alanlarına da yayıldı. Geliştirdiğimiz teknoloji, Oxford, MIT, Tokyo Teknoloji Enstitüsü, Kyoto Üniversitesi, Oslo Üniversitesi, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı gibi kuruluşlarda, dünyanın dört bir yanında biliminsanlarınca kullanılmakta.

Bilkent'teki TUM faaliyetleri hakkında daha fazla bilgi için :
www.fen.bilkent.edu.tr/~spm

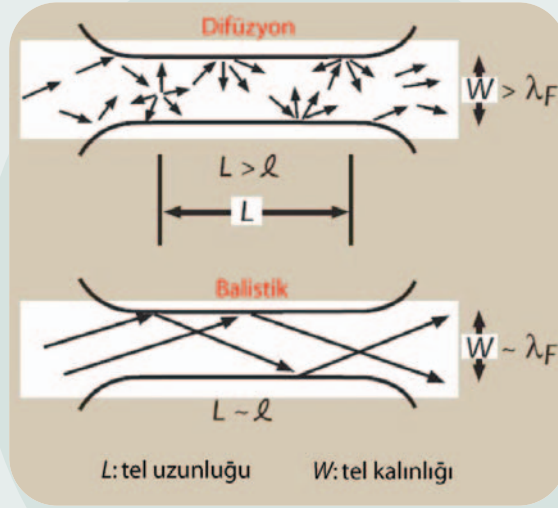
Ahmet Oral
Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü

NANOTELLERDE ELEK

Maddenin temel özellikleri, yapıtaşı olan atomların kimyasal yapıları ve madde içinde bu atomların dizilişleriyle belirlenir. Örneğin bakır, oda sıcaklığında katı ve iyi bir iletken, hidrojen ve oksijen moleküllerinden oluşan suysa sıvı ve şeffaftır. Gündelik hayatımızda kullandığımız, karşılaştığımız nesnelerin boyutları atomların boyutundan (1 Angstrom = 10^{-10} m) o kadar büyüktür ki bir fındık büyüklüğündeki maddede trilyon kere trilyon civarında atom bulunur. Dolayısıyla makroskopik ölçekte tek tek atomların değil, muazzam sayıda atomların ortalama, istatistiksel özelliklerini gözlemliyoruz.

Elektriksel iletkenlik de bu özelliklerden biridir. Örnek olarak iyi bir iletken olan altını ele alalım. Oda sıcaklığında altın katı halde, kristal yapıda bulunur. Altın (Au) metalinin kristal yapısı yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdır. Yani bir kenarı 4 Angstrom olan küplerden oluşan üç boyutlu bir ızgara düşünürsek, fcc altın kristali bu küplerin her köşesine ve her yüzeyinin ortasına birer altın atomunun yerleştirilmesiyle oluşur. Kusursuz bir kristalde yapı tüm yönlerde kendini tekrar eder (yapı periyodiktir). Tüm metallerde olduğu gibi kristalin periyodik potansiyeli içinde neredeyse serbestçe dolaşabilen elektronların varlığı, altın kristalini iyi bir iletken yapar. Eğer kristal kusursuz ve çok düşük sıcaklıklardaysa, bulunduğu ortamı “ezbere bilen” elektronlar önemli bir direnç görmeden kristalin içinde dolaşabilirler. Ancak gerçekte hiçbir kristal kusursuz değildir; bazı durumlarda bulunması gereken noktada bir atom eksiktir, ya da fazladan bir atom, bulunmaması gereken bir yerde sıkışıp kalmıştır, ya da başka bir elementin yolunu şaşırmış bazı atomları, kristal atomlarının arasına karışmıştır. Tabii bir de kristaldeki atomların yerlerinde çakılı durmayıp, sıcaklığın etkisiyle sürekli kıpırdandıklarını düşünürsek, tüm bunların elektronların “ezberini bozup”, kristal içinde serbestçe dolaşmalarını kısıtlayan etkenler olduğunu görürüz. Bu etkenlerin istatistiksel ortalama etkisi de elimizdeki kristalin elektriksel direncinin ne kadar olduğunu belirleyecektir.

Makroskopik boyutlardaki bir altın telin iki ucuna elektriksel gerilim (V) uygulandığında belli bir akım (I) ölçülür. Telin ölçülen direnci ($R=V/I$) telin uzunluğuyla (L) ve altının öz direnciyle (ρ) doğru, kesit alanıyla (A) ise ters orantılıdır; yani $R=\rho L/A$. Dolayısıyla telin direnci geometrik ölçülerinin yanı sıra hangi malzemeden yapıldığıyla da belirlenir. Öz direnci belirleyen etkenlerden bazıları, malzemedeki birim hacimdeki serbest elektronların sayısı (n), bu elektronların etkin kütleleri (m) ve bu elektronların kristal içinde hangi sıklıkla çarpışma yaşadıklarıdır (yani elektronların hangi sıklıkla “ezberlerinin bozulduğu”dur): $\rho=m/(nF\tau)$. Burada elektronun elektrik yükü, ise elektronların iki çarpışma arasında geçirdiği ortalama



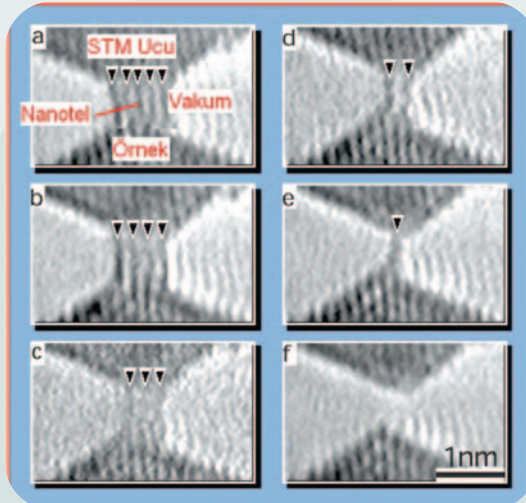
Şekil 1: Bir boyutlu tellerde elektron taşınımını. (a) Difüzyon: Telin uzunluğu (L) elektronların ortalama serbest mesafesinden (l), ve telin kalınlığı (W) da elektronların Fermi dalga uzunluğundan (λ_F) daha büyük ise. (b) Balistik: L ile l , λ_F W ile aynı mertebede ise.

serbest zamandır. Eğer, τ sürede bir elektronun kristal içinde katedeceği ortalama yol (l) telin uzunluğundan çok daha küçükse, elektronların taşınımı difüzyon karakterinde olacaktır (bkz. Şekil 1).

Burada özetlemeye çalıştığımız elektriksel direnç mekanizması, kullanılan telin ölçülerini küçültmeye başladığımızda uzunca bir süre değişmeden aynı kalır. Uzunluğu mikrometre (metrenin milyonda biri) mertebesinde olan altın tellerde bile elektronlar bir uçtan diğer uca ulaşınca kadar pek çok (yaklaşık 10) çarpışma yaşarlar. Ancak kalınlıkları nanometre ölçeğine (on atomdan daha az), boyları da 100 nanometrenin altına indiğinde mikroskopik tellerin elektriksel, mekanik

ve diğer özellikleri çok farklılaşmaya başlar. Bu durumda, nanotelin iletkenliği uzunluğundan bağımsız olarak yalnızca kalınlığıyla ve evrensel sabit bir değerin (iletkenlik kuantumu) katlı halinde belirlenir. Hatırlamamız gereken kural şudur: “Küçük farklıdır”. Elektronik aygıtların ölçülerini küçültmeye çalışırken, gözardı edilmemesi gereken, ölçü ve boyutlulukla ilgili etkiler vardır. Eğer belli sınırların altındaki ölçülere inilirse, elimizdeki sistemin özellikleri makroskopik ölçülerdekiden çok farklı olacaktır. Elektriksel direnç açısından, telin içinden geçen elektronların herhangi bir çarpışma yaşamadığı, ancak kuantum fiziksel başka etkilerin çok daha önem kazandığı “balistik” karaktere ulaşılması olur. Mikroelektronikte yaşanan hızlı gelişmeler, entegre devrelerde kullanılan bileşenlerin ölçülerinde inanılmaz küçülmeler sağlamış ve günümüzde artık “nanoelektronik” ve “nanoteknoloji” olarak nitelendirilen alanın sınırına gelinmiş durumda. Son 15-20 yıldır bilim adamlarının laboratuvarlarda ve simülasyon bilgisayarlarda yaratılan nanoyapıların, önümüzdeki yıllarda mühendislerin elinde teknolojinin yapıtaşları olacaklarına kesin gözüyle bakılıyor.

Peki, nanometre ölçeğinde ince teller (nanoteller) nasıl oluşturulabilir? Yapılabilecek en ince nanotelin kalınlığı ne olabilir? İkinci sorunun yanıtını hemen vermek mümkün: Maddenin yapıtaşı atomlar olduğuna göre, düşünülebilecek en ince nanotel taksıra atomların dizilişleriyle oluşturulabilir! Tam anlamıyla bir boyutlu bir sistem olan bu ‘atom zinciri’ biçimindeki nanotelleri, son yıllarda laboratuvar ortamında da oluşturup özelliklerini deneysel olarak ölçmek mümkün oldu ve bu yapılar ‘kuramsal bir kurgu’ olmaktan çıktı. Tokyo Teknoloji Enstitüsü’nden Prof. Kunio Takayanagi ve ekibi 90’lı yılların sonlarında altın nanoteller ve asılı atom zincirleri oluşturup iletkenliklerini ölçerek bu alanda bir çığır açtılar. Bu amaçla, içinde taramalı tünelleme mikroskobu (STM) bulunan bir “çok yüksek vakumda – geçirmeli elektron mikroskobu (UHV-TEM)” geliştirilerek, Şekil 2’de görülen, iki elektrot arasında asılı çok ince altın telleri ürettiriler. Taramalı tünelleme mikroskobunun çalışma ilkesi, çok ince uçlu bir iğnenin, görüntülenmek istenen örneğin yüzeyine kontrollü bir şekilde yaklaştırılıp, iğne yüzey üzerinde gezdirilirken, iğneyle yüzey arasındaki mesafenin çok güçlü bir fonksiyonu olan tünelleme akımının ölçülmesi ve böylece yüzey topolojisinin atomik çözünürlükte görüntülenmesine dayanır. İletkenliğini (ya da direncini) ölçmek üzere, nanoteller oluşturmak için altından yapılmış STM iğnesinin ucu yine altın bir yüzeye kasıtlı olarak batırılıp, sonrasında yavaşça geri çekilmiştir. İğnenin yüzeye batmasıyla oluşan bağlantı bölgesi, iğne geri çekilmeye başladığında, tıpkı çiğnenmiş bir sakız gibi

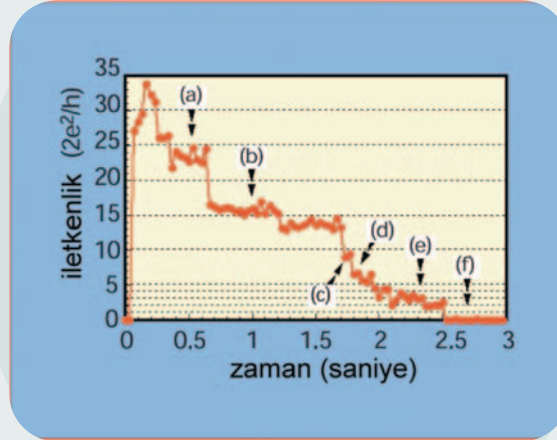


Şekil 2: Altın nanotellerin ‘geçirmeli elektron mikroskobu’ (TEM) görüntüleri. Siyah üçgenlerle gösterilen her bir hat STM ucu ve örnek yüzeyi arasında asılı kalmış bir altın atom zincirini göstermektedir.

ELEKTRİKSEL İLETKENLİK

uzayıp incelerken iğne ve yüzey arasında asılı teller oluşturmuştur. Çektikçe incelen bu nanoteller, kopmadan hemen önce tek bir atom zinciri yapısını da almaktadır.

TEM ile inceleme aşamaları görüntülenen bu nanotellerin ölçülen iletkenlikleri ($G=1/R$) Şekil 3'te gösteriliyor. Şekilde görüldüğü gibi, "balistik iletkenlik" özelliği taşıyan bu çok kısa ve çok ince nanotellerin iletkenliği basamaklı şekilde ve Şekil 2'deki yapısal değişimlerle uyumlu olarak değişmekte. Ayrıca her bir iletkenlik basamağı ($2e^2/h$)'nin katlarından oluşmakta. 300'den fazla kez tekrarlanan deneyler sonucunda açıkça görüldü ki, altın atomlarının tek sıralı bir zincir oluşturduğu durumda (h , Planck sabiti olmak üzere), iletkenliği $G_0=2e^2/h=(12,9 \text{ k}\Omega)^{-1}$ 'dir. Bu değer, kuramsal olarak balistik iletkenlik probleminin kuantum mekaniksel analiziyle hesaplanabilmekte. İki elektrot arasında çok dar bir bağlantı bölgesi (nanotel) varsa, bu yapının balistik iletkenliği, elektronların bu bölgeden kaç değişik enerji "kanal"ından geçebileceğiyle orantılıdır. Her bir kanalın iletkenliğe katkısı G_0 olduğundan, yapının toplam iletkenliği 'n tam katları şeklinde olur ve G_0 'a "iletkenlik kuantumu" adını alır. "İletkenlik kanalları"nın sayısı nanotelin kalınlığıyla orantılı olduğundan, altın nanoteller incelidikçe iletkenlikleri kesikli (basamaklı) değişimler gösterir. Şekil 2'deki görüntüleri yorumlarken unutulmaması gereken nokta, oluşan nanotellerin resimlerde yalnızca yan yüzlerinin görüntülenebildiğidir. Şekil 3'teki iletkenlik değerlerinden de anlaşılacağı üzere (sırasıyla $25G_0$ ve $16G_0$), (a) ve (b) nanotellerinde yan yana 25 ve 16 adet tekdüze atom zinciri vardır. Elbette iletkenliğin kuantumlaşması yalnızca altın nanotellere özgü değil, küçük ölçeklerde sonuçlarını çok daha açıkça ortaya koyan kuantum fiziğinin bir gerektirmesidir.



Şekil 3: STM ucu örnek yüzeyine batırılıp geri çekilirken oluşan nanotellerin ölçülen elektriksel iletkenlikleri. Şekil 1'deki oluşan nanotellere karşılık gelen noktalar harflerle işaretlenmiştir.

Altından Nanotüp

Nanotüp deyince hepimizin aklına hemen karbon nanotüpler geliyor. Ancak, çok ince altın nanotellerle yapılan çalışmalarda, yine Prof. Takayanagi ve ekibi tarafından tüp şeklinde (ortası boş) altın tellerin oluştuğu görüntüldü. Altın nanotellerinde atomların yapısal dizilimini daha iyi tespit edebilmek için önceki düzenekten farklı olarak, vakumlanmış bir ortamda çok ince bir altın tabakasını yüksek enerjili elektronlarla bombardıman ederek film üzerinde delikler oluşturdular. Oluşan deliklerin çapı zaman içinde büyürken, komşu iki delik birleşmeden hemen önce aralarında çok ince bir bağlantı kalıyordu. Boşlukta asılı duran bu köprünün atomik yapısı çok hassas TEM görüntüleriyle incelendiğinde, bir aşamada, altın nanotelin, sanki beş adet atom zinciri bir eksen etrafına burgulu olarak sarılmışçasına bir tüp yapısı kazandığı görüldü (bkz. Şekil 4, sol taraf). Nanoteli incelemeye devam edildiğinde kopmadan hemen

önce, yine bir tekdüze atom zinciri (11 altın atomu bulunan) oluştuğu tespit edildi. Altın gibi bir elementin tüp formunda bir yapı oluşturması oldukça şaşırtıcıydı. Bu tüplerin burgulu yapısının nedeni, bu yapının tüplerin mekanik ve elektronik özelliklerine etkisi, ve örneğin bu tellerden geçecek akımın dönerek geçip geçmeyeceği, dolayısıyla da nanoölçekte bir indüktör gibi davranıp davranmayacağı gibi ilginç sorular yanıt bekliyordu.

Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yaptığımız bir çalışmayla bu sorulara yanıt bulmaya çalıştık. Atomik ve moleküler sistemlerin modellenmesinde başarıyla kullanılan "yoğunluk fonksiyoneli kuru"nu uygulayarak tüp şeklindeki altın tellerin özelliklerini hesapladık. Altın tüpün deneyde gözlenen yapısının rastlantısal olmadığını, bu yapının altın atomlarının komşuluk ilişkisini en üst düzeyde tutarken, aynı zamanda iki ucundan asılı olan bu nanotüp üzerindeki mekanik gerilimi de en aza indirdiğini gösterdik. Aynı koşulları sağlayan başka bir tüp yapısının da (daha ince ve burgu boyu farklı) deneysel olarak gözlenebileceğini öngördük.

Gözlenen altın nanotüpün elektriksel iletkenliğini hesapladığımızda, ideal koşullarda olduğunu, dolayısıyla kuantum mekaniksel olarak elektronların bu tüp üzerinden geçişlerine izin veren 5 adet "kanal" bulunduğunu gördük. Bu nanotüp üzerinden geçecek akımın ne kadar burgulu olarak akacağını görmek üzere iletkenliğe katkıda bulunan "kanal"lara ait elektron yük dağılımlarını incelediğimizde (bkz. Şekil 4, sağ taraf), kanalların, burgu uzunluğu ve yönü farklı, üç değişik yapıya sahip olduğu görülmekte. Dolayısıyla tüm kanalların toplam katkısıyla geçecek akım, beklediği kadar burgulu olmayacak.

Nanoölçekli yapılar içinde nanoteller önemli bir sınıf oluşturur. Nanotellerde yalnızca elektriksel iletkenlik değil, ısı iletimi de kuantumlaşır. Elektronik devrelerin ölçüleri günden güne küçüldüğünden, çok da uzak olmayan bir gelecekte, teknoloji kuantum fiziğinin sınırlarına dayanacak. O aşamada, elektron, ısı ve entropi taşınımında kuantum etkileri gösteren nanoteller, önemli ve yararlı roller oynayacak.

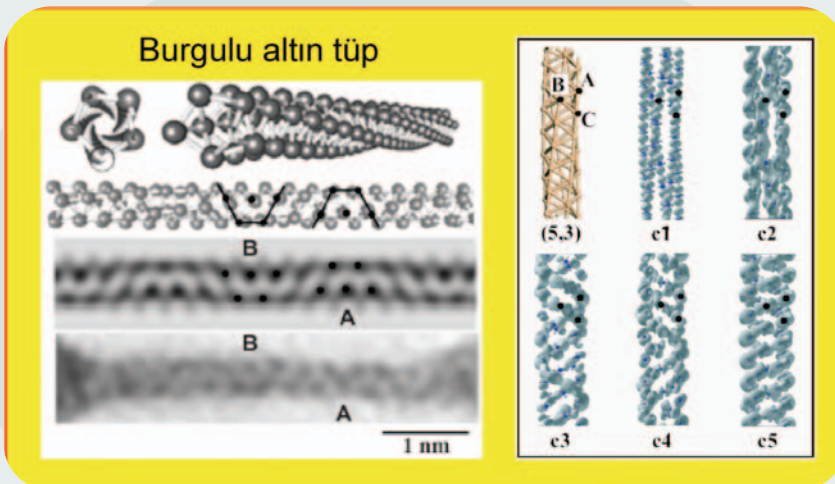
Ünlü fizikçi Richard Feynman'ın, daha 1959 yılında yaptığı, ve günümüzde hızla gelişmekte olan nanoteknolojinin müjdecisi sayılan konuşmasında öngördüğü gibi, bu yazıda kısaca bahsedebildiğimiz nanotellerin iletkenlik özellikleri de gösteriyor ki, küçük ölçeklere doğru alınacak uzun yolda bizi hoş, şaşırtıcı ve yararlı bulgular bekliyor.

Tuğrul Senger

Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü

Kaynaklar:

- Takayanagi K., Y. Kondo, H. Ohnishi, 2001, "Suspended gold nanowires: Ballistic transport of electrons", ISAP International 3, 3-8.
Oshima Y., A. Onaga, K. Takayanagi, 2003, "Helical Gold Nanotube Synthesized at 150 K", Physical Review Letters 91, 205503.
3. Senger R. T., S. Dağ, S. Çıracı, 2004, "Chiral Single-Wall Gold Nanotubes", Physical Review Letters 93, 196807.



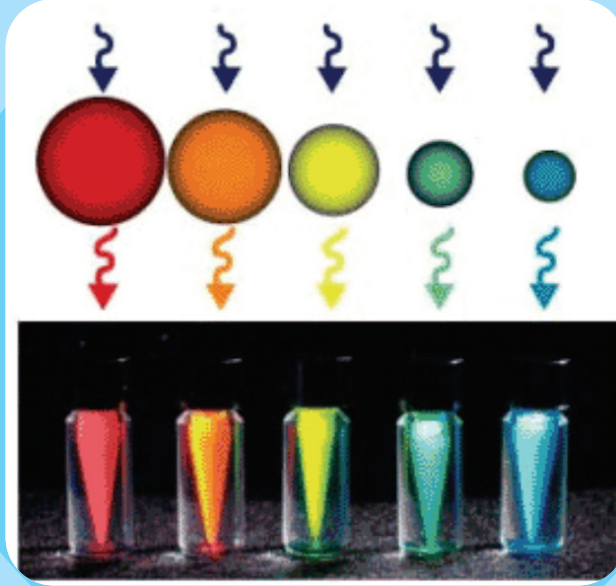
Şekil 4: Solda: Tüp yapısında burgulu altın nanotellerin TEM görüntüsü ve bu görüntüden çıkarılan atom dizilimi. Sağda: Bu nanotüpün iletkenliği $5G_0$ olarak hesaplanmıştır. İletkenliğe katkıda bulunan her bir kanala ait elektron yük dağılımı, değişik burgusal yapılarla sahaiptrir.

NANOKRİSTALDEN

Maddenin en küçük yapıtaşının atom olarak adlandırılmasının üstünden bin yıldan fazla zaman geçmiş olmasına karşın, küçük boyutlu yapıların önemine ilk vurguyu 1959 yılında Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde Richard Feynmann yapmıştı. Britannica Ansiklopedisi'ni bir toplu iğnenin başına yazabileceğimizi düşünen Feynman, bilginin çok küçük boyutlarda saklanmasında bir kenarında 5 atom olan 125 atomluk bir küpten oluşan bir metal kümesinin bir bit olarak görev yapabileceğini söylemişti. Feynman'ın öngörüsünün üstünden yıllar geçti. Ancak son yıllarda, teknolojinin gelişmesine paralel olarak, Feynman'ın öngörükleri gerçekleşmeye başladı.

Yoğun madde fizikinde, ideal kristal, belirli simetrilere sahip, üç boyutta da sonsuz uzunlukta bir örgü ve örgü noktalarındaki atom veya moleküllerden oluşur. Örneğin, mikroelettronikğin temel malzemesi olan silisyum kristali, yüzey merkezli kübik yapıda milyarlarca birim hücrenin peşpeşe tekrarından meydana gelir. Kristallerin üç boyutta gösterdiği ilginç elektrik, optik ve magnetik özellikler, bu üç boyutun sınırlanmasıyla tamamen farklı özellikler gösterebilir. Kristal büyüklüğünün nanometrik boyutlara indirilmesiyle hareketleri kısıtlanan serbest elektronlar nedeniyle onlarca atomdan oluşan nanokristaller, kuantum mekaniğinin beklentilerine uygun olarak kocaman bir atom gibi davranabilirler. Tıpkı tek bir atomun elektron enerji düzeyleri gibi enerji düzeyleri sergileyen nanokristalleri, kuantum noktaları olarak da adlandırmak olası.

Çok çeşitli malzemelerden nanokristaller elde etmek mümkün. Metal nanokristallere belki de en ilginç örnek, altın nanokristaller. Kimyasal yöntemlerle elde edilen ve çapları 1 nm ile 70 nm arasında değişen altın



CdSe (kadmium-selenyum) nanoparçacıklar, morötesi ışıkla aydınlatıldığında, boyutlarına bağlı olarak farklı renklerde ışıma yaparlar.

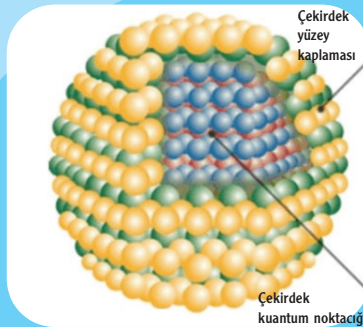
nanokristallerin renkleri de büyüklüklerine bağlı olarak mordan kırmızıya kadar değişir. Altının kırmızı rengini kristalin büyüklüğüne yorumlayan ilk insan Faraday olmakla birlikte, bu özellikler kullanılarak farklı renklerde cam yapımının çok eski çağlara gittiği biliniyor. Parçacıkların boyutlarını daha iyi anlamak için, bu parçacıkların 100.000 tanesinin yanyana gelmesi halinde bir insan saç kalınlığında olacağını söylemek yerinde olur.

Yarıiletken nanokristaller de uzun yıllardır camlara renk vermekte kullanılmaktaydı. Bu tip yarıiletken nanokristaller arasında CdSe, CdS en bi-

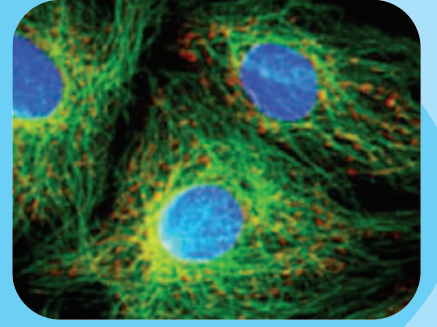
linenleri; öyle ki bunlar artık şişelerde satılmakta. Mordan koyu kırmızıya kadar gökkuşağının bütün renklerinde ışıyan bu nanokristaller çok farklı uygulamalarda kullanılmaktalar. Bu tip nanokristallerin yüzeyi gerek kimyasallar, gerekse biyolojik, gerekse başka yarıiletken veya yalıtkan malzemelerle kaplanabiliyor. DNA'dan nanotüplere kadar birçok malzemeye eklenen nanokristaller, morötesi ışık altında ışıyarak bağlandıkları malzemelerin görüntülenmesinde önemli roller üstlenebiliyorlar.

Örneğin, bir nanokristale hücrenin belirli bir proteinine bağlanacak moleküller eklendiğinde, bu parçacıklar hücre içinde farklı bölgelere bağlanıyor ve hücre içi işleyiş hakkında ayrıntılı bilgi verebiliyorlar. Hücrenin boyutlarıyla kıyaslandığında, bir nanoparçacık, araba içerisinde kaybolmuş bir karınca gibidir. Dolayısıyla bu fosforlu parçacıklar hücre içinde rahatça dolaşabiliyorlar.

Nanoparçacıklara bu şekilde değişik moleküler grupların bağlanabilmesi, oldukça fazla tıbbi uygulamada kullanılmalarına izin verir. Örneğin, yakın zamanda yapılan çalışmalarda, nanoparçacıkları nanoboyutlu Truva Atı olarak kullanarak, kanserli hücreleri içten çökertmenin mümkün olduğu gösterildi. Bir nanoparçacığın bir



Nanoparçacıkların dışının kaplanması, onları hücre için daha az zararlı hale getirir. Nanoparçacıklar, dış yüzeylerine eklenen proteinler yardımı ile, değişik proteinlere bağlanarak hücre içi işlevsel görüntülemeye kullanılırlar.



Ağustos 2005 **23** BİLİM ve TEKNİK