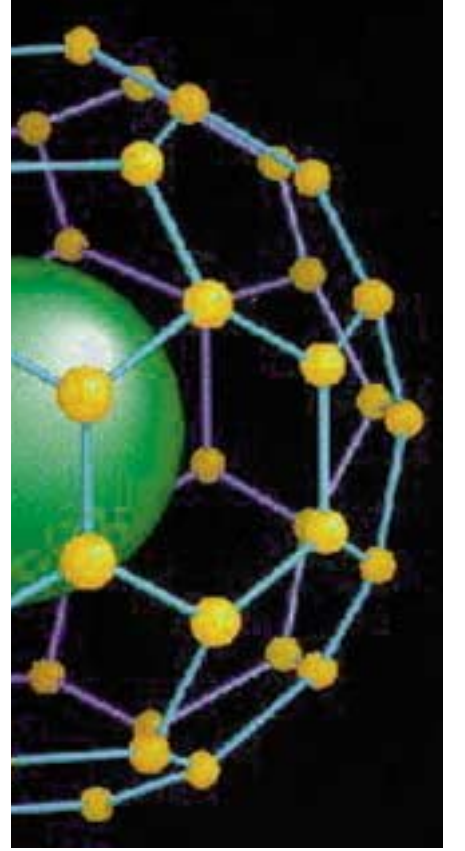
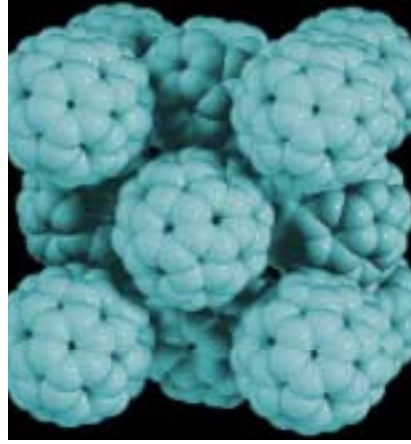
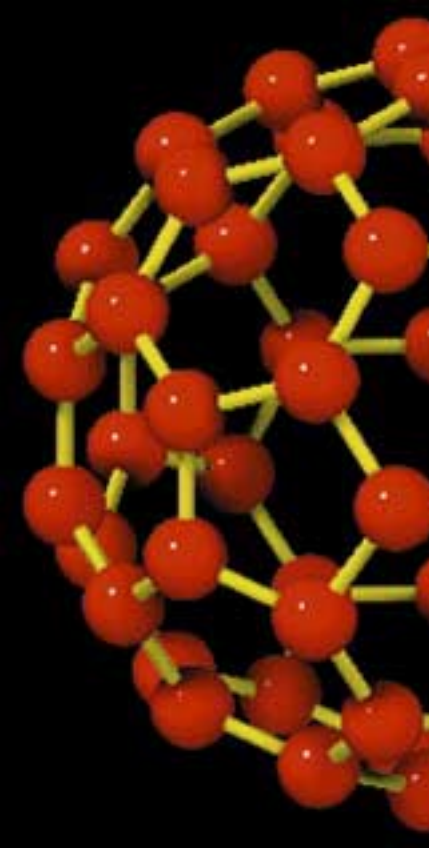


TOPLAR, TÜPLER, ÇUBUKLAR, HALKALAR

KARBON NANOYAPILAR

Şakir Erkoç*



Karbon elementi canlıların temel taşı; yapısında karbon içermeyen hiç bir canlı varlık yok. Nanoteknoloji çağının başlamasında en önemli rolü oynayan karbon nano yapılar da nanomakinelerin, nanorobotların vazgeçilmez elemanları olacak. Karbon nano yapılar, bu tür nanosistemlerin yapılmasında şimdilik tek aday durumunda. Na-

noteknolojide önemli iki unsur var: uygun malzeme ve onu işleyebilecek teknik düzenek. Karbon bu bakımdan da şimdilik rakipsiz bir element.

Karbon, üç boyutlu (3B) yarıiletken elmas yapıdan, iki boyutlu (2B) yarımetalik grafitte, bir boyutlu (1B) iletken ve yarıiletken nanotüplere ve sıfır boyutlu (0B) nanotoplara kadar

farklı kararlı yapılar ve birçok ilginç özelliğe sahip harikulade bir element. Karbonun 1B ve 0B yapıları nanometre düzeyinde oldukları için, bu sistemlere nanotüpler ve nanotoplar deniyor; karbon nano yapıların aşını toplar ve tüpler oluşturuyor.

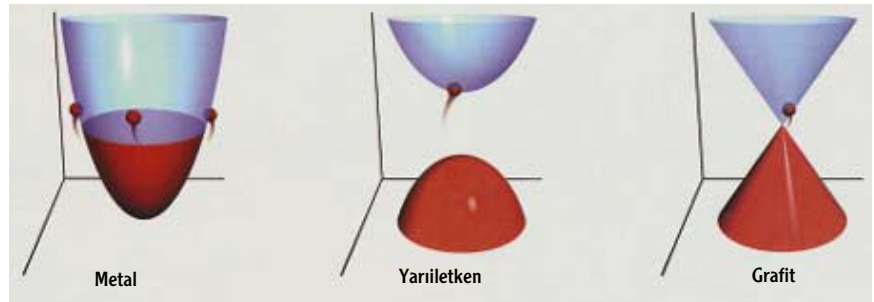
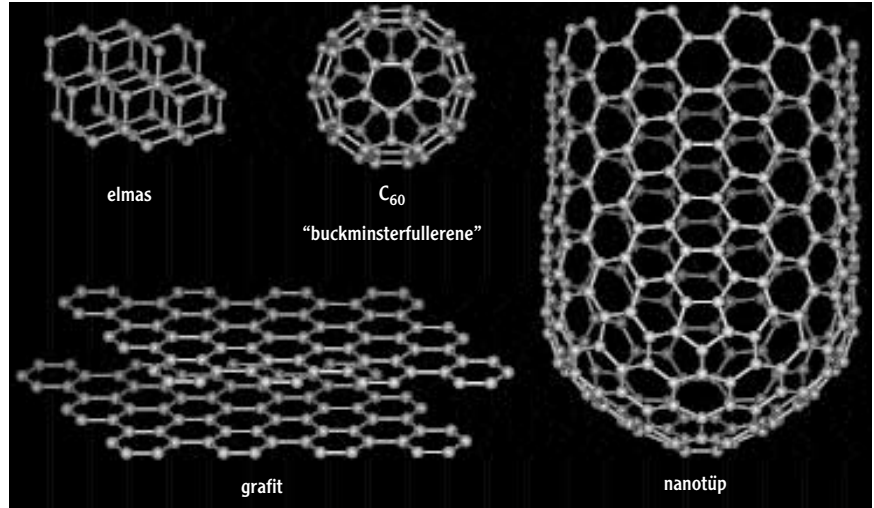
Nanotop ve nanotüplerin elektronikten biyolojiye, ileri malzemelerden

tıba kadar pek çok uygulama alanı var. Nanotoplar optik sınırlayıcı olarak kullanılıyor; bunlar malzemeleri aşırı ışıktan korumada yararlanan kaplamalar. Karbon toplar içeren polimerler fotoiletkenlik özelliği gösterdiği için, karbon nanotoplar fotodiyot ve transistör olarak, ayrıca güneş pillerinde de kullanılıyor. Karbon nanotop katkılı ince polimer tabakalarının ilginç kırınım özelliği, onları önemli optik uygulamaların bir parçası haline getirmiş durumda. Bunların yanısıra, oksitlenmeye karşı iyi bir koruyucu olmaları, karbon nanotopların yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılmalrının nedeni. Metallerde ise eşpotansiyel yüzeyleri oluşturmada karbon nanotopların önemli yeri var. Malzemelerin yüzeylerini ince elmas tabakasıyla kaplama veya silisyum yüzeylerinde ince SiC (silisyum karbür) tabakası oluşturmada (ince SiC filmlerinin yüksek sıcaklığa dayanıklı elektronik aygıtlarda ve mikromekanik sistemlerde önemli bir yeri var) yine karbon nanotopların rolü söz konusu. Ayrıca, özellikle hidrokarbon birleştirme reaksiyonları, organik solventlerin oksitlenmesi ve hidrojenlendirilmesi vb. reaksiyonlarda olmak üzere, tercih edilir bir katalizör durumundalar. Pek çok elektronik ve optik uygulaması bulunan katmanlı yapıların oluşturulmasında karbon nanotopları yine görüyoruz. Bunların AIDS tedavisinde bile yeri olduğunu söylesek? Suda çözülebilen karbon topu türevlerinden oluşturulan bir maddenin HIV virüsünün faaliyetlerini sınırladığı tesbit edilmiş bulunuyor.

Karbon nanotoplar hidrojen depolamada ve yüksek enerjili pil yapımında, ayrıca iki ayrı malzeme arasında sürtünmeyi azaltıcı madde olarak da (küre şeklinde olmaları ve simetrik yapılarına bağlı olarak net dipol momentleri bulunmamasından) kullanılıyor. Karşımıza çıktıkları diğer bazı önemli alanlarsa, belirli özelliklere (çeşitli gazlar, nem, vb.) duyarlı algılayıcıların ve süperiletken malzeme



Karbon atomlarının birbirleri ile bağlanma geometrileri



Malzemelerin elektrik özellikleri dolu (kırmızı) ve boş iletkenlik (mavi) enerji seviyeleri arasındaki aralığa bağlı. Metaller elektriği kolay iletir, çünkü çok elektron var ve iletkenlik seviyelerine kolayca geçebilirler. Yarıiletkenlerde elektronların iletkenlik seviyelerine geçebilmeleri için dışardan desteğe ihtiyacı var. Grafitte az miktarda elektron dışardan destek olmadan iletkenlik seviyelerine geçebilir.

(nanotoplardan oluşturulan katkılı kristal yapıların süperiletkenlik özelliği göstermesinden dolayı) yapımı.

Karbon nanotüpler, geometrilerine bağlı olarak yarıiletken ve metalik özellik gösterirler. Hiç bir katkı maddesi olmaksızın, nanotüpün geometrik parametrelerinin (çapı, tüp yüzeyinin yönü vs.) değiştirilmesi yoluyla elektronik özelliklerinin de değiştirebilir olması, tüplere elektronik uygulamalarda önemli bir yer verir. Nanotüplerin içlerini uygun başka atomlarla katkılansız olarak düşük boyutlu (genellikle 1B) yeni malzemelerin üretilmesi mümkün. Karbon nanotüplerin elektronik malzeme olarak manyetik ve optik nanoaygıt yapımında, ayrıca hafıza elemanı, kapasitör, transistör, diyot, mantık devresi ve elektronik anahtar yapımında kullanım alanları bulunuyor. Bunların yanında karbon nanotüpler, bilinen en sağlam malzeme olma özelliğine sahip. Hasarsız bir karbon nanotüp, kendi ağırlığının 300 milyon katı bir ağırlığa dayanabilecek sağlamlıkta; bu sağlamlıkta başka bir malzemeye yok.

Karbonun 3B'tan 0B'a kadar farklı yapıda olabilmesi özelliği nereden geliyor? Karbon bunca marifeti nasıl kazanmış?

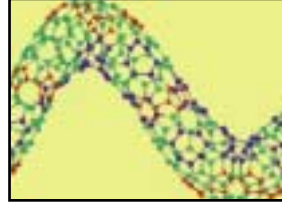
Karbon atomu 6 elektronu ile ($1s^2 2s^2 2p^2$) periyodik tabloda IV. grup elementlerinin ilk elemanı. Karbon atomları kendi aralarında, bağlanmaya karışan elektronların sayısına göre sp^3 , sp^2 ve sp^1 gösterimleriyle ifade edilen üç farklı bağlanma (etkileşme) gösterirler. Bu gösterimler aynı zamanda bağlanma geometrisini de temsil eder. Karbon elementi, her üç bağlanma geometrisini gösterebilen tek element olması bakımından istisnai bir özelliğe sahip.

Karbon atomlarından oluşan malzemeler karbon atomlarının kendi aralarındaki etkileşim (bağlanma) geometrisine göre, çok farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösteriyorlar. Karbon atomunun bu niteliğiyle, 6 adet elektronu olmasından kaynaklanıyor. Bu elektronlardan ikisinin ($1s^2$) bağlanmaya hiç etkisi yok; ayrıca $1s^2$ elektronlarıyla geri kalan (bağlanmaya karışan) elektronların enerjileri arasında da büyük fark var. Bu özelliklerin başka hiç

bir elementte bulunmayışı, karbona bunca marifet kazandırdığı gibi, onu rakipsiz de yapıyor.

Karbon Nanoyapılar

Karbon nanotoplar: Karbonun top şeklinde kafes yapısı oluşturabileceğine ilişkin, ilk kez 1966 yılında D.E.H. Jones tarafından ortaya atılan düşünce, o zamanlar ilim çevrelerince pek ilgi çekmedi. 1970 yılında E. Osawa, kâse şeklindeki "coranulene" molekülünü sentezledikten sonra, bu moleküllerden birkaçının biraraya gelmesiyle top şeklinde bir kafes yapısı oluşturulabileceği fikrini ileri sürdü, ancak bu da fazla ilgi görmedi. 1984 yılında R.E. Smalley ve arkadaşları, grafit kristalini lazerle eritip buharlaştırdıkları sırada karbon atomlarının topaklar halinde ve farklı büyüklüklerde top biçimli kafes yapıları oluşturduğunu fark ettiler. Bu karbon topları 20-130 kadar karbon atomu içeriyordu. Nihayet



1985 yılında H.W. Kroto, R.E. Smalley ve arkadaşları, oluşan karbon toplarını izole etmeyi başararak karbon nanotoplarının yapılarının tümüyle bilinmesine giden ilk adımı attılar (bu da onlara 1996 yılında Nobel ödülü getirdi).

Grafitin buharlaştırılması sırasında oluşan topların %75 kadarını 60 atomlu toplar (C_{60}), %23 kadarını 70 atomlu toplar (C_{70}), kalanını da daha küçük ve daha büyük toplar oluşturuyor. Bu topların içerisinde yapısı ve özellikleri en iyi bilineni, aynı zamanda en sağlam olan C_{60} . Karbon toplarında atomlar birbirleriyle sp^2 şeklinde bağlanıyorlar. Karbon topların hepsinde çift sayıda karbon atomu var; ayrıca kararlı yapıdaki karbon toplarda

atomlar altıgen ve beşgen düzlemler oluşturarak ve sadece üç komşusu olacak şekilde bir araya gelerek kafes yapısını oluşturuyorlar. Karbon topların en küçüğünde bulunan 20 atom, 12 adet düzgün beşgenden oluşan bir yapı kurmuş durumdalar. 12 yüzlü yapılar veya bu bunların simetrisine sahip yapılar "ikozahedral" olarak adlandırılır. Karbon nanotopların en çok üretilen ve yaygın olarak kullanılanı 60 karbon atomundan oluşan C_{60} . Küre şeklindeki C_{60} , 12 yüzlü simetriye sahip; 12 adet beşgen ve 20 adet altıgen yüzden oluşuyor.

Karbon nanotoplar genellikle küre şeklinde bir kafes yapısına sahip; bu yapıya karbon atomlarının beşgen ve altıgen yüzeyler oluşturmalarından kaynaklanıyor. 20 atomdan başlayarak 1.000'lerle ifade edilecek atom sayısına sahip karbon nanotoplar, bu atom sayısına bağlı olarak farklı büyüklükler gösteriyor. Tek duvarlı olabildikleri gibi, iç

Karbonun Çeşitli Yapıları

Karbondan oluşan makroskopik boyutlardaki malzemeler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Elmas: Karbonun çok iyi bilinen kristal yapısı. Atomlar birbirleri ile sp^3 şeklinde bağlanır. Tabii olarak bulunduğu gibi laboratuvar da tek kristal olarak üretilebilir. Çok sert bir yapıya sahip olması başlıca özelliği.

Grafit: Grafit de karbonun çok iyi bilinen başka bir kristal yapısı. Grafit yapıda (grafit plakalarda) karbon atomları birbirleri ile sp^2 şeklinde bağlanır. Grafit tabii olarak bulunduğu gibi laboratuvar da tek kristal olarak üretilebilir, buna "kish" grafit denir.

Karbon fiberler: Grafit özellikli, içi dolu silindirik şekilde ve farklı kesit yapıları olan bu malzemeler çok sağlam olmaları bakımından önemli mekanik özelliklere sahip.

Camsı karbon: Daha ziyade polimerimsi ve/veya gözenekli (süngerimsi) yapıda olan bu malzemeler hazırlanış şartlarına göre farklı özellikler gösteren, genellikle sert bir malzeme. Gözenekli yapıda yüzey alanı geniş olur ve açık bağlı karbon atomlarının miktarı çok olur.

Siyah karbon: Genellikle hidrokarbonlardan hidrojen çıkartılması

ile elde edilen karbon topaklarına bu ad verilir. Üretim şartlarına göre farklı isimlendirilir, endüstride bazı malzemelerin mekanik, elektrik ve optik özelliklerini düzenlemek için dolgu maddesi olarak kullanılır.

Karbin ve karbolitler: Zincir veya polimer şeklindeki bu yapılar genellikle hızlı soğutma işlemlerinden sonra meydana gelir, kristal yapıda da oluşan karbinler sert bir yapıya sahip.

Amorf karbon: Uzun mesafeli düzeni olmayan, bazan kısa mesafeli düzeni olan, genellikle düzensiz yapıda oluşan karbon malzeme. Hazırlanış şartlarına göre fiziksel özellikleri değişebilir. Amorf yapıda atomlar birbirleri ile (%90) sp^3 ve (%10) sp^2 şeklinde bağlanır.

Sıvı karbon: Elmas, grafit veya başka bir yapıdan eritilerek elde edilen (4450 K), metal özelliği fazla olan bir madde.

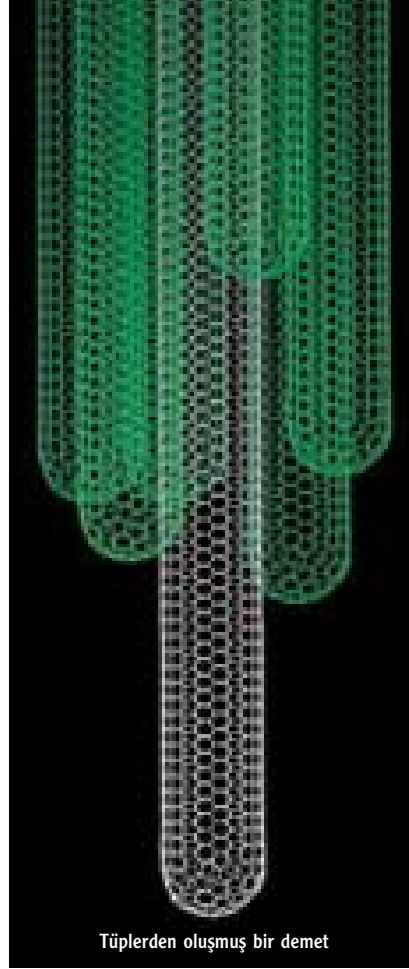
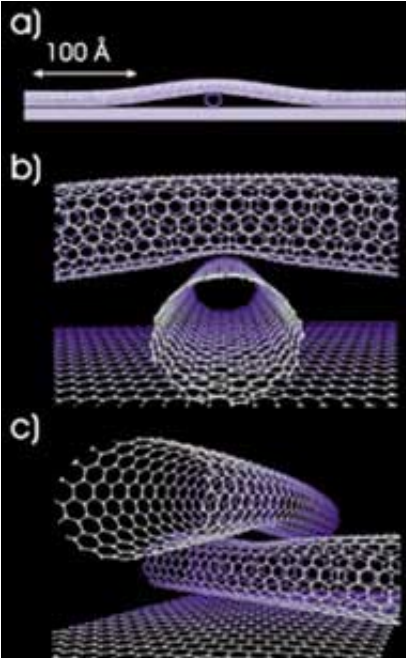
Karbon, elmas ve grafit gibi kristal yapılarından başka, yukarıdaki sınıflamadan ayrı olarak, sonlu boyutlarda (1B ve 0B, nanometre mertebesinde) sağlam yapılara da sahip olması bakımından istisnai bir element. Karbonun nanoyapıları top, tüp, çubuk ve halka şeklinde sınıflandırılır. Karbonun bu özelliği son onbeş yıldır biliniyor ve üzerinde hem deneysel hem de teorik olarak birçok çalışma yapılan malzemelerden birisi olma özelliğini hala koruyor.

Karbon esaslı malzemelerin sp^n şeklinde bağ yapmaları aynı zamanda bu malzemelerin boyutu ile de alakalandırılır. Karbon periyodik tabloda mevcut elementler içerisinde 0 (sıfır) boyuttan 3 (üç) boyuta kadar izomerleri olabilen tek element. Karbondan meydana gelebilen izomerler ile boyutları ve bazı fiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi özetlenebilir.

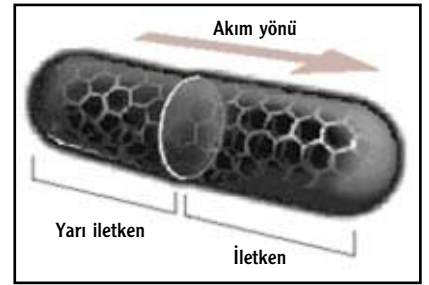
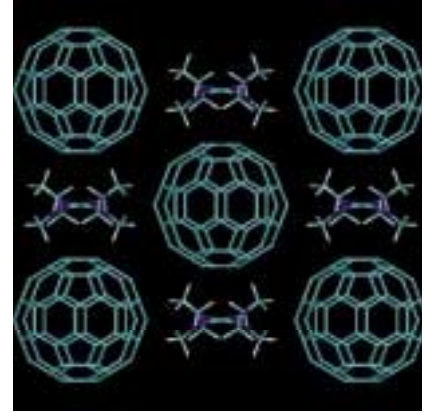
Boyut	0B	1B	2B	3B
İzomer	C_{60} nanotop	nanotüp karbin	grafit fiber	elmas amorf
Bağ şekli	sp^2	$sp^2(sp^1)$	sp^2	sp^3
Yoğunluk (gr/cm^3)	1.72	1.2 - 2.0 2.68 - 3.13	2.26 2	3.515 2 - 3
Bağ uzunluğu (Å)	1.40 (C=C) 1.46 (C-C)	1.44 (C=C)	1.42 (C=C) 1.44 (C=C)	1.54 (C-C)
Elektronik özellik	yariletken $E_g = 1.9$ eV	metal veya yariletken	yarımetal (metalimsi)	yalıtkan $E_g = 5.47$ eV



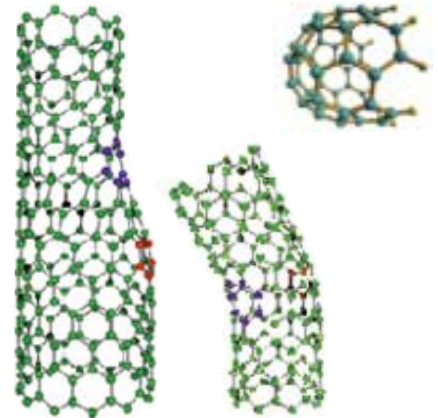
Tüp içine yerleştirilmiş top elektronik anahtar gibi çalışıyor



Tüplerden oluşmuş bir demet



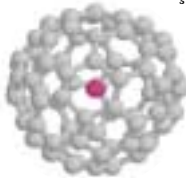
Zikzak ve sandalye kolu şeklindeki tüpler birleştirilince diyot gibi çalışıyor.



İçerisinde geçmiş soğan katmanlarına benzer bir yapı sergileyenleri, ya da ikili gruplar (dimer) halinde bulunanları da var.

Karbon nanotoplardan oluşmuş kristal yapılar da söz konusu; bunlar genellikle küp şeklinde. Özellikle C_{60} ve C_{70} 'den oluşturulmuş kristal yapıların fiziksel özellikleri iyi biliniyor. Ayrıca nanotoplardan yapılan kristaller başka atomlarla katkılandırılarak, farklı özelliklerde yeni malzemeler (özellikle süperiletken malzemeler) üretilebiliyor.

Karbon nanotüpler hem saf olarak, hem de katkılandırılmış olarak da elde edilebiliyorlar. Katkılandırılmıyorsa, topoların içine yerleştirilen başka bir elementle ("endohedral" katkılandırma), veya topoların birisinin yerine konan başka bir atomla ("substitutional" -yerine koymalı- katkılandırma) gerçekleştirilebiliyor. Topoların oluşturulmuş kristal yapıda topolar arasında başka bir atomun yerleştirilmesi de mümkün ("exohedral" katkılandırma). Karbon topolar yerleştirildikleri



kristal yüzeylerinin elektronik ve optik özelliklerini değiştiriyorlar. İki yüzey arasında zıplayarak hareket edebilen topoların bu özelliğinden faydalanarak nanotransistörler, hatta tek elektron transistörler yapmak veya tek elektron akımı elde etmek bile mümkün.

Karbon nanotüpler: Karbonun tüp şeklinde yapı oluşturabileceği ilk defa 1991 yılında Iijima tarafından deneysel olarak farkedildi. Grafitten "arc-discharge" buharlaştırma yöntemiyle elde edilen tüpler, grafit plakasının kıvrılarak silindirik şekline gelmesiyle içi boş boru halini alıyor. Farklı çap ve boyda olabilen bu yapıların uçları da açık veya kapalı olabiliyor. Duvarlarıysa ya tek, ya da iç içe geçmiş silindirikler halinde. Grafit plakasının kıvrılma yönüne göre nanotüpler değişik mekanik ve elektronik özellikler gösteriyorlar. Çok esnek ve sağlam olmaları nedeniyle, tüp ekseninde çekilmeye karşı, hasar görmeksizin direnç göstermeleri, onların ayrı bir özellikleri. Küçük çaplı (yaklaşık 1-2 nm) tüplerden oluşturulmuş bir demeti koparabilmek için uygulanan çekme kuvvetinin büyüklüğü yaklaşık 36 gigapascal. Buna göre, nanotüp fiberlerin gerilmeye karşı en sağlam malzeme özelliğini taşıdığı ortada.

Nanotüp yapıda, grafit plakalarında olduğu gibi sadece altıgen şekiller bulunuyor; yapı, eğer tüpün uç kısmına gelen kısım altıgenin kenarıysa "sandalye kolu", köşesiyse "zikzak" olarak adlandırılıyor. Sandalye kolu modeli metal özelliği gösterirken, zikzak modeli yarıiletken özelliğinde. Ancak zikzak model, tüpün çevresindeki altıgen sayısının 3'ün katları olması durumunda metal özelliği gösteriyor. Düzgün karbon nanotüp yapılarında



Nanotüplerin Elektronik Ötesinde Kullanımları

Uygulanabilirlik Dereceleri
0 = Bilim kurgu
2 = Uygulanmış
3 = Pazarlanmaya hazır

	Fikir	Engeller	Uygulanabilirlik	
	Kimyasal ve Genetik Sondalar İşaretlenmiş DNA iplikçığı	Bir nanotüp uçlu atomik kuvvet mikroskobu, DNA iplikçığını izleyerek bir genin birkaç olası değişkeninden hangisinin iplikçikte bulunduğunu belirleyen kimyasal "işaretleri" ortaya çıkarabilir.	Bir yüzeyin kimyasını görüntülemek için bulunmuş tek yöntem bu olsa da, henüz yaygın şekilde kullanılmıyor. Şu ana kadar yalnızca DNA'nın görece kısa parçalarında uygulanmış.	3
	Mekanik Hafıza Nonvolatile RAM	Destek blokları üzerine yerleştirilen nanotüpten yapılmış bir ekran, ikili hafıza cihazı olarak denenmiş. Bu cihazda voltaj, bazı tüplerin temasına ("açık" durum), bazılarınınsa ayrılmasına ("kapalı" durum) yol açıyor.	Cihazın açılıp kapanma hızı ölçülmemiş; ancak bir mekanik hafıza için hız sınırı olsa olsa 1 megahertz civarında. Bu da geleneksel hafıza çipleriyle kıyaslandığında oldukça düşük bir hız.	2
	Nanocımbızlar 5 mikronluk cımbız	Bir cam çubuk üzerindeki elektrotlara bağlı iki nanotüp, voltajın değiştirilmesiyle açılıp kapatılabilir. Bu tür cımbızlarla, büyüklüğü 500 nm olan nesnel kaldırılıp hareket ettirilebilir.	Cımbızlar, kendi enlerinden büyük nesnelere yakalayabildikleri halde, nanotüpler öylesine yapışkan ki, bu sefer de nesneyi bir türlü bırakmıyorlar. Üstelik, bu küçüklükteki nesnelere hareket ettirmek için daha basit yöntemler var.	2
	Üstün Duyarlılıkta Algılayıcılar Oksijen tüplere yapıyor	Yarıiletken nanotüpler, oda ısısında alkanillere, halojen ve diğer gazlara maruz kaldıklarında elektriksel dirençlerini belirgin şekilde değiştiriyorlar. Bunun anlamıysa daha duyarlı kimyasal algılayıcılar için umut olduğu.	Nanotüpler o kadar çok şeye (oksijen ve su dahil) karşı yüksek duyarlılık taşıyor ki, bir kimyasal gazı diğerinden ayırdememeleri riski söz konusu.	3
	Hidrojen ve İyon Deposu Nanotüpün iç kısmındaki atomlar	Nanotüpler, içi boş olan orta kısımlarında hidrojeni depolayabilir ve bunu verimli ve ekonomik yakıt hücrelerinde kademeli olarak serbest bırakabilirler. Lityum iyonlarını da depolayabilmeleri durumunda, daha uzun ömürlü pillere kavuşacağız.	Şu ana kadarki en iyimser veriler, % 6,5'lük hidrojen alımına işaret ediyor; buysa yakıt hücrelerini ekonomik hale getirmeye yetecek bir oran değil. Lityum iyonlarıyla yapılan çalışmalar halen başlangıç aşamasında.	1
	Keskin Görüntü Veren Taramalı Mikroskop Tek tek seçilebilen IgM antikorları	Bir taramalı mikroskopun uç kısmına bağlı nanotüpler, görüntünün yan kısımlarındaki çözünürlüğü 10 katı kadar artırarak, protein ve diğer büyük moleküllerin daha açık bir şekilde görünmelerini sağlayabiliyor.	Artık piyasada bulunabilen bu uçlar, yine de talep üzerine tek tek üretiliyor. Nanotüp uçları çözünürlüğü dikey yönde artırmaya da, nanoyapılarda daha önceleri gizli kalmış olan derin çukurlukları görüntülemeye olanak tanıyor.	4
	Süper-güçlü Malzemeler Nanotüp gerilme testi	Kompozit malzeme içine gömülü nanotüpler, büyük bir esneklik ve gerilme kuvvetine sahip olduklarından zıplayan arabaların, ya da depremde çökmek yerine ileri geri sallanan binaların yapımında kullanılabilir.	Nanotüplerin maliyeti, kompozitlerde günümüzde kullanılan karbon fiberlerin maliyetinden 10-1000 kat fazla. Ayrıca nanotüplerin yüzeylerinin fazla düzgün ve pürüzsüz olması, malzemenin içinden kolayca dışarıya kaymalarına, dolayısıyla da kırılmaya yol açabiliyor.	0

atomlar birbirleri ile sp^2 şeklinde (grafit plakada olduğu gibi) bağlanıyor, atomlar sadece altıgen geometri oluşturuyor ve her atomun sadece üç komşusu bulunuyor. Karbon tüplerin uçlarının koni şeklinde tamamlandığı durumlar da mümkün.

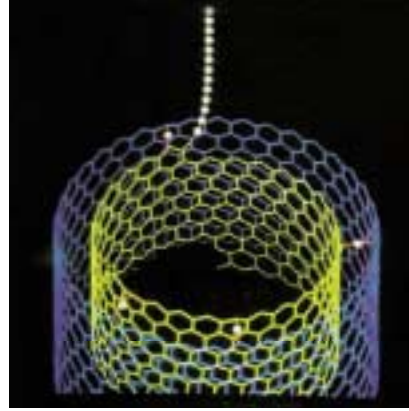
Tek duvarlı karbon nanotüpler istisnai mekanik ve elektromekanik özelliklere sahip malzemeler oluşturuyorlar. Karbon tüplerin, makroskopik büyüklüklerde oluşmaları mümkünse de bunlar çok kırılğan; nanometre düzeyindeki boyutlara sahip tüplerse

çok esnek ve sağlam özellikte. Şerit halinde ve helezoni şekilde de üretilen nanotüplerin farklı çaplarda olanları birbirine eklenebiliyor; eklem, bükülme veya kıvrılma yerlerinde farklı geometrik şekiller (beşgen, yedi-gen gibi) oluşuyor.

Karbon nanotüplerin çapları nanometre, boyları mikrometre düzeyinde olabiliyor. Nanotüplerin çapları şimdiye kadar üretilen en ileri yarıiletken aygıtlarından çok daha küçük. Karbon nanotüplerin yarıiletken teknolojisinde kullanılmaya başlaması yarıiletken fiziğinde çok büyük bir atılıma vesile olacak; çünkü nanotüplerin çok ilginç elektronik özellikleri var. Tüpün geometrisine (çapına ve silindir yüzeyinin kıvrılma yönüne) bağlı olarak nanotüpler metal veya yarıiletkenlik özelliği gösterebiliyorlar. Tüpün elektronik özellikleri, katkı maddesi olmaksızın yalnızca geometrik parametrelerle ayarlanabiliyor. Yarıiletken nanotüplerin yasak enerji aralığı ("band gap") 1 ile 0 eV arasında değiştirilebiliyor.

Karbon nanofiberler çok geniş yüzey alanına sahip. Nanofiberin kütlesiyle alanı arasındaki oran, normal malzemelere göre çok büyük; örneğin kütlesi 1 gr. olan bir karbon nanotüp fiberin alanı 300 m²'yi bulabiliyor. Karbon nanotüp fiberlerin bu özelliği sayesinde nanometre düzeyinde süper kapasitörlerin, dolayısıyla da yapay kas üretimi mümkün olabilecek. Hidrojen depolamaya da olanak sağlayan geniş yüzey alanı, karbon nanotüp fiberleri potansiyel enerji depolama malzemesi adayı konumuna getiriyor.

Karbon nanotüpler ticari olarak henüz üretilmemekte. Yalnızca laboratuvarında deney amaçlı olarak üretilen bu nanotüplerin maliyeti, yaklaşık 1.500 \$/gr. civarında.



Karbon nanoçubuklar: Çubuklar, içi tamamen veya kısmen dolu tüp yapılardan oluşuyor. İç içe geçmiş karbon tüplerinde (çok duvarlı tüplerde) iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazla. Eğer iç içe geçmiş tüplerde, tüplerin duvarları arasındaki uzaklık, karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (< 0.15 nm), karbon atomları birbirleriyle sp³ (gibi) bağlanıyor, başka bir deyişle, her karbon atomunun dört bağlı komşusu bulunuyor. Bu durumda oluşan çok duvarlı tüp yapısına çubuk deniyor. Bu yapıların esnekliği tüplere göre daha az; ayrıca tek duvarlı tüplerden farklı mekanik ve elektronik özellikler gösteriyorlar.

Karbon nanohalkalar: Karbon tüplerin iki ucu birleştirilerek halka ("toroid") şeklinde yapıların oluşturulması da söz konusu. Bu yapılar üzerindeki

çalışmalar şimdilik yalnızca teorik düzeyde olmakla birlikte, deneysel olarak da kısa zamanda yapılabileceklerine kuşkusuz gözüyle bakılıyor. Farklı iç ve dış çaptaki halkalarla çok değişik halka modelleri oluşturmak mümkün. Her farklı halkanın, farklı özellikler göstereceği kesin. Karbon tüpleri kıvrılarak, ilginç özelliklere sahip helezoni yapılar da oluşturulabilir.

Karbon nanoyapılar alanında alınan patentler, çalışmaların nereye doğru gittiğini ve olası kullanım alanlarının iyi bir göstergesi. Bu konuda yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda gün geçtikçe artmakta. Karbon nanoyapıların kullanım alanlarıyla bu malzemelerden elde edilebilen nanoaygıtların üretimi ve uygulamaya konmaları nanoteknoloji çağını başlatmış bulunuyor. Bu çağa ayak uydurmamız bir zorunluluk.

*Fizik Bölümü, ODTÜ 06531 Ankara
erkoc@erkoc.physics.metu.edu.tr
http://erkoc.physics.metu.edu.tr

Kaynaklar:
Kroto, H.W., Heath, J.R., S.C. O'Brien, R.F. Curl, and R.E. Smalley, Nature, 318, 1985.
M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P.C. Eklund, Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, Academic Press, San Diego, 1996.
Nature, September 2000.
P.F.J. Harris, Carbon Nanotubes and Related Structures, Cambridge Univ. Press, 1999.
P.G. Collins and P. Avouris, Scientific American, December 2000. Science, November 2000.
S. Iijima, Nature (London) 354, 56(1991).
S. Itoh and S. Ihara, Phys. Rev. B 49, 13970(1994).
Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C 11, 175(2000).
Ş. Erkoç, Int. J. Mod. Phys. C 11 (6), (2000).
Y.K. Kwon, D. Tomanek, and S. Iijima, Phys. Rev. Lett. 82, 1470(1999).
http://cnst.rice.edu/reshome.html
http://www.sussex.ac.uk/Users/kroto/

Karbon Nanotüplerin Karşılaştırmalı Özellikleri

Özellik	tek duvarlı karbon nanotüp	başka malzemeler
ebadi	0.6 - 1.8 nm çapında	elektron demeti ile 50nm x 5nm ebadında çizgiler oluşturulabilir
yoğunluk	1.33 - 1.40 g/cm ³	Alüminyum: 2.7 g/cm ³
gerilme mukavemeti	45 gigapaskal	en sağlam çelik alaşımları 2 megapaskal'da kopar
esneklik	düğüm yapılabilecek kadar esnek	metaller ve karbon fiberler kırılır
akım taşıma kapasitesi	1 gigaamper/cm ²	bakır teller 1 megaamper/cm ² 'de yanar
alan yayma	1 mikrometre uzaklıktan fosfor atomlarını 1-3 Volt civarında uyarabilir	Molibdenum uç 50 - 100 Volt/mikrometre (kisa ömürlü)
ısı iletimi	oda sıcaklığında 6000 W/mK	saf elmas 3320 W/mK
sıcaklığa karşı dayanıklılığı	havada 750 C'ye kadar, vakumda 2800 C'ye kadar	mikroçiplerdeki metal teller 600 - 1000 C'de erir
maliyet	1500 \$/gram	Altın: 10 \$/gram

1nm = 10⁻⁹ m ; 1 mikrometre = 10⁻⁶ m ; 1 gigapaskal = 10⁹ paskal ; 1 paskal = 1 N/m²