

SZÉN NANOCSONVEK

A jövő – és részben már a jelen – ígértes anyagai

Napjainkban egyre többet hallani a nanotechnológiai forradalomról. Nem is olyan régen a miniaturizálásban a csúcsot még az olyan szilíciumalapú mikrocsipek jelentették, amelyekben a legkisebb elemek az ezredmilliméter tartományába estek. A tudomány fejlődése következtében azonban ma már a milliméter milliomodrászénél is kisebb méretű objektumokat, azaz akár magukat az egyes atomokat is látni, sőt manipulálni tudjuk. Mindez az anyagvizsgálati módszerek, elsősorban az elektronmikroszkópok, illetve a különböző pásztázó tűszondás mikroszkópok (pásztázó alagútmikroszkóp = scanning tunneling microscope = STM; pásztázó atomerő mikroszkóp = atomic force microscope = AFM) hihetetlen fejlődésének köszönhető.

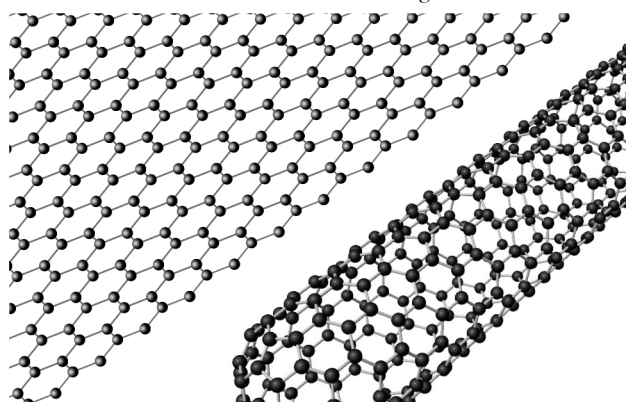
A szemünk láttára kibontakozó és széles területet felölelő nanotechnológiában kulcsfontosságúak a *szén nanocsövek*. Az egyfalú szén nanocső egy nagyon kis átmérőjű, belül üres egyenes henger, amelynek a „falán” helyezkednek el a szénatomok. Elnevezésük onnan ered, hogy a henger átmérője a nanométeres tartományba esik, vagyis ezek a csövek négy nagyságrenddel vékonyabbak az emberi hajszálnál (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy a kerületen, a cső tengelyére merőlegesen körbehaladva legfeljebb néhányszor tíz szénatomot találunk. Ugyanakkor hosszuk tipikusan több tíz- vagy százezerszer nagyobb vastagságuknál.

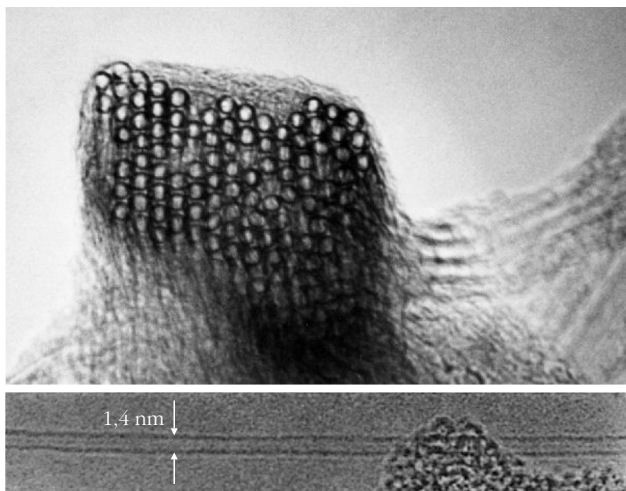
Szén nanocsöveket először fullerének előállításakor figyeltek meg, 1991-ben. Az ívkisüléses elpárolgatáshoz használt grafitrúd felületén keletkezett

kormot vizsgálták elektronmikroszkóppal. A felvételeken koncentrikusan egymásba ágyazott csöveket lehetett látni, amelyek száma esetenként a tízet is meghaladta. Az ilyen többfalú szén nanocsövek külső átmérője 2 és 20 nm közé esik, a szomszédos falak távolsága $\approx 0,34$ nm, vagyis annyi, amennyi a grafit párhuzamos rétegei közötti van der Waals-távolság.

A kutatások a 90-es évek közepén lódultak meg, amikor lehetővé vált egyfalú szén nanocsövek előállítása megfelelő katalizátorral adalékolt grafit lézeres elpárolgatásával. A szén nanocsövek előállítása manapság leggyakrabban valamilyen széntartalmú gáz katalitikus elbontásával (chemical vapor deposition = CVD) történik. Ennél az eljárásnál a katalizátorrészecskének egy hordozóra való megfelelő ráhelyezésével a létrejö-

1. ábra. Szén nanocső származtatása hatszöges rács feltekeréséből





2. ábra. Transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel egyfalú szén nanocsövekből álló kötegről (felül), illetve egy magányos egyfalú szén nanocsőről (alul). (*Science* 273 (1996) 483)

vő mintázat akár tervezhető is, például egyenletes sűrűségű „erdő” hozható létre szén nanocsövekből. Előállítottak már centiméteres hosszúságú nanocsövekből álló erdőt is, gyufaskatulya-méretben.

A körülményektől függően az egyfalú szén nanocsövek összeállhatnak van der Waals-erők által összetartott kötegekké, de lehetnek izolált csövek is (2. ábra). A cső vége lehet nyitott vagy zárt. Az utóbbi esetben a csövet lezáró „sapka” ötszögeket is tartalmaz. Egy hosszú cső tulajdonságait azonban a henger palástján hatszögekbe rendeződő szénatomok határozzák meg. Az egyfalú szén nanocsövek nemcsak az átmérőjükben különböznek, hanem ezeknek a hatszögeknek a henger falán való elhelyezkedésében is. Annyiféle egyfalú szén nanocső létezik, ahányféleképpen képzeletben(!) kivághatunk és hengerré hajthatunk egy téglalapalakú csíkot egy síkbeli hatszöges rácsból (1. ábra). Ezt a feltekerési- vagy kiralitási vektorral szokás jellemezni, ami egy a feltekerés után fedésbe kerülő szénatompárt összekötő vektor az eredeti hatszöges rácson. Bármely egyfalú szén nanocső egyértelműen megadható két egész számmal, az (n, m) kiralitási indexekkel, ami a kiralitási vektornak a hatszöges rács két primitív vektorára vonatkozó komponense. Ha $n = m$, akkor bizonyos szén-szén kötések merőlegesek a cső hossz tengelyére, ezek a karosszék csövek (3.a ábra), ha valamelyik index nulla, akkor bizonyos szén-szén kötések párhuzamosak a cső hossz tengelyével, ezek a cikk-cakk csövek (3.b ábra). Ezekben a speciális esetekben léteznek a csőnek tükörsíkjai. Az általános esetben $(n \neq m \neq 0)$ nincs tükörsík, ilyenkor királis csőről beszélünk (3.c ábra).

Az egyfalú szén nanocsövek tulajdonságai – a görbületi effektusok elhanyagolásával – jól közelíthetők a szabályos hatszöges szénrács, a grafén tulajdonságaiból kiindulva. Ezt hívják zónahajtogatásos közelítésnek. Belátható például, hogy – az egészen kis átmérőjű csövektől eltekintve – ha $(n-m)/3$ egész szám, akkor a cső fémes, ellenkező esetben szigetelő.

A 0,4–0,8 nm átmérőtartományban azonban a nagy görbület miatt már jelentős eltérések adódnak a zónahajtogatásos módszer eredményeitől.

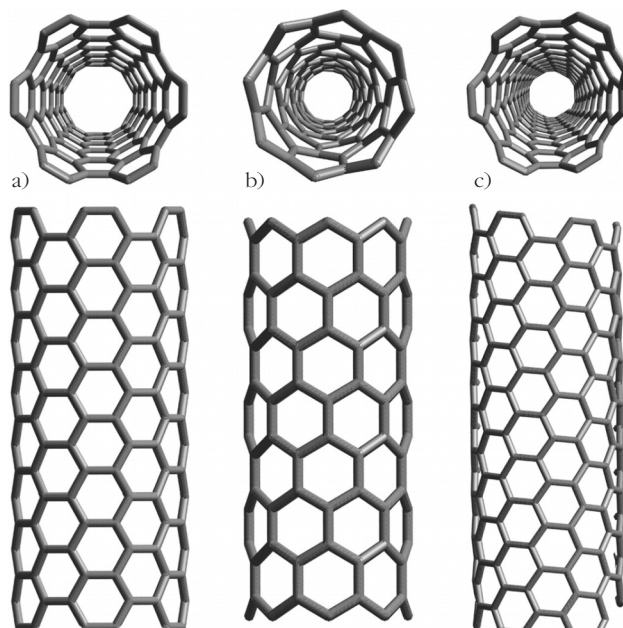
A szén nanocsövek alkalmazása szempontjából az egyik legnagyobb problémaként azt szokás említeni, hogy az egyfalú szén nanocsövek célzott, szelektív előállítása jelenleg még nem megoldott. Ez kétségtelenül igaz, de hozzá kell tenni, hogy sok olyan alkalmazás van, ahol a jól definiált kiralitás valójában nem is szempont, elegendő például a fémes, illetve szigetelő csöveket utólag szétválasztani.

Mire jók a szén nanocsövek?

A szén nanocsövek vizsgálata sokat segíthet abban, hogy jobban megértsük az atomok viselkedésének a kvantumfizika által vezérelt törvényszerűségeit. Alakjuknál és méretüknél fogva alkalmasak mezoszkopikus jelenségek, például a ballisztikus vezetés vizsgálatára. Továbbá olyan, az egydimenziós fémekben fellépő, korrelált elektronokra jellemző „egzotikus” állapotok tanulmányozhatók bennük, mint a Luttinger-folyadék állapot. Ebben a cikkben azonban azt szeretnénk bemutatni, hogy a szén nanocsövek különleges elektromos, mechanikai és kémiai tulajdonságai milyen alkalmazási lehetőségekkel kecsegtetnek. Csokorba gyűjtünk néhány fontos, részben már létező, részben még csak kísérleti stádiumban lévő alkalmazást.

A szén nanocsövek nagyon hegyes képződmények: hosszuk tipikusan több ezerszer nagyobb az átmérőjükénél. Mindenki ismeri a „villámhárító effektust”. Nos, a szén nanocsövek végénél már viszonylag kis feszültség hatására nagy elektromos térerősség alakul ki, ami könnyedén szakít ki elektronokat a nanocsőből. Ezen elektronok segítségével azután sokféle eszköz működtethető, például egy lapos kijelző, vagy

3. ábra. Karosszék cső (a), cikk-cakk cső (b) és királis cső (c)





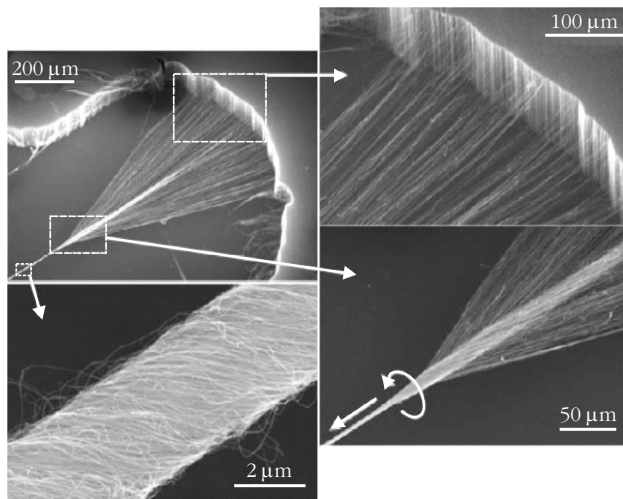
4. ábra. Szén nanocső téremissziós elektronforrással működő hordozható röntgenspektrométer

egy hordozható röntgenkészülék. Míg a szén nanocsőves, hidegkatódos, hordozható röntgenspektrométerek már megjelentek a piacon (4. ábra), a lapos képernyőkkel még csak a prototípusoknál tart a Samsung, illetve a Motorola cég. A szén nanocső katódos lapos képernyő jellemzője a nagy felbontású, éles kép és a nagy fényerő. Előnye a plazmatévével szemben, hogy könnyű, kicsi a felvett teljesítmény, és a pixelek nem égnék be. Előnye az LCD-vel szemben a nagyobb fényerő, hogy bármilyen látószögből jól látható, a pixelek pedig nagyon gyorsan kapcsolhatók.

A szén nanocsővek mechanikai tulajdonságai is különlegesek. Szakítószilárdságuk példa nélküli, 75-ször nagyobb az acélénál, de még a régebből ismert szénszálaknál is 10–15-ször erősebbek. Ugyanakkor sűrűségük csak hatoda az acélénak. Mindez rendkívül kedvező lehetőségeket teremt könnyű és nagyon erős anyagok előállítására. A szén nanocsővekkel erősített műanyagok egy napon a könnyű és erős kompozitok új családját jelenthetik, amelyek különösen a gépkocsi- vagy repülőgépgyártásban válhatnak nélkülözhetlenné. Luxusalkalmazásokban már ma is léteznek: a 2006-os Tour de France kerékpárverseny győztese például olyan biciklit használt, amelynek a szénszálas vázát szén nanocsővekkel tovább erősítették. A rendkívül erős váz mindössze 1 kg-ot nyomott.

Szén nanocsővekkel ígéretes eredményeket értek el a mesterséges izom kutatása terén is. Az alapjelenség a nanocső nyúlása, illetve rövidülése a rávitt elektromos töltés függvényében. Néhány voltnyi elektromos feszültség hatására az emberi izomnál sokkal nagyobb húzófeszültség kifejtésére képesek. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a piezokerámiákkal ellentétben nem törékenyek, érthető, miért kísérleteznek több helyen is a szén nanocsővek mechanikai működtető szerkezetként, aktuátorként való alkalmazásával.

A szén nanocsőveket, bármilyen hihetetlen, szupererős fonalakká lehet fonní polivinilalkohol segítségével (5. ábra). A néhány mikron átmérőjű szálak hossza akár 100 méter is lehet. Az ilyen erős fonálból szőtt ruhaanyagok mechanikailag ellenállóbbak lehetnek bármely más ismert természetes vagy mesterséges anyagnál. Az anyagok szívósságát szokás azzal a



5. ábra. Szupererős szén nanocső fonal szövése szén nanocsővekből álló „szőnyegből”. (Science 306 (2004) 1356)

tömegegységre jutó energiával jellemezni, amit az anyag még szakadás vagy törés nélkül képes elnyelni. A szén nanocső fonalakra 570 kJ/kg értéket mértek, ami húszszor nagyobb a golyóálló mellényekben jelenleg használatos kevlarra, és háromszor nagyobb a legszívósabb természetes anyagra, a pókselyemre vonatkozó értéknél. Egy ilyen anyagból készült rendkívül könnyű golyóálló mellény valóságos – a *Gyűrűk urából* ismert – „mithril lancing” lenne. Hogy a kard se maradjon ki, megemlíjük, hogy nemrégiben fény derült a szaracénok híres, damaszkuszi acélból kovacsolt kardjának titkára. Egy XVII. századi kard elektronmikroszkópos vizsgálatából megállapították a kutatók, hogy – valószínűleg a speciális kezelés következtében – a kard éle szén nanocsőveket (és szénszálakat) is tartalmazott, és nem lehetetlen, hogy ennek köszönhette bámulatos mechanikai tulajdonságait.

Említést érdemel egy egzotikus, talán soha meg nem valósuló ötlet: az űrlift. Ennek a lelke egy olyan kábel lenne, amelynek egyik vége a Föld felszínén, valahol az Egyenlítőn lenne rögzítve (esetleg egy úszó tengeri szigeten), a másik vége pedig, a hozzá kötött ellensúllyal, túllógna a körülbelül 36 ezer kilométeres geostacionárius magasságon. A centrifugális erő miatt kifeszülő kábelben mozgó lift segítségével a jelenlegi rakétás technikánál olcsóbban lehetne tárgyakat, illetve embereket az űrbe juttatni. Egy űrlift elkészítése és üzemben tartása (ha egyáltalán lehetséges) manapság még horribilis összegbe kerülne. Mindenesetre, a jelenleg ismert anyagok közül az ehhez szükséges mechanikai igénybevételt egyedül a szén nanocsővek bírják ki, egy ekkora hosszúságú acélsodrony például a saját súlya alatt elszakadna. Érdekességként megjegyezzük, hogy egy ilyen űrliftet *Arthur C. Clarke* már 1979-ben, a *The Fountains of Paradise* című novellájában leírt, amelyben a kábel egy speciális szénszál(!) volt.

A szén nanocsővek elektromos szempontból is érdekesek. Vannak közöttük fémes és félvezető tulajdonságúak is. Mindkét csoport nagyon fontos a jövőbeli nanoelektronikai alkalmazások szempontjából. Egyedi nanocsővekből már készítettek olyan áramkö-

röket (tranzisztorokat, logikai kapukat), amelyek mindazt tudják, ami, mondjuk, egy számítógép működéséhez szükséges. Ne feledjük, egy nanocső tranzisztor több mint százszor kisebb a jelenlegi legkisebb szilícium alapú tranzisztornál.

A jó elektromos vezetőképesség együtt jár a jó hővezető-képességgel. A szén nanocsövek – a fononok nagy szabad úthossza miatt – a legnagyobb hővezető-képességű anyagok közé tartoznak. Szobahőmérsékleten, a cső hossz tengelye irányában 15-ször jobban vezetik a hőt, mint a réz. Kísérletek szerint sokkal jobb hőkontaktust biztosítanak például egy processzor és hűtőbordája között, mint a jelenleg használatos hővezető paszták.

Nemrégiben kiderült, hogy megfelelő eljárással ultravékony, hajlékony, átlátszó, ugyanakkor elektromosan vezető film készíthető egyfálú szén nanocsövekből. Ezek a filmek hordozóra is fölvihetők, de önállóak is lehetnek (6. ábra). A fényt áteresztő vezető anyagok az elektrooptikai alkalmazások szempontjából – egyebek között érintőképernyőként, illetve napelemekben – rendkívül fontosak. Erre a célra jelenleg a legerterjedtebb az ITO (indium-ón(tin)-oxid). Hasonló elektromos ellenállás esetén a hajlékony, átlátszó szén nanocső film fényáteresztő képessége a látható tartományban összemérhető a törékeny ITO-éval, a 2–5 μm infravörös tartományban pedig lényegesen jobb nála.

Egyelőre kísérleti stádiumban vannak szén nanocsövekből álló olyan membránok, amelyek – a nanométeres átmérőjű csövekben történő áramlások tulajdonságai miatt – alkalmasak különböző molekulák hatékony szétválasztására. A szén nanocsövek folyadékáteresztő képessége a mérések szerint több tízezerszer nagyobb, mint ami a klasszikus egyenletek

alapján várható. Remények szerint 5–10 éven belül piacra kerülhetnek olyan szén nanocsöves membrán-szűrők, amelyekkel minden eddiginél olcsóbban lehet tengervízből ivóvizet előállítani. Az ilyen membránok segítségével – egyebek mellett – talán lehetséges lesz a szén-dioxid kiszűrése s így a káros kibocsátások mérséklése is. Elképzelhető folyadékáramlások kibekapcsolása is a nm-es tartományban.

A nanocsövek belsejébe a nyitott végükön viszonylag könnyen be lehet juttatni különböző molekulákat. A nanoborsók például belsejükben fullerén molekulákat tartalmazó szén nanocsövek. A szén nanocsövek további fontos tulajdonsága, hogy a külsejükre rá lehet kötni különféle oldalcsoportokat. A funkcionizált endohedrális nanocsövek pedig esetleg olyan nanokapszulaként szolgálhatnak majd, amelyek segítségével például, a külső funkciós csoporttól függően, gyógyszermolekulákat célzottan lehetne eljuttatni a szervezet megadott helyére.

A funkcionizált nanocsövek ígéretes alkalmazásaira példaként említjük a daganatos sejtek szelektív elpusztítása terén amerikai kutatók által elért kezdeti eredményeket. Egérkísérletek során sikerült a daganatos sejtekhez megfelelően funkcionizált nanocsöveket hozzákötniük. Ezután a látható fényhez közeli infravörös tartományba eső fénnel (0,7–1,1 μm) világították meg az állatot. Ezt a fényt a test szövetei jó részt átengedik, a szén nanocsövek viszont nagymértékben elnyelik. Ezáltal a nanocsövek közvetlen környéke annyira fölmelegedett, hogy ettől elpusztultak a daganatos sejtek. Természetesen a módszer tényleges használhatóságát még nagyon sok és körültekintő vizsgálat igazolhatja csak.

Ígéretes orvosi alkalmazással kecsegtetnek azok a mostanában folyó vizsgálatok is, amelyek során olasz kutatók szén nanocsövek hálózatát tartalmazó hordozón tenyésztettek (a hippokampuszból származó) idegsejteket. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a szén nanocsövek javítják a jelátvitelt a neuronok között. A kutatók célja olyan szén nanocsöveken alapuló implantátumok, új generációs biocipek kifejlesztése, amelyek segítségével a sérült neuronok újbóli összeköttetése révén a központi idegrendszer bizonyos sérülései helyrehozhatók. Megjegyezzük, hogy ebben az EU-projektben magyar kutatók is részt vesznek: a nanocsövek minősítése az MTA SZFKI-ban történik.

Végezetül megemlíti, hogy a szén nanocsövek elméleti és kísérleti kutatása hazánkban is több egyetemen, illetve kutatóintézetben folyik, nemzetközileg is számottevő eredményekkel.

Az íráshoz kapcsolódó internetes oldalak elérhetők például a <http://virag.elte.hu/kurti/science.html> oldalról. A *Fizikai Szemlé*ben a szén nanocsövekről eddig megjelent cikkek: Kürti Jenő, A varázslatos szénatom (47/9 (1997) 274), Biró László Péter, Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig (53/11 (2003) 385) és Márk Géza, Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban (56/6 (2006) 190).

Kürti Jenő

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

6. ábra. 80 nm vastagságú, egyfálú szén nanocsövekből álló film, zafír hordozón. Az olvasható szöveg a film mögött van. (*Science* 305 (2004) 1273)

