

NANO



MIKRO- ÉS NANOTECHNIKA II

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

5. ELŐADÁS: SZÉN NANOCSSÖVEK



2012/2013 tanév 1. félév

1

SZÉN NANOCSSÖVEK

CARBON NANOTUBES (CNT)

Források:

Mojzes Imre , Molnár László Milán: Nanotechnológia, Műegyetemi Kiadó, 2007

Kürti Jenő: Szén nanocsövek, Fizikai Szemle 2007 (3) p. 106.

Biró László Péter és munkatársai: Synthesis of carbon nanotubes by spray-pyrolysis, MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet (www.mfa.kfki.hu)

2

”NANO”-ANYAGOK, NANOSZERKEZETEK

Nanoszerkezet: legalább az egyik térbeli irányban kb. 100 nm alatti méret

Szén struktúrák
(fullerének, szén nanocsövek, grafén)

Fémek, fém multirétegek

Félvezetők (elemi és vegyület-félvezetők, két- egy- és null-dimenziós szerkezetek (kvantum-völgy, kvantum-szál, kvantum-pötty)

Végül is bármiből lehet nanoanyag!

3

SZÉN NANOCSŐ, CARBON NANOTUBE, CNT

Sokak szerint a szén nanocső (*carbon nanotube, CNT*) lesz a 21. század legfontosabb anyaga. A jövő eldönti, hogy ez igaz lesz-e, da a múlt arra tanít, hogy a legtöbb jóslat nem vált be.

Mindenesetre az 1991-es felfedezése óta kb. 20000 tudományos és műszaki cikk jelent meg róla, és több mint 1000 szabadalmat regisztráltak (ezt 2006-ban írták.



Egyfalu szén nanocső számítógépes modellje.

4

SZÉN NANOCSSÖVEK (CNT)

A 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. 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.

5

SZÉN NANOCSSÖVEK (CNT)

Szén nanocsöveket először fullerének előállításánál figyeltek meg, 1991-ben. Az ívkisüléses elpárologtatáshoz 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 0,34 nm, vagyis megegyezik a grafit párhuzamos rétegei közötti van der Waals-távolsággal.

6

SZÉN NANOCŐVEK (CNT)

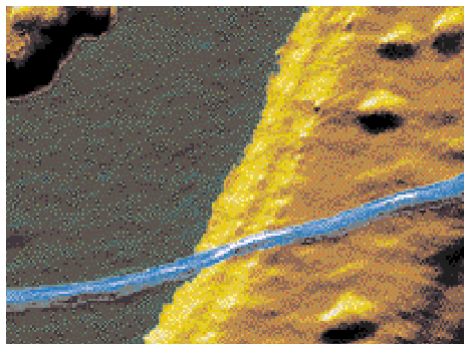
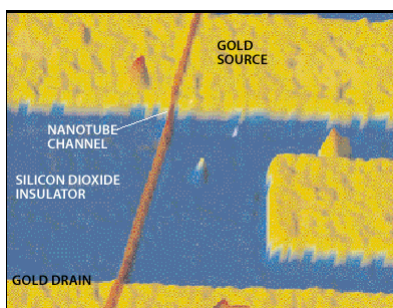
A kutatások a 90-es évek közepén lódultak meg, amikor lehetővé vált egyfalú szén nanocsövek előállítása megfelelő katalizátorral adalékolt grafit lézeres elpárologtatásával. A szén nanocsövek előállítása ma leggyakrabban valamilyen széntartalmú gáz katalitikus elbontásával (*chemical vapor deposition*, CVD) történik. Ennél az eljárásnál a katalizátorrészecskének egy hordozóra való megfelelő ráhelyezésével a létrejövő mintázat akár tervezhető is, például egyenletes sűrűségű "erdő" hozható létre szén nanocsövekből. Előállítottak már centiméteres hosszúságú nanocsövekből álló erdőt is, gyufaskatulya-méretben.

7

CARBON NANOTUBE (CNT)

Novel materials with unique electrical and mechanical properties

Made of pure carbon, as regular and symmetric as crystals, exquisitely thin, impressively long macromolecules.



CNT ELŐÁLLÍTÁS LABORATÓRIUMBAN



Forrás: Siegmur Roth, Max Planck Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

SZÉN NANOCSSÖVEK



Valódi nanocsövek

Forrás: Siegmur Roth, Max Planck Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

A SZÉN NANOCső ÁRA

1 db szén nanocső árának becslése:



1 nanocső: kb. 10^5 szénatom

12g szén kb. 6×10^{23} vagyis kb. 6×10^{18} nanocső

1g nanocső a "piacon" nagyjából 1000€ ez kb. 5×10^{17} nanocső

1 nanocső ára kb. 2 f€

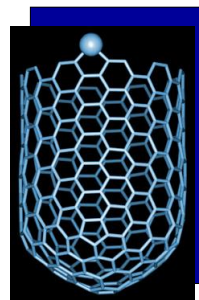
A szén nanocső igen olcsó anyag!

11

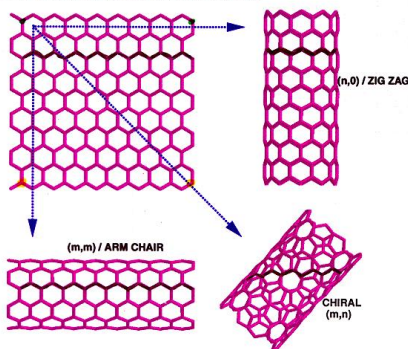
SZÉN NANOCsőVEK (CNT)

CNT : csőformájú szénképződmény mintegy 1nm átmérővel. Hossza: néhány nanométertől mikronig.

Geometriailag egy csőformájúra alakított kétdimenziós grafitréteg .



• STRIP OF A GRAPHENE SHEET ROLLED INTO A TUBE

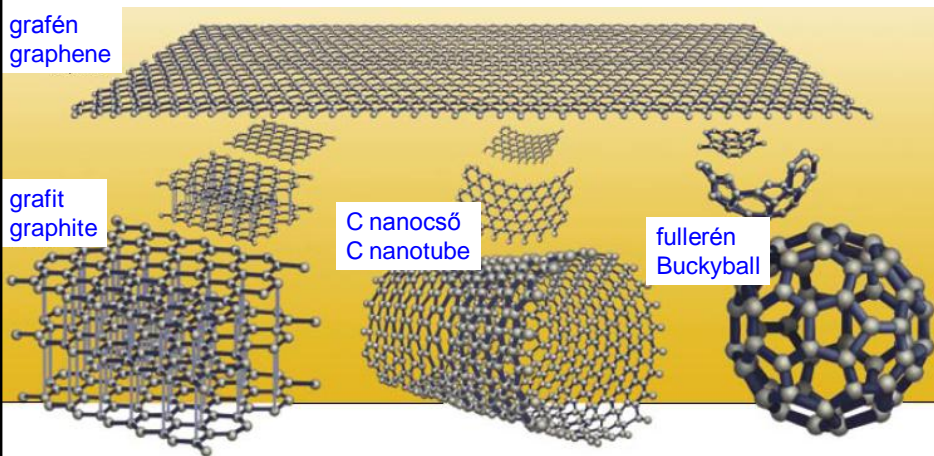


CNT: gyémántkeménységű, szakító szilárdsága ~ 200 GPa.
CNT: lehet fémes (a réznél jobb) vagy félvezető, kiralitásától függően

**NEM CSAK SZÉN ÉS
NEM CSAK CSŐ!**

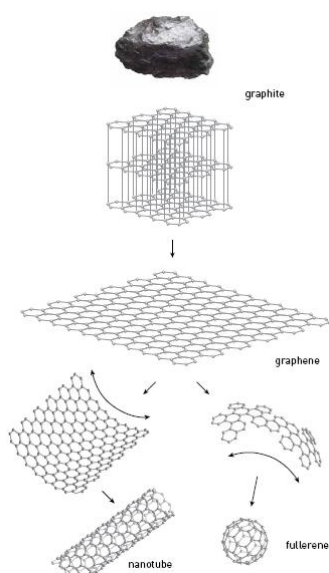
12

C (SZÉN): MOLEKULÁRIS ALAKZATOK



13

C (SZÉN): MOLEKULÁRIS ALAKZATOK



Graphite is a basic material found in nature. When taken apart graphite sheets become graphene. A rolled up layer of graphene forms a carbon nanotube, folded up it becomes a small football, fullerene.

14

FULLEREN ÉS GRAFÉN

C_{60} fullerén vagy "buckyball" vagy buckminsterfullerén (R.B.Fuller építész nevééről, aki hasonló szerkezeteket tervezett).

60 szénatom, 20 hatszög, 12 ötszög, futball-labda alak.

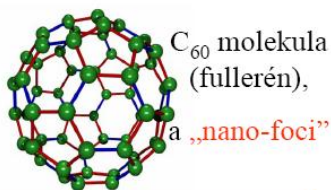
Kémiai Nobel díj 1996: H. Kroto, K. Smalley, R. Curl

Grafén: egy atomréteg "vastag" lemez

Fizikai Nobel díj 2010: A. Geim és K. Novoselov

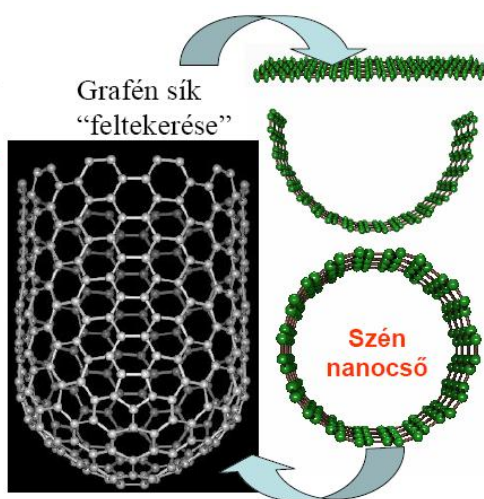
15

FULLERÉN ÉS SZÉN NANOCső



NEM

állíthatók elő „kifaragással”, rá kell bírni a szénatomokat, hogy így kapcsolódjanak össze.



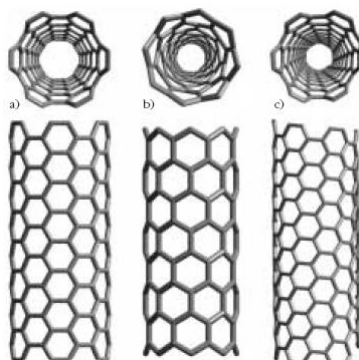
16

CNT: SZÉN NANOCSŐ

Az egyenes, egyfalú szén nanocső (*single wall carbon nanotube, SWCNT*) egy olyan nano-objektum, amelyet úgy képzelhetünk el, mint az egyetlen atom vastagságú grafit réteg (grafén) tökéletes hengerré tekerése nyomán nyert alakzatot. A többfalú szén nanocső (*multiple wall carbon nanotube, MWCNT*) több, koncentrikusan egymásba helyezett, egyfalú csőből épül fel, úgy, hogy az egyes falak közötti távolság megegyezik a turbóréteges grafitra jellemző, 0,34 nm értékkel.

17

CNT SZERKEZETEK



Egyenes szén nanocsövek szerkezeti modellje. A három jellegzetes nanocső család: a *karosszék* csövek (a) esetében egyik C-C kötés merőleges a cső tengelyére, a *cikk-cakk* csövek (b) esetében egyik C-C kötés párhuzamos a cső tengelyével, míg a *királis* csövek (c) esetében a cső tengelye és a hozzá legközelebb eső C-C kötés 0 és 30° közötti szöveget zár be.

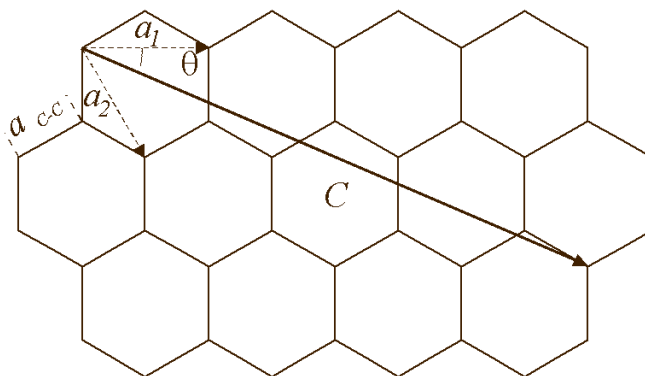
18

CNT SZERKEZETEK

Az egyfalú, egyenes szén nanocső elektromos tulajdonságait az a mód határozza meg, ahogyan a grafén réteg feltekerésére sor kerül, ez egyértelműen megadható az ún. feltekerési vektor segítségével. A vektor origójában és végpontjában található szénatomok „egybeolvasztásával” keletkező hengerfelületen, a feltekerési vektor a cső tengelyére merőleges kört alkot. A $C = n a_1 + m a_2$ egyértelműen azonosítja a szén nanocsövet, az egységvektorok (n, m) szorzóinak segítségével.

19

CNT SZERKEZETEK



A grafén sík nanocsővé tekerését meghatározó feltekerési vektor C , a_1 és a_2 a grafén sík két egységvektora, a_{C-C} a szén-szén kötés.

20

CNT KÜLÖNLEGES TULAJDONSÁGAI

Mechanikai tulajdonságok:

Young-modulus: ≈ 1 TPa
 Szakítószilárdság: > 50 GPa
 Maximális hosszirányú deformáció: $> 10\%$

Hosszirányú terhelhetőség / tömeg arány rendkívül nagy

Termikus tulajdonságok:

Jó hővezető (tengely mentén): ≈ 5000 W/m·K
 (vö. vörösréz: 400 W/m·K)

Szerkezeti/geometriai tulajdonságok:

Nagy fajlagos felület (egyfalú CNT)

Elektromos tulajdonságok:

Sávszerkezet függ a kiralitás vektortól
 lehet fémes vezető, illetve félvezető

21

SZILÁRDSÁG

A nanocsövek azonnal felkeltették a mérnöki tudományok terén dolgozó kutatók érdeklődését. Rendkívüli tulajdonságaik, többek között a páratlan rugalmasság, hajlékonyság, szakítószilárdság és hőstabilitás következtében felhasználhatóak például mikroszkopikus robotok gyártására vagy ütközéseknek jobban ellenálló autókarszériák, esetleg földrengésbiztos épületek szerkezeti anyagaként

(Megj.: A szén nanocsövek nem összetévesztendőek az ipar által már több évtizede szintén anyagerősítésre használt szénszálakkal, amelyekről úgy méretben, mint szerkezetben és tulajdonságokban élesen eltérnek).

22

SZILÁRDSÁG

Valamennyi ma ismert anyag közül az egyfalú szén nanocsövek rendelkeznek a legnagyobb szilárdsággal. Ami a szén nanocsöveket mechanikailag ennyire stabillá (erőssé) teszi, az a szénatomok egymáshoz kapcsolódásának az erőssége, amely a nanocsövek C-C kötéseiben esetében erősebb, mint a gyémántban található C-C kötések esetén.

Szén nanocsövek esetében a szén atomok egy hatszöges rácson helyezkednek el, pontosan úgy, mint a grafit esetében, ezért a szén nanocsöveket úgy képzelhetjük el, mint egy grafitsík feltekerésével nyert csövet. Ezen csövek végei általában egy fél fullerén „sapkával” zárulnak be.

23

CNT TULAJDONSÁGAI



Méret, vastagság: Az egyfalú nanocsövek átmérője 0,6-1,8 nanométer, míg a többfalú nanocsövek átmérője 1-100 nanométer között van.



Sűrűség: Az egyfalú nanocsövek nagyon könnyűek, sűrűségük 1,33-1,40 g/cm³. Összehasonlításként az alumínium sűrűsége 2,7 g/cm³.








Szakítószilárdság: Az egyfalú nanocsövek esetén 45 billió Pascal, míg az acél szakítószilárdsága 2 billió Pascal.



Rugalmasság: Nagy szögben hajlíthatóak és károsodás nélkül felveszik utána az eredeti formájukat. A fémek (pl. acél) már kis hajlítás esetén törnek.

24

CNT TULAJDONSÁGAI

Vezetőképesség: Egyfalú nanocsövek esetén 1 billió A/cm²-re becsülhető, míg a rézvezetékek 1 millió A/cm²-nél elégnék.

Téremisszió: Aktív foszforral 1-3 V, ha az elektródok 1 μm távolságra vannak egymástól. Molibdén esetén 50-100V/μm szükséges és csak nagyon korlátozott élettartam mellett.

Hővezetés: Becsülhetően 6000 W/(m*K) lehet szobahőmérsékleten, míg a nagy tisztaságú gyémánt hővezető képessége ennek kb. a fele (3320 W/(m*K)).

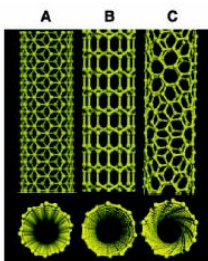
Hőstabilitás: A nanocsövek vákuumban 2800 °C-ig és levegőn 750°C-ig stabilak. A fémek 600-1000 °C között már olvadnak.

Ár: A nanocsövek grammonként 1500, míg az arany egy grammja 10 dollárba került 2000. októberében.²⁵

CNT: ELEKTROMOS TULAJDONSÁGOK

A feltekerés mikéntje befolyásolja az egyfalú nanocső elektromos tulajdonságait; minden karosszék konfigurációjú nanocső fémes viselkedésű, a cikkcakk nanocsövek közül azonban csak minden harmadik ilyen, a többiek félvezető tulajdonságokkal rendelkeznek. A királis nanocsövek esetén a kiralitás határozza meg a cső viselkedését.

CNT TULAJDONSÁGAI

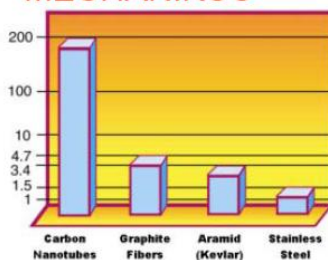


ELKTRONSZERKEZET

- fém vagy félvezető (feltekerés sz.)
- ballisztikus vezető
- nanoelektronika „szilíciuma”



MECHANIKUS



Egyfalú szén nanocsövek szakítószilárdsága (GPa) összevetve már alkalmazást nyert nagy szilárdságú anyagokéval
K.-T Lau & D. Hui, Composites B, 33 (2002) 263

27

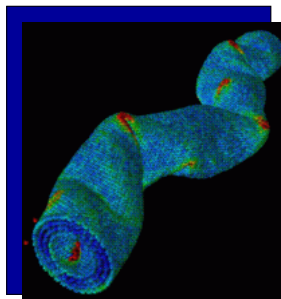
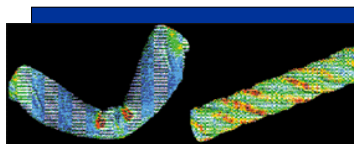
SZÉN NANOCÖVEK TULAJDONSÁGAI

A legerősebb és leghajlékonyabb molekuláris anyag a C-C kovalens kötések és a varratmentes hexagonális hálós architektúra miatt

A Young modulus 1 TPa felett (70 GPa alumíniumra és 700 GPa C-szállra)
-a szilárdság/súly arány 500-szor nagyobb mint alumínium esetén, hasonló javulás acélhoz és titánhoz képest és egy nagyságrenddel jobb mint a grafit/epoxy keverék

A maximális deformáció ~10%-al magasabb bármilyen anyagénál

A hővezető képesség ~ 3000 W/mK axiális és igen alacsony a merőleges, radiális irányban



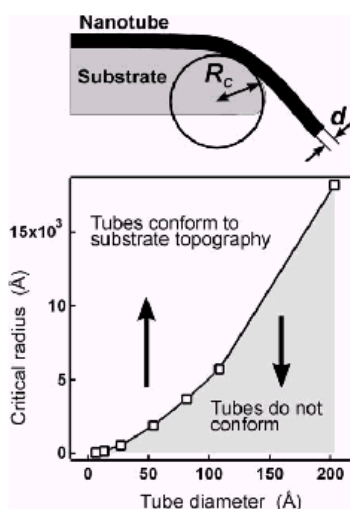
28

MECHANIKAI TULAJDONSÁGOK

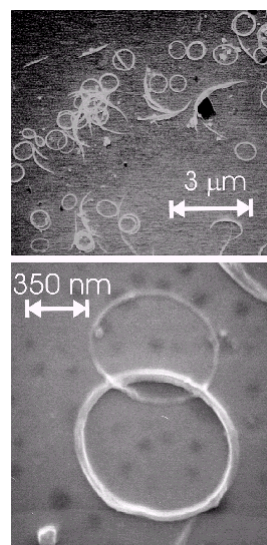
A szén nanocsövek mechanikai tulajdonságai is különlegesek. Szakítószilárdságuk példa nélküli, 75-ször nagyobb az acélénál, de még a régebről ismert szénszálaknál is 10-15-ször erősebbek. Ugyanakkor sűrűségük csak hatoda az acélénak. Mindez rendkívül kedvező lehetőségeket teremt könnyű és nagyon erős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

29

ALKALMAZKODÁS A FELÜLETHEZ



Egymásba fonódó CNT-k



CNT alkalmazkodása a szubsztráthoz,
a görbületi sugár függvényében

MECHANIKAI TULAJDONSÁGOK: ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

Szén nanocsövekkel 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 nanocsövek mechanikai működtető szerkezetként, aktuátorként való alkalmazásával.

31

ELEKTROMOS TULAJDONSÁGOK

A szén nanocsövek elektromos szempontból is érdekesek. Vannak közöttük fémes és félvezető tulajdonságúak is. Mindkét csoport nagyon fontos a jövőbeli nanoelektronikai alkalmazások szempontjából. Egyedi nanocsövekből már készítettek olyan áramköröket (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.

32

TERMIKUS TULAJDONSÁGOK

A jó elektromos vezetőképesség együtt jár a jó hővezető-képességgel. A szén nanocsövek - a fononok nagy szabad úthossza miatt - a legnagyobb hővezetőképeségű 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.

33

CNT MINT SZERKEZTI ANYAG: KOMPOZITOK

Kompozitok:

Nanocsöveket foglalnak a (polimer, fém, kerámia, stb.) mátrixba

Eredmény: a csövek tengelyének irányában javulnak a mechanikai tulajdonságok

Szakítószilárdság/tömeg:

100x Al

10x szénszálak

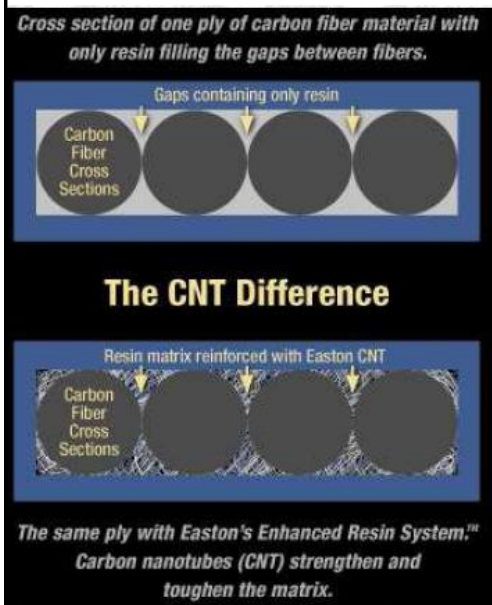
Illusztráció: nanocső kompozit

kerékpárváz; tömeg: <1 kg
(Easton Carbon)



34

CNT MINT SZERKEZTI ANYAG



Bicikliváz kompozit:

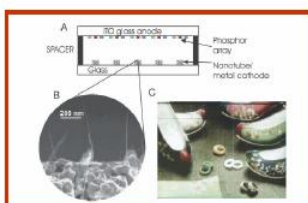
Szénzásal erősítésű anyagból indulnak ki, ami eleve egy kompozit:

Mátrix: műgyanta

Ehhez adnak hozzá szén nanocsöveket, ezzel tovább erősítve a gyanta mátrixot.

35

ALKALMAZÁSOK



SÍKKÉPERNYŐ - SAMSUNG



Hordozható RX készülék –
APPLIED
NANOTECHNOLOGIES Ltd.,
USA

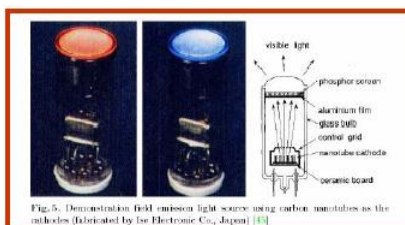


Fig. 5. Demonstration of a light emission source using carbon nanotubes as the cathodes (fabricated by ISE Electronic Co., Japan) [10]

VILÁGÍTÁS – ISE ELECTRONIC. CO. Japán



BICIKLI (a
teljes váz 1 kg!!)
- EASTON
SPORTS, USA

HIDEGEMISSZIÓS KATÓD

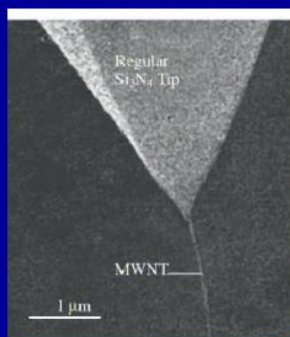
A szén nanocsövek nagyon hegyes képződmények: hosszuk tipikusan több ezerszer nagyobb az átmérőjüknél.

A szén nanocsövek végénél már viszonylag kis feszültség hatására nagy elektromos térerősség alakul ki, ami könnyedén szakít ki elektronokat a nanocsőből.

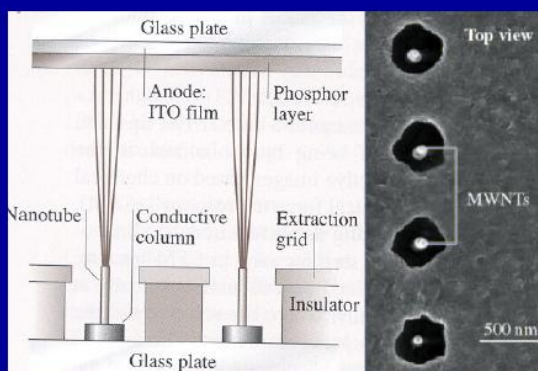
Ezen elektronok segítségével azután sokféle eszköz működtethető, például egy lapos kijelző, vagy egy hordozható röntgenkészülék.

37

Szén nanocsövek nanotechnológiai alkalmazásokban (MWNT: többfalú szén nanocső)



Kerámia tű hegyére
növesztett MWNT AFM
szonda



Téremissziós képernyő működési elve és a
katód MWNT megvalósítása (Mo helyett)

38

HIDEGEMISSZIÓS KATÓD

Míg a szén nanocsöves, hidegkatódos, hordozható röntgen-spektrométerek már megjelentek a piacon, 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 égnek be.

Előnye az LCD-vel szemben a nagyobb fényerő, hogy bármilyen látószögből jól látható, a pixelek pedig nagyon gyorsan kapcsolhatók.

39



Szén nanocső téremissziós elektronforrással működő hordozható röntgenspektrométer

40

CNT ELŐÁLLÍTÁSA

A szén nanocsövek szintézisére számos módszer ismert. Beszámoltak már cseppfolyós nitrogénben, illetve argonban, cseppfolyós ammóniában, vízben és sóoldadékban végzett sikeres szintézisekről. Ismertek gázfázisú és szilárdfázisú szintézismódszerek is. Ezek az eljárások nagy kapacitású nanocsőgyártó technológiákként még nem terjedtek el, holott például a vizes közegben grafit-elektrodok között végrehajtott elektromos kisülés vagy a ferrocén katalizálta lángpirolízis technikailag nem állítana nagy nehézségeket a méretnövelés elé.

41

CNT ELŐÁLLÍTÁSA

Jelenleg két módszer látszik alkalmasnak nagy mennyiségű - itt természetesen nem tonnáról, hanem kilogrammokról beszélünk - szén nanocsövek előállítására.

Az egyik a plazmatechnológia, amely elektromos ívkisülés révén hoz létre a nanocső képződéséhez megfelelően magas, úgynevezett plazmahőmérsékletet. Itt szénatomok, illetve atomcsoportok képződnek a szén elektródokból, és rakódnak le különböző szénformákként a reaktorban.

A másik módszer a szénhidrogének gázfázisú katalitikus bontása (CCVD - Catalytic Chemical Vapor Deposition).

42

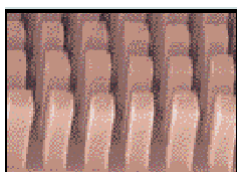
CNT ELŐÁLLÍTÁSA

Szénelektrodás ív:

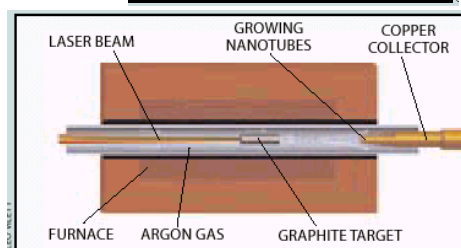
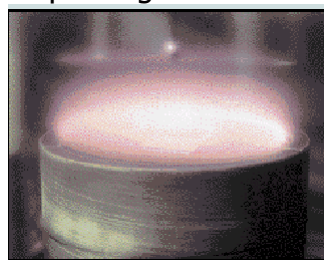
Egyszerű, olcsó eljárás
Rossz kihozatal

Kemence - grafit
párologtatással

Kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD):
Veszélyes eljárás

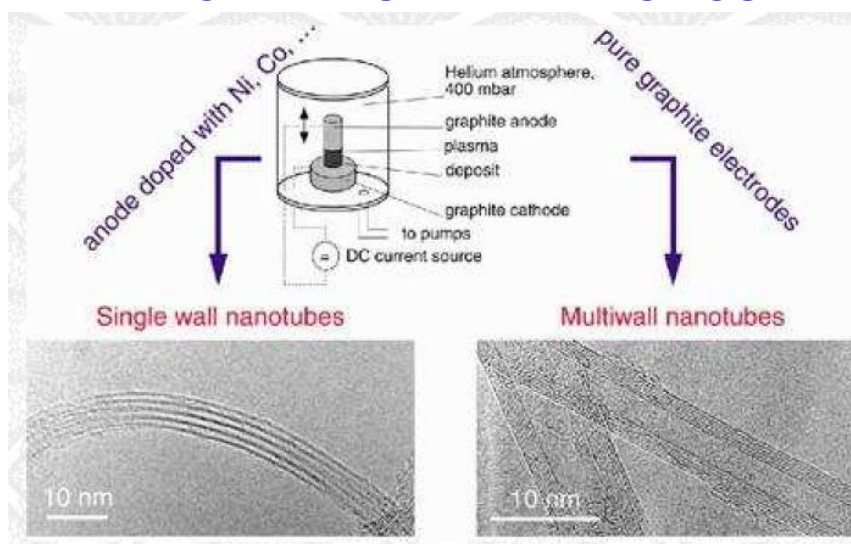


Jó kihozatal, jó minőségű
SWNT termék



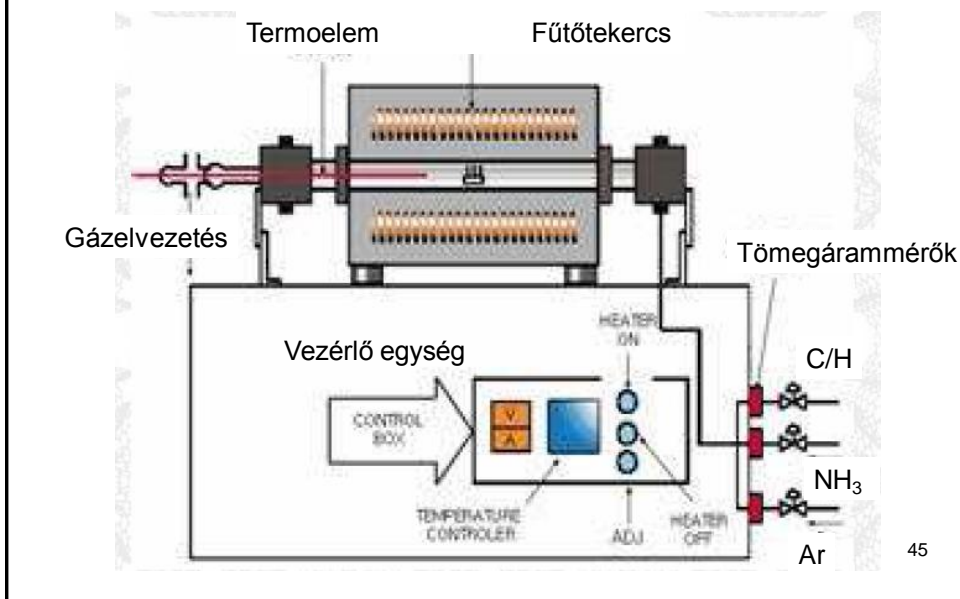
Lézerabláció:

CNT ELŐÁLLÍTÁSA: ELEKTROMOS ÍV

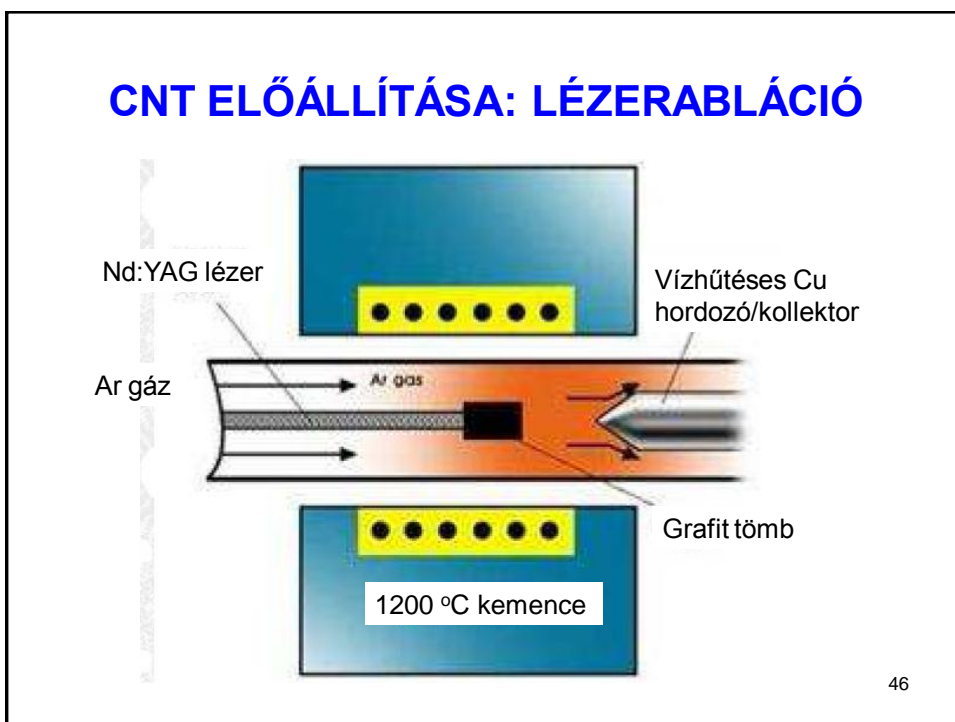


44

CNT ELŐÁLLÍTÁSA: CVD



CNT ELŐÁLLÍTÁSA: LÉZERABLÁCIÓ



CNT ELŐÁLLÍTÁSA: SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY SPRAY PYROLYSIS

The injection CVD or “spray pyrolysis” method is based on the simultaneous injection of a metallocene–hydrocarbon solution through a sprayer into the reaction furnace. The major advantage of the spray-pyrolysis method consists in the direct and continuous generation of fresh catalytic particles throughout the entire growth cycle. This gives the possibility to scale up the method for continuous or semicontinuous production of carbon nanotubes at commercially viable prices.

Tapasztó L., Kertész K., Vértesy Z., Horváth Z. E., Koós A. A., Osváth Z., Sárközi Zs., Darabont Al., Biró L. P:

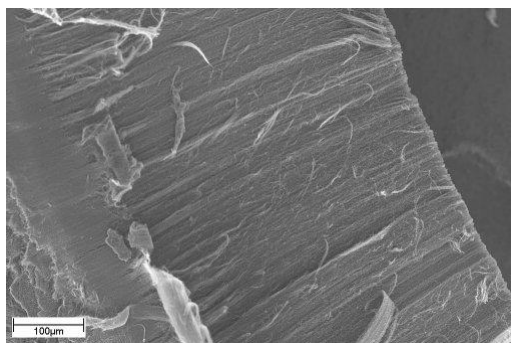
Diameter and morphology dependence on experimental conditions of carbon nanotube arrays grown by spray pyrolysis

Carbon **43** (2005) 970–977.

Forrás: www.mfa.kfki.hu

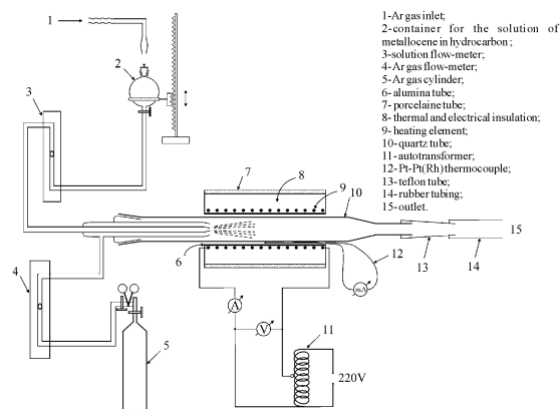
47

CNT ELŐÁLLÍTÁSA



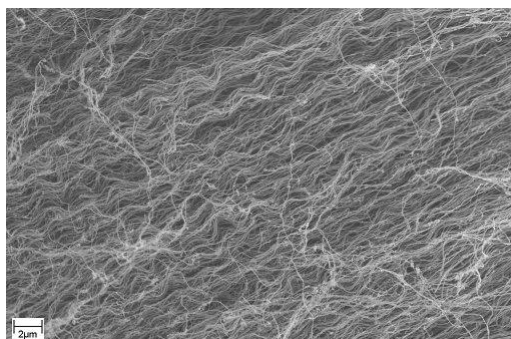
48

CNT ELŐÁLLÍTÁSA:



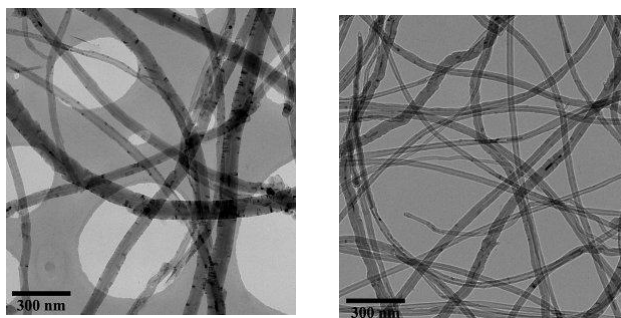
The setup used to synthesize carbon nanotubes consist of an electric furnace with an effective heating length of 200 mm, a quartz reactor of 18 mm inner diameter and a nozzle with two concentric tubes of 0.8 and 1.8 mm inner diameter, respectively. The inner tube of the nozzle carries the metallocene–hydrocarbon solution, while the outer one guides the carrier gas in order to pulverize the solution.

CNT ELŐÁLLÍTÁSA



SEM image of the carbon nanotubes

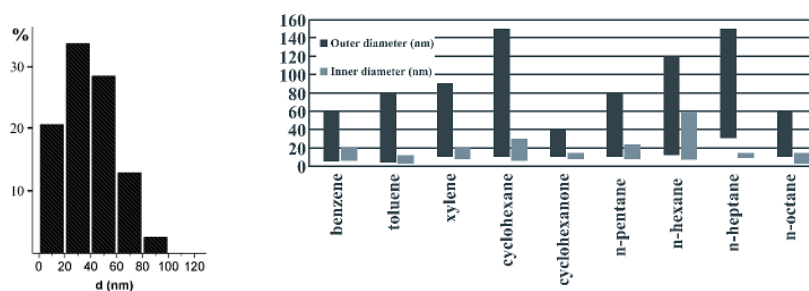
CNT ELŐÁLLÍTÁSA



TEM images of the samples produced of xylene and octane, respectively

51

CNT ELŐÁLLÍTÁSA

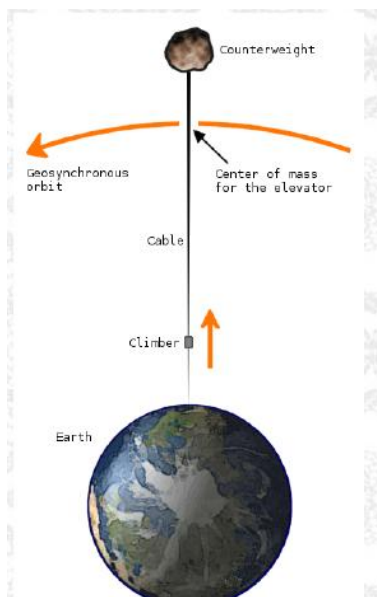


Diameter distribution of the nanotubes produced of xylene.

Comparison of the outer and inner diameters of the carbon nanotubes produced of different carbon sources. The diagram shows the diameter intervals containing 80% of the nanotube diameters measured in the sample.

52

SCI-FI: NASA ŰRLIFT PROJEKT



Drasztikus csökkentené az űrkutatás költségeit.

A ma ismert anyagok közül *csak* a szén nanocső lenne alkalmas.

Egy ilyen űrliftet *Arthur C. Clarke* már 1979-ben, a *The Fountains of Paradise* c. novellájában leírt, amelyben a kábel egy speciális szénszál(!) volt.

53

SCI-FI ÉS CNT

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

54