

beli kulcsszereplői. A Keszthelyi Lajos által kidolgozott orientálás ezen optikai (pl. holográfiai) alkalmazások szempontjából is nagyon sok előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Jelenleg is intenzív kutatások folynak az Intézetben ebben témakörben.

Keszthelyi Lajos 1975-ben lett az Intézet igazgatója, egészen 1994-ig töltötte be ezt a posztot. Az alig pár évvel korábban alapított Intézet arculatának kialakulása tulajdonképpen igazgatóságának idejére esik. 1989-től öt éven át egyidejűleg főigazgatóként irányította az egész SZBK-t.

A biofizika közismerten interdiszciplináris tudomány, az alkotó tudományágak súlya nagyban függ művelői tudományos habitásától. Keszthelyi Lajos jellegzetes megtestesítője a kísérleti fizikus mentalitású biofizikusnak. Megmutatkozik ez gondolkodásmódjában, a témák kiválasztásában, tárgyalásában, még ab-

ban is, hogyan alakította az SZBK Biofizikai Intézetének tematikáját, kutatói gárdáját. Jelenleg is aktív résztvevője az Intézet életének. Saját kutatási témát vezet, és rendszeresen konzultál valamennyi más területen dolgozó kutatóval, akik tanácsait mindig nagyra értékelik. Az intézeti szemináriumokon most is lenyűgözi kollégáit a témák gyors átlátásával, a problémák azonnali feltárásával, előre mutató javaslataival. Tanítványai igyekeztek és azóta is igyekeznek eltanulni egyedülálló kutatói tulajdonságait, a nagy szakmai tudáson, kiváló kísérleti készségen és munkabíráson túl széles műveltségét, eredetiségét, ötletességét, különleges fogékonyságát az új dolgok iránt.

Születésnapja alkalmából, valamennyi tisztelője nevében is, további jó egészséget és eredményes munkát kívánunk a 80 éves Keszthelyi Lajosnak.

*Ormos Pál, Szőkefalvi-Nagy Zoltán*

## FERENCZI DÍJ, 2006

A Ferenczi György Emlékalapítvány Kuratóriuma a beérkezett pályázatok közül a 2006. évi Ferenczi György Díjat sorrend megjelölése nélkül *Osváth Zoltánnak* és *Radnóczi György Zoltánnak* ítélte oda. A Díj igazoló oklevelét, a kitüntetettek nevét mutató

Ferenczi György emlékplakettet és a Díjjal együtt járó 75-75 ezer forint pénzjutalmat 2006. október 20-án a Csodák Palotájában rendezett ünnepségen adták át. Az alábbiakban a két kitüntetett pályamű összefoglalását adjuk közre.

## Szén nanocső ponthibák alagútmikroszkópos megfigyelése

Osváth Zoltán

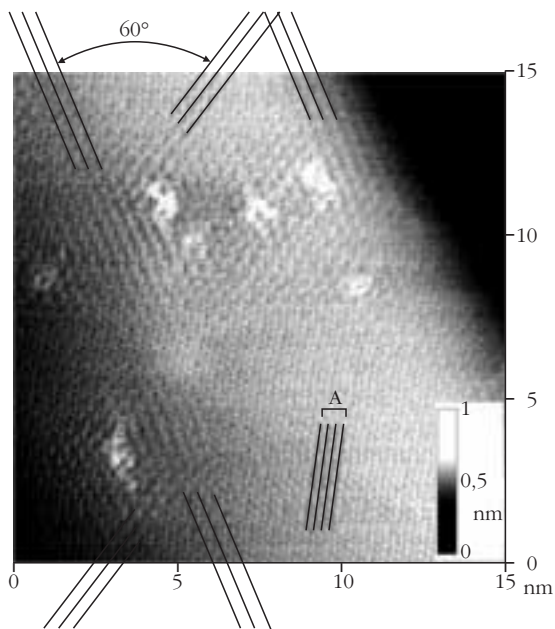
MTA MFA, Nanoszerkezetek Osztály

Felfedezésük után a szén nanocsövek kutatása az egyik erőteljesen virágzó kutatási területté vált. Fizikusok, vegyészek és az anyagtudomány művelői egyaránt nagy figyelemmel fordultak az elmúlt évtizedben e parányi objektumok világa felé. Mindez azért történt, mert a szén nanocsövek egyedi és igen különleges vezetési és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Különleges tulajdonságaik miatt a szén nanocsövek rengeteg területen nyerhetnek alkalmazást, mint például a nanoelektronikában, kompozit anyagok készítésében (úgy elektromos, mint mechanikai tulajdonságok javítására), vagy sík képernyők, tér-emissziós lámpák gyártásában (e termékek ipari termelése a küszöbön áll).

Az egyfalú szén nanocső úgy modellezhető, mint egyetlen grafit síkból (grafén) feltekert, henger alakú objektum, melynek tulajdonságai függenek a feltekerés módjától [1]. A többfalú szén nanocsövek olyan egymásba koncentrikusan helyezett egyfalú csövekkel modellezhetőek, amelyekben a szomszédos hengeralakúak közötti távolság 0,34 nm körül van. E modellek tökéletes hengerszerkezetekként kezelik a szén nanocsöveket. A valóságban azonban már az előállítás során hibák épülnek be a nanocsőszerkezetbe [2],

amelyek befolyásolják mind a mechanikai, mind a vezetési tulajdonságokat. A szerkezeti hibák jelenléte nagyon fontos például a szén nanocső alapú térvezérlésű tranzisztorok (CNT-FET) működésénél. A katalitikus CVD-módszerrel előállított nanocsövek általában görbültek, ami a szerkezeti hibákkal van összefüggésben. Ezzel szemben az elektromos ívkisüléssel előállított szén nanocsövek általában egyenesek, jól grafitizáltak, azaz kevesebb szerkezeti hibát tartalmaznak.

Szerkezeti hibák utólagos beavatkozással is létrehozhatók a nanocsövekben, mint például kémiai kezeléssel vagy besugárással. Ebben a munkában ívkisüléses módszerrel előállított többfalú szén nanocsöveket sugároztunk be 30 keV-os  $\text{Ar}^+$  ionokkal, a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) egyik ionimplantációs berendezésével. Ezen az energián az ionok még főleg az atommagokkal való rugalmas ütközések során veszítik el energiájukat, így feltételeztük, hogy a besugárzás hatására sok ponthiba (vakancia, intersticiális atom) keletkezik a nanocsövek szerkezetében. A besugáráshoz kis,  $D = 5 \cdot 10^{11}$  ion/cm<sup>2</sup> dózist alkalmaztunk azért, hogy egyedi, egymástól jól elkülöníthető ponthibákat hozzunk létre, amelyeket vizsgálni tudunk egy arra alkalmas eszköz-



1. ábra. Ponthibákat tartalmazó (besugárzott) szén nanocső atomi felbontású STM-felvétele. A hibák közvetlen környezetében interferenciavonalak, úgynevezett „ $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R$ ” szuperstruktúrák figyelhetők meg. A berajzolt segédvonalak az interferenciacsíkokra, illetve az atomi periodicitásra (A-val jelölt vonalcsoport) kívánják felhívni a figyelmet.

zel, a pásztázó alagútmikroszkóppal (STM) [3]. A vizsgálatokat levegőn és szobahőmérsékleten működő STM-mel végeztük, állandó áramú üzemmódban [4].

Az 1. ábrán egy besugárzott, többfalú szén nanocső STM-felvételét láthatjuk atomi felbontásban. A nanocsövön néhány ponthiba figyelhető meg, egymástól pár nanométeres távolságra.

A ponthibák dombszerű kiemelkedések (világos pontok) formájában jelennek meg a felvételen. Ez a világosabb kontraszt a hibahelyeken nem a felületből kiemelkedő objektumot jelent, hanem pusztán a helyi elektronszerkezet (állapotsűrűség) megváltozásából adódik (látszólagos kiemelkedések) [5]. A hibahelyeken levő többletállapotok miatt lokálisan megnő az

alagútáram, így az STM-tűnek fel kell emelkednie néhány angströmöt, hogy az áram állandó értéken maradjon (állandó áramú leképezés).

A hibahelyek közvetlen szomszédságában megfigyelhető még a lokális állapotok sűrűségének olyan oszcillációja, amelynek periódusa (kb. 0,39 nm) nagyobb az atomi szerkezet által meghatározott periódusnál (kb. 0,25 nm) [5]. Ezek az úgynevezett „ $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R$ ” szuperstruktúrák hasonlítanak a fémbeli ponthibák környezetében megfigyelt Friedel-oszcillációkhoz, megjelenésük a hibahelyekre érkező, illetve az azokon szóródott elektronhullámok interferenciájával magyarázható [6]. Az interferencia eredményeképpen az állapotok sűrűsége átrendeződik a hiba közvetlen környezetében. Megfigyelhető, hogy az interferenciavonalak amplitúdója fokozatosan csökken, ahogy távolodunk a hibától, és 3 nm-en belül teljesen eltűnik. A mérésekből az is látszik, hogy adott kiralitású nanocső esetén az egyes hibahelyeknél megfigyelt szuperstruktúra-mintázatok ugyanolyan orientációjúak. Az interferenciavonalak által bezárt  $60^\circ$ -os szögek az elektronhullámok Fermi-energiánál megengedett terjedési irányainak köszönhetőek.

A témával kapcsolatos további anyagok a Nanoszerkezetek Osztály honlapján találhatóak: <http://www.mfa.kfki.hu/int/nano>.

#### Irodalom

1. Kürti J., A varázslatos szénatom. *Fizikai Szemle* 47/9 (1997) 276
2. Biró L.P., Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig. *Fizikai Szemle* 53/3 (2003) 385
3. Balázs E., A pásztázó alagútmikroszkóp és társai. *Természet Világa* 1993/1
4. Márk G., Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. *Fizikai Szemle* 56/6 (2006) 190
5. Z. Osváth, G. Vértesy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z.E. Horváth, J. Gyulai, L.P. Biró, Atomically resolved STM images of carbon nanotube defects produced by  $\text{Ar}^+$  irradiation. *Physical Review B* 72 (2005) 045429
6. L. Tapasztó, P. Nemes-Incze, Z. Osváth, Al. Darabont, Ph. Lambin, L.P. Biró, Complex electron density oscillations on CVD-grown multi-wall carbon nanotube bent-junction. *Physical Review B* közlés alatt.

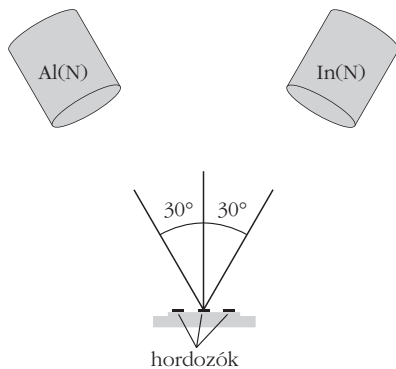
## III-nitrid nanofű

A III-nitrid vegyület-félvezetők (GaN, AlN, InN és különböző ötvözeteik) egyre fontosabb szerephez jutnak a félvezetőiparban, elsősorban elektromos tulajdonságaiknak (direkt átmenettel rendelkező sáv szerkezet, nagy elektronmozgékonyosság) köszönhetően. Ilyen anyagokból készülnek a napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazott, intenzív fényű zöld, kék, UV világítódiodák, félvezető lézerek. A félvezető eszközök gyártásának szempontjából fontos, hogy a különböző ötvözetek az összetételnek megfelelő tiltottsáv szélességgel rendelkeznek, így gyakorlatilag tetszőleges tiltottsáv szélesség érhető el a 2–6 eV tartományban. Az AlN/InN ötvözetek előállításánál fontos korlátot jelent a körülbelül 10%-os oldhatósági határ. Emiatt a 10–90% InN-et tartalmazó ötvözetek nem-

Radnóczi György Zoltán  
MTA MFA, Vékonyrétegfizikai Osztály

egyensúlyi összetételük miatt metastabilak és nehezen állíthatók elő jó minőségben.

Kísérleteinkben ilyen nem-egyensúlyi összetételű, epitaxiális rétegeket kívántunk növeszteni MgO hordozón, reaktív magnetronporlasztással. A növesztéshez külön In- és Al-forrásokat használtunk, az 1. ábrán látható elrendezésben, nitrogén porlasztógázzal.  $300^\circ\text{C}$  hőmérsékleten a 2. ábrán látható szerkezetet növesztettük, melyet a morfológia alapján nanofűnek neveztünk el. A szerkezet érdekessége, hogy a folytonos réteg helyett felépült tűkristályok görbültek, ennek megfelelően a hordozótól távol eső szakaszai orientációja lényegesen eltér a hordozóhoz közeli részek epitaxiának megfelelő orientációjától. A nanofű jellemzően 10–20 nm széles és 300 nm hosszú osz-

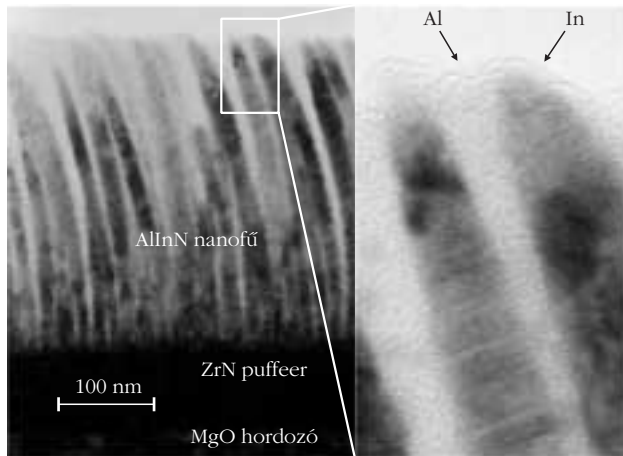


1. ábra. A magnetronforrások és a hordozó elhelyezkedése a nanofű növesztésénél.

lopokból áll, melyek körülbelül  $28^\circ$ -ot görbülnek, végük csúcsos, hordozóval érintkező részük epitaxiális, és meglehetősen sok hibát, főleg rétegződési hibát tartalmaznak. Mikroszkópos és röntgendiffrakciós vizsgálatokkal is kimutattuk, hogy az oszlopok az Al-forrás felé dőlnek.

A görbület logikus magyarázata lett volna az oszlop tengelyével párhuzamos Burgers-vektorú éldiszlokációk jelenléte, ilyen kristályhibákat azonban nem figyeltünk meg. Ezzel szemben kimutattuk, hogy az oszlopok hibamentes szakaszai is görbültek. A rácshibák helyett tehát más magyarázatot kerestünk. Ha kiszámítjuk, hogy rugalmas deformációt feltételezve milyen mértékben torzul a kristályrács, akkor 1% körüli érték adódik, ami meglehetősen nagy. Ezért nem valószínű, hogy a görbületet rugalmas deformáció okozza, emellett a deformációt létrehozó feszültség forrása is tisztázatlan.

Figyelembe véve, hogy az oszlopok az Al-forrás felé dőlnek feltételezzük, hogy a görbületet rácsállandó-különbség okozza, ami az oszlopokon belüli koncentrációgradiens miatt alakul ki. Az oszlopok In(Al)-forrás felőli oldalán több In(Al) épül be az ötvözetbe, így a nagyobb In-tartalmú oldalon nagyobb lesz az ötvözet rácsparamétere, mint az Al-ban gazdag oldalon. A Vegard-szabályon alapuló becsléseink szerint az In-tartalom nanométerenként körülbelül 1 at%-ot



2. ábra. Az AlInN nanofű átnézeti képe. Az oszlopok csúcsának nagyított képén nyilakkal jelöltük a beérkező Al-, illetve In-fluxus irányát.

változik. A meglepően nagy koncentrációgradiens kialakulásának oka, hogy a csúcsos végű oszlopok hegyén árnyékhatások miatt inhomogén lesz a beérkező részecskék összetétele. A nitrid anyagok esetében viszonylag alacsonynak számító  $300^\circ\text{C}$ -os növesztési hőmérsékleten, a kis felületi mozgékonyág miatt ez az inhomogenitás részben megmarad, így a növekvő oszlopok összetétele és rácsparamétere is helyfüggő lesz.

Koncentrációgradiens miatt kialakuló görbületet több anyagrendszeren megfigyeltek, leginkább eltérő összetételű rétegekből álló rétegrendszerek esetében. A nanofű újdonságát az adja, hogy ez egy önszerveződő szerkezet, melyben az összetétel inhomogenitását a növesztési kísérlet geometriai feltételei és a felületi mozgékonyág határozzák meg. A geometriai feltételek célzott változtatásával (mintaforgatás, döntés, források intenzitásának változtatása) ilyen túkristályokból várhatóan érdekes nanoszerkezetek hozhatók létre. A görbült túkristályok további érdekessége, hogy rendezettségük ugyanolyan fokú, mint bármely kristályé, ám a kristályok alapvető tulajdonságával – a translációs szimmetriával – nem rendelkeznek.

## FRISS

2007 januárjától új szolgáltatással bővült a *Fizikai Szemle* internetes változatának is otthont adó KFKI-szerver. Szalay Katalin és Kőrösi Magdolna útjára indította a FRISS oldalt. Itt naprakész információkat kaphatunk az ország fizikusokat és fizikatanárokát érdeklő eseményeiről, előadásokról, konferenciákról, kiállításokról stb.

Külön érdekesség a minden napon megjelenő HISTÓRIA rovat, melyben a természet-, a műszaki tudományokat művelő kimagasló egyéniségekről emlékeznek meg a honlap gondozói. A rövid méltatásokat kép és sokirányú web-dokumentumok egészítik ki.

Jó böngészést kívánunk olvasóinknak.

