

Szén nanocsövek vizsgálata és módosítása ionsugaras és pásztázószondás módszerekkel

PhD téziszfüzet

Osváth Zoltán

Témavezető: **Dr. Biró László P.**, MTA doktora
Főosztályvezető,
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
(MFA)

Konzulens: **Prof. Gyulai József**, MTA rendes tagja
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
(BME)

MTA
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

2006

A kutatások előzménye

A szén nanocsövek a fullerének családjába tartozó grafitos, csőszerű nanoszerkezetek. Jellemző átmérőjük az 1 - 50 nm tartományban van, hosszúságuk meghaladhatja a 10 μm -t, újabban a több millimétert! A szén nanocsöveket Sumio Iijima fedezte fel 1991-ben [1] ívkiüléses módszerrel előállított ún. fullerén korom (*fulleren soot*) mintában. 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 [11] és mechanikai [11] tulajdonságokkal rendelkeznek. Különleges tulajdonságaik miatt a szén nanocsövek rengeteg területen nyerhetnek alkalmazást, mint például a nanoelektronikában [4, 5], kompozit anyagok készítésében (úgy elektromos, mint mechanikai tulajdonságok javítására), vagy sík képernyők [6], illetve téremissziós lámpák gyártásában (ezen termékek ipari termelése a küszöbön áll) [7].

Szintézis után a szén nanocsöveket általában tisztítani is kell. Az előállítási módszertől függően, de mindig keletkeznek kisebb-nagyobb mennyiségben más szén nanoszerkezetek is, leggyakrabban grafitos részecskék és amorf szén. Ezekon kívül, az előállításnál alkalmazott katalizátor fémszemcséket is el kell távolítani, a tiszta végtermék érdekében. Ezért nem sokkal az előállítási módszerek kidolgozása után szükségessé vált a tisztítási eljárások kidolgozása is. A destruktív módszerek savas kezelésre, gáz- vagy folyadékfázisú oxidációra (esetleg a kettő kombinációjára) alapoznak [8]. Az erős, oxidáló hatású savak fel tudják oldani a katalizátorszemcséket, és a szenet is oxidálják. Az amorf szén hamarabb oxidálódik, mint a grafitos nanocső, ezért lehetővé vált olyan eljárások kidolgozása, amelyek hatékonyan eltávolítják az amorf szenet még azelőtt, hogy a nanocsövek jelentős módon roncsolódnának [9].

A szén nanocsövek vizsgálata során néhány érdekes jelenséget észleltek. Így például TEM-ben vizsgált egyfalú szén nanocsövek esetén megfigyelték, hogy az elektronsugárzás hatására a nanocsövek szerkezete megváltozott (átmérőjük lecsökkent) [10]. Egy másik kísérletben fókuszált elektronsugarakkal összeforrasztottak két egyfalú szén nanocsövet, létrehozva egy X-típusú nanocső-elágazást [11]. A nanocsövek átmérőjének lecsökkenését, valamint két nanocső összeforradását 30 keV-os, fókuszált Ga^+ ionos sugárzás esetén is megfigyelték [12]. E szerkezeti változások a nanocsövek falában megjelenő nagy számú egyszeres vagy többszörös vakancia képződésével magyarázhatók, amelyek más hibatípusokká alakulhatnak át a lógó kötések összekapcsolódása által (pl. nem-hatszöges széngyűrűkké) [10, 11]. Szimulációkkal kimutatták, hogy 0,1 – 1 keV-os Ar^+ ionokkal besugárzott egyfalú szén nanocső kötegekben a szomszédos nanocsövek között kovalens kötések jöhetnek létre [13]. Ezekkel a kötésekkel javítani lehet a nanocső köteg mechanikai [14] és vezetési [15] tulajdonságait. Hasonló kovalens kötések létrejöhetnek többfalú szén nanocsövek falai között is [16]. Krasheninnikov és munkatársai szimulálták az ionos besugárzás által keltett nanocső ponthibák (vakanciák) STM felvételeit [17, 18]. A szimulált felvételeken a vakanciák világos kontrasztban jelennek meg a lokálisan megváltozott állapotsűrűség miatt. Az irodalomban nem találtunk olyan munkákat, amelyekben kísérleti STM-mel vizsgálnának besugárzás által keltett szén nanocső ponthibákat.

Célkitűzések

A doktori munkám elvégzéséhez elsősorban a pásztázó alagútmikroszkópiát (STM), és az atomerő mikroszkópiát (AFM) kellett elsajátítanom. Munkámat Az EU FP5-ös NANOCOMP kutatóképző hálózat (*Research Training Network*) keretében kezdtem el, amelyben fő feladatomban a különböző módszerekkel előállított szén nanocső minták STM-es jellemzése volt.

Egyik feladatomban volt a belga csoport (Prof. B.Nagy János) által alkalmazott kétlépcsős $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ -as oxidációs eljárás nanocsővekre gyakorolt hatásának vizsgálata, valamint a nanocsőves minták katalizátortartalmának meghatározása az egyes tisztítási lépések után, ionsugaras módszerekkel.

Másik célkitűzésem az volt, hogy ionos besugárzással ponthibákat hozzak létre a nanocsővek falában és ezeket atomi felbontású STM-mel és alagútspektroszkópiával (STS) tanulmányozzam. Különböző iondózisokkal besugárzott nanocsőveket vizsgáltam, és tanulmányoztam a besugárzott szén nanocsővek hibahelyeit 450°C -os hőkezelés után. E kutatás távolabbi célja magába foglalja a besugárzott szén nanocsővek gázérzékelési tulajdonságainak vizsgálatát, illetve annak a lehetőségnek a kiaknázását, hogy a besugárzással létrehozott nanocső rácshibákhoz további molekulák, gyökök kapcsolódhatnak.

Vizsgálati módszerek

A disszertáció első részében CVD módszerrel előállított szén nanocső minták kobalt katalizátortartalmát vizsgáltam a különböző tisztítási lépcsők után. A katalizátortartalom meghatározására Rutherford-visszaszórásos spektrometriát (RBS), ionok által gerjesztett röntgensugaras analízist (PIXE), és röntgenfluoreszcencia analízist (XRF) alkalmaztam. Mindhárom módszer kvantitatív elemanalízisre alkalmas eljárás.

Az RBS és PIXE módszerek esetén gyorsított ionok (esetünkben $^4\text{He}^+$ ionok) segítségével történik a vizsgálat. RBS esetén a mintában levő atomokkal való rugalmas ütközés következtében visszaszóródott ionok energiájából következtetni lehet a mintában levő kémiai elemekre. A detektor adott csatornájába érkező visszaszórt ionok számából meghatározható egy adott kémiai elem koncentrációja adott mélységben. A PIXE módszer esetén az ionok által indukált röntgensugárzást detektáljuk, melynek energiája jellemző a kibocsátó atomra. A PIXE módszer fontos kiegészítője az RBS módszernek különösen akkor ha nagyobb, közel azonos tömegszámú, periódusos rendszerben szomszédos atomokat kell megkülönböztetni.

Az XRF eljárásban egy röntgenső vagy egy radioaktív sugárforrás primer sugárzása gerjeszti az anyag atomjait vagy ionjait. A keletkező szekunder, karakterisztikus sugárzás (fluoreszcens sugárzás) energia-analíziséből az anyag elemösszetételére lehet következtetni, míg az egy elem által emittált fluoreszcens sugárzás intenzitásának méréséből ennek az elemnek a koncentrációja határozható meg.

A disszertáció második részében ionos besugárzás által létrehozott nanocső ponthibákat vizsgáltam. A nanocsőveket 30 keV-os Ar^+ ionokkal sugároztuk be a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) egyik ionimplantációs

berendezésével. A besugárzott nanocsöveken keletkezett hibahelyeket egy modern felületvizsgáló eszközzel, a pásztázó alagútmikroszkóppal vizsgáltam (STM).

Az STM vezető és félvezető felületek atomi léptékű vizsgálatára és módosítására alkalmas. Segítségével a nanocső falakban keletkezett ponthibákat is kiválóan lehetett vizsgálni. Az STM-ben egy igen hegyes tűt helyezünk a felülettől nanométeres távolságra. A tű és a minta közé *volt* nagyságrendű feszültséget kapcsolunk, melynek hatására nanoamper nagyságrendű alagútáram kezd folyni a két elektróda között. A tűvel pásztázó mozgást végzünk a minta síkjában, miközben egy visszacsatoló hurok a tű felület feletti magasságát szabályozza úgy, hogy az alagútáram állandó értéken maradjon (állandó áramú leképezés). Az alagútáram nagysága függ a minta lokális állapotsűrűségétől, ezért a mért felület együttesen tartalmaz topográfiai és elektronszerkezeti adatokat. Az elektronszerkezetről az STM másik üzemmódja, az alagútspektroszkópia (STS) ad bővebb információt. Ebben az üzemmódban a tű egy helyben áll, miközben áram-feszültség jelleggörbét rögzít a minta adott pontjában.

Az STM méréseket atomerő mikroszkópiás (AFM) mérésekkel egészítettem ki. E két különböző módszerrel végzett mérések alapján a besugárzott felületeken becsülni lehetett a geometriai kiemelkedésként megjelenő hibahelyek valamint az elektronszerkezeti változások miatt megjelenő hibahelyek arányát. Az AFM-ben egy laprugóra rögzített, piramis alakú szilícium-nitrid tűt mozgatunk a minta felett. A mintához közelítve a tű eléri a felületet (kontakt üzemmód), és a laprugó kissé elhajlik. A visszacsatoló rendszer ebben az esetben a laprugó elhajlását tartja állandó értéken a tű függőleges irányú mozgatásával. A laprugó elhajlásának állandó értéken való tartásával a tű és a minta közti erő is állandó marad, a rögzített felület pedig a minta topográfiáját adja meg.

A disszertációban leírt kutatást hazai és nemzetközi együttműködés keretében végeztem. A vizsgált szén nanocsöveket az együttműködő partnerek állították elő. A STM és AFM vizsgálatokat az MTA MFA Nanoscope E berendezésén végeztem.

Új tudományos eredmények

A disszertáció fontosabb eredményeit az alábbi tézispontok foglalják össze:

- 1) CVD-vel előállított szén nanocső mintákban megmértem a kobalt katalizátor eltávolításának mértékét az egyes tisztítási lépések során (RBS, PIXE, és XRF módszerekkel), és meghatároztam a maradék kobalt mennyiségét az adott teljes tisztítási eljárásra. Ez 1 tömeg %-nak adódott, ami két és félszeres csökkenést jelent a tisztítatlan mintához képest. TEM felvételek alapján kimutattam, hogy a maradék kobalt a nanocsövek és más grafityszerű szerkezetek belsejében marad a mintában. STM mérésekkel kimutattam, hogy az alkalmazott többlépcsős tisztítási eljárás roncsolja a nanocsövek felületét, azokon nanométeres nagyságrendű krátereket hoz létre [1, 2].
- 2) Kis dózisu ($5 \cdot 10^{11}$ ion/cm²), 30 keV-os Ar⁺ ionokkal történő besugárzás esetén a becsapódó ionok által létrehozott ponthibákat mutattam ki egyfalú nanocsövek

falában. Ezek a hibák néhány tizednanométeres, látszólagos kiemelkedések formájában jelennek meg az STM felvételeken. STS mérésekkel megmutattam, hogy a hibahelyeken levő lokális állapotsűrűség különbözik a hibátlan nanocsőrészek mért állapotsűrűségétől [3, 4, 6].

A grafit (HOPG) hordozón végzett STM és AFM mérésekkel kimutattam, hogy a besugárzás által keletkezett hibahelyeken megfigyelt látszólagos kiemelkedések nagy része (90 %-a) a lokális állapotsűrűség változása miatt jelenik meg, és csak kis része (10 %-a) tulajdonítható a HOPG felületről ténylegesen kiemelkedő klasztereknek, deformációknak (publikálandó eredmény).

- 3) Besugárzott többfalú szén nanocsövek 450 °C-os hőkezelése után a hibahelyek részleges kihőkezelődését figyeltem meg STM-mel. Hőkezelés után a hibahelyeken mért állapotsűrűség görbéken többletállapotokat figyeltem meg 0,35 eV-tal a Fermi energia felett, míg hőkezelés előtt 0,1 eV körül voltak hasonló állapotok. Ezt azzal magyaráztam, hogy a hibák jellege megváltozott a hőkezelés során [4, 5, 6].
- 4) Atomi felbontású STM felvételeket készítettem ponthibákat tartalmazó többfalú szén nanocsövekről. A hibahelyeken levő látszólagos kiemelkedések mellett ún. „ $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R$ ” szuperstruktúrákat figyeltem meg a hibák közvetlen szomszédságában. Ezek a struktúrák az elektronhullámok interferenciája miatt alakulnak ki, ami átrendezi a hiba körüli állapotsűrűséget. Kimutattam, hogy adott kiralitású szén nanocső esetén az egyes hibahelyeknél megfigyelt szuperstruktúrák ugyanolyan orientációjúak [4, 5, 6, 7].
- 5) Kimutattam, hogy nagy dózisu (10^{15} ion/cm²), 800 eV-os Ar⁺ besugárzás hatására a többfalú szén nanocsövek STM-mel mért felülete egyenetlenné, érdekessé válik. A nanocsövek érdekes felületét az Ar⁺ ionok által a nanocsövek falában keltett nagy mennyiségű ponthibának (vakanciák, intersticiális atomok, stb.), valamint a szomszédos nanocső falak között kialakult kötéseknek tulajdonítottam (ez utóbbiak alternatív alagutazási útvonalakat biztosítanak az elektronok számára) [3].
- 6) Nagy dózisu (10^{15} ion/cm²), 800 eV-os Ar⁺ besugárzás után az STM tú gyors (1 – 10 Hz) pásztázásával (és az alagutazási paraméterek változtatásával) szénatomokat távolítottam el a többfalú nanocsövek külső falaiból. Vonalmetszetek alapján megállapítottam, hogy a tú két-három atomi rétegnyi vastagságból távolítottam el atomokat. Mivel a besugározatlan nanocsövek esetén nem tapasztaltam ilyen jellegű módosulást, a megfigyelésekből arra következtettem, hogy a nagy dózisu Ar⁺ besugárzás jelentősen roncította a külső falak grafitos szerkezetét. Megállapítottam, hogy az STM vizsgálatoknál alkalmazott tú szintén módosulást szenvedett a nanocsővel való kölcsönhatás során [8].

Az eredmények hasznosítása

A disszertációban bemutatott kutatás az alábbi projektek sikeréhez járult hozzá:

EU FP5 NANOCOMP: „*Large scale synthesis of carbon nanotubes and their composite materials*”

OTKA T030435: „*Szén alapú nanoszerkezetek vizsgálata pásztázószondás módszerek (STM, AFM) és számítógépes szimuláció segítségével*”

OTKA T043685: „*Szén nanocső jellegű nanoszerkezetek előállítása, módosítása és jellemzése fizikai, kémiai és szimulációs módszerekre alapozva*”

OTKA T043704: „*Ionsugaras módszerek a fizikai nanotechnológiában (IONNANO)*”

Publikációk

A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények:

- [1] L. P. Biró, N. Q. Khanh, Z. E. Horváth, Z. Vértesy, A. Kocsonya, Z. Kónya, **Z. Osváth**, A. Koós, J. Gyulai, X. B. Zhang, G. Van Tendeloo, A. Fonseca, J. B. Nagy, *Catalyst traces after chemical purification in CVD grown carbon nanotubes*, Electronic Properties of Molecular Nanostructures, AIP Conference Proceedings Vol. **591** (2001) 183
- [2] L. P. Biró, N. Q. Khanh, Z. Vértesy, Z. E. Horváth, **Z. Osváth**, A. Koós, J. Gyulai, A. Kocsonya, Z. Kónya, X. B. Zhang, G. Van Tendeloo, A. Fonseca, J. B. Nagy, *Catalyst traces and other impurities in chemically purified carbon nanotubes grown by CVD*, Materials Science and Engineering C **19** (2002) 9
- [3] **Z. Osváth**, G. Vértesy, G. Pető, I. Szabó, J. Gyulai, W. Maser and L. P. Biró, *STM investigation of irradiated carbon nanotubes*, Electronic Properties of Synthetic Nanostructures: XVIII International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, AIP Conference Proceedings Vol. **723** (2004) 149
- [4] **Z. Osváth**, G. Vértesy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z. E. Horváth, J. Gyulai and L. P. Biró, *Atomically resolved STM images of carbon nanotube defects produced by Ar⁺ irradiation*, Physical Review B **72** (2005) 045429
- [5] **Z. Osváth**, G. Vértesy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z. E. Horváth, J. Gyulai and L. P. Biró, *Atomically resolved STM images of carbon nanotube defects produced by Ar⁺ irradiation*, Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology **12** (2005) Issue 4 (selected paper, published online on 25 July 2005 - <http://www.vjnano.org>)
- [6] **Z. Osváth**, G. Vértesy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z. E. Horváth, J. Gyulai and L. P. Biró, *Scanning tunneling microscopy investigation of atomic-scale carbon nanotube*

defects produced by Ar⁺ ion irradiation, Materials Science and Engineering C (2006), nyomtatás alatt

- [7] **Z. Osváth**, G. Vértesy, L. Tapasztó, F. Wéber, Z. E. Horváth, J. Gyulai, and L. P. Biró, *STM images of atomic-scale carbon nanotube defects produced by Ar⁺ irradiation*, Electronic Properties of Novel Nanostructures: XIX International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, AIP Conference Proceedings Vol. **786** (2005) 154
- [8] **Z. Osváth**, W. Maser, I. Szabó, G. Pető, A. A. Koós, J. Gyulai, L. P. Biró, *STM study on multi-wall carbon nanotubes irradiated with Ar⁺ ions*, EUROMAT 2003, 8th European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, 1-5 September 2003, Lausanne, Switzerland – *poszter*

A tézisponthoz nem kapcsolódó szén nanocső témájú közlemények:

- [9] G. I. Márk, L. P. Biró, A. Koós, **Z. Osváth**, J. Gyulai, A. M. Benito, P. A. Thiry, Ph. Lambin, *Charge spreading effects during 3D tunneling through a supported carbon nanotube*, Electronic Properties of Molecular Nanostructures, AIP Conference Proceedings Vol. **591** (2001) 364
- [10] **Z. Osváth**, A. A. Koós, Z. E. Horváth, J. Gyulai, A. M. Benito, M. T. Martínez, W. K. Maser and L. P. Biró, *Arc-grown Y-branched carbon nanotubes observed by scanning tunneling microscopy (STM)*, Chemical Physics Letters **365** (2002) 338
- [11] G. I. Márk, A. A. Koós, **Z. Osváth**, L. P. Biró, J. Gyulai, A.M. Benito, W.K. Maser, P.A. Thiry, Ph. Lambin, *Calculation of the charge spreading along the carbon nanotube as seen in STM*, Diamond and Related Materials **11** (2002) 961
- [12] L. P. Biró, R. Ehlich, **Z. Osváth**, A. A. Koós, Z. E. Horváth, J. Gyulai, J. B.Nagy, *Room temperature growth of single-wall coiled carbon nanotubes and Y-branches*, Materials Science and Engineering C **19** (2002) 3
- [13] L. P. Biró, R. Ehlich, **Z. Osváth**, A. A. Koós, Z. E. Horváth, J. Gyulai, B. J. Nagy, *From straight carbon nanotubes to Y-branched and coiled carbon nanotubes*, Diamond and Related Materials **11** (2002) 1081
- [14] Z. Kónya, I. Vesselényi, K. Niesz, A. Kukovecz, A. Demortier, A. Fonseca, J. Delhalle, Z. Mekhalif, J. B.Nagy, A.A. Koós, **Z. Osváth**, A. Kocsonya, L.P. Biró and I. Kiricsi, *Large scale production of short functionalized carbon nanotubes*, Chemical Physics Letters **360** (2002) 429
- [15] **Z. Osváth**, A. A. Koós, Z. E. Horváth, J. Gyulai, A.M. Benito, M.T. Martínez, W. Maser, and L. P. Biró, *STM observation of asymmetrical Y-branched carbon*

nanotubes and nano-knees produced by the arc discharge method, Materials Science and Engineering C **23** (2003) 561

- [16] **Z. Osváth**, L. Fulcheri, G. I. Márk, L. Tapasztó, J. Gyulai, and L. P. Biró, *STM and STS investigation of few wall carbon nanotubes containing non-hexagonal carbon rings*, Nanotechnology, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Vol. **5118** (2003) 587
- [17] W. K. Maser, A. M. Benito, M. A. Callejas, T. Seeger, M. T. Martínez, J. Schreiber, J. Muszinski, O. Chauvet, **Z. Osváth**, A. A. Koós and L. P. Biró, *Synthesis and characterization of new polyaniline/nanotube composites*, Materials Science and Engineering C **23** (2003) 87
- [18] A. A. Koós, R. Ehlich, Z. E. Horváth, **Z. Osváth**, J. Gyulai, J. B. Nagy, L. P. Biró, *STM and AFM investigation of coiled carbon nanotubes produced by laser evaporation of fullerene*, Materials Science and Engineering C **23** (2003) 275
- [19] A. A. Koós, Z. E. Horváth, **Z. Osváth**, L. Tapasztó, K. Niesz, Z. Kónya, I. Kiricsi, N. Grobert, M. Rühle, and L. P. Biró, *STM investigation of carbon nanotubes completely covered with functional groups*, Nanotechnology, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Vol. **5118** (2003) 565
- [20] L. P. Biró, Z. E. Horváth, A. A. Koós, **Z. Osváth**, Z. Vértesy, Al. Darabont, K. Kertész, C. Neamțu, Zs. Sárközi, L. Tapasztó, *Direct synthesis of multi-walled and single-walled carbon nanotubes by spray-pyrolysis*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials **5** (2003) 661
- [21] A. A. Koós, Z. E. Horváth, **Z. Osváth**, L. Tapasztó, K. Niesz, Z. Kónya, I. Kiricsi, N. Grobert, M. Rühle, L. P. Biró, *STM investigation of carbon nanotubes connected by functional groups*, Materials Science and Engineering C **23** (2003) 1007
- [22] L. P. Biró, Z. E. Horváth, G. I. Márk, **Z. Osváth**, A. A. Koós, A. M. Benito, W. Maser, Ph. Lambin, *Carbon nanotube Y junctions: growth and properties*, Diamond and Related Materials **13** (2004) 241
- [23] L. Tapasztó, K. Kertész, Z. Vértesy, Z. E. Horváth, A. A. Koós, **Z. Osváth**, Zs. Sárközi, Al. Darabont, L. P. Biró, *Diameter and morphology dependence on experimental conditions of carbon nanotube arrays grown by spray pyrolysis*, Carbon **43** (2005) 970
- [24] A. Darabont, P. Nemes-Incze, K. Kertész, L. Tapasztó, A. A. Koós, **Z. Osváth**, Z. Sárközi, Z. Vértesy, Z. E. Horváth, L. P. Biró, *Synthesis of carbon nanotubes by spray pyrolysis and their investigation by electron microscopy*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials **7** (2005) 631

- [25] Darabont Sándor, Kertész Krisztián, Sárközi Zsuzsa, Tapasztó Levente, Biró László Péter, Horváth Zsolt Endre, Koós Antal, **Osváth Zoltán**, *A porlasztásos pirolízis módszer és a növesztési paraméterek vizsgálata a szén nanoszerkezetek előállításában*, Korszerű kísérleti és elméleti fizikatanulmányok, Sapientia Könyvek **20.**, Scientia Kiadó, Kolozsvár 2003, pp. 10 – 126
- [26] A. A. Koós, Z. E. Horváth, K. Kertész, Z. Vértesy, L. Tapasztó, **Z. Osváth**, Z. Sárközi, P. Nemes Incze, Al. Darabont, L. P. Biró, *Optimization of the synthesis of carbon nanotubes in a semi-continuous injection chemical vapor deposition method*, Proceedings of the First International Workshop on Semiconductor Nanocrystals, Semiconductor Nanocrystals, Vol. **1** (2005), page 51 – 54
- [27] Al. Darabont, N. Daróczy, P. Nemes-Incze, K. Kertész, Zs. Sárközi, A. A. Koós, Z. E. Horváth, **Z. Osváth**, Z. Vértesy, L. P. Biró, *Szén nanocsövek szintézise folyékony szénhidrogénekből katalizátor jelenlétében*, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) Műszaki Szemle **31** (2005) 36
- [28] Z. E. Horváth, K. Kertész, L. Pethő, A. A. Koós, L. Tapasztó, Z. Vértesy, **Z. Osváth**, A. Darabont, P. Nemes-Incze, Zs. Sárközi and L. P. Biró, *Inexpensive, Upscalable Methods For Nanotube Growth*, Current Applied Physics **6** (2006) 135
- [29] A. A. Koós, Z. E. Horváth, K. Kertész, Z. Vértesy, L. Tapasztó, **Z. Osváth**, Z. Sárközi, P. Nemes-Incze, Al. Darabont, L. P. Biró, *Influence of catalyst and carbon source on the synthesis of carbon nanotubes in a semi-continuous injection chemical vapor deposition method*, Carbon Nanotubes (Ed.: V. N. Popov, Ph. Lambin), NATO Science Series 222, 53 – 54, 2006 Springer, Netherlands

Más témákhoz tartozó cikkek:

- [30] **Z. Osváth**, L. Nagy, *Double-differential cross sections for the ionization-excitation of the helium by fast proton and antiproton impact*, Physics Letters A **271** (2000) 385
- [31] L. Dózsa, G. Molnár, A.L. Tóth, E. Horváth, **Z. Osváth**, C.A. Dimitriadis, L. Papadimitriou, N. Vouroutzis, E. Paraskevopoulos, *Properties of β -FeSi₂ quantum structures grown on silicon*, NATO Science Series, Mathematics, Physics and Chemistry Vol. **204**, Nanostructured and Advanced Materials, pp. 331 – 334, 2005 Springer, Netherlands
- [32] A. Tunyogi, F. Pászti, **Z. Osváth**, F. Tanczikó, M. Major, E. Szilágyi, *Asymmetric interfaces in Fe/Ag and Ag/Fe bilayers prepared by molecular beam evaporation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B (2006), *nyomtatás alatt*

Hivatkozások

2006 május 3.-ig a fenti publikációkra 85 független hivatkozást regisztráltunk.

Irodalomjegyzék

- ⁱ S. Iijima, *Nature* **354** (1991) 56
- ⁱⁱ C. T. White, and T. N. Todorov, *Nature* **393** (1998) 240
- ⁱⁱⁱ M. M. Treacy, T. W. Ebbesen, and J. M. Gibson, *Nature* **381** (1996) 678
- ^{iv} S. D. Li, Z. Yu, S. F. Yen, W. C. Tang, P. J. Burke, *Nano Lett.* **4** (2004) 753
- ^v L. Roschier, M. Sillanpaa, T. H. Wang, M. Ahlskog, S. Iijima, P. Hakonen, *J. Low Temp. Phys.* **136** (2004) 465
- ^{vi} W. B. Choi, D. S. Chung, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. W. Yin, I. T. Han, Y. H. Lee, J. E. Jung, N. S. Lee, G. S. Park, J. M. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 3129
- ^{vii} Y. Saito, S. Ulemura, K. Hamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** (1998) L346
- ^{viii} I. W. Chiang, B. E. Brinson, R. E. Smalley, J. L. Margrave, R. H. Hauge, *J. Phys. Chem. B* **105** (2001) 1157
- ^{ix} J.-F. Colomer, P. Piedigrosso, I. Willems, C. Journet, P. Bernier, G. Van Tendeloo, A. Fonseca, J. B. Nagy, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* **94** (1998) 3753
- ^x P. M. Ajayan, V. Ravikumar, J.-C. Charlier, *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1437
- ^{xi} M. Terrones, F. Banhart, N. Grobert, J.-C. Charlier, H. Terrones, and P. M. Ajayan, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 075505
- ^{xii} M. S. Raghuvier, P. G. Ganesan, J. D'Arcy-Gall, and G. Ramanath, M. Marshall, and I. Petrov, *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 4484
- ^{xiii} E. Salonen, A.V. Krasheninnikov, K. Nordlund, *Nucl. Instrum. Meth. B* **193** (2002) 603
- ^{xiv} A. Kis, G. Csányi, J.-P. Salvetat, Thien-Nga Lee, E. Couteau, A. J. Kulik, W. Benoit, J. Brugger, and L. Forró, *Nature Mater.* **3** (2004) 153
- ^{xv} H. Stahl, J. Appenzeller, R. Martel, Ph. Avouris, and B. Lengeler, *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 5186
- ^{xvi} M. Huhtala, A. V. Krasheninnikov, J. Aittoniemi, S. J. Stuart, K. Nordlund, and K. Kaski, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 045404
- ^{xvii} A. V. Krasheninnikov, K. Nordlund, M. Sirviö, E. Salonen, and J. Keinonen, *Phys. Rev. B* **63** (2001) 245405
- ^{xviii} A. V. Krasheninnikov, K. Nordlund, *Phys. Solid State* **44** (2002) 470