

Szén nanocsövek elektromos vezetési tulajdonságai

Önálló kutatások, elméleti összefoglalók kategória

Dabóczi Mátyás, Márkus Bence

2030 Érd, Péter u. 3. 1221 Budapest, Leányka u. 20.

E-mail: dmaty06@gmail.com E-mail: mydoomvirus@gmail.com

Tel: 06-20-451-71-41 Tel: 06-20-323-45-56

Vörösmarty Mihály Gimnázium, Érd ELTE Apáczai Csere János

Gyakorlógimnázium, Budapest

Felkészítő tanárok:

Dr. Simon Ferenc (egyetemi docens – BME Fizika Tanszék)

Dr. Vannay László (egyetemi docens – BME Fizika Tanszék)

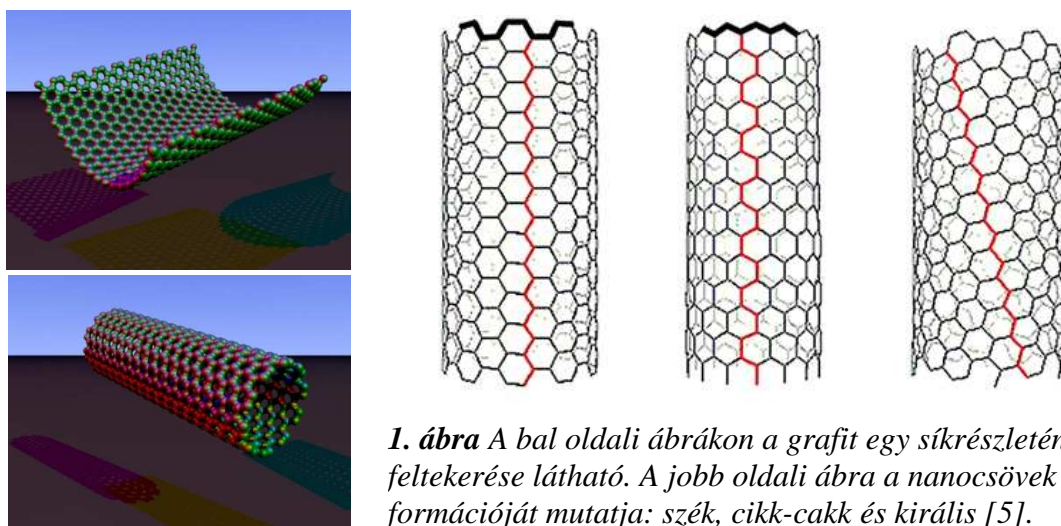
Budapest, 2009

1. A szén nanocsövek ismert tulajdonságai

I. Felfedezésük és általános felépítésük

Sokat hallani manapság különböző „nano” mérettartományba tartozó anyagok kutatásáról. A terület figyelemre méltó képviselői a szén nanocsövek, melyeket Iijima Sumio fedezett fel 1991-ben [1]. Ezen anyagok jelentőségét a széleskörű alkalmazási lehetőségeik adják különböző területeken, mint pl. nanoelektronika, szupererős kompozit anyagok, de akár orvosi alkalmazások is, mint célzott gyógyszer célba juttatási segédanyagok.

A szén nanocsövek a hatos rendszámú elem újabb allotróp módosulatai, melyekben a szénatomok egy henger palástján helyezkednek el hatszögeket alkotva. A grafit szerkezete sokak által igen jól ismert: több sík helyezkedik el egymás felett, melyeket szintén hatszögek csúcspontjaiban elhelyezkedő szénatomok építenek fel. Minden atom egyszeres kovalens kötést létesít három másik szénatommal és a negyedik, még szabad vegyértékelektronjukkal delokalizált kötésrendszert hoznak létre a sík mentén (sp^2 -szerű konfiguráció). A síkokat (csak) másodrendű kötő erők tartják össze, aminek következtében azok elcsúszhatnak egymáson. (Ez adja a grafitnak azt a tulajdonságát, hogy papíron nyomot hagy.) A nanocsöveket elképzelhetjük úgy, hogy a grafit egy síkjából megfelelő módon kivágott részt tekerünk hengerré. Így az előbb leírt hengeres szerkezethez jutunk. A valóságban persze nem így képződnek a nanocsövek. Annak az egyenesnek függvényében, amely mentén a hatszögrácsos síkot képzeletben elszeljük (kiralitásvektor) 3 formáció alakulhat ki: szék, cikk-cakk és királis szerkezetű (utóbbi elnevezés arra utal, hogy ezen nanocsövek esetében a szomszédos hatszögek elhelyezkedése lehet jobb-, illetve balsodrású).

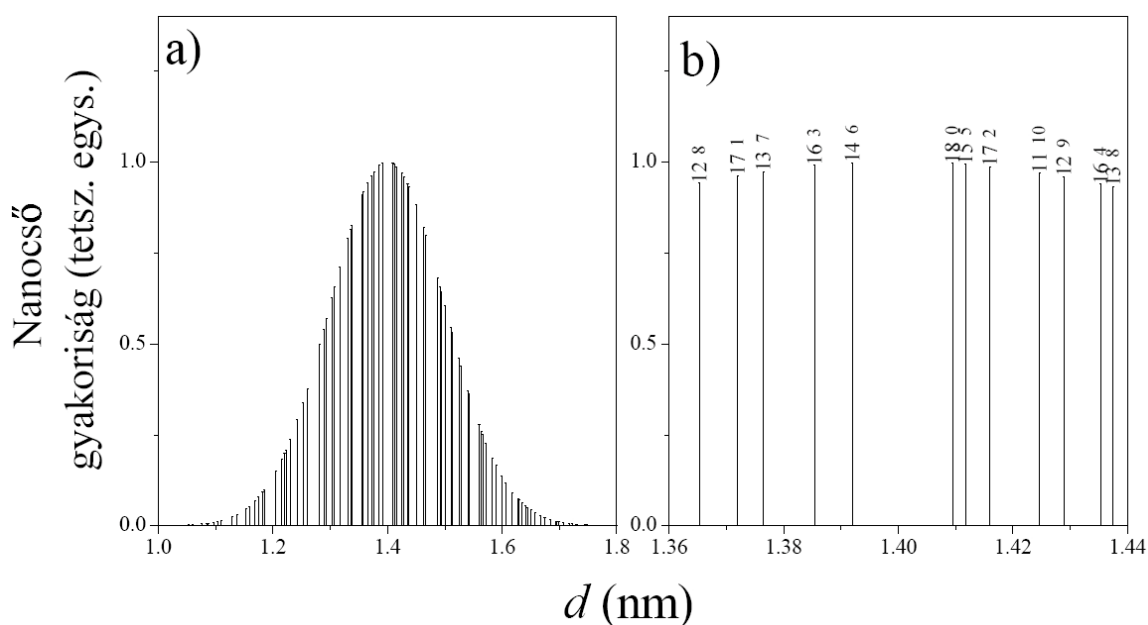


1. ábra A bal oldali ábrákon a grafit egy síkrészletének feltekerése látható. A jobb oldali ábra a nanocsövek három formációját mutatja: szék, cikk-cakk és királis [5].

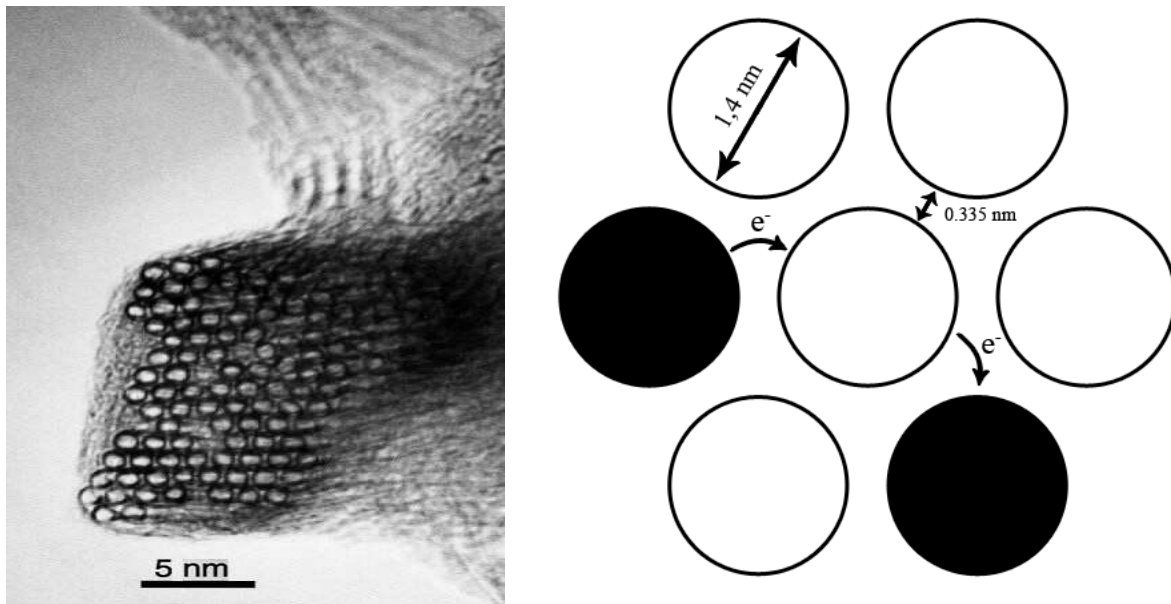
II. Fizikai tulajdonságaik

A létrejött hengerek különböző átmérőjűek lehetnek annak függvényében, hogy milyen szélességű sávot tekerünk fel a grafit síkjából. Átmérőjük nm-es mérettartományba esik és cső formájúak - nagy többségük az átlagos 1,4 nm-es átmérőt közelíti meg -, ezért is kapták a nanocső elnevezést. Igen fontos tulajdonságuk, hogy hosszuk akár az 1 mm-t, azaz átmérőjük milliószorosát is elérheti [2]. A különböző átmérőknek köszönhetően lehetséges, hogy egy nanocső körül található egy másik, nagyobb átmérőjű is. Ilyenkor többfalú nanocsővekről beszélünk, melyeket korábban fedeztek fel, mint egyfalú társaikat. Mi méréseinket egyfalú szén nanocsőveken végeztük.

Természetesen a valóságban sohasem egy, hanem halmaznyi nanocsővel találkozunk. Ezeket a csöveket másodrendű kötő erők tartják össze a grafit síkjaihoz hasonlóan. Két szénatom közötti kölcsönhatást jó közelítéssel a Van der Waals potenciál írja le, amelynek 0,335 nm-nél minimuma van, ami azt jelenti, hogyha rácsba rendeződnek az atomok, akkor szívesen helyezkednek el ebben az energiaminimum pontban. Ez a magyarázata annak, hogy a szén nanocsővek esetén hatszöges kristályszerkezet alakul ki, amely egyébként ideális térkitöltésű is. Ilyen térkitöltés mellett is marad azonban minden három nanocső között egy kitöltetlen rész, mely igen fontos lesz a következőkben.



2. ábra Szén nanocsővek átmérőeloszlása



3. ábra Bal oldalt: egyfalú szén nanocsőköteg nagyfelbontású elektronmikroszkópos képe [3]. Jobb oldalt: hatszögrács szemléltetése valós adatokkal.

A nanocsövekre jellemző, hogy kiralitásvektoruk számértékének függvényében változik, fémes tulajdonságúak-e vagy sem. Ez alapján alakul ki, hogy az egyfalú nanocsövek 1/3-a fémes, míg 2/3-a szigetelő [2]. Így ha feszültséget kapcsolunk egy köteg nanocsőre, akkor a vezetési sávban lévő elektronok a vezető nanocsövekről próbálnak „átugrani” egy másik nanocsőre, ám ha ez nem vezető, akkor egyből egy következőre „ugranak át”.

III. Dópolás

A nanocsövek vezetési tulajdonsága azonban megváltoztatható, ha alkálifémekkel dópoljuk őket. Ilyenkor a kis elektronegativitású, kevés vegyértékelektronnal rendelkező fématomokat a nanocsövek közötti üregekbe juttatjuk, ahol azok képesek leadni legnagyobb energiájú elektronjukat, és ezzel megváltoztatni a csövek vezetési képességét.

Dópolás végrehajtására több lehetőség is kínálkozik. Az egyik, hogy alkálifémet és ammóniát is juttatunk a nanocső mellé, majd a rendszert lehűtjük. Az ammónia -33 °C -on cseppfolyóssá válik, és sötét színnel feloldja az alkálifémet. A folyadék képes bejutni a nanocsövek közötti üregekbe, majd mikor a rendszer felmelegszik, az ammónia elpárolog, míg az alkálifém a nanocsövek között marad.

Egy másik lehetőség szilárd alkálifém juttatása a nanocsövek mellé olyan módon, hogy a két anyag ne érintkezzen egymással. Fontos, hogy az alkálifém és a nanocsövek oxigénmentes térben legyenek, mert ha ez nincs így, akkor a fém azonnal oxidálódik. Ezért a

rendszert héliummal 20 mbar nyomásra töltjük, aminek következtében jelentősen csökken az alkálifém olvadás- és forráspontja. Ha ezt a rendszert elkezdjük melegíteni az alkálifém (mi esetünkben a kálium) cseppfolyóssá majd gáz halmazállapotúvá válik, és a nanocsövek közé diffundál. Hűtés után pedig a kívánt helyen, a nanocsövek között szilárdul meg.

Méréseink során mindkét eljárást használtuk. Mikor dópolt mintával dolgoztunk az előbbi, míg mérés közbeni dópolás során az utóbbi módszert alkalmaztuk.

2. A kutatási terület

Kísérleteink során egyfalú szén nanocsövekből készített minták elektromos vezetési tulajdonságainak vizsgálatát tűztük ki célul. Azt vizsgáltuk, hogy ezek a tulajdonságok mely irányba változnak káliummal való dópolás hatására, valamint azt, hogy a létrejövő rendszerben mekkora a félvezető és fémes vezetés határán létrejövő tiltott sáv nagysága.

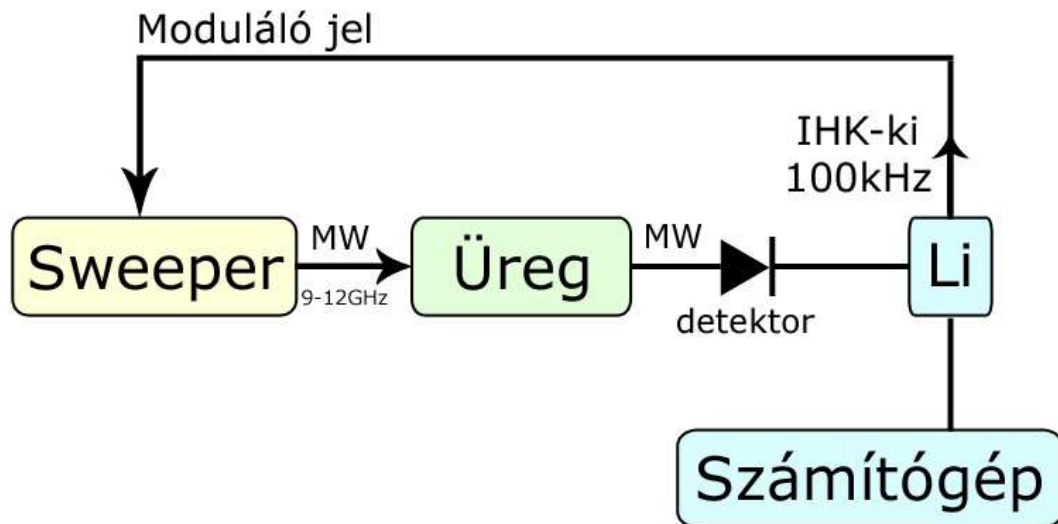
A vezetési tulajdonságok vizsgálatához mikrohullámú ellenállás mérési módszert alkalmaztunk. A módszer előnye, hogy nem igényel a mintákon fémes kontaktusokat, illetve porszerű anyagokon is elvégezhető. Mindez igen előnyös, hiszen a káliummal dópolt porminták levegő érzékenyek, ami miatt nehéz lenne kontaktusokat használni.

A vezetőképesség hőmérsékletfüggésének méréséből következtetni tudunk arra, hogy a vizsgált anyag fémes, félvezető vagy esetleg szigetelő-e. A méréseket dópolt és referenciamintákon is elvégeztük, valamint végrehajtottunk egy mérést mely közben szakaszosan került sor a dópolásra a hőmérséklet emelésének segítségével. Az utóbbi módszer segítségével megpróbáltuk elérni azt a pontot is, ahol a nanocsövek a félvezető és fémes tulajdonság között találhatók.

3. A mérés menete

A minták vezetőképességét az ún. üregrezonancia perturbációs módszerrel mértük. Ennek lényege, hogy mikrohullámú (9GHz) frekvencián rezonáns üreget készítettünk (a rezonancia teljesen analóg a jól ismert RLC rezgőkörök rezonanciájával). Az üreg jósági tényezője (Q) nagymértékben függ a bele helyezett mintától. Megmutatható, hogy Q egyenesen arányos a behelyezett minta fajlagos ellenállásával, így Q hőmérsékletfüggésének méréséből a fajlagos vezetőképesség (ill. fajlagos ellenállás) hőmérsékletfüggését is megkapjuk. A módszer igen érzékeny a fajlagos vezetőképesség kis relatív változásaira, azonban hátránya, hogy az abszolút értéket viszonylag pontatlanul tudjuk csak meghatározni.

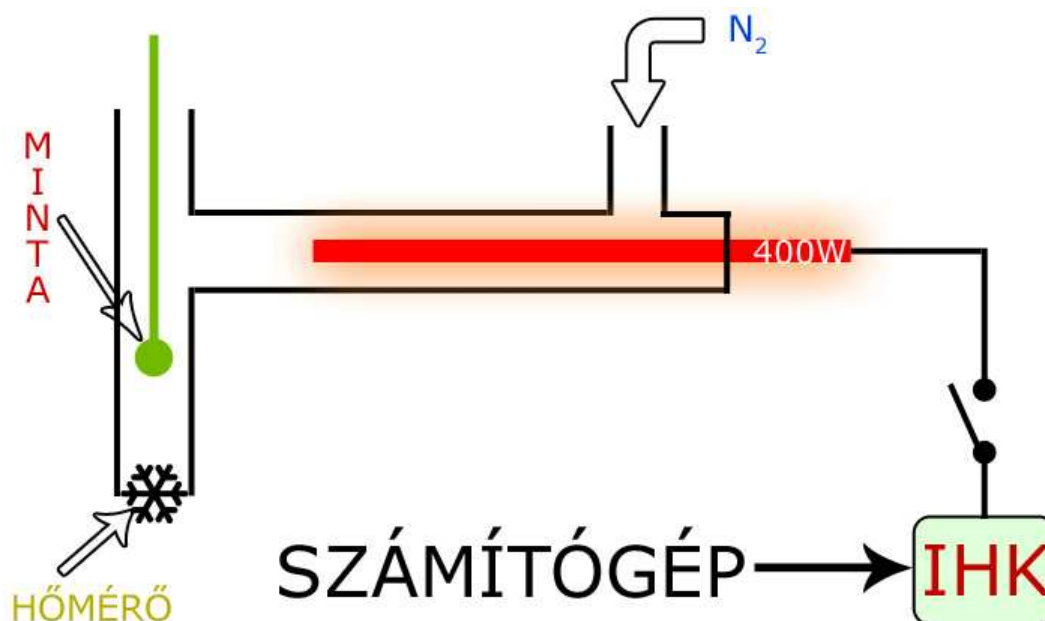
A méréseket egy számítógéppel vezéreltük, és a végleges adatokat is ide kértük be az eszközöktől. Első lépésként a sweeper segítségével egy frekvenciasweepelt mikrohullámú jelet hoztunk létre, majd ezt a jel amplitudóját Lock-In-nal moduláltuk, majd az üregbe vezettük, ahol mértük a jósági tényező értékét.



4. ábra A mérés menete

(Li – Lock-In – „mérőműszer”); (MW – mikrohullámú jel)

Mérésünk során a minta hőmérsékletét 100-600 K hőmérséklet tartományban tudtuk változtatni, úgy, hogy az üregeken adott hőmérsékletű nitrogéngázt vezettünk át. A gázt folyékony nitrogén elpárologtatásával kaptuk, aminek előnye, hogy tiszta és nem tartalmaz vizet, mely a mikrohullámokat elnyelné. Fűtéshez a nitrogén egy 400 W-os fűtőszál mellett, hűtéshez egy cseppfolyós nitrogénbe vezetett (-196 °C) vörösréz hőcserélőn haladt át.



5. ábra Az összeállított mérés sablonos rajza
(IHK – Intelligens hőmérséklet kezelő); (N_2 – nitrogén)

4. Szilárd testek sávszerkezete

A sávszerkezetet a H atomtól elindulva (mivel ez a legegyszerűbb atom) célszerű levezetni. A H atomnak 1 elektronja van, amely az atommaghoz legközelebb eső $1s^1$ energiaszinten található alapállapotban. Amennyiben 4 H atomot veszünk, akkor a négy darab $1s$ állapotból 4 lényegesen különböző, kiterjedt állapotot szerkeszthetünk. Ez nem csak a hosszabb láncmolekulákra, hanem a valódi (térbeli) kristályokra is általánosítható, azaz N darab atom N számú egyforma (pl. $1s$, $2s$ vagy $2p\dots$) atomállapotából N számú lényegesen különböző kiterjedt állapot szerkeszthető. Minél hosszabb a láncmolekula, annál sűrűbben követik egymást a kiterjedt elektronok energiaszintjei. Esetünkben viszont nem H atomokkal kell foglalkozni, hanem ezeknél nagyobbakkal, amelyekben az elektronok több energiaszinten helyezkednek el. Ezek az energiaszint sorozatok elkülönülhetnek, de át is fedhetik egymást. Megengedett sávoknak nevezzük az egymást sűrűn követő energiaszintek egy-egy sorozatát. Tiltott sávon azt az energiatartományt értjük, amelyben egyetlen energiaértékhez sem tartozik elektronállapot. A tiltott sáv alatt helyezkedik el a betöltött sáv, amelyben az alapállapotú atom elektronjai helyezkednek el. Fölötte vagy részben fedésben pedig a vezetési sáv, ahova ha elektronok kerülnek (pl. gerjesztés során), akkor az anyag elektromos vezetővé válik. Számunkra a Na és K atomok szerkezete volt érdekes, mivel mindegyik könnyedén le tudja adni a külső $3s$ illetve $4s$ energiaszinten található elektronját. Ezeknek az anyagoknak az s

állapotokból kialakuló megengedett sáv N energiaszintje közül az N számú elektron csak $N/2$ szintet tölt be párosával. A fennmaradó közeli, üres energiaszintekre az elektronok kicsiny energiával is gerjeszthetők. A fenti módon három – az elektromos vezetés szempontjából - jellegzetesen eltérő típusú anyagfajtát különböztethetünk meg: vezetők, szigetelők, félvezetők.

a) A vezetőknek nevezzük azokat az anyagokat, melyekben a vezetési sávot nem választja el tiltott sáv a betöltött sávtól. Vezetőnek tekinthetjük a fémek többségét, ám más anyagok (pl. grafit) is vezetőknek minősülnek.

b) Szigetelőnek tekintjük azokat az anyagokat, melyeknél a teljesen betöltött sávot széles, tiltott sáv választja el a vezetési sávtól, ez a távolság kb. 5 eV.

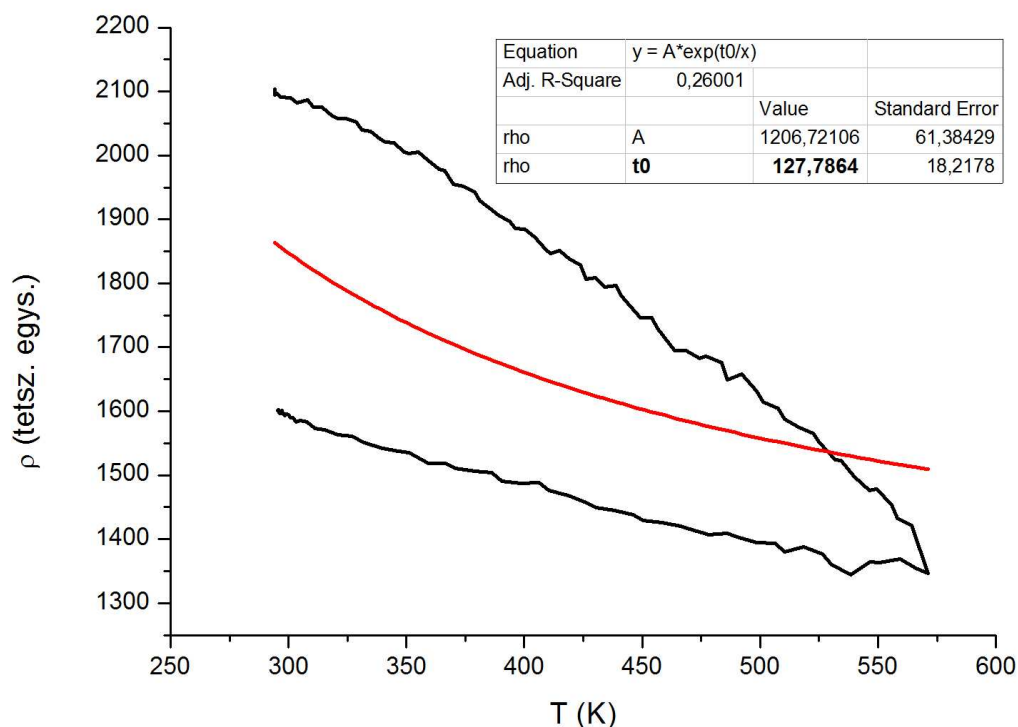
c) Félvezetőről akkor beszélünk, ha a tiltott sáv kb. 0,5 eV-nál kisebb méretű. A kis méretű tiltott sáv miatt hőmérséklet emelésével vagy a rácsszerkezet szennyezésével vezetővé alakíthatóak [4].

A transzport tulajdonságokat, például elektromos vezetés az anyag szerkezete alapvetően meghatározza. A geometria és az azon belül létrejövő szimmetriák határozzák meg a sáv szerkezet milyenségét. Az anyagi minőséget (felépítő atomok) az atom-elektron, illetve az elektron-elektron kölcsönhatás kvantummechanikai szabályai szerint lehet meghatározni.

5. A nanocsövek elektromos vezetési képessége és annak változása káliummal való dópolás hatására

I. Dópolatlan nanocsövek vizsgálata

Az első mérést egy dópolatlan nanocsövet tartalmazó mintán végeztük el. A hőmérsékletet 21 °C-ról (294 K) növeltük 298 °C-ra (571 K) majd csökkentettük 22 °C-ra (295 K). Miután megkaptuk az adatokat, ábrázoltuk a fajlagos ellenállást (ρ) az abszolút hőmérséklet függvényében.



6. ábra Dópolatlan nanocsövek fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggése (1).

(A felső görbe az első folyamat, míg az alsó a második)

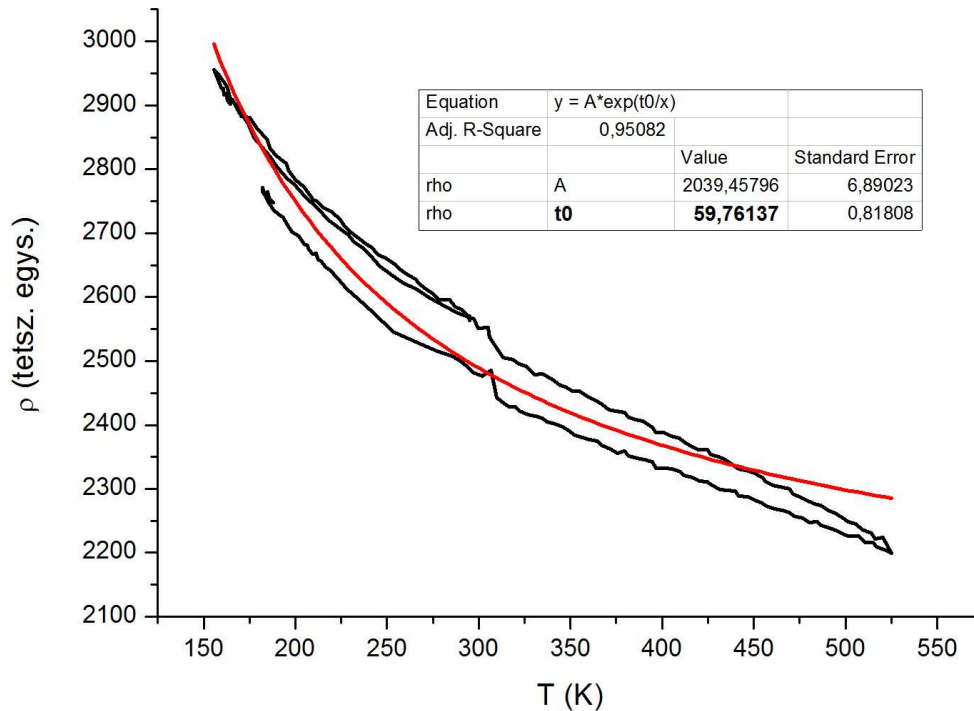
A grafikonon látszik, hogy a hőmérsékleten növelése és csökkentése során, az azonos hőmérsékleten kapott értékek nem egyeznek meg. Ez annak köszönhető, hogy 10 fokos lépésenként változtattuk a hőmérsékletet, amit a rendszer nem tudott tökéletesen követni. A hiba milyenségének következtében kettő közötti értéket tekinthetjük valósnak. A nem tökéletes egyezés mellett így is nagyon jól megfigyelhető a tendencia, mely szerint a dópolatlan nanocsövek elektromos ellenállása hőmérséklet növelésével csökken, tehát félvezetőként viselkednek.

A következő mérésekkel való összehasonlítás és a pontosság érdekében az összes adat alapján illesztettünk egy görbét a következő közelítés segítségével:

$$\rho \approx e^{\frac{E_0}{k_b T}} \quad E_0 = k_b T_0 \quad \rho \approx e^{\frac{T_0}{T}}$$

Az illesztett görbéből számunkra T_0 paraméter értéke érdekes, ugyanis az egyenletben ez egyezik meg a tiltott sáv energiájának értékével. A fenti görbe esetében T_0 értéke 127,8 K.

Egy másik referenciamintán is elvégeztük a mérést, azonban ez esetben -104 °C (169 K) és 252 °C (525 K) között növelve majd csökkentve a hőmérsékletet, valamint finomítottunk a léptéken is. Így a grafikonon sokkal jobban követik egymást a hőmérséklet növelése és csökkentése során felvett adatok alapján kapott görbék.



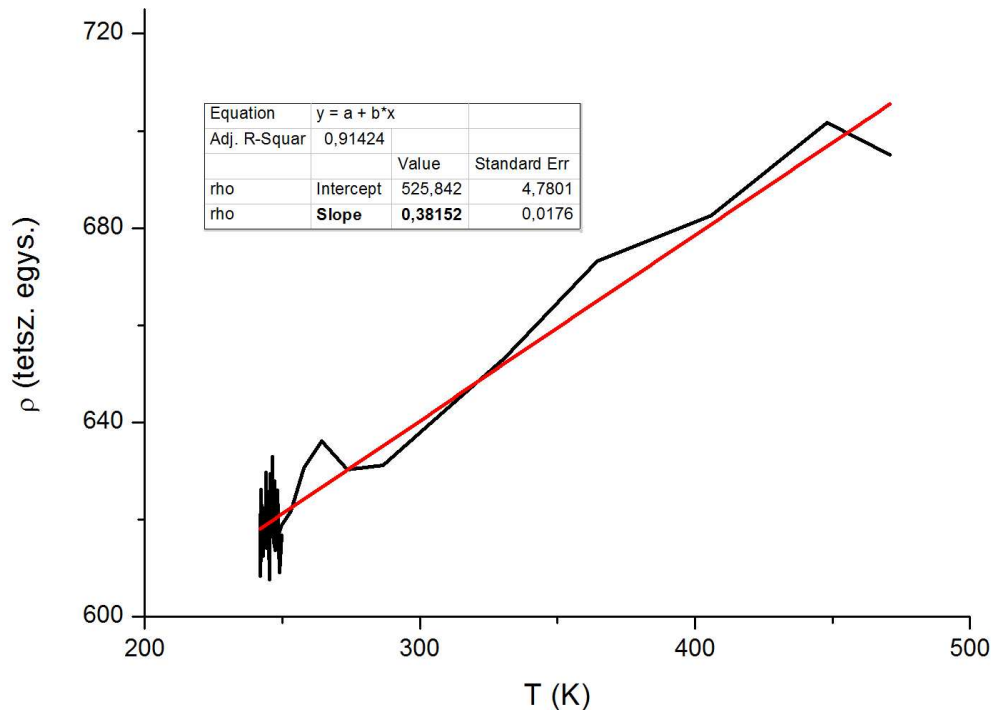
7. ábra Dópolatlan nanocsövek ellenállásának hőmérsékletfüggése (2).

A második minta esetében T_0 értéke 59,8 K-re adódik, ami eltér az előző esetben számolt adattól. Azonban a következő tényeket figyelembe kell venni: nem tökéletesen azonos mintákról van szó, valamint a második esetben pontosabban végeztük a mérést. Ezek alapján az eltérést teljesen normálisnak tekinthetjük, amit igazol az is, hogy mindkét esetben azonos tendenciát figyelhetünk meg a minta ellenállásának hőmérsékletfüggésében.

Így első lépésként sikerült bizonyítani, hogy egy egyfalú szén nanocső mintának hőmérsékletnövelés hatására nő a vezetőképessége. Ez alapján félvezető jelleget tapasztalunk. Ennek oka, hogy bár vannak fémes nanocsövek is a mintában, ezek egymástól távol, szigetelő csövekkel elválasztva találhatóak.

II. Dópolt nanocsövek vizsgálata

A referenciaminták után káliummal dópolt nanocsöveket vizsgáltunk hasonló módszerrel, majd ez esetben is ábrázoltuk a nanocsövek ellenállását a hőmérséklet függvényében.



8. ábra Dópolt nanocsövek ellenállásának hőmérsékletfüggése.

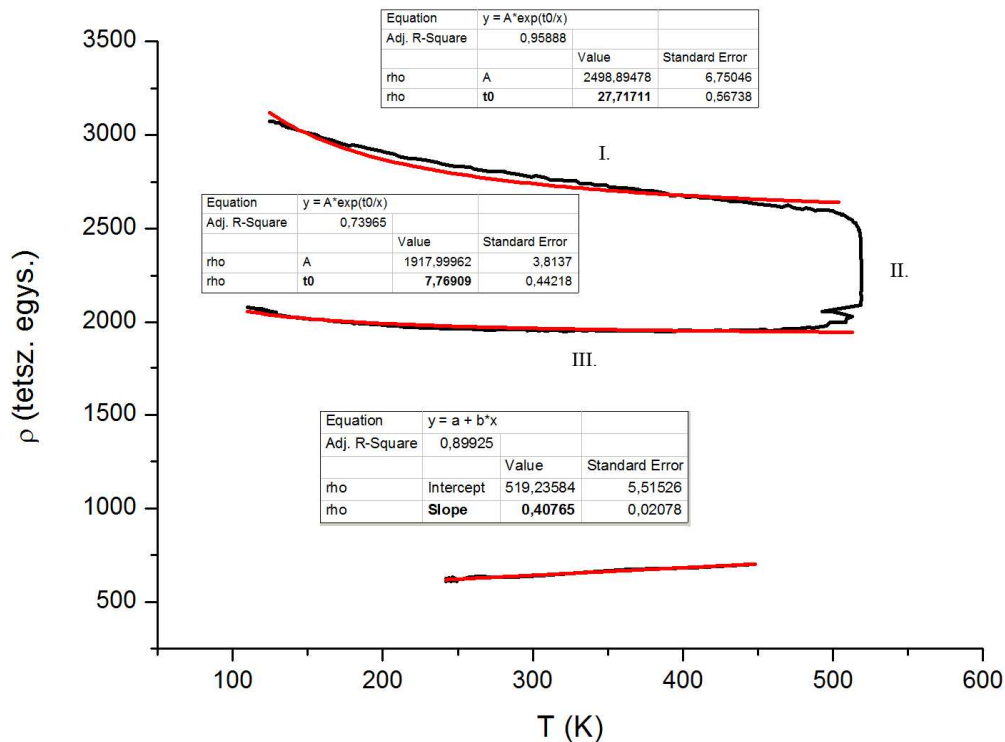
A méréshez a fent ismertetett cseppfolyós ammóniával készült mintákat használtuk. Jól látható, hogy a hőmérsékletfüggés jellege teljesen megváltozott. A hőmérséklet emelésével az ellenállás növekedését tapasztaljuk. Ez egyértelműen fémes viselkedésre utal. Emellett az ellenállás nagysága is kb. a harmadára csökkent az alkálifémmel való dópolás hatására.

Ezen adatok alapján kijelenthetjük, hogy a mivel a minta vezetőképessége hőmérséklet növelésével csökken, ezért a minta elektromos vezetés szempontjából fémként viselkedik.

III. Szén nanocsövek dópolása ellenállásuk mérése közben (in-situ)

Ezt a mérést olyan mintán végeztünk melyben a nanocsövek mellett szilárd kálium volt található.

A mérés a mintát -148 °C-ról (125 K) indulva 246 °C-ig (519 K) hevítettük, majd ezen a hőmérsékleten a kálium párolgásával megindult a dópolás. Pár perc elteltével elkezdtek csökkenteni a hőmérsékletet egészen -163 °C-ig (110 K), azért hogy kisméretű dópolás hatását is megfigyelhessük. Így sikerült azt elérnünk, hogy a nanocsövek csak részben dópolódjanak. Az adatok és ábrázolásuk segítségével pedig arra kaphatunk, magyarázatot, hogy mi is történik valójában a dópolás során elektromos vezetés szempontjából.



9. ábra Szén nanocsövek elektromos ellenállásának hőmérsékletfüggése és annak változása káliummal való részleges dópolás hatására.

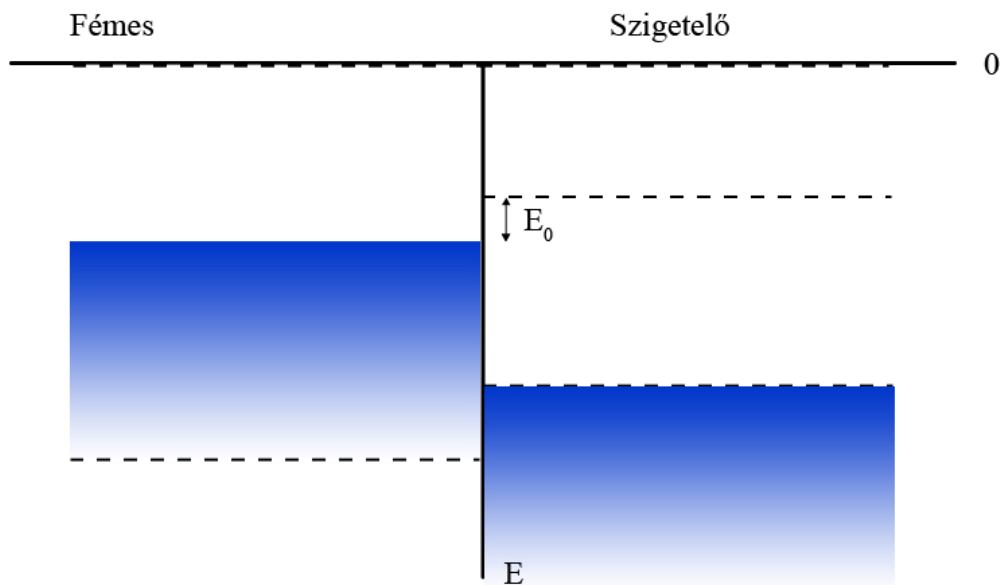
- I. felfűtési fázis
- II. lehűtési fázis
- III. teljes dópolás hatása

A grafikon alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le: részleges dópolás hatására is eltér a nanocsövek vezetőképessége a dópolatlan mintáétól, azonban csak kvantitatív változás figyelhető meg, ugyanis csökken az ellenállásuk, míg kvalitatívan nem változnak, mivel továbbra is félvezetőként viselkednek.

Ha összevetjük a kapott grafikont a teljes dópolás esetében ábrázolt adatokkal, akkor jól látszik, hogy mindkét esetben nő a vezetőképesség, ám nagyobb dópolás hatására nagyobb mértékben. Fontos még észrevenni, hogy a nanocső-minta kis dópolás hatására is közelít a fémes vezetéshez, ugyanis T_0 értéke 27,7 K-ről 7,7 K-re csökken. Teljes dópolásnál ez az érték még kisebb lett.

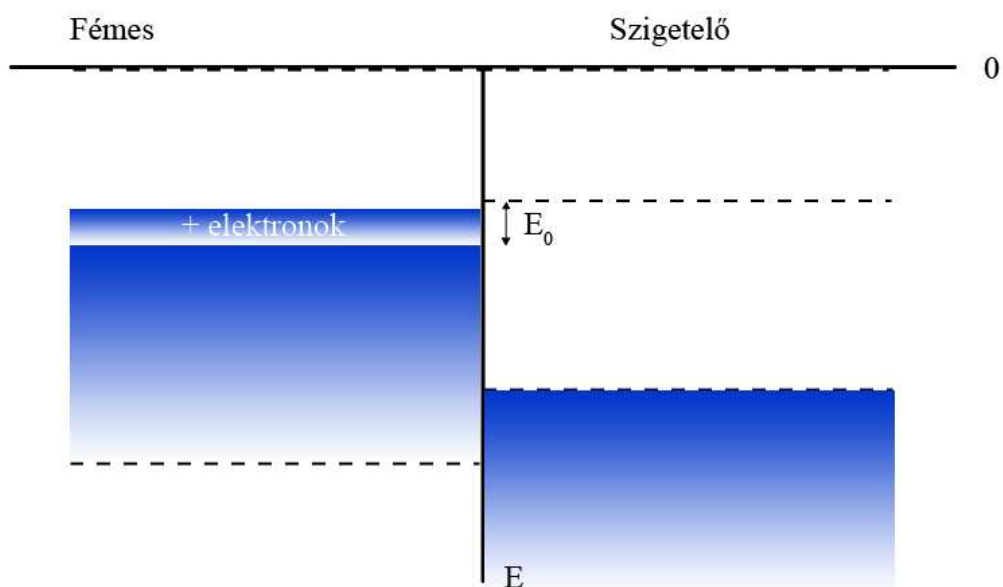
IV. Tapasztalatok magyarázata sáv szerkezet segítségével

A mérés három pontja alapján arra következtethetünk, hogy a fémes és szigetelő nanocsövekből keletkező rendszerben van egy - a szigetelőknél megtalálható sávnál kisebb nagyságú - tiltott sáv.



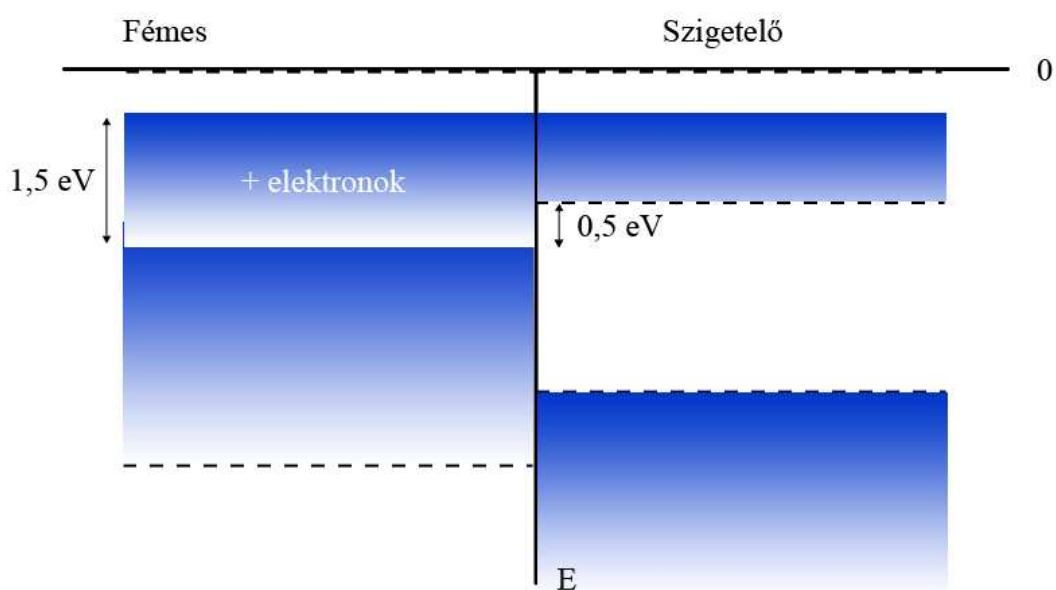
10. ábra Fémes és szigetelő nanocsövek rendszerében létrejövő tiltott sáv (E_0).

Kis mértékű dópolás hatására a plusz elektronok (az energiaminimumra való törekvés elvének megfelelően) a fémes nanocsöveknek adnak elektrontöbbletet. Azonban ha a dópolás nagysága nem elég ahhoz, hogy a teljes E_0 sáv telítődjön, akkor ugyan változik a szén nanocsövek az ellenállásának nagysága, azonban kvalitatívan nem változik a vezetőképesség.



11. ábra Kis mértékű dópolás szemléltetése sáv szerkezet segítségével.

Teljes dópolás hatására azonban elég plusz elektron kerül ahhoz a rendszerbe, hogy az összes nanocső fémessé váljon. Így jelentősen lecsökken az ellenállás a plusz elektronoknak és annak köszönhetően, hogy homogénné vált a rendszer elektromos vezeték szempontjából.



12. ábra Teljes dópolás hatására létrejövő rendszer sáv szerkezete.

6. Szén nanocsövek felhasználása

Felfedezésük óta egyre nő a szén nanocsövek felhasználási területe. Alkalmazásuk legtöbb esetben az igen nagy átmérő-hossz arányhoz, illetve üreges szerkezetükhöz kapcsolódik. Így használják kompozitok készítésére, katalizátorhordozóként, nanocső alapú memória készítésére stb.

Az általunk végzett kutatás fontos témája volt a dópolás, mely eljárás szenzorok készítése során is alkalmazható. Ugyanis ha a szenzort alkotó nanocsövekbe dópoláshoz hasonlóan különböző gázok kerülnek, azok megváltoztatják vezetőképességüket, mely alapján pedig jelet tud képezni az érzékelő.

Egy másik alkalmazási lehetőség különböző anyagok tárolása a nanocsövek üregeiben, mely során szintén a nanocsövek azon tulajdonságát használják ki, hogy az üregekbe „szennyező” anyag juttatható.

Végül pedig egy ígéretesnek tűnő felhasználásról kell szót ejtenünk. Szén nanocsövek dópolása során alkálifém-ionok valamint ezekkel együtt elektronok is kerültek a nanocsövek közé. Tehát elektronáramlás is létrejött. Ezt a folyamat lítium alkalmazásával a jövőben hatékonyabb lítium-ion akkumulátorok készítésére lehet alkalmas. Ez alternatívája lehet a jelenleg széles körben alkalmazott grafit alapú lítium elemeknek és akkumulátoroknak.

7. Összegzés

Első lépésként egyfalú szén nanocsövek elektromos vezetési képességét vizsgáltuk és ellenállásuk hőmérsékletfüggéséből (hőmérsékletnövelés hatására csökkent fajlagos ellenállásuk) arra következtetünk, hogy a szén nanocsövek félvezetőként viselkednek.

Következő lépésként káliummal dópolt minta vezetési képességét vizsgáltuk. A mérés eredményeképpen (ha a hőmérsékletet növeltük, nőtt a nanocsövek fajlagos ellenállása is) megállapítottuk, hogy a szén nanocsövek teljes dópolás hatására fémes tulajdonságúvá válnak. A mért pontokra illesztett görbék alapján kiszámoltuk a fémes-szigetelő nanocsövek rendszerében létrejövő tiltott sáv nagyságát, ami 20-200 K tartományba esett.

Végül pedig dópolás közben vizsgáltuk az egyfalú szén nanocsövek elektromos vezetési tulajdonságait. E mérés alapján állíthatjuk, hogy egy bizonyos nagyságú dópolásig csak kvantitatívan változik a nanocsövek vezetési tulajdonsága, míg e fölött (mikor telítődik a tiltott sáv) már kvalitatívan is, ekkor ugyanis félvezetéből fémes vezetővé válnak.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézetének a kutatási lehetőség biztosításáért, a mérések elvégzéséhez szükséges eszközök, berendezések, anyagok használatáért. Külön köszönettel tartozunk Dr. Vannay László egyetemi docensnek a kutatás megszervezéséért és az elméleti bevezetésért, valamint témavezetőnknek és mentorunknak, Dr. Simon Ferenc docensnek az áldozatos munkájáért, segítségéért és odafigyelésért.

Hivatkozások

- [1] Sumio Iijma: Helical microtubules of graphitic carbon (*Nature*, 354:56–58, 1991.)
- [2] Simon Ferenc: Rezgési- és mágneses rezonancia spektroszkópia szén nanocsöveken (MTA Doktori Értekezés, Budapest, 2007).
- [3] Andreas Thess, Roland Lee, Pavel Nikolaev, Hongjie Dai, Pierre Petit, Jerome Robert, Chunhui Xu, Young Hee Lee, Seong Gon Kim, Andrew G. Rinzler, Daniel T. Colbert, Gustavo E. Scuseria, David Tománek, John E. Fischer, and Richard E. Smalley: Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes (*Science*, 273:483–487, 1996.)
- [4] Tóth Eszter: Fizika IV. (Tankönyvkiadó, Budapest, 1985).
- [5] Bíró László: Újszerű szén nanocső architektúrák (Magyar Tudomány, 2003).