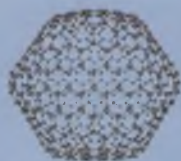
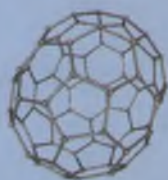
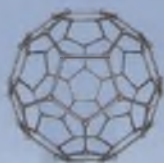


Mojzes Imre
Molnár László Milán

NA TECHNOLÓGIA NO



Műegyetemi
Kiadó



A fontosabb fizikai és kémiai állandók

Az elektron töltése (elemi töltés)	$e = 1,602176462 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Avogadro-állandó	$N_A = (6,022045 \pm 0,000031) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
A fénysebesség vákuumban	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Boltzmann-állandó	$\frac{R}{N_A} = k = (1,380662 \pm 0,000044) \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Stefan-Boltzmann-állandó	$\delta = (5,6697 \pm 0,029) \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} =$ $= 1,374 \cdot 10^{-12} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4} =$ $= 4,96 \cdot 10^{-8} \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$
A vákuum permittivitása (dielektromos állandó)	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} =$ $= 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
A vákuum permeabilitása (mágneses állandó)	$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1,25664 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Planck-állandó	$h = (6,626176 \pm 0,000036) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Rydberg-állandó	$R_\infty = (1,097373177 \pm 0,000000083) \cdot 10^7 \cdot \text{m}^{-1}$
Egyetemes (univerzális) gázállandó	$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}$
Wien-állandó	$b = 0,2897 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

Dr. Mojzes Imre

Molnár László Milán

Nanotechnológia

Dr. Mojzes Imre
Molnár László Milán

Nanotechnológia

Műegyetemi Kiadó, 2007



Lektorálta:

Dr. Zombory László, egyetemi tanár, a műszaki tudományok doktora

Anyanyelvi lektor:

Soós Mária

Műszaki szerkesztő és a borító tervezője:

Ficzek Mária

© *Dr. Mojzes Imre, Molnár László Milán*

Egyetemi tankönyv



A könyv az *Oktatási és Kulturális Minisztérium* támogatásával,
a *Felsőoktatási Tankönyv- és Szakkönyvtámogatási Pályázat* keretében jelent meg.

Azonosító: **S2457**

ISBN 978 963 420 918 8

Készült a Műegyetemi Kiadó gondozásában.

www.kiado.bme.hu

Felelős vezető: *Wintermantel Zsolt*

Terjedelem: 20,5 (A/5) ív

Nyomta és kötötte: *Pauker Nyomdaipari Kft.*

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	11
2. Hogyan kezdődött?	15
2.1. A mikroelektronika fejlődése	15
2.2. Építkezés alulról felfelé	22
2.3. Építkezés felülről lefelé	23
2.4. Önszerveződés	23
2.5. Összefoglalás	25
2.6. Irodalomjegyzék a 2. fejezethez	26
3. Átmenet a mikrovilágból a nanovilágba	27
3.1. A mikroelektronika és a nanoelektronika határán	27
3.1.1. Mikroelektromechanikai rendszerek	28
3.1.2. Mikroelektrooptikai rendszerek	36
3.1.3. Nanoelektromechanikai rendszerek	36
3.1.4. Nanoelektrooptikai rendszerek	37
3.2. Aeroszolkok	38
3.3. Kolloid rendszerek	39
3.4. Összefoglalás	40
3.5. Irodalomjegyzék a 3. fejezethez	41
4. Anyagtudományi aspektusok	43
4.1. A szén mint a nanotechnológia alapanyaga	43
4.2. Nanocsövek	46
4.3. Nanovezetékek	50
4.4. Multirétegek mint speciális nanostruktúrák	51

4.5. Nanoobjektumok létrehozása vegyület-félvezető alapon	52
4.5.1. Félvezető nanovezetékek szintézise	52
4.5.2. A kapott nanovezetékek	54
4.5.3. Ga_2O_3 nanoszálak	54
4.5.4. A vegyület-félvezető nanovezetékek tulajdonságai	59
4.6. Szilárdtestek és vékonyrétegek nanomechanikai tulajdonságai	61
4.7. Felületi plazmonok	65
4.8. Összefoglalás	65
4.9. Irodalomjegyzék a 4. fejezethez	66
5. Mérés és manipuláció a nanovilágban	69
5.1. A pásztázószondás mikroszkópia	70
5.2. Az SPM története	70
5.3. Az SPM eszközök nagy családja	71
5.4. Az atomerő-mikroszkóp	71
5.4.1. Felépítés, működési elv	71
5.4.1.1. A kantilever és AFM hegy	72
5.4.1.2. Piezo mozgató egység	74
5.4.1.3. Elmozdulásmérő egység	75
5.4.1.4. Elektronikus kiszolgáló egység, képfeldolgozás	76
5.4.1.5. Rezgésmentesítés	76
5.4.2. Képképzési módok	77
5.4.2.1. Statikus mód	77
5.4.2.2. Dinamikus módok	78
5.4.3. Felhasználási területek	79
5.4.3.1. Adattárolás	79
5.4.3.2. Félvezető eszközök és elektronika	79
5.5. A pásztázó alagútmikroszkóp	80
5.5.1. Felépítés, működési elv	80
5.5.1.1. Az alagúteffektus	80
5.5.1.2. Az STM hegy	83
5.5.2. Felhasználási területek	83
5.5.2.1. Atomi, illetve közel atomi szintű manipuláció	83
5.5.2.2. Nanolitográfia	86

5.6. Egyéb SPM eszközök	87
5.6.1. Közeltéri optikai pásztázó mikroszkóp	87
5.6.2. Mágneses szerkezetmeghatározás	89
5.6.3. Anyagösszetétel-meghatározás: a KPFM	90
5.7. Mikroszkópos technikák összehasonlítása	91
5.8. Összefoglalás	92
5.9. Irodalomjegyzék az 5. fejezethez	93
6. Nanoelektronika	95
6.1. Elektromos vezetés és transzportfolyamatok nanoobjektumokban	95
6.1.1. Elektromos vezetőképesség és transzport nanocsövekben	95
6.1.2. Termikus vezetőképesség és fonon transzport	98
6.1.2.1. Hővezetőképesség vizsgálata szén nanocsövekben	98
6.1.2.2. Fononok nanoméretű rendszerekben	99
6.1.3. Elektromos vezetés és transzportmechanizmusok nanovezetékekben	100
6.1.4. Nanovezetékek elektromos paramétereinek módosítása	103
6.2. Építőelemek	103
6.3. Az alapvető logikai kapuk megépítése a nanoelektronika eszköztárával	104
6.4. Kisméretű MOS-eszközök	108
6.5. Nanokijelzők	112
6.6. Nanofotonika	113
6.7. A vegyület-félvezető alapú nanoelektronika	115
6.8. Spintronika	116
6.9. Nanotechnológia és mobil telefónia	116
6.10. Energiátárolás nanotechnológia segítségével	118
6.11. A gyémánt nanostruktúrák	120
6.12. Nano információátárolás és -feldolgozás	122
6.13. Szén nanocsövek az elektronikában	124
6.14. Nanoérzékelők	127

6.15. Nanoméretű struktúrák létrehozására alkalmas megoldások	130
6.15.1. Önszerveződés	131
6.15.2. A szélesebb értelemben vett litográfia	131
6.15.3. Nanolitográfia domborítással (DIP-PEN nanolitografia)	132
6.16. A szén nanocsövek piaca	132
6.17. Összefoglalás	134
6.18. Irodalomjegyzék a 6. fejezethez	134
7. Alkalmazások	139
7.1. Ipari alkalmazások	139
7.1.1. Nanotechnológia az építőiparban és az épületgépészetben	139
7.1.2. Textilipari alkalmazások	141
7.1.2.1. Polimer felületek megmunkálása az új textilnyersanyagok kialakításában	141
7.1.2.2. Megvalósult nanotextiliák	141
7.1.3. Bevonatok és kenőanyagok	144
7.1.4. Nanotechnológia és napenergia	144
7.1.5. Nanoélelmiszerek	145
7.2. Biológiai alkalmazások	145
7.2.1. Nanotechnológia a környezetvédelemben	146
7.2.2. Az élővilág színeiről	147
7.3. Nanoeszközök és -anyagok orvosi alkalmazása	148
7.3.1. Hatóanyag transzport	149
7.3.2. Új terápiák és hatóanyagok	150
7.3.3. In-vivo diagnosztika	150
7.3.4. In-vitro diagnosztika	150
7.3.5. Orvosi implantátumok és bioanyagok	151
7.4. A katalízis	153
7.5. Kozmetikai ipar	154
7.6. Összefoglalás	156
7.7. Irodalomjegyzék a 7. fejezethez	156

8. Nanotechnológia és a szellemi tulajdon védelme	159
8.1. A szellemi termék monopóliuma	159
8.2. Szabadalmak	164
8.3. Védjegyek	166
8.4. Know-how	167
8.5. Összefoglalás	167
8.6. Irodalomjegyzék a 8. fejezethez	167
9. Nanotechnológia és szabványosítás	169
9.1. A szabványokról általában	169
9.2. Nanotechnológia és szabványosítás	170
9.3. Összefoglalás	171
9.4. Irodalomjegyzék a 9. fejezethez	171
10. Társadalmi hatások, kockázatok	173
10.1. Bevezetés	173
10.2. A nanotechnológia kockázatai	174
10.3. A nanotechnológia pozitív hatása az emberre és környezetére	175
10.4. A nanotechnológia társadalmi hatásai	176
10.5. Mesterségesen előállított nanorészecskék	177
10.6. A nanorészecskék egészségügyi kockázata	178
10.7. Nanotechnológia kockázati tényezői általában	179
10.8. Összefoglalás	181
10.9. Irodalomjegyzék a 10. fejezethez	181
11. Kitekintés, merre tovább	183
11.1. Befektetések a nanotechnológiába	183
11.2. A nanotechnológia és a nanoelektronika hosszútávú lehetőségei	183
11.3. Irodalomjegyzék a 11. fejezethez	186

12. Nanotechnológiai értelmező szótár	187
13. Irodalomjegyzék	195
14. Tárgymutató	199
15. Contents	209

*Csak aki a régít ápolgatva
ismeri meg az újat, csak az
lehet mások tanítójává.
Konfuciusz (Kr.e. 551 – 479)*

1. Bevezető

Gyakran felmerül a kérdés, hogy miért fog a nanotechnológia forradalmi változásokat előidézni. Erre egyszerűen az a válasz: azért, mert érinti életünk szinte minden területét: az orvosságok – amelyeket használunk –, számítógépeink teljesítőképessége, az energia, amit használunk, az étel, amit eszünk, az autó, amit hajtunk, az épületek, amelyekben élünk és a textíliák, amelyekből öltözetünk készül. Ez tehát azt jelenti, hogy új lehetőségek, új termékek, új piacok nyílnak. Ha a hatásokat rövid- és középtávúakra osztjuk be, akkor ezek fokozatosan jelentkeznek, bár a látóhatáron látszanak olyan területek, ahol ugrásszerű változásokat fogunk tapasztalni.

Igen fontos leszögezni a nanotechnológia sokszínűségét. Ez egy megengedő jellegű technológia, lehetővé téve új dolgok megalkotását szinte minden korábban elfogadott és használt technológiai diszciplína területén. Hasonlóan más megengedő jellegű technológiákhoz, mint amilyen az internet, a belső égésű motorok vagy az elektromosság, jelentős hatást fog gyakorolni a társadalomra és gyakran annak ellenállásába fog ütközni. Az elektromosságot kezdetben a gázvilágítás alternatív megoldásának tartották, de később belőle fejlődött ki a telefon, a számítógép, az internet, amik nélkül életünket ma már elképzelhetetlennek tartjuk. A nanotechnológiát nem ilyen egyszerű leosztani, mivel általában több tudományos diszciplínára gyakorol hatást, azaz multidiszciplináris. Ez a jellege nagy kihívást jelent a tudományos társadalomra, a kormányzat K+F szervezeteire, valamint az iparra; ugyanakkor megteremti a váratlan dolgok megjelenésének lehetőségét is. Igen lényeges hangsúlyozni, hogy a nanotechnológia nem egyszerűen a méretek csökkentésének módja, hanem a nanoméreteknél a más tudományok törvényszerűségei kezdenek működni (kvantumfizika), az anyagok hagyományos tulajdonságai mellett új tulajdonságok jelennek meg, és a felület kezd meghatározó lenni az anyag tömbi tulajdonságaival szemben.

A nanotechnológia egyik szépsége sokszínűségében rejlik. Ezt sok esetben annak köszönheti, hogy szerves rendszereket, élő anyagokat is kezel. Nézzünk ebből ízelítőnek néhányat:

- **Élet- és orvostudományok.** Az élet- és orvostudományokban ez azt jelenti, hogy kezdünk képesek lenni a dolgokat mérni, érzékelni és előállítani azon a szinten, ahol az élő szervezetek működnek, baktériumoktól a növényekig. Ez nemcsak lehetőséget teremt arra, hogy befolyásoljuk a biológiai világ tulajdonságait, hanem megteremti annak esélyét is, hogy bizonyos megoldásokat kölcsönözzünk abból a világból, amely igen sok eredeti megoldást fejlesztett ki az evolúció több milliárd éves fejlődése során.
- **Anyagtudomány.** Az anyagok, a dolgok a nanoméret-tartományban általában elkezdnek másképpen viselkedni. Azok az anyagok, amelyeket szokásosan tömbi mivoltukban használunk és vizsgálunk, a nanoméret-tartományban rendezetleneknek és ellenőrizetleneknek tűnnek. Így például egy nagyon vékony üres cső jön létre megfelelően elrendezett a szén atomokból, és nagyon érdekes elektromos és termikus tulajdonságokat mutat. Ha az anyagrészecskék elegendően kicsik (és azokat nanorészecskékként minősíthetjük), mechanikai tulajdonságaik megváltoznak és a fény és más elektromágneses sugárzás különféle változásokat hoz létre bennük. Ennek egyik oka, hogy a sugárzás hullámhossza összemérhető lesz a nanorészecskék méreteivel. Ismeretes, hogy a látható fény hullámhossza néhány 100 nanométer.
Ha a nanorészecskéket kompozit anyagokban alkalmazzuk, azok jelentősen javíthatják tulajdonságukat, csökkenthetik súlyukat, növelhetik kémiai, hőtechnikai és ellenálló képességeiket és hathatnak azokra a tulajdonságokra, amelyek meghatározóak az anyag és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatására.
Azok a bevonatok, amelyeket nanorészecskékből állíthatunk elő, szokatlanul síkosak lehetnek, és mutathatnak olyan szokatlan tulajdonságokat, mint például színváltozás, víztaszító képesség. Ezeket a különleges hatásokat általában elektromos jelre tudjuk generálni ill. visszaállítani.
- **Elektronika.** Az elektronikában szinte azt gondolhatjuk, hogy a méretek csökkenése egy folyamat eredménye, amely lehetővé teszi, hogy egyre kisebb elektronikus eszközöket állítsunk elő. A méretek határát ezen a területen a litográfia határozza meg. Végso soron az áramkörti elemek egyetlen molekulából is állhatnak. A nanostruktúrák, mint pl. a kvantumpöttyök forradalmian új típusú számítógépek előállítását teszik lehetővé.

Sokan gondolják, hogy a nanotechnológia fejlődése igen hosszú ideig tart, míg eléri a gyakorlati alkalmazhatóság szintjét. Ez nem így van, és csak említés szintjén mutatunk meg néhányat a mára már megvalósult gyakorlati alkalmazások közül:

- Gyógyszerek adagolása
- Napenergia konverzió (fotovoltaikus vagy közvetlen hidrogéntermelésű)
- Akkumulátorok
- Kijelzők és e-papír
- Nanocsöveket tartalmazó kompozitok
- Nanorészecskéket tartalmazó kompozitok
- Katalízis
- Bevonatok (különlegesen kemény vagy új tulajdonságokkal rendelkező)
- Ötvözetek (például a protézisekben használt acél)
- Ötvözetek, amelyek segítik a sejtek növekedését
- Szigetelések (termikus és elektromos)
- Érzékelők (bio és kémiai)
- Egyetlen foton generálására és detektálására alkalmas eszközök
- Különböző vegyi anyagok (ragasztók, kenőanyagok, festékek, üzem- és robbanóanyagok, textíliák)
- Számítástechnikában használható memóriák
- Nyomtatható elektronikus áramkörök
- Különböző optikai komponensek

A fenti felsorolás természetesen nem lehet teljes, hiszen igen sok kutatási terület érlel olyan új eredményeket, amelyekből nagyon gyorsan gyakorlati eredmények lehetnek.

Ismereteink szerint könyvünk első kísérlet arra, hogy ezt a szerteágazó területet magyarul bemutassuk az érdeklődők számára. Érdeklődő alatt ebben az esetben mind az élő, mind az élettelen természettudományok, valamint az orvosi és műszaki tudományok területén dolgozó szakembereket értjük. Az áttekintett terület bármilyen szélesnek is látszik, nem lehet teljes, a terület fejlődési dinamikája meghaladja a mikroelektronika terén korábban tapasztalt ütemet. Ez azzal is magyarázható, hogy a területet művelők köre sokkal szélesebb, mint a mikroelektronika hőskorában volt.

Az egyes területek alapos ismertetésére jelen munka keretében nem vállalkozhattunk, mivel ezt a könyvet a műszaki felsőoktatás terén használható tankönyvnek szántuk. Nem monográfia tehát, így nem tekinthettük át a tudomány jelenlegi állását, lényegében nem térhettünk ki konkrét kutatási eredmények ismertetésére. Ez különösen azért volt fájdalmas, mert így kimaradtak az örömdetes nagyszámú hazai kutatási eredmények is. E sorok írója mint a 2004 ősze óta működő Nano

Törzsasztal egyik alapítója, örömmel győződött meg a hazai nano-műhelyekben folyó magas szintű munkákról.

Szerzők köszönetet mondanak Prof.Dr. Zombory Lászlónak a lektori véleményért és tartalmas, hasznos észrevételeiért. Köszönjük Villy Évának a szöveggondozást és a Műegyetemi Kiadó munkatársainak, Ódor Mariannak és Ficzek Máriának az alkotó közreműködést.

Szerzők köszönetet mondanak Bódis Balázsnak, Tibenszky Zoltánnak, Póser Istvánnak, Nagy Károlynak, Zádor Péter Dávidnak, Csüllög Sándornak, Dr. Kósáné Kalavé Enikőnek, Dr. Misák Sándornak a könyvben felhasznált anyagok előkészítéséért.

Budapest, 2007. június

A szerzők

2. Hogyan kezdődött?

Ebben a fejezetben a nanotechnológia kezdeti lépéseit és fontosabb fogalmait tekintjük át. Ennek során megismerhetjük a nanotechnológia, majd később a nanotudomány kialakulását, rövid áttekintést adunk a fejlődés nemzetközi és hazai kezdeteiről. Áttekintésünk nem törekszik teljességre.

2.1. A mikroelektronika fejlődése

A XX. század egyik meghatározó technológiája a mikroelektronikához kötődött. Osztjuk azt a véleményt, hogy ez egy kihagyhatatlan szakmai kultúra [Gyulai, 1991]. E kultúra színvonalas művelése hozzájárul ahhoz, hogy más területeken, így például a biológia területén is jelentős eredményeket érhessünk el. Az alaptudományok ugyanis jelenségorientált, logikus kérdés-válasz láncolat révén igyekeznek megmagyarázni világunkat. E világ fejlődéséhez jelentősen hozzájárul a számítógépes szimuláció, amely a számítógépek teljesítménynövekedésének köszönhetően ma már a valódi állapotot, folyamatokat pontosan leíró lehetőségekkel bír. E téren elért eredmények lehetővé tették az anyagtudomány mint szintézistudomány fejlődését, amely olyan, a mikrovilágban működő szerszámokat hozott létre, melyek segítségével a kívánt struktúrák létrehozhatóak.

Az anyagtudomány olyan szintézistudomány, amely épít a szilárdtestfizika, kémia, a termodinamika, a krisztallográfia stb. eredményeire, de a jelenségeket nem *in ipso* tekinti, vizsgálja, hanem a mikrovilágban működő szerszámokat kívánja megismerni és alkalmazni, hogy azok közreműködésével egy várt funkciójú/tulajdonságú anyagstruktúrát hozzon létre.

A technológia ebben a fogalomkörben olyan szabálygyűjtemény, amely rögzíti ezen szerszámok működési tartományát. E szabályok segítségével reprodukálható termékek állíthatók elő.

A technika azon módszerek és eljárások összessége, amelyeket az ember a tudományos ismeretei felhasználásával céljainak megvalósítására, anyagi javainak előállítására vagy – gyakori megfogalmazással – környezetének alakítására, megváltoztatására alkalmaz. A technika szinonimájaként használt technológia szó az angol szakirodalom hatására terjedt el. A XX. század során mindinkább beleértették a tudományos kutatások eredményeinek gyakorlati alkalmazását, a tudomány kézzelfogható eredményén túl a hozzájuk társuló magatartásokat, folyamatokat, magukat a termékeket és mindennek a társadalmi életben megfigyelhető kihatásait.

A technika szó görög eredetű, a magyar nyelvbe a németből került át, eleinte főként eredeti „mesterségbeli tudás, készség” jelentésében¹.

A csúcstechnológia az az új termelési eljárás és az ezzel járó ismeretanyag, legyen az elméleti vagy gyakorlati, amelyek olcsóbb vagy jobb minőségű termékek előállítását teszik lehetővé.

A technológiának profitot meghatározó szerepe van. A technológiával megvalósított extraprofit megmarad mindaddig, amíg az új technológia általánosan ismertté és alkalmazottá nem válik. Az ismeret nem csak legális úton terjed, erről majd a 8. fejezetben írunk.

A technológia jellegzetes vonásai:

1. Minden tudományos eredmény csak a technológia révén hasznosulhat a gazdaságban.
2. A piacgazdaságban a technológia és a profit összetett viszonyban létezik, a kölcsönhatás sokszínű, földrajzi helytől, képzettségtől is függ.
3. Az azonos, de különböző termelőnél gyártott termékek minőségének meghatározója.
4. A 2. és 3. miatt a technológia új eredményeit titkosan kezelik.
5. A csúcstechnológia nem vásárolható, csak saját fejlesztéssel szerezhető meg.
6. A technológiai kutatás és fejlesztés eredményeit a döntéshozók szigorúbban és egyértelműbben mérlegelik, mint más területekét.

A technológia helyett elsősorban német nyelvterületen a technika szó is használatos, továbbiakban mi ezt a két szót szinonimaként használjuk. A technológia és a technika egy másik definíciója szerint olyan nélkülözhetetlen eszköz, amely közvetíti az egyes tudományok eredményeit a társadalom hasznára, lehetővé téve, hogy a természet nyersanyagaiból emberi fogyasztásra, vagy felhasználásra alkalmas eszközöket állítsunk elő [Prohászka, 1991]. Ezen eszközök egyik igen ígéretes területe a mikroelektronikában megszokott mérettartománynál lényegesen kisebb méretű objektumokat hasznosító, nanoméretű eszközöket jelenti. A továbbiakban nano-

¹ Britannica Hungarica, 17. kötet

méretű eszköznek olyan objektumokat tekintünk, amelyeknek legalább egyik mérete kisebb, mint 100 nanométer.

Az objektumokat itt a lehető legteljesebb értelemben használjuk, beleértve mind a szerves, mind a szervetlen rendszereket.

A mikroelektronikai technológia mind technológiai anyagaikat, mind magukat az eszközeiket illetően alapvetően a szervetlen világhoz tartozó dolgokat jelentett. E technika valamikor a XX. század végén érkezett el ahhoz a fejlődési fokozathoz, amikor felmerült szerves anyagok mikroelektronikai alkalmazása is. Ezek az anyagok megjelentek úgy is mint félvezető anyagok, és úgy is mint félvezető rétegrendszer kialakításához szükséges anyagok. A korábban szinte egyeduralkodóként használt szilícium-szilíciumdioxid-alumínium rendszer helyébe fokozatosan új szereplők léptek, lecserélve majd részben, vagy egészen az említett rendszer mindhárom alkotórészét. Ez a mikroelektronikában igen jelentős változást hozott, hiszen technológiáját tekintve a mikroelektronikai ipar igen konzervatív iparág. Ezt a konzervativizmust a technológiaváltást kísérő jelentős bizonytalanság és a nagy ráfordítások indokolják. Az a gyors fejlődési tempó, amely a mikroelektronikai elemfejlésztésben tapasztalható, nem teszi lehetővé ekkora kockázatok vállalását, és a termékek fokozatosan csökkenő ára nem termeli ki a szükséges ráfordításokat.

A mikroelektronikai termékfejlésztésben ezért elsősorban konstrukciós megoldásokkal és az egyes elemek méreteinek csökkentésével történt a fejlesztés, amelyre világosan és egyértelműen utal Moore törvénye. Ez a törvény, amely – hangsúlyozzuk nem természeti törvény, hanem a műszaki-gazdasági folyamatokat leíró tapasztalati tényeken alapul – jól prognosztizálja a digitális memória-áramkörök fejlődését. Figyelemre méltó tény, hogy hasonló törvényszerűségek a mikroelektronika más területén – például nagyteljesítményű eszközök – nem figyelhetők meg.

A nanotechnológia – bármely fájdalmas is a mikroelektronikát művelők számára – nem a mikroelektronika természetes továbbfejlődéséből alakult ki, hanem egy teljesen új filozófiát követő technológia és konstrukció. Ezt a továbbiakban részletesen ismertetjük.

A nanotechnológia ma már elismert szereplője a technológiapolitikának; többen egy sor, az emberiség előtt álló feladat egyetlen lehetséges megoldásának tartják.

A terület fejlődése Robert Feynman 1959-ben publikált könyvével kezdődik. A kötet a később híressé vált előadáson alapul [Feynman, 1959]. E könyvben a később Nobel-díjas szerző arról értekezik, hogy nem látni olyan elvi akadályt, amely kizárná, hogy egyes eszközöket atomokból építsünk fel. Az ekkortájt kibontakozó mikroelektronika egészen más utat járt, hiszen csak egy évvel vagyunk az integrált áramkörök felfedezése után. Ezek az integrált áramkörök és későbbi utódjai egy teljesen más fejlődési, fejlesztési filozófia termékei. Előállításuk ugyanis másik utat követ, azaz a folyamatos fejlesztés eredményeképpen egyre növekvő méretű szilícium egykristályból állítanak elő először szeleteket, ezeken elvégzik az elemtech-

nológiai műveleteket, és az így létrejövő chipeket kisserelve parányi méretű félvezető eszközöket állítanak elő. Ma ez a folyamat pizzányi átmérőjű és embermagaságú szilícium egykristályokból indul ki. A legkorszerűbb félvezető eszközök úgynevezett tervezési szabályai 2003 végére lépték át a nanotechnológia mérethatáraként elfogadott 100 nanométert. Itt tehát egy felülről lefelé történő technológia megvalósítása zajlik, amely még mindig igen nagyszámú atomot tartalmazó rendszer, igaz, ebben a rendszerben az egyes áramkörtí funkciókat mára már csak néhány tíz elektron valósítja meg.

2.1. táblázat. Technológia térkép

Év	Tervezési szabály	Órajel	Logikai áramkörök	Mikroprocesszorok, tranzisztorok	Tápfeszültség
Egység	Mikron/nm	MHz/GHz	Millió/cm ²	millió tranzisztor/chip	V _{dd}
1993	0,5	200	2	5,2	5
1995	0,35	300	4	12	3,3
1999	180	750	6,6	23,8	2,5
2001	130	1,68	13	47,6	1,2
2003	100	2,31	24	95,2	1,0
2005	80	5,17	44	190	0,9
2008	70	6,74	109	539	0,7
2011	50	11,5	269	15223	0,6
2014	34	19,3	664	4308	0,5
2016	22	28,7			0,4

A nanotechnológia szemléletmódja ezzel ellentétes megközelítésű, itt atomokból, vagy molekulákból állítják elő a nagyobb méretű objektumokat.

A molekulák megemlítése itt azért is fontos, mert Eric Drexler volt az a biokémikus, aki a nanotechnológia alulról felfelé történő építkezésének alapját lefektette [Drexler, 1986, 1991, 1992]. A két megközelítés eredménye mára már átfedésre került, kialakítva egy olyan mérettartományt, ahol az eszközöknek jellemzően már legalább egy mérete esik a hagyományosan nanotechnológiai mérettartománynak tekintett 100 nanométeres tartomány alá. Az e mérettartományban működő eszközök igen fontos mechanikai, optikai, érzékelési és szabályozási feladatokat láthatnak el. Kialakításukat ma még elsősorban a mikroelektronikai technológia eszköztárának felhasználásával végzik. A végeredmény azonban jelentősen külön-

bőzik a mikroelektronikai eszközök esetében megszokott tömbi hordozón kialakított, jellegében kétdimenziós félvezető eszközöktől. A „hagyományos” félvezető eszközök ugyanis egy viszonylag vastag hordozónak csak a felületi rétegeit hasznosítják. Többek között a mikroelektronikai eszközök ebben is különböznek az emberi agy struktúrájától, amely – mint tudjuk – egy háromdimenziós struktúra. A mikroelektronikai technológiával kialakított mikrorendszerek jellegzetesen szintén háromdimenziós struktúrák és közelebb állnak a géptan, az optika elemkészletéhez. Ezekben a félvezető eszközökben fogaskerekeket, membránokat, komplett motorokat alakítanak ki, melyek megkövetelik az alapanyag (ez jellemzően szilícium egykristály) orientációfüggő térbeli megmunkálását. Az optikai eszközökben prizmákat, lencséket, szűrőket, esetenként komplett spektroszkópokat találunk, ezek méretei azonban nagyságrendekkel kisebbek, mint a hagyományos optikai laborokban található eszközöké.

Mára a nanotechnológia alkalmazásai kérdései is előtérbe kerültek, mivel az egyes technológiai eljárásokat sikerült olyan szintre fejleszteni, hogy megfelelő megbízhatóságú eszközöket állítsunk elő. Az ilyen eszközök alapanyaga a szerves világban elsősorban a szén és a szilícium. A szerves világban pedig különféle nagymolekulájú anyagok és polimerek, fehérjék és bizonyos sejtek csoportjai szolgálnak alapanyagul. Az előállított anyagok mennyiségét ma már tonnákban mérik, nem egy a nanotechnológiák közül mára iparszerű jelleget ért el, termékei kereskedelmi forgalomban kaphatóak.

A szén nanocsövek sem mentesek az elsőbbségi vitáktól, így Morinovu Endo Japánban, a Shinshu Egyetemről munkatársaival már 1976-ban is publikált a szén nanocsövekről. Az általa javasolt előállítási módszer szerint hidrogénből és benzolból történt a gyártás.

A továbbiakban tekintsük át a nanotechnológia kezdeteit.

- 1974 Az IBM kutatói Aviram és Seiden az első molekuláris elektronikai eszközre szóló szabadalmi bejelentést tesznek.
- 1981 Heinrich Rohrer és Gerd Karl Binnig felfedezik a pásztázó alagútmikroszkópot. Eredményüket öt évvel később Nobel-díjjal ismerik el.
- 1985 Richard Smalley, Robert Curl, Jr., és Harold Kroto felfedezik a 60 szén-atomból álló kalickaszerű térbeli elrendezést. Ezt később fullerénnek nevezik el, emléket állítva J. Buckminster Fuller amerikai matematikus, építész, költő emlékének. Felfedezésükért 11 évvel később kémiai Nobel-díjban részesülnek.

- 1986 Felfedezik az atomerőmikroszkópot. Felbontása hasonló, mint a pásztázó alagútmikroszkópé. Működési elve a fonográfra emlékeztet.
- 1986 K. Eric Drexler publikálja *Engines of Creation* c. könyvét, amelyben széles olvasóközönség számára megfogalmazza a nanotechnológia előnyeit és veszélyeit.
- 1987 Holland és angol kutatók először figyelik meg az elektromos vezetés kvantumjellegét. Ezzel egyértelműen demonstrálják, hogy a nanoelektronika nemcsak kisebb, hanem más is.
- 1987 Theodore A. Fulton és Gerlad J. Dolan a Bell Laboratóriumban létrehozzák az első egyelektron-tranzisztort, amelynek átkapcsolása mindössze egyetlen elektron mozgásával történik.
- 1989 A később igen népszerűvé és közismertté vált IBM feliratot 35 xenon atom mozgásával felírják egy szilícium lapka felületére az IBM zürichi kutatólaboratóriumában.
- 1991 Többfalú szén nanocső felfedezése (Sumio Iijima, NEC).
- 1992 Az elektromos tulajdonságok vizsgálata.
- 1993 Az egyfalú szén nanocső felfedezése (S. Iijima és D.S. Bethune, IBM párhuzamosan).
- 1993 Az USA-ban a Rice Egyetemen létrehozzák az első nanotechnológiai laboratóriumot. (alapító igazgató a Nobel-díjas R.E. Smalley)
- 1996 A Richard Smalley által elvégzett első szintézis.
- 1997 A New York-i Egyetemen Madrian Seeman megmutatja, hogy a DNS a nanomechanikai eszközök alapvető építőköveként is használható.
- 1998 Az első tervezérlésű tranzisztor².

² Nature, 393-as kötet, p49. Tans & al.

- 1999 A Yale Egyetem kutatói Mark Reed és James Tour létrehozzák az első szerves molekulából felépített kapcsolóeszközt³.
- 2001 Egyszerű logikai áramkör (hat tranzisztorral).
- 2001 CNT-FET inverter (Dericke Nanoletters vol. 1. p453, 2001).
- 2002 CNT ring oszcillátor, frekvenciája 200 Hz, ami mintegy 40 évvel van lemaradva a tranzisztor technológia élvonalától (A.Javey Nanoletters vol. 2. p929, 2002).
- 2003 Nanohuzal alapú lézerek⁴.

Röviden tekintsük át a kezdetek hazai krónikáját is.

- 1948 Gyulai Zoltán vékony tűkristályok növekedéséről szóló cikket publikál, amelyet többen a nanotechnológia kezdetének tartanak. [Gyulai, 1954]. (Bársony István szíves közlése)

1995 szeptember
egynapos szeminárium.

1995 október
COST indító megbeszélés Zürichben.

1996 február
NATO Szeminárium Szegeden.
Kiadvány: Nanoparticles in Solids and Solutions Edited by Janos H. Fendler and Imre Dékány NATO ASI Series 3. High Technology – Vol. 18.

1996 szeptember
IUVSTA workshop Balatonföldvár TDQM workshop Eger
(MIL-ORG, NETI PHARE TDQM szervezés).

³ CMP Centifica adatai alapján

⁴ X. Duan és munkatársai Nature Vol. 421, pp.241–245. 2003

1996 november

ELFT Vékonyréteg és Vákuum Szakcsoport és a IUVESTA MNB közös ülése a BME Elektronikai Technológia Tanszékén.

1997 március

Megjelenik a „Nanotechnology—a dedicated tool for the future” Ed. I. Mojzes and B. Kovács. Az első nanotechnológiai témájú kötet Magyarországon.

2000– Több intézményben megindulnak a kifejezetten nanotechnológiai és -tudományi munkák, illetve a korábbiak ilyen szempontból (is) bővülnek.

2004 A nanovilágról kapott ismereteink gyarapodásával egyre több olyan jellegű ismeret halmozódott fel, amelynek nem volt és lehet, hogy nem is lesz termelési vonzata. Ilyen értelemben tehát indokolatlan a technológia szó használata. Ezeket az ismereteket egyszerűen tudományos alapismeretekhez kell sorolnunk, így indokolt lett ezeknek elválasztása és besorolásuk a nanotudomány körébe. Határvonala természetesen nem éles, hiszen az ismeretek gyarapodásával és egy-egy terület fejlesztésével, ezekből a tudományos ismeretekből technológiák jöhetnek létre.

2.2. Építkezés alulról felfelé

Ebben az építési filozófiában a kialakítani kívánt terméket elemi építőkövekből állítjuk össze. Ezek a „tégla” általában ugyan maguk is rendkívül bonyolult egységek, de ezeket mi atomnak vagy molekulának tekintjük. Ezek vizsgálata már más diszciplínák feladata, más ismeretekkel és más módszerekkel. Az elemi egységek-

Alulról felfelé			Felülről lefelé	
Kémiai reakciók	Önszerveződés	Elhelyezés	Litográfia	Vágás, nyomás, esztergályozás
Molekulák	Kristályok rétegek, csövek	Kísérleti atomi vagy molekuláris eszközök	Elektronikus eszközök	Megmunkált felületek
Kozmetikumok, üzemanyag adalékok	Kijelzők		Komputeres chippek MEMS-ek	Jó minőségű optikai gödör lézerek

ből összeállított eszközöket, gyakran szerszámoknak is nevezzük. Érdekes kérdést vet fel e szerszámok önreprodukciója, de ezekre az aspektusokra itt nem térünk ki. Mindenesetre megjegyezzük, hogy ez a terület az öt legkiemelkedőbb nanotechnológiai beruházási terület között van az anyagtudomány, a szoftverek, a nano-elektronika és a nanobiotechnológia társaságában.

2.3. Építkezés felülről lefelé

A felülről lefelé történő építkezés alatt általában azt értjük, hogy valamely nagyobb munkadarabból annak faragásával, alakításával hozzuk létre a terméket. Így működnek a hagyományos iparágak, ahova – ebből a szempontból – a mikroelektronikát is ide soroljuk. A mikroelektronika is embernyi magasságú pizzányi átmérőjű egykristályból alakítja ki a chipeket, igen jelentős mennyiségű hulladékot termelve és egy kisebb város energiafogyasztását felhasználva ehhez. Így működik a marás, az esztergályozás, és a hagyományos fa- és fémmegmunkálás. Az energia- és anyag-megtakarítás ugyanebben a technológiában is jelentős tartalékokkal bír, azonban sok esetben érzékelhető határainál tartunk. Minél nagyobb a kiinduló anyag és a céltermék mérete közötti különbség, annál nagyobb mértékű az anyagveszteség és az energiaráfordítás. Összehasonlításképpen megjegyezzük, ha a nano mérettartományt úgy szemléltetjük, hogy a célterméket 1 cm-nek vesszük, akkor a kiinduló anyag méretének 10.000 km-nek kellene lenni. Látható tehát, hogy igen nagy a méretskála. Tovább nehezíti a dolgot, sok esetben nemcsak a felesleget kell lefaragni, hanem olyan struktúrákat kell kialakítani, amelyek ezzel a módszerrel elvben sem valósíthatók meg. Mint később látni fogjuk, ez jellegzetesen a nanovilág problematikája.

2.4. Önszerveződés

A termodinamika II. törvénye kimondja, hogy zárt rendszerben az entrópia mindig maximális értéke felé törekszik. Felmerülhet tehát az a kérdés, hogy a rendezetlenség vagy az entrópia vezethet-e spontán módon rendezett állapotok létrejöttéhez. Ilyen rendezett állapotnak tekinthető egy nanotechnológiai objektum is. Az ilyen objektumok létrejöttében igen fontos szerepet játszik a hőmérséklet. Az energia és az entrópia közötti egyensúly, amely a szabadenergia a minimalizálására törekszik, szintén hőmérsékletfüggő. Alacsonyabb hőmérsékleteken egy rendezettebb struktúrát várunk, míg magasabb hőmérsékleteken a rendezetlenebb struktúrák megjelenése valószínűbb. Az önszerveződő struktúrák olyan dinamikus alakzatok, amelyek a rend és a rendezetlenség közötti igen precíz egyensúly keretein belül

jönnek létre. Ezeknél a rendszereknél sem létrehozásuk, sem vizsgálatuk során nem szabad előnybe részesíteni sem a rendet, sem a rendezetlenséget [Jones, 2004].

Az önszerveződés a természet egyik kedvelt módszere különféle dolgok létrehozására. Egyszerűen ez azt jelenti, hogy összekombinálunk különféle anyagokat egy előre elhatározott módszer szerint. Az önszerveződő monorétegek, amelyeket a fentiekben említettünk, egyszerű példák erre.

Az önszerveződést a nanotechnológiáról szóló források egy alulról történő építkezésként említik. Ilyen eljárás például egy motor összeszerelése, mert itt a motort alkatrészeiből rakják össze. (A példa azért nem teljesen jó, mert a motor alkatrészei nem önmaguktól állnak össze motorrá, hanem azokat össze kell szerelni). Az önszerveződés általában kis addicionális erőforrásokat igényel. Az önszerveződés ezért gazdaságilag egy nagyon perspektivikus eljárás, és ezért van az, hogy feltehetően hamarosan alkalmazásba is kerül. Nagyon valószínű, hogy ezt az alulról építkező, önszerveződő folyamatot kombinálják egy felülről történő építkező folyamattal. Az ilyen megoldásra példa lehet az, hogy egy felülről történő építkezési technológiával megmunkált hordozón önszerveződő, alulról építkező struktúrákat hozunk létre.

Végezetül az önszerveződést mint egy folyamatot kell tekintenünk, amelyben az egyes önszerveződött részek maguk is önszerveződött rendszerek részeivé válnak. Nézzünk néhány példát ezeknek az önszerveződő rendszereknek a kialakítására.

A nanoelemek közül jelenleg legperspektivikusabbnak a szén nanocsövek használata tűnik. Ezekben az eszközökben a félvezető tulajdonságú nanocső vezetőképeségét moduláljuk egy gate feszültség segítségével. Az ilyen eszközök létrehozását sokáig akadályozta, hogy a szén nanocső készítése során vezető és félvezető tulajdonságú nanocsövek keletkeznek. A korszerű technológiai eljárások szétválogatásán túl lehetővé teszik a nanocsövek hosszának befolyásolását is. Ennek megfelelően mindkét típusú nanocsövet fel tudjuk használni logikai áramkörök felépítésére. A vezető tulajdonságú szén nanocsövek kötik össze az egyes logikai áramköröket. A SPICE Program szimulálni tudja a szén alapú tervezérlésű tranzisztorokat a CNFET (CNFET – Carbon Nanotube Field Effect Transistor) logikai áramkörökben.

A fent említett önszerveződés a DNS közismert sajátossága. Ennek segítségével olyan csatlakozó felületeket alakíthatunk ki, amelyekhez szén nanocsöveket kapcsolhatunk. Ennek során egy hálószerű struktúra képződik, amely különféle logikai funkciók megvalósítására használható (ld. 6. fejezet). Az ilyen áramkörök létrehozásának három feltétele van:

- Az önszerveződés sajátossága, hogy szabályos alakzatokat hozzon létre.
- A rendszer komplexitása, hogy összetett rendszereket is megvalósíthasson.
- A rendszer tűréshatára, hogy az elkerülhetetlenül meglevő hibák hatását lehetőség szerint kiküszöböljük.

A szabályosság a CMOS-áramkörökben úgy jelentkezik, hogy standard elemi cellákat használunk, ezek egyformasága azonban nem alapkövetelmény CMOS-IC-ben (CMOS – Complementer Metal Oxid Semiconductor Integrated Circuit). A DNS önszerveződés azonban csak az azonos elemű cellákból felépülő szabályos periódusú struktúrák létrehozására alkalmas.

A bonyolultság a jelenleg használatos CMOS-áramkörökben több százmillió n-FET és/vagy p-FET elemeket tud elhelyezni a szelet felszínén. Ezeket az elemeket nagyságrendileg 100 nm széles fémcsíkokkal kötjük össze. Ezt a pontosságot fotolitográfiával érjük el. A DNS önszerveződő áramkörökben olyan rendszereket igyekszünk kialakítani, amelyek már számítástechnikai szempontból is szóba jöhetnek. Ugyanakkor a DNS önszerveződő áramkörökben jelenleg általában nem tudunk olyan komplexitású áramköröket létrehozni, mint a CMOS-technológiában. A komplexitást tehát úgy kell elérnünk, hogy nagy mennyiségű elem felhasználására ne kerüljön sor. Általában megemlítjük, hogy a szabályos struktúrák jellegzetesen csökkentik a megvalósítható rendszer komplexitását.

A rendszer tűréshatára olyan, hogy az elkerülhetetlenül meglevő hibák hatását lehetőség szerint kiküszöböljük. A hibahely alatt általában kétféle hibát értünk: funkcionálisat és pozicionálisat. A funkcionális hiba alatt egy áramkörti hiba esetében azt értjük, hogy az nem hajtja végre a specifikációban rögzített funkcióját, így például a tranzisztor nem vezet, amikor vezetnie kellene. A pozicionális hiba akkor jön létre, ha egy egyébként jól funkcionáló elemet rosszul pozicionálunk. Mind a CMOS, mind a DNS önszerveződő nanoelektronikai rendszereiben megjelenhetnek funkcionális hibák, de csak az önszerveződés az, ami pozicionális hibákhoz vezethet.

A CMOS-alapú technológiákban a hibatűrés támogatottsága korlátozott. Ugyanakkor a több százmillió eszközből és huzalozásból álló félvezető eszközben, a hiba megjelenése bizonyos valószínűséghez köthető. Így például bizonyos számú hibát a rendszer tolerál. Ennek egyik módja például a cache-memóriában történő információk leltározása oly módon, hogy bizonyos redundáns cellákat alkalmazunk, és megengedjük a rendszer átkonfigurálását.

Az önszerveződés eltérő anyagú rendszerekben is létrejöhet [Szabó, 2005].

2.5. Összefoglalás

A fentiekben röviden összefoglaltuk az alapvető konstrukciós elveket. Nyilvánvaló, hogy ezek megvalósulása a nanotechnológia egyes területein eltérően jelentkezik. Vannak területek, ahol csak az egyik érvényesül, ilyen például a nanoelektronika jelenlegi állása, ahol a ma már kereskedelmi forgalomban kapható nanoelektronikai

memória áramköröket a hagyományos CMOS-technológiával felülről lefelé történő módszerrel alakítják ki.

2.6. Irodalomjegyzék a 2. fejezethez

- [Drexler, 1986] Drexler, K.E. Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology New York: Anchor Press/Doubleday.
- [Drexler, 1991] Drexler, K.E., C. Peterson, and G. Pergamit. Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution New York: William Morrow.
- [Drexler, 1992] Drexler, K.E. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation New York. John Wiley & Sons. (Association of American Publishers „Most Outstanding Computer Science Book, 1992”)
- [Endo, 1976] A. Oberlin, M. Endo, and T. Koyama, J. of Krystal Growth, 32, pp.335–349, 1976
- [Endo, 1988] M. Endo, American Chemical Society, Chemtech, September 1988 pp.568–576
- [Feynman, 1959] Előadás az Amerikai Fizikai Társulat 1959. decemberi ülésén. Megjelent a CALTECH „Engineering and Science” című kiadványában (ld. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>)
- [Gyulai, 1954] Gyulai, Z.: Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften von NaCl-Nadelkristallen. Zeitschrift für Physik, Bd.138, S.317–321 (1954) (Dr. Bársony István szíves közlése)
- [Gyulai, 1991] Gyulai J.: Egy kihagyhatatlan szakmai kultúra. Magyar Tudomány 1991. 2. szám 184–190. o.
- [Jones, 2004] Richard A.L.Jones: Soft Machines – Nanotechnology and Life. Oxford University Press 2004
- [Prohászka, 1991] Prohászka J.: Magyar Tudomány, 1991. 2. szám 196. oldal
- [Szabó, 2005] Szabó, T., Szeri, A., Dékány, I.: Composite graphitic nanolayers prepared by self-assembly between dispersed graphite oxide and cationic polymer. Carbon, vol. 43., pp.87–94 (2005)

*Aki nem alkalmaz új
megoldásokat, új bajokra
számíthat, mert az idő a
legnagyobb újtó.*
Francis Bacon (1561–1626)

3. Átmenet a mikrovilágból a nanovilágba

Ebben a fejezetben, követve a 2.3. pontban mondottakat, a mikrovilágból a nanovilágba való átmentet mutatjuk be. A mikroelektronika és a nanoelektronika közötti átmenetet a mikrorendszerek képviselik, ezek sok esetben – azon túl, hogy gyakran tartalmaznak 100 nm alatti tartományba eső méretű elemeket – a nanotechnológia egyéb sajátosságait is mutatják. Kiemeljük közülük a szerves anyagok kiterjedt alkalmazását.

3.1. A mikroelektronika és a nanoelektronika határán

Hogyan hasonlíthatjuk össze a mikro és nanotechnológiát? Az első tudományos közlemény, amely a mikrotechnológiára vonatkozott 1950-es években jelent meg. Ezek a publikációk elsősorban érzékelők, mozgatók kialakítására vonatkoztak. Igen nagyszámú szabadalom is született ezekben. Azok a cégek, amelyek kizárólag a mikrotechnológiára szakosodtak az '50-es évek végén kezdtek el megalakulni, és tevékenységüket elsősorban a fogyasztói és orvosi területre koncentrálták. A DARPA (DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency) 1980-as években ismerte fel, hogy ezek a mikrotechnológiai eszközök igen fontos szerephez juthatnak a biztonsági és védelmi rendszerekben is.

A nanotechnológia terén több különálló területet határozhatunk meg. Ezek a nanoanyagok, a nanoelektronika és a molekuláris eszközök lehetnek. Az utóbbi abban különbözik, hogy egy egészen más technológiát alkalmaz, mint a mikrotechnológiák általában. Ezek a technológiák potenciálisan diszruptív technológiák, és jelentőségük az elkövetkezendő rendszerekben egyre nő. Az alábbiakban a mikro- és a nanorendszerek elkülönítése nem minden esetben egyértelmű, hiszen az alfejezet címében is utalunk rá, hogy ezek a határterületen helyezkednek el.

A terület fontosságát sokféle statisztikával igazolhatnánk, az alábbiakban az USA nanoszenzor-piacának fejlődésével mutatjuk be a dinamikát. A 3.1. táblázat egyfajta szenzorfelosztást is mutat, erre is ismertek más felosztások is.

3.1. táblázat. Az USA nanoszenzor piaca (millió USD-ben)¹

Szenzortípus	2003	2004	2009	Átlagos éves növekedési ütem %
Nanokémiai	10.0	11.2	94.2	53.1
Nanobiológiai	20.9	23.8	98.6	32.9
Nanoradiológiai	0	0	1.0	–
Nanotermikus	0	0	0	0.
Nanoelmozdulás	3.5	5.0	12.9	20.9
Nanoerő	110.0	150.0	385.0	20.7
TELJES	144.4	190	591.7	25.5

A nanoszenzorok legfőbb felhasználási területe a környezetvédelem lesz, ezt követi az egészségügy, majd a védelmi ipar. A járművek és a feldolgozóipar is igen jelentős számban fog alkalmazni nanoszenzorokat.

3.1.1. Mikroelektromechanikai rendszerek

Ennek a területnek jellegzetes képviselői azok az áramköri elemek, amelyek segítségével például hangolást valósíthatunk meg. Természetesen más példákat is választhatunk volna, így például különféle motorokat, pumpákat és egyéb mozgatható elemeket [Mojzes, 2005].

A hangolható RF RMS alapú bemenő fokozatok igen fontos részei a szoftver vezérelte digitális rádiórendszereknek. Az RF-jel áthaladási útja és ennek az útnak a paraméterei egyaránt változtathatóak MEMS áramkörök segítségével. Az ilyen eszközökre példaként megemlíthetjük a sugárvezérelt antennát, a hangolható szűrőket és oszcillátorokat, az impedancia vezérelt illesztő hálózatokat és a nagyfrekvenciás kapcsolóeszközöket. A nagyfeszültségű kapcsoló a legfontosabb eszköz ezekben a készülékekben. Ezekben PIN diódákat vagy tranzisztorokat használtak az átkapcsolásra PIN (PIN – p-i-n diode). Ma már az RF MEMS-ek egyre nagyobb szerephez jutnak ezekben a fokozatokban. Ezt elsősorban kiváló csillapítási tulaj-

¹ Forrás: Micro Nano vol.9 No12. 2004. december 17.o.

donságaiknak, szigetelésüknek és linearitásuknak köszönhetik, amely megközelíti az ideális nagyfeszültségű kapcsoló paramétereit, amelyek tulajdonságait a 3.2. táblázatban foglaltunk össze. Magukat a kapcsolóelemeket akár a bekapcsolandó eszközök felületén is kialakíthatjuk. Ezek a kapcsolók kisméretűek, így például egy Ø25 mm-es gallium-arzenid szelet felületén több ezer kialakítható belőlük. A technológiájukban alkalmazható a jól begyakorolt pick-and-place technológia².

Az RF MEMS eszközök mind a rádiófrekvenciás, mind a milliméter hullámú tartományban kiterjedt alkalmazást találtak. A legfontosabb eszközök a következők:

- mikrokapcsolók, amelyek a hálózat impedanciáját változtatják;
- frekvencia duplexerek a harmadik generációs mobil készülékekben;
- hangolható induktivitások és kapacitások;
- kapcsolók, amelyek változtatható felépítésű bázisállomásokban kerülnek alkalmazásra;
- hangolható igen kis méretű antennák elsősorban katonai radarok számára³.

3.2. táblázat. Ideális és RF MEMS segítségen megvalósított kapcsolók összehasonlítására

Ideális kapcsoló	RF MEMS kapcsoló
Széles sáv	DC–65 GHz+
Nincs veszteség	Kis beiktatási csillapítás (0,1 dB – 5 GHz-ig és 0,2 dB magasabb frekvencián)
Nagy szigetelés	Nagy szigetelés (40 dB között 5 GHz és 22+ dB 40 GHz-en)
Lineáris	Nagy linearitás (mért TOI> 72 dBm)
Kis méret	Hughes Res. Laboratory által előállított SPST kapcsoló (SPST – Single Pole, Single Throw) ⁴
Nincs saját fogyasztása	nW az elektróda átkapcsolásakor

További példaként érzékelők is szolgálhatnak. Mágneses mezők érzékelésére MEMS rezonátorokat fejlesztettek ki mágneses anyagokból. Az érzékelés alapja az, hogy a külső mágneses tér és a mágneses anyag kölcsönhatása érdekében a rezonancia frekvencia megváltozik. Maga az eljárás tulajdonképpen CMOS-kompatibilis⁵.

További rendkívül érdekes terület a rezgőkvarc helyettesítése MEMS eszközökkel.

² [NANO, 9/2/7]

³ Mst4/02/39

⁴ [Hyman, 1999]

⁵ [NANO, 9/2/10]

Ma már nehezen tudunk elképzelni olyan infokommunikációs eszközt, amelyben ne jelenne meg a rezgőkvarc, amely az órajelet szolgáltatja. Ilyen eszközök vezérlik személyi számítógépeinket, mobiltelefonjainkat, fényképezőgépeinket, hordozható médialejátszóinkat. A kvarc tehát egy igen elterjedt elektronikus eszköz, technológiája igen sokat fejlődött. Évente 9 milliárd darabnál többre teszik termelését, az iparág mintegy 3 milliárd dollárt forgalmaz. Áramkörök konstruálásánál lényegében nincs alternatívája, tulajdonságait a kvarc technológia határozza be. Ezt a technológiát lényegesen kevésbé tudjuk befolyásolni, mint az anyagában hozzá közelálló szilíciumtechnológiát. Innen is adódhatott az a felismerés, hogy próbálják meg a szilíciumtechnológia segítségével kiváltani a rezgőkvarcot. A folyamat mintegy négy évtized fejlődés eredménye, amelynek legfontosabb állomásait a 3.3. táblázattal szemléltetjük.

Az oszcillátor egy olyan szilícium szelet felületén helyezkedik el, amelyben egyéb meghajtó áramköröket helyeznek el. A CMOS PLL (PLL – Phase-Locked Loop) igen kis fogyasztású a szokásos órajel előállító PLL IC-k teljesítményének mindössze 50%-át használja fel.

A meghajtó áramkör lényegesen jobb ESD (ESD – Electric and Static Discharge) védelmet nyújt, mint a szokásos kvarc kristályok bemeneti védelme. A kis zajú differenciális Boser-oszcillátor kiváló védelmet eredményez, a különböző elektromos interferenciákkal szemben.

Az állandó memória gyors konfigurációt tesz lehetővé, szükségtelessé teszi a tradicionális CMOS maszkok kialakítását, és a költségeket alacsonyan tartja.

Az oszcillátorok frekvencia elmozdása ± 150 pikoszekundum, a rezonátorok igen kis fáziszajúak, kialakításuk a 0,18 mikronos CMOS-technológiával történik. A frekvenciatűrése 0,050 ppm. A jelenleg elérhető frekvenciatartomány 1–125 MHz-ig terjed, a frekvenciatűrés ± 50 -tól ± 100 ppm.

Az eszköz öregedés hatására évente ± 2 ppm-mel változtatja frekvenciáját. A tápfeszültség 1,8-től 3,3 V-ig terjed.

Az eszközök megbízhatósága eleget tesz a 6 szigma tervezési szabálynak, mivel kialakítása szabvány CMOS-technológiával történik, tokozásában pedig a szintén szokásos integrált áramköri tokozási technológiát követi. A négyzetes rezonátort tartalmazó eszközök gyártásának átfutási ideje 3 hét. Egy technológiai menetben 1.000.000 db eszköz képződik. E tulajdonságuk különösen kedvező, ha összevetjük a kvarc technológia igen sok mechanikai megmunkálási lépést tartalmazó folyamatával, amely 12 hétig tart és ennek eredményeképpen 30.000 eszköz képződik.

3.3. táblázat. A MEMS eszközök fejlődésének szemléltetése

1965	Az első mikroelektro-mechanikai félvezető eszköz piacra kerül, ez a szilícium nyomásérzékelő.
1967	H.C. Nathanson a Westinghouse-ból publikálja az első mikroelektro-mechanikai (MEMS) rezonátort.
1976	Dr. Petersen az IBM Research San Jose-i központjában megalkotja az első MEMS rezonátort.
1982	Dr. Petersen publikálja a „Szilícium mint mechanikai anyag” c. munkáját, amely a leggyakrabban idézett MEMS témájú dolgozat lesz.
1980	Dr. R. Howe és Dr. R. Müller felfedezik a poliszilícium áldozati (sacrifice) réteget, ami alatt olyan réteget értünk, amelyet csak technológiai és nem funkcionális célból viszünk fel az eszközstruktúrára.
1992	F. Laerner a Bosch cégnél felfedezi a mély reaktív ionmarást, amely a MEMS struktúrák alaptechnológiai folyamata lesz. (DRIP – Deep Reactive Ion Etching)
1998	M. Lutz a Bosch cégnél megszervezi az első szilícium MEMS elfordulásmérő szenzor (yaw rate sensor, a jármű függőleges tengely körüli elfordulását érzékeli, s működteti a féket) gyártását.
1999	M. Lutz felfedezi az EpiPoly bevonási technológiát, amely lehetővé teszi a MEMS eszközök szabványos műanyagtokozását.
2000	A Bosch-cég és Stanford Egyetem közreműködésével 100 mm átmérőjű szeleten először demonstrálják az MEMS First™ technológiát.
2002	G. Yama és a Bosch munkatársai elsőként demonstrálják az MEMS First™ technológiát CMOS változatban.
2003	A. Partridge a Bosch-cégnél elektronikus frekvenciakompenzációs módszert valósít meg.
2006. I. né.	A SiTime Rt. piacra dobja az első szabvány CMOS soron előállított 200 mm átmérőjű szeletből készített rezonátorát.

A rezonátorok kialakítása során a szokásos CMOS-technológiát követik. Nagyobb figyelmet kell fordítani a felületi szennyeződésekre, mivel a rezonátorok frekvencia stabilitása és termikus hiszterézise erre érzékeny. Ha ezeket a folyamatokat kellő mértékben ellenőrizzük, akkor nem kapunk szisztematikus termikus hiszterézist.

Az eszközök kialakíthatóak a szokásos integrált áramkörti tokozási technikával, beleértve az SSOP, BGA, CSP és QFN technológiát [Mojzes, 2005]. Legelőnyö-

sebbnek a QFN típusú műanyagtokozást (QFN – Quad Flat No-Lead) találták, amely nagy megbízhatóságot, a hozzávezetések alacsony induktivitását, jó termikus tulajdonságot eredményezett. A költségtényező szempontjából jelentős előny, hogy nincs szükség a kvarceszközök technológiájában megszokott hermetikus kerámia- és/vagy fémtokozásra. További előnyként jelentkezik, hogy a kvarc alkalmazásával általában minimum 3 diszkrét elemet is használni kell. Ezek jelentősen növelik az interferencia lehetőségét, és a kristályok általában egyedi beállítást igényelnek. Az új alakú oszcillátorok alkalmazása nem igényel egyedi hangolást, tetszőleges hosszúságú vezetékkel csatlakoztatható a berendezésorientált áramkörhöz. Ez utóbbi esetben az eszköz kizárólag digitális áramköröket tartalmaz, szemben a hagyományos kvarc oszcillátorokkal, ahol az áramkör analóg részeket is tartalmaz. A termelésbe bevonható szeletátmérő növekedésével a termelési költségek tovább csökkenthetők. A jelenleg forgalmazott eszközök árai megegyeznek a műszakilag ekvivalens kvarc kristályok árával. A fentiekben szemléltetésképpen megadtunk öregedési és stabilitási paramétereket is. Ezek különösen az autóipari alkalmazások szempontjából fontosak, mivel az autóelektronikai rendszerekben igen jelentős megbízhatósági paramétereket fogadtak el. E rendszerek fejlesztése csak a gépipari technológiákkal szigorúan egyeztetett módon történik. Megbízhatóságukkal szemben általában a mechanikai alkatrészek megbízhatóságát meghaladó követelményeket támasztanak. 1995 óta tekinthetjük az elektronikus alkalmazásokat áttöréssellegűnek, jelenleg mintegy 30 alkalmazási területet ismerünk. Ezek közül a legfontosabbak:

- Ütközési detektorok.

Előre jelzik a jármű előtti más járműveket ill. objektumokat. Követelmény, hogy az érzékelésszög-tartomány minél jobban közelítse a 360 fokot. Ezt a feladatot általában több érzékelő összehangolásával valósítják meg. A megoldások kiterjednek mikrohullám, optoelektronikai és lézer szkennelő megoldásokra. A megbízhatósági követelmények általában előírják, hogy az alkatrészek 125 °C-ig megtartsák működési képességüket.

- Nyomásérzékelők.

Mind az autó üzemi paraméterei, mind a gumik nyomásának ellenőrzésére szolgálnak. A megfelelő fékhatás eléréséhez lényegesek a különböző pedálok nyomását érzékelő szenzorok.

- Üzemanyagellátás.

Mind a benzines, mind a dízel üzemű motorokban lényeges a befecskendezés körülményeinek ellenőrzése és szabályozása, erre a célra több, általában kombinált érzékelőt alkalmaznak. Ezek üzemi hőmérséklete is igen magas, megbízhatóságuk kulcsfontosságú.

- Nyomatékkérzők.

A nyomatékkérzők ABS rendszerekben kerülnek alkalmazásra, igen mostoha környezeti körülmények között és általában a fékekkel egybeépítettek⁶.

Az autóiipari alkalmazások mellett a motorkerékpároknál is egyre jobban alkalmazzák az intelligens mikroérzékelőket. Problémát jelent, hogy a kijelzésre használt felület általában kisebb, ezért a kijelezhető információk mennyisége korlátozottabb. További nehézséget jelent, hogy a túl sok érzékelő olyan érzetet kelt a jármű vezetőjében, hogy ő már nem felelős a különböző veszélyek érzékeléséért, mivel azokat az érzékelőkre bízta. Motorkerékpároknál ütközés esetén a légsákok alkalmazása nehezebb, mint az autóiipari alkalmazásoknál. Különös veszélyt jelent egy eseteleges téves felfúvódás, hiszen ez majd minden esetben a jármű felboruláshoz vezet.

Egy sor eszköz a többi járművel vagy azok utasaival történő kommunikációt szolgálja. Jelenleg nem rendelkezünk általánosan elfogadott, erre vonatkozó szabványokkal⁷.

Mind az autóiipari, mind a motorkerékpárok alkalmazása szempontjából lényeges a kommunikáció a vezetővel. Ehhez más kommunikációs eszközökre van szükség, mint például egy asztali mérőműszerre.

A környezeti intelligencia alatt azt értjük, hogy a járműbe épített érzékelők és azok által szolgáltatott jelek feldolgozásából a lehető legteljesebb körű információt gyűjtjük össze a jármű környezetéből, és ezeket feldolgozva juttatjuk a járművezető és az utasok tudomására. Ha a jelenleg ismert rendszerek mindegyikét egy járműre telepítenénk, ez mintegy 8.000 euróval drágítaná meg az adott autót. Lényeges hangsúlyozni, hogy az érzékelés háromdimenziós és a lehető legszélesebb hullámhossz tartományra terjed ki, beleértve az akusztikus hullámok érzékelését is. A kamerák felbontása lényegesen nagyobb, mint a korábban megszokott érzékelők esetében volt⁸.

A reustolnak is nevezett állítható mikroellenállás technológiája kompatibilis mind a CMOS, mind a BiCMOS (bipoláris és CMOS kombinált technológia), mind a MEMS technológiákkal. Maga az eszköz egy olyan mikromembránból van, amely egy a szilícium hordozóban kialakított üreg felett helyezkedik el. A membrán felületén egy vezető disszipációs réteget hozunk létre, amely általában polyszilícium. Ha ezt a mikromelegítőt egy levegővel telített üveg felett elhelyezkedőnek tekintjük, akkor annak hőszigetelő képessége nagyon nagy, és működési hőmérséklete elérheti a 800–1000 °C-ot is⁹.

⁶ Mst2/02/21

⁷ Mst2/02/34

⁸ Mst2/02/37

⁹ [NANO, 9/2/5]

Példaképpen megemlítünk egy olyan hangolható kondenzátort, amely szintén e technológiával készült. Ezek olyan kapcsolható, szilícium chipen megvalósított kondenzátorok, amelyek a rákapcsolt feszültség hatására változtatják a kapacitásokat. A változás egy folyamatos függvény szerint történik. A legnagyobb és legkisebb kapacitás aránya 17, a működési feszültség 20 V alatti, és jósági tényező 150–500 között van. Az eszköz működési frekvenciája 1–6 GHz¹⁰.

A webes világban is kiterjedten alkalmazzák a MEMS eszközöket. Így a különböző összetevőket tartalmazó biológiai minták szétválasztása történhet olyan elektroforézist megvalósító mikrocsatorna rendszerben, amely 20 különféle proteint kevesebb, mint 15 másodperc alatt szétválaszt. A módszer alapjául nem a szokásosan használt elektrokinetikus erőt használják, hanem működése hidrodinamikus erők felhasználásán alapszik¹¹.

Ezt az eszközt is MEMS-hez használt technológiákkal alakítják ki.

A Lab-on-Chip eszközök jellegzetes anyaga a szilícium volt. Ilyen mikrolaboratóriumokat ma már több gyártó szállít. A jellegzetes következő generációs eszközök azonban feltehetően egyre nagyobb százalékban fognak tartalmazni műanyagokat és üveget. Ezeket az eszközöket azonban igyekeznek szilícium technológiában kialakított módszerekkel így LIGA és mély RIE módszerekkel, valamint különböző lézeres technológiával kialakítani¹².

A LIGA technológia (**LIGA** – Lithographie Galvanoformung Abformung) egyike azon kevés elektronikai technológiai alaptechnológiáknak, amelyet Európában, nevezetesen Karlsruheban fejlesztettek ki. A technológia azon alapszik, hogy egy néhány GeV-os szinkrotron sugárzás segítségével végzik el a PMMA expozícióját. A nagy behatolási mélység eredményeképpen oszlopszerű struktúrák is kialakíthatóak ezzel az eljárással. A technológia következő lépésében előhívják a besugárzott rétegben kialakult ábrát, és ezt galvanikus úton fémmel vonják be. A másik elektródát az a vezető alaplap biztosítja, amelyen a reziszt réteget megmunkálták. Az így galvanizálással létrehozott fém minta öntőformaként szolgál [Kück, 2003]. A LIGA technológia segítségével kisméretű spektroszkópokat is kialakíthatunk, amelyek például vérminták analízisére is jól használhatók. Az eljárás segítségével különösen hosszú vékony tárgyak alakíthatóak ki előnyösen. Így például PMMA-ból készíthetünk 500 μm hosszú és mindössze 3 μm átmérőjű szálakat. Az eljárásnak van lézeres és ultrabolya változata is, segítségével szilíciumból is alakíthatunk ki ilyen típusú eszközöket. A technológia jól használható például optikai

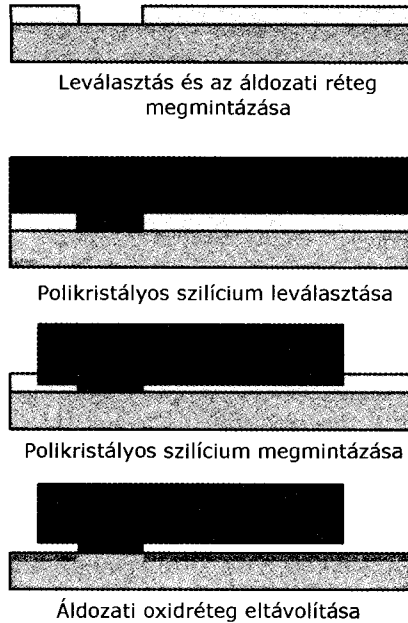
¹⁰ [NANO, 9/3/7]

¹¹ [NANO, 9/3/4]

¹² Mst2/02/28

távközlő rendszerek csatlakozóinak és mikrolencséinek kialakítására¹³.

Az egyes cégeknél eltérő technológiák alakultak ki a felületi mikromegmunkálásról. Egy áldozati réteget is tartalmazó technológia lépéseit szemlélteti a 3.1. ábra.



3.1. ábra. Áldozati réteget is tartalmazó mikromegmunkálási lépéssorozat

Forrás: mstnew 2/00 p20

Hétköznapi tárgyainkban is megjelentek a MEMS eszközök.

A korábban megszokott és mintegy száz éve használt töltőtollak működési elve azon alapult, hogy a tintatartóból – amely lehetett patron vagy a tollal egybeépített tartály – a tinta egy kapillárison keresztül jutott a tollhegyre és így történt az írás. A rendszer hátránya volt, hogy a tinta adagolása függött a hőmérséklettől és a légnyomástól, ami például repülőgépen történő alkalmazások esetén kellemetlen következményekkel járt.

Az intelligens töltőtoll ezeket a hátrányokat úgy küszöböli ki, hogy egy, a tinta áramlását szabályozó rendszert tartalmaz. Ez érzékeli a tartályban lévő tinta mennyiségét, erre egy vékonyréteg alapú kapacitív és induktív érzékelőt alkalmaz. Az intelligens töltőtoll rendszer tartalmaz egy mikro folyadékadagolót és egy mikrocspot is, amelyek szabályozásával adagolja a tintát. A töltőtoll jelenlegi fej-

¹³ http://int.mirl.itri.org.tw/eng/research/micro-electro-mechanical/liga.jsp?tree_idx=0600

lesztési állapotában igen alacsony fogyasztású, és egy három voltos óraakkumulátorral több, mint hét évig működik¹⁴.

A MEMS eszközök tokozása és hőháztartása is igen összetett problémákat vet fel [Székely, 2000],[Rencz, 2000], [Fűrjes, 2003], [Dűcső, 2003].

3.1.2. Mikroelektrooptikai rendszerek

A mikroelektrooptikai rendszerek (MEOS – Micro-Electro-Optical-Sysetems) tipikus alkalmazási területei az optikai hírközlés területén találhatóak. Egyik jellegzetes alkalmazási példa az optikai szál és a félvezető eszköz csatlakoztatására kialakított V-jellegű árkok kialakítása. Ezt a folyamatot mind üvegen, mind indium-foszfidban elvégezhetjük¹⁵.

3.1.3. Nanoelektromechanikai rendszerek

NEMS alapú háromdimenziós gyorsulásmérőt fejlesztettek ki, amely egy token belül tartalmazza magát az érzékelőt és egy soros digitális kimenetet megvalósító áramkört is. (NEMS – Nano-Electro-Mechanical Sysems) Az eszköz lehetővé teszi, hogy a kéz mozgásával vezéreljünk bizonyos eszközöket. Az eszköz 3000 g gyorsulásig működőképes így különösen alkalmas mobiltelefonokban, játékokban és autóiipari alkalmazásokban történő felhasználásra¹⁶.

A szén nanocsöveken kívül arany és ezüst nanocsövek is kereskedelmi forgalomba kerültek. Ezek mechanikai tulajdonságai azonban elmaradnak a szén nanocsövek tulajdonságai mögött. Ezek potenciális alkalmazása nanoérzékelőkben a katalízisben és a chip felületén megvalósított kémiai reakciókban lehetséges¹⁷.

Lehetőség van a CMOS-eljárással kompatibilis módon MEMS-mikrofonok előállítására is. Ezek a mikrofonok igen közel álló paraméterekkel állíthatóak elő a CMOS-technológiára jellemző nagy kihozatali százalékkal, és kiterjedt alkalmazásra számítanak személyi számítógépekben, digitális kamerákban és egyéb hordozható eszközökben¹⁸.

Más elven is készíthetőek szilícium mikrofonok, ekkor a membránt poliszilíciumból alakítják ki. Ezt az elrendezést mutatja a 3.2. ábra.

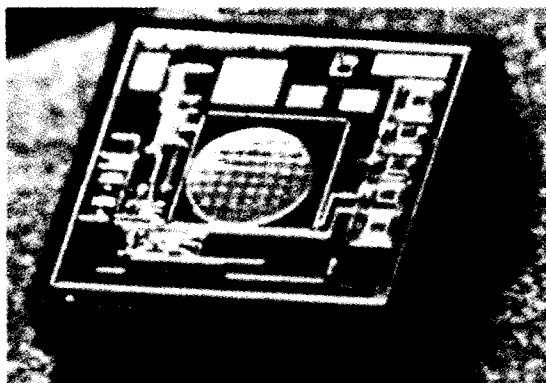
¹⁴ Mst2/02/39

¹⁵ [Dantec, 1197]

¹⁶ [NANO, 9/3/5]

¹⁷ [NANO, 9/3/16]

¹⁸ [NANO, 11/7/6]



3.2. ábra. Poliszilíciumos membránnal kialakított szilícium mikrofon

Forrás: Mstnews 2001 p40.

3.1.4. Nanoelektrooptikai rendszerek

A BIOMEMS-MEMS-ek fejlődése elsősorban a folyadékok mikroméretű áramlása szempontjából nagyon fontos. Ezek az áramlási folyamatok mind a tüzelőanyag-cellákban, mind az űrkutatási alkalmazásokban igen lényeges szerepet játszanak. A folyadékok áramlása igen bonyolult keresztmetszetű csatornákon keresztül történik. Ezek ma már háromdimenziós szoftverekkel modellezhetők. A modellezés során meghatározhatók azok a geometriai paraméterek, amelyek az áramlás dinamikáját befolyásolja¹⁹.

A fotonikai mikrochipek már nem tartoznak többé az álmok világába. Kialakításuk során szilícium nanotechnológiát használnak. Egy ilyen eszköz a csatoló, ahol a chip 5 μm -es optikai szálat tud csatolni 200 nm-es hullámvezetőhöz a csatolás hatásfoka 95%²⁰.

A MEMS-ek alkalmasság tehetők arra is, hogy segítségükkel függőleges üregű, felületén világító (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser) hangolható lézereket hozzunk létre. Ezekben a fényforrásokban a hordozó először egy elosztott, n-típusú Bragg-reflektort hozunk létre, ezt követi a kvantum gödrökből kialakított aktív zóna, amely felületén egy p-típusú elosztott Bragg-reflektort alakítunk ki. A lézersugárzás a hordozó felületére merőlegesen egy fém kontaktusban kialakított lyukon keresztül lép ki. Itt tehát, ellentétben a hagyományos félvezető lézerekkel, a meghajtó áram és a keletkező koherens sugárzás iránya megegyezik. Ez adja azt az előnyt, hogy például nagy felületű, több pontban önállóan vezérelhető kijelzőket hozzunk létre [Mojzes, 1998]. A technológia jelenlegi fejlettségi szintje mellett egy három inch átmérőjű GaAs szelet felületén több tízezer elemi lézerstruktúrát alakíthatunk ki. Az eszköznek ismert mind a szelet felső, mind a szelet

¹⁹ [NANO, 9/3/1]

²⁰ [NANO, 9/3/10]

alsó oldalán sugárzó változata az aktív réteg igazi nanomultiréteg szerkezet, amely tartalmaz 8–120 nm vastag AlGaAs, InGaAs és GaAs rétegeket, amelyek elvégzik a hagyományos félvezető lézerstruktúrában is alkalmazott gyűjtő (confinement layer) réteget is. Az egyes rétegek rácsillesztettek, kiinduló anyagként GaAs-et használnak. Az áram korlátozására vagy ioninplantált vagy oxidréteget alkalmaznak. Gerjesztés külső fényforrásból, általában egy másik félvezető lézerből történik²¹.

Az ilyen típusú lézerek például atomórákban kerülhetnek alkalmazásra²².

A vírusok alapján létrehozhatunk nanohuzalokat és nanogyűrűket is. Az M13-as vírus (bakteriofág) tulajdonképpen hordozónak használható. Az M13-as kb. 6 nm átmérőjű és 880 nm hosszú. Ha ezekhez a vírusokhoz speciális peptideket adagolunk, akkor egy nagyon jól meghatározott nanohuzalt kapunk. A folyamat hő hatására gyorsítható. Elsősorban adattárolásra, optikai eszközökre és nanoáramkörökre használhatók²³.

3.2. Aeroszolkok

A bennünket körülvevő környezetben igen fontos szerep jut azoknak az ionoknak és azoknak az ionoknak és aeroszol részecskének, amelyek különböző eredetűek, így lehetnek természetes eredetűek – pl. vulkánkitörésből származóak – vagy mesterséges eredetűek – így pl. különböző égéstermékek köztük a robbanómotorok kipufogó gázából származóak. Ezeknek a részecskének egy jelentős része a nanotechnológia által érintett mérettartományba esik. A részecskék méretét és jellegét igen erősen befolyásolják a keletkezés körülményei, az áramlástani paraméterek és a közegben jelenlevő egyéb részecskék.

A környezetszennyezés és a közegészségügy szempontjából is kiemelt fontossága van a dízelmotorokból származó égéstermékeknek²⁴.

A motorok emissziója szempontjából a kutatás fő iránya a kibocsátott anyag mennyiségének csökkentése, határesetben nullára redukálása. A dízelmotorok által kibocsátott anyagok – lévén nanorészecskék – kémiai tulajdonságát jelentősen befolyásolja a részecskék nagysága, amely az oxidáció körülményeitől függ. A folyamat általában egyszerű Arrhenius-kifejezéssel írható le, ahol az aktivációs energia nagyságrendileg 100 kJ/mol. Ez az aktivációs energia kb. 55 kJ/mol, kisebb, mint egy hagyományos égésnél. A részecskék nagysága 130 nanométernél éri el a

²¹ <http://em.wikipedia.org/wiki/VCSEL>

²² [NANO, 9/2/5]

²³ [NANO, 9/2/5]

²⁴ <http://www.chem.umn.edu/netstep/2003/march/5roberts.html>

maximumát, azonban jelentős számú részecske nagysága a nanotartomány felső határába esik.

A hagyományos gyertyaláng is termel nanorészecskéket, amelyek nagyságrendje a 10–300 nanométer tartományba esik. Találtak ettől kisebb méretű részecskéket is, különösen akkor, ha a láng felett légáramlatot hoztak létre. Ekkor a részecskék 1,1–2 nanométer tartományba estek²⁵.

Itt jegyezzük meg, hogy a kémiai módszerekkel létrehozott nanorészecskék előállításában igen fontos szerep jut a prekursoroknak. Ezek halmazállapota lehet szilárd, folyékony vagy gáz. A kémiai folyamatok megkezdésekor a prekursorok és a reakcióban résztvevő anyagok különböző halmazállapotúak is lehetnek. Az első lépésben egy új fázist hozunk létre. Ez ritkán ugyan, de elvezethet önmagában is nanorészecskék képződéséhez, de gyakran további lépéseket, így pl. porlasztást kell beiktatni. Nagyon gyakran további kémiai lépések is szükségesek a kívánt termék létrehozásához. Ezeket a részecskéket leggyakrabban gázokban hozzák létre. Ezek között igen fontos szerepet játszik a titán-dioxid, amelyet por formájában forgalmaznak. Ilyen anyag még a cink-oxid is, amelyet korábban elsősorban optoelektronikai alkalmazásokban ismertünk.

A dízelmotorok kipufogógázaiban igen fontos jelentősége van a fémtartalomnak. Ezt általában tömegspektrometriás módszerekkel vizsgálják. Ha a kipufogógázokban megnő a vastartalom, akkor a nanorészecskék mérete és mennyisége is növekszik. Ugyanez áll fenn, ha a motor terhelését növelik. Ha több a vastartalom, a keletkező részecskék koagulálhatnak [Lee, 2004].

3.3. Kolloid rendszerek

Utólag visszatekintve feltehetően a kolloid rendszerek voltak az első tömegesen alkalmazott nanoobjektumok. A XX. sz. eleje óta kutatásuk elsősorban a kémia területére koncentrálódott, és ilyen típusú oldatok vizsgálatából vontak le következtetéseket.

A kolloid rendszerek lehetnek félvezető tulajdonságúak is. Így az optoelektronikában jól ismert PbS és a CdSe, amely szilárd állapotban is félvezető, kolloidban is megtartja ezt a tulajdonságát [Joó, 1994]. A nanokolloidok kiterjedt alkalmazást jelentenek az egészségügyben. Elsősorban a szervezet oxigénellátását javítják segítségével. Hatásmechanizmusuk a negatív oxigén ionokban gazdag gyógyvizekhez hasonló²⁶.

²⁵ <http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a772844076-jumtype=rss>

²⁶ http://www.provitass.org/Newsletter/Weiter_Texte/NanoHybrin.htm

Mind a környezetünkben, mind a földalatti vizekben jelentős mennyiségben találhatóak a nehézfém fázisok különféle kolloid állapotban [Utsunomiya, 2004].

Az ún. szol-gél bevonatok és vékonyrétegek előállítása és felhasználási lehetőségeinek vizsgálata az elmúlt évtizedben került a felületkémi kutatásokkal foglalkozó szakemberek érdeklődésének előterébe. Ezen típusú rendszerek szintéziséhez szükséges alapvető fizikai-kémiai és kolloidkémiai ismeretek ugyan nagyrészt már régóta ismeretesek voltak, „újrafelfedezésük” mégis elsősorban a nanotechnológia térhódításának köszönhető.

Szol-gél eljárás alatt azt a műveletsort értjük, amikor a kialakítandó nanométer vastagságú bevonat alkotóelemeit, vagyis a kolloid mérettartományba eső (1–500 nm átmérőjű) részecskéket az ún. prekursor anyagból kiindulva folyadék közegben állítjuk elő. A részecskék keletkezésének folyamata minden esetben két egymást követő lépésből áll: először a prekursor molekulák hidrolízise következik be, majd ezt követően kondenzációs lépések eredményeképpen alakulnak ki a nanoméretű részecskék. Ennek eredményeképpen első lépésben egy stabil kolloid rendszert, azaz szolt állítunk elő. A második lépésben ebből a folyadék közegű rendszerből képezzünk egy, még jelentős folyadékmennyiséget tartalmazó (nedves) réteget a bevonandó felületen. Ebből pedig megfelelő szárítási és hőkezelési eljárásokat alkalmazva alakítjuk ki a bevonat végső állapotát, természetesen a tervezett alkalmazásnak leginkább megfelelő módon [Kálmán, 2003].

3.4. Összefoglalás

Ebben a fejezetben a mikroelektronika és a nanotechnológia közötti határterületet tekintettük át. E területen igen reményteljes K+F eredmények vannak, tömegmértékben is megjelentek az alkalmazások. A legfontosabb felhasználó az autóipar, ami különösen reményteljessé teszi az alkalmazások tömegessé válását. Az itt alkalmazott technológiák alapvetően szilícium egykristályok megmunkálását teszi lehetővé, de fontos anyagot jelent az üveg is.

3.5. Irodalomjegyzék a 3. fejezethez

- [Dantec, 1997] Le Dantec R., Miu, C., Benyattou, T., Guillot, G., Seassal C., Leclercq, J.L., Gendryx, L., Viktorovitch Benferhat P. R.: Optical characterization methods of InP based micro-opto-electro-mechanical systems. Proceedings of SPIE – vol 3008., 1997. pp 258–264
- [Dúcsó, 2003] Dúcsó, Cs., Ádám, M., Fürjes, P., Hirschfelder, M., Kulinyi, S., Bársony, I.: Explosion-proof Monitoring of Hydrocarbons by Micropellistor. Sensors and Actuators, B 95, pp. 189–194 (2003)
- [Fürjes, 2003] Fürjes P.: Hőátvitel szilícium mikrogépészeti szerkezetekben. PhD értekezés, 2003.
- [Hyman, 1999] Hyman, D., Lam, J., Warneke, B., Schmitz, A., Hsu, T.Y., Brown, J., Schaffner, J., Walston, A., Loo, R.Y., Mehregany, M., Jae Lee: Surface-micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol.9, 1999. p.348–61.
- [Joó, 1994] Joó P.: Határfelületi elektrokémia – különös tekintettel a félvezető kolloidokra. A felületi- és kolloidkémia aktuális problémái (Szerk.: Hörvölgyi Z., Csemesz F., Pászli I.) MKE Továbbképző tanfolyamai I. Magyar Kémikusok Egyesülete, Budapest 1994. 18–22.
- [Kálmán, 2003] Kálmán E., Csanády A-né: Nanoszerkezetű bevonatok a felületvédelemben. Magyar Tudomány, 9.kötet pp.1154–1165 (2003)
- [Kück, 2003] Kück, H.: LIGA Technology. Universität Stuttgart, izfm 2003, 06. 10.
- [Lee, 2004] Lee, D., Miller, A., Kittelson, D., Zachariah, M.R.: Single-Particle Mass Spectrometry of Metal-Bearing Diesel Nanoparticles. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.
- [Mojzes, 1998] Mojzes, I., Kökényesi S.: Fotonikai anyagok és eszközök. Műegyetemi Kiadó, 1998.
- [Rencz, 2000] Rencz, M., Székely, V., Kohári, Zs., Courtois, B.: A method for thermal model generation of MEMS packages. Proc. of MSM2000, San Diego, USA, pp. 209–212 (2000)
- [Székely, 2000] Székely, V., Poppe A., Rencz, M., Rosental, M., Teszéry, T.: THERMAN: a thermal simulation tool for IC chips, microstructures and PW boards. Microelectronics Reliability, vol.40, pp.517–524 (2000)

- [Utsunomiya, 2004] Utsunomiya, S., Traexler, K., Wang, L-M., Ewing, R.C.: Nanoscale Heavy Phases on Atmospheric and Groundwater Colloids. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.

Van valami varázslatos a tudományban. A tények csekély befektetéséből a föltevések bőséges profitja árad vissza az emberekhez.
Mark Twain (1835–1910)

4. Anyagtudományi aspektusok

Ebben a fejezetben a nanotechnológia anyagtudományi aspektusairól adunk áttekintést. Ezek az eredmények nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy a nanotechnológián belül önálló diszciplínává válik a nanotudomány. E területen jelenleg az anyagok igen széles választékát vizsgálják, és számos nanojelenséget tárnak fel. Igen lassan körvonalazódik, hogy melyek lesznek azok az anyagok, amelyek döntő hatást fognak gyakorolni a nanotudomány fejlődésére, és önálló piaci termékként is megjelenhetnek.

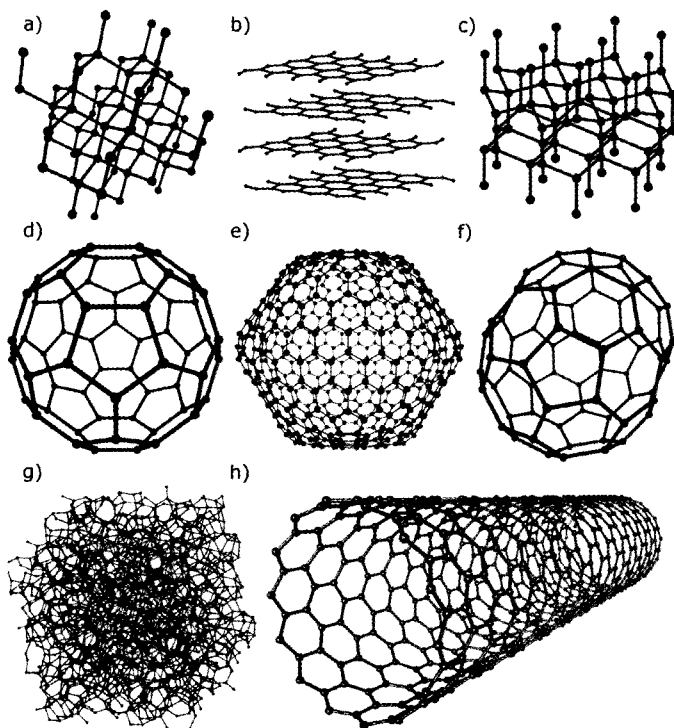
4.1. A szén mint a nanotechnológia alapanyaga

A szén két allotrop módosulatát, a gyémántot és a grafitot az emberiség már az ókorban is ismerte és használta. A gyémánt keménysége és fénye miatt különös tisztelettel bírt, a grafit épp ellenkezőleg: puhasága miatt volt közismert. E két igen eltérő tulajdonságot a szén kétféle kötési típusa okozza. A gyémánt változatban ugyanis a szén tetraéderes kristályrácsba rendeződik, a grafit pedig réteges hatszög-szimmetriájú szerkezetekben kristályosodik. Ez tehát az oka a két igen eltérő tulajdonságú anyag létezésének. Ezeket a hatszög szimmetriájú, egyetlen atomnyi vastagságú síkokat grafén síknak nevezzük. A grafén sík rácsállandója $2,46 \text{ \AA}$. A szén kötése ekkor sp^2 -típusú.

A síkokat a mindennapi gyakorlat szerint is térbeli ábrákká alakíthatjuk át. A síkokat eltérő módon tekerhetjük fel, és illeszthetjük össze. Ha feltételezzük, hogy a hatszög-szimmetriájú síkok hibamentesek, akkor azokat háromféle módszer szerint tekerhetjük fel, és illeszthetjük varratmentesen. Mind az ötszög, mind a hétszög jellegű szimmetria egyaránt hibahelyet jelent ebben a hálózatban. Az első esetben a szénatomokból álló hatszögek, képzeletben elvágvá a nanocsövet, szabá-

lyos cikk-cakk rajzolatot hozhatnak létre. A szabályos rendben beépülő öt, és héttagú gyűrűk a nanocső feltekeredésével, azaz spirális alakzatok kialakulásával jár.

A grafit és a gyémánt között átmeneti formáció is előfordulhat, lényegében ezt is egy önálló allotrop módosulatként foghatjuk fel. Ezt a módosulatot lonsdaleite-nek nevezzük¹. Ebben a változatban a gyémántnak lényegében hexagonális kristálystruktúrája marad, amely lényegében megőrzi a grafitét, amelyből keletkezett. Ezt az anyagot először meteoritokban találták meg, ahol a magas hőmérséklet és az extrémisan magas nyomás a grafitot gyémánttá alakította. Elnevezését Kathleen Lonsdale (1903–1971) brit ásványkutatónőről kapta. A későbbiekben létrehozott C_{60} , C_{540} , és C_{70} valamint az amorf szén további allotrop módosulatoknak tekinthető. Ezeket a 4.1. ábrán mutatjuk be.



4.1. ábra. A szén allotrop módosulatainak összegzése. Forrás:

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Eight_Allotropes_of_Carbon.png

a) gyémánt, b) grafit, c) Lonsdaleite, d) C_{60} (Buckminsterfullerén), e) C_{540} , f) C_{70} (ennek szerepére még visszatérünk), g) amorf szén, h) egyfalú nanocső.

¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Lonsdaleite>

A feltekerési mód többféle módon jellemezhető. Ilyen jellemző lehet az elektronok eloszlása a Fermi-szint környezetében. Ilyen szempontból kétféle állapotot különböztethetünk meg. A nanocsövek fémes jellegűek, ha a Fermi-energia környezetében valamennyi energiaállapot sűrűsége nullától különböző. Ha a Fermi-energia környezetében található egy tiltott sáv, akkor félvezető tulajdonságú nanocsőről beszélhetünk. Ez a tiltott sáv teszi lehetővé, hogy elektronikus eszközöket hozzunk létre nanocsövek mint aktív elemek felhasználásával. Elvben természetesen elképzelhető, hogy ezeket a félvezető tulajdonságú szén nanocsöveket fémes tulajdonságú nanocsövekkel érintkeztessük mindkét végükön és így fém-félvezető-fém átmenetet hozzunk létre és így csatlakozzunk a külső makroszkopikus áramkörökhöz.

Megállapították, hogy a félvezető nanocsövek tiltott sávjának szélessége fordítottan arányos a nanocső átmérőjével. A kísérleti adatok azt mutatják, hogy az egyfalú, tehát egyetlen grafén sík feltekerésével képződő szén nanocső jellemző átmérője egy-két nanométer közötti mérettartományba esik. Érdekes összevetni ezt az átmérőt azzal, hogy a grafit esetében a legközelebbi szomszéd szénatomok távolsága ennek az átmérőnek mintegy tizede.

Képzeli el azt, hogy több különféle átmérőjű szén nanocsövet egymásba helyezünk, így olyan koncentrikus csősorozat jöhet létre, amelyek külső jellemző átmérője már néhányszor 10 nanométer és a falak közötti távolság 0,339 nm.

A nanocsövek igen fontos jellemzője vezetőképességük. Ez a fajlagos vezetőképesség mintegy 10^7 A/cm². Ha ezt az értéket visszaszámoljuk, akkor a szén nanocső esetében mintegy 100 μ A erősségű áramot kapunk. Ez igen nagy érték, amint a későbbiekben látni fogjuk, elsősorban az optoelektronikai alkalmazásoknál jelent előnyt. Úgy kell ugyanis ezt elképzelni, hogy minden egyes nanocső egy olyan elektronforrás, amely 100 μ A nagyságú áramot bocsát ki. Ilyen források felhasználásával miniatűr röntgenkészülék is készíthető, ez kevesebb energiát fogyaszt, mivel nem kell felfűteni a katódot².

A kétféle vezetési típusú szén másik oldalról jelentős technológiai nehézséget okoz. A véletlenszerűen előállított nanocsövek ugyanis egyidejűleg és egy térben képződnek, mintegy egyharmaduk fémes vezetést, a többi félvezető tulajdonságot mutat. Az alkalmazáshoz vagy olyan technológiát kell majd kifejleszteni, amely csak egyfajta vezetési tulajdonságú nanocsöveket állít elő, vagy szét kell a kétféle anyagot válogatni.

Kvantumpöttyök is előállíthatók szénből. Ezek kiváló lumineszcenciás tulajdonságokkal rendelkeznek. Előállításuk környezetbarátabb, és ezért az orvostudományban és a biológiában is használhatók lesznek. Előállításukra lézeres ablációt használnak, és a folyamatot vízgőz jelenlétében végzik. Az így előállított eszközök-

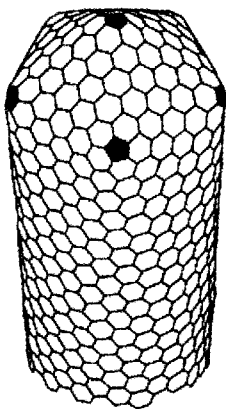
² <http://utsusemi.nims.go.jp>

ket polimer bevonattal látják el. Ha ezeket a pöttyöket megvilágítják, fényt emitálnak a látható és a közeli infravörös tartományban³.

4.2. Nanocsövek

A nanocsövek alapvető változata egy egyszerű cső, amelynek mérettartománya a nanométer nagyságrendjébe esik. Gyakran ennek a csőnek a végén 12 ötszögből álló struktúra van, amely lezárja a csövet. Ezt a struktúrát fullerénnek nevezzük. Használatos még a buckminsterfullerén elnevezés is. Mindkét elnevezés adózik Richard Buckminster Fuller (1895–1983) amerikai mérnök, építész, matematikus, filozófus emlékének. Ő volt az, aki a geodéziai kupolát megalkotta, amelyben az épület méreteit a beépített anyagok szilárdsága nem korlátozza.

A 4.2. ábrán egy másfajta lezárási módot mutatunk be, ebben hat ötszög vesz részt.



4.2. ábra. Lezárt végű szén nanocső, amelyben a lezárásban hat ötszög vesz részt

Forrás: <http://utsusemi.nims.go.jp>

A különféle technológiákkal létrehozott szén nanocső hossza több ezer nanométer is lehet. A rendszer stabilitását a szénatomok kötési módja adja, ugyanis az atomok hatos gyűrűbe kapcsolódnak. E hatos gyűrűs elrendezés a grafit révén ismerős, a nanocső legegyszerűbb formájában alapvetően a grafit egy rétegének csővé alakítását jelenti. A fizikai jelenségek közül a kvantumfizikai jelenségek dominálnak, ez szerencsésen párosodik a grafit mint anyag jól ismert tulajdonságaival. A grafit ugyanis egyike azon kevés félfémeknek, amely félúton helyezkedik el a fémek és a félvezetők között. A jelenségek itt tulajdonképpen egy egydimenziós kvantumrendszerben zajlanak, ahol a méretek a nanométeres tartományba esnek.

³ NANO, 7/11/6

A nanocsövek jellegzetes tulajdonságai tehát a technológiával befolyásolhatók, azaz vezető és félvezető tulajdonságú nanocsövek állíthatók elő. Az előállítási technika nehézsége abban van, hogy a spontán keletkező nanocsövek kb. egyharmada olyan méret és struktúra kialakítású, hogy valódi elektromos vezetőként viselkedik. E vezetőben a grafit kristálysíkjában az elektronok egy meghatározott állapota adja csaknem a teljes vezetőképességet, a többi elektron nem képes elmozdulni. Az elektron-elektron kölcsönhatás az ún. Lüttinger-folyadékban leírt módon történik, ami azt is jelenti, hogy a kinetikai indukció dominál, majd négy nagyságrenddel nagyobb, mint a mágneses induktancia [Burke, 2002]. A kvantum kapacitás kb. egyenlő az elektrosztatikus kapacitással. Az egyes mennyiségek számszerű értékei

$$L_{\text{kinetic}} \sim 16\text{nH}/\mu\text{m}$$

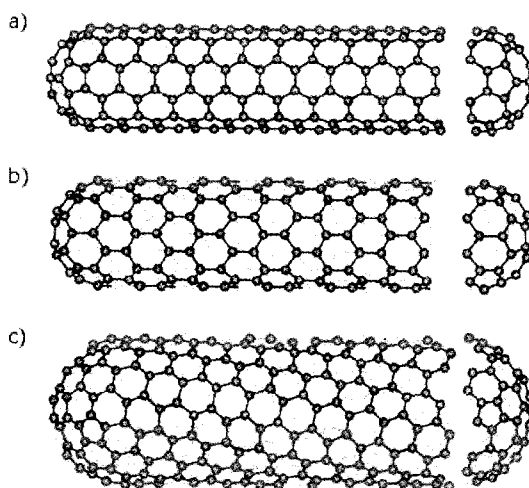
$$C_{\text{kvantum}} \sim 100\text{ aF}/\mu\text{m}$$

$$C_{\text{el.sztatikus}} \sim 50\text{ aF}/\mu\text{m}$$

A szén nanocsöveknek két nagy csoportja van: az egyfalú és a többfalú nanocsövek. Az egyfalú szén nanocső, mint említettük, egy egyetlen atomi réteg vastagságú grafén háló feltekerésével keletkezik, a többfalú grafitcsövek koncentrikusan egymásban elhelyezkedő egyfalú csövekből épülnek fel. A hengerek egymástól 0,339 nm távolságban helyezkednek el. Az egymásba épülő csövek száma elérheti akár a 100-as számot is. A szén nanocsövek valódi csövek, azaz beléjük különféle anyagok tölthetők be, ill. áramoltathatóak át.

Nanocsövek előállíthatóak szilíciumból és vegyület-félvezetőkől is.

Az egyfalú szén nanocsövek a feltekerés módjától függően háromféle alakzatba sorolhatóak, ezt a 4.3. ábra segítségével szemléltetjük.



4.3. ábra. A háromféle szén nanocső: a. karosszék, b. cikk-cakk, c. királis

A „karosszék” típusú szén nanocsövek félvezető tulajdonságúak a „cikk-cakk” típusúak vezető tulajdonságúak és a királis csövek képezik a harmadik típust. Az egyes típusok egymás közt keveredhetnek, ami szétválasztásukat igen nehézé teszi. A létrejövő nanocsövek közel kétharmada félvezető, azaz feszültség vagy fényimpulzus hatására az elektronok a vegyérték sávból a vezetési sávba emelkedhetnek, ahol szabadon mozognak. Az emelés magassága a tiltott sáv szélességétől függ. A nanocsövek kis mérete következtében a rajtuk keresztül áramló elektronok igen jól ellenőrizhetők. A Coulomb-akadálynak nevezett jelenség úgy működik, hogy a nanocsőbe egy időben csak egy elektront enged be. Ez megnyithatja az utat az egy elektronos tranzisztor létrehozása felé.

Elméleti eredmények alapján a nanocsövek hővezetési tulajdonságai is kiválóak. Hővezetésük megközelíti a gyémánt és a zafír értékét, ezért segítségükkel nagy hatásfokú, nagyfelületű, olcsó hővezetőket is előállíthatunk.

A hibátlan rácsszerkezetű szén nanocsövekben az elektronok ballisztikus, azaz szóródás nélküli pályán mozognak. Ezt a jelenséget a nagyfrekvenciás, kisméretű félvezető eszközökben alaposan tanulmányozták. Ezekben az eszközökben néhány 10 db elektron mozog, leírásukra egyenként a Monte-Carlo szimulációt használják. Az ilyen transzportfolyamatokra a hagyományos statisztikai leírás a kis egyedszámok miatt már nem alkalmazható. Ebben a transzport folyamatban, az elektronok sem egymással, sem a rács elemeivel nem ütköznek. Ezért az ilyen vezetés szórás nélküli pályán való mozgást jelent. Tudjuk, hogy ez a szórás okozza a fémek és félvezetőkben az elektromos ellenállást. Ilyen ballisztikus pályán mozogva az elektronok hosszabb úton megőrzik spinjüket. E jelenséggel az elektronikus eszközök egy teljesen új osztálya állítható elő, amelyekben az alapműködési elv azon alapszik, hogy az elektronok spinjétől függően kapcsolnak ki és be, szemben a hagyományos elektronikus eszközökkel, amelyek az elektronok töltésére reagálnak.

A nanocsövek esetében is szerephez juthat a megtervezett anyagok előállítása, mivel a különböző átmérőjű nanocsövekhez különböző tiltott sáv értékek tartoznak. A legkisebb átmérőjű nanocsövek esetében csak kevés szabad elektron állapottal számolhatunk és ezek is távol helyezkednek el egymástól. Ezek a nanocsövek jelentik tehát a széles tiltottsávú félvezető anyagok megfelelőit. Ha alkalmas módon – például a technológia változtatásával – a nanocsövek átmérőjét növeljük, az energiaállapotok száma ekkor megnövekszik és a tiltott energiaértékek összehasonorodnak. Ezzel a folyamatos átmenettel eljuthatunk az egészen kis tiltottsáv-értékű félvezető anyagoktól egészen a tiltott sáv nélküli csövekhez, amelyek már fémek vezetési tulajdonsággal rendelkeznek.

Ez a folyamatos átmenet szinte sugallja, hogy fém-félvezető átmeneteket hozunk létre, amelyek például diódákban is alkalmazásra kerülnek.

Grafít nagyenergiájú besugárzásával is állíthatunk elő szén nanocsöveket [Gyulai, 2003.].

Az így besugárzott grafit felületén furcsa szörszerű képződmények is keletkeztek, amellyel tulajdonképpen a pikoszekundum időskálán 10 μm hosszúságú nanocsövek nőttek, amelynek kb. hangsebességgel való növekedési sebesség felel meg [Gyulai, 2003].

Sikerült olyan elágazó nanocső struktúrákat is létrehozni, ahol a 6-os gyűrű helyére 5-ös vagy 7-es gyűrűt beépítve Y alakú elágazást hozhatunk létre.

Az egyfalú és a többfalú szén nanocsövek tulajdonságait a 4.1. táblázatban hasonlítottuk össze. Hangsúlyozzuk, hogy a más anyagból kialakított hasonló felépítésű struktúrák ettől gyökeresen eltérő tulajdonságokat mutathatnak.

4.1. táblázat. Szén nanostruktúrák összehasonlítása
(Zádor Péter Dávid után)

Anyag típus	Fontosabb tulajdonságok
Egyfalú szén nanocső (SWNT)	Az egyfalú szén nanocsöveknek kitűnő mechanikus és elektrokémiai tulajdonságaik vannak. Polimerekké való egyesítésük viszont nehézségekbe ütközik. Az SWNT-nek egy atom széles fala van és az átmérője tipikusan 1,4 nm de 0,3–2 nm-es tartományban is mozoghat. Hosszuk 200 nm felett van, ha katalizált CVD eljárást használunk.
Többfalú szén nanocső (MWNT)	A többfalú szén nanocső jó elektrokémia tulajdonságokkal rendelkezik, az ára mérsékelt és van mód a polimerekké való egyesítésre is; nanocsövek egy csoportját növesztik és ezek köré öntik a polimert. Nincsenek annyira jó és változatos tulajdonságai, mint az SWNT-nek, de könnyebb vele dolgozni a nagyobb méretei miatt. A CVD módszerrel előállított típusnak az átmérője 10–50 nm, és a hossza 1–50 μm , az úgynevezett „bambusz” (bamboo) típusnak pedig 20–40 nm az átmérője, és 1–20 μm hosszú.
CNF	A CNF-nek (CNF – Carbon Nano Fiber) a másik két típusához képest szerényebb elektrokémiai tulajdonságai vannak, de polimerekké szervezni ezt a legegyszerűbb a nagy méretei miatt. A CNF szerkezete több koncentrikus belső csőből áll, melynek falai 20 fokos szöget zárnak be a hosszirányú tengellyel. Bár a CNF hasonlít a nagy átmérőjű MWNT-hez, a különbség a kettő közt, hogy a CNF nem folytonos csövekből áll, és a felülete az egyes csőfalak végén lépcsős. Két jellegzetes fajtája a CNF:PR-24 (–65 nm átmérőjű), és a PR-19 (130 nm átmérőjű), a hosszuk 50–100 μm .

Önszerveződő helikális nanocsövekből is hozhatunk létre elektronikus eszközöket. Ezek hossza elérheti a 10 mikrométert. Felépítésükhöz több grafén síkot használhatunk. Ezek a csövek, amelyek 0,335 nanométer átmérőjűek, önszerveződés-

sel stabil formációt hoznak létre. A vezetőképességük a hőmérséklettel nő, így ezek konvencionálisan félvezetőknek tekinthetők.

A szén nanocsövön kívül az irodalomban nagyszámú egyéb anyagból előállított nanocsövekről is sok adatot találhatunk. Ezek közül is kiemelkednek a TiO_2 anyagú nanocsövek, amelyek magas fokon rendezett sorozatként állíthatóak elő [Grimes, 2007]. Az anodikusan oxidált titán felületén képződő nanocső oszlopok falvastagsága 13 nm, a pórusok nagysága hozzávetőleg 30 nm. Szenzorokban, víz fotoelektrolíziséhez használják őket. Az ilyen porózus struktúrák jól használhatóak hidrogén detektálására, elektromos ellenállásuk mintegy kilenc nagyságrendet változik, ha a hidrogén koncentráció szobahőmérsékleten eléri az 1000 ppm értéket.

4.3. Nanovezetékek

A nanovezetékek (nanowires) mind kör, mind hasáb keresztmetszetben előállíthatók. Ennek megfelelően beszélünk szálról vagy szalagról. Mi a továbbiakban egységesen a nanovezeték kifejezést használjuk. A nanovezetékek növekedése általában egy fém részecske jelenlétében kezdődik, amely katalizátor szerepet játszik. A vezetékek preferált növekedési iránya az $\langle 111 \rangle$ irány [Wagner, 1970]. A növekedés a gőz-folyadék-szilárd fázis mechanizmus alapján történik (VLS – Vapor-Liquid-Solid). Az $\langle 111 \rangle$ irányú nanovezetékek nagy hátránya, hogy nagy a hibahelyek száma [Krishnamachari, 2005], ezek általában a növekedésre merőleges irányban képződnek.

Elsősorban a félvezető típusú nanovezetékek vannak az érdeklődés középpontjában. Ezek anyaga lehet vegyület-félvezető (InAs, InP, GaAs, GaP), de lehet oxid is, így például béta- Ga_2O_3 is [Zhi, 2004; Yang, 2004; Rao, 2003; Romane, 2005].

A nanovezetékek előállítására általában magas hőmérsékletű folyamatokat használnak, hogy a katalitikus hatás kellően érvényesüljön.

A mikroelektronikában széles körben használt szilíciumból is állítható elő nanovezeték kobalt nanorészecskék katalizátorként való alkalmazásával. A folyamat hidrogén atmoszférában történik, a magas hőmérsékletű folyamat során a szálak a szilícium egykristályból nőnek ki. A szálak átmérője 50–60 nanométer közé esik és hosszúságuk a mikron, és milliméter mérettartományba esik. Mind egyedülálló, mind egymással összefonódott szilícium szálakat sikerült előállítani. A kísérleti vizsgálatok arra utalnak, hogy a növekedés gőzfázisból történt [Carter, 2005].

Mivel a nanovezetékek általában félvezető tulajdonságaik miatt érdekesek, ezekhez fém kontaktusokat kell készíteni. A fém-félvezető nanovezetékek alapú eszközökben tehát kontaktus ellenállást kell mérni [Mohney, 2005]. Ennek során meghatározásra kerül a nanoméretű elektronikai eszközökben az ohmos kontaktus

ellenállása a félvezető nanovezetékekhez. Meghatározó paraméter, amelyet a fém-félvezető átmenetnél vizsgáltak, az R_c kontaktustellenállás és az ebből kapható ρ_c fajlagos kontaktellenállás. A fajlagos kontaktellenállás vizsgálata akkor praktikus, ha különböző geometriájú kontaktusokat akarnak összehasonlítani. Az R_c kontaktusellenállás a ρ_c / A összefüggés segítségével kapható meg, ahol A a kontaktus felülete. Több tesztstruktúrát is használnak a kontaktus-ellenállás meghatározására. Általában a távíró egyenlet (transmission line) modellt használják az áram transzport leírására. A leggyakrabban használt vizsgálati módszer a négytűs elrendezés.

4.4. Multirétegek mint speciális nanostruktúrák

Érdekes fizikai jelenségeket mutató nanostruktúrák hozhatók létre olyan módon, hogy néhány atomi sor vastagságú különböző anyagokból készített rétegek követik egymást váltakozva.

Így például erre a célra jó modell anyag az amorf szilícium/germánium multiréteg. Megjegyezzük, hogy a szilícium-germánium félvezető tranzisztor alapanyagként is lényeges szerephez jut.

A nanométeres anyagi rendszerek fizikai és kémiai tulajdonságainak vizsgálatánál a kvantummechanikai hatások sem hagyhatók figyelmen kívül [Csik, 2003], [Hasegawa, 2006].

A multirétegekben igen fontos szerepet játszanak a vegyület-félvezetők [Ivan, 2002], [Kikineshi, 2004].

Multirétegekben a réteges szerkezet miatt megjelenő mesterséges periodicitás módosítja a rétegrendszer sávszerkezetét és optikai tulajdonságait. Változtatva az egyes rétegek tulajdonságát és vastagságát egy sor széleskörűen használt félvezető eszköz modellstruktúrája állítható elő. Így készíthetők fotodetektorok, alagút-tranzisztorok, többszörös kvantumpotenciálgödör-lézerek is. A technika felhasználható arra is, hogy egyéb passzív optikai elemeket állítsunk elő, így például a függőleges üregű félvezető lézerekben használt Bragg-reflexiók hatást mutató tükröt is.

Az egyes rétegek természetesen egymással is kölcsönhatásba léphetnek, így ezekben a rendszerekben jól tanulmányozható a hőkezelés hatására létrejövő anyagátrendeződés, amely Auger-mélységprofilanalízis segítségével jól követhető.

A diffúzió vezethet kölcsönös keveredéshez is, ahol Si-Ge szilárd oldat alakulhat ki, amely optikailag átlátszóbb, így a hőkezelt mintákon a tiltott sáv szélessége megnövekszik.

Ilyen multirétegek eredményesen alkalmazhatóak a magneto-optikai adatrögzítésben például Co/Ni és Co/Pt multirétegek segítségével. Az adattárolás mellett adat kiolvasáshoz is felhasználhatók a vékonyrétegek, mivel a ferromágneses/nem mágneses anyagból készült rétegrendszernek mágneses térben ill. tér nélkül je-

lentősen különbözik az ellenállása. A jelenség GMR - óriás mágneses ellenállás néven került be közel két évtizede a számítógépek adattároló lemezegeibe (**GMR – Giant Magneto Resistance**).

A szén nanocsövekben az elektronok mozgását az ún. hullámcsomag-dinamikai módszer segítségével vizsgálhatjuk (**WPD – Wave Package Dynamics**). Ez az eljárás segítséget nyújt abban is, hogy az STM-képeket pontosan értelmezhessük [Márk, 2006].

4.5. Nanoobjektumok létrehozása vegyület-félvezető alapon

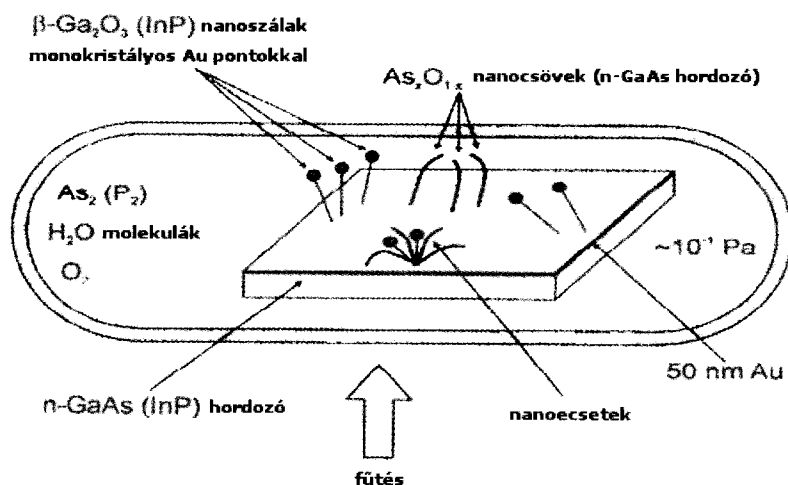
A nanoelektronikában használt a nanotechnológia által előállított két legismertebb alapelem a nanovezeték és a nanocső. E két termék létrejöttét nem minden esetben tudjuk eddigi ismereteink alapján megmagyarázni. Ez annak is a következménye, hogy a nanométeres tartományban sok esetben a korábbi modellek alkalmazhatatlanok az eszközök és a technológiai folyamatok leírására. A kísérletek során egy sor új jelenséggel találkozunk, amelyek okaira többnyire csak feltételezések léteznek. Viszont hogy tervezni tudjuk ezeket nanoméretű eszközöket, szükséges, hogy mélyebben megismerkedjünk növesztési módszereikkel, tulajdonságaikkal, fizikai hátterükkel, kiváltképp a vezetőképességükkel, legyen szó akár hő-, akár elektron-transzportról.

4.5.1. Félvezető nanovezetékek szintézise

Az alábbiakban ismertetett kísérletben a nanovezeték növesztés mechanizmusát kicsi, zárt evakuált térben vizsgálták, amely lényegében különbözik az eddig szokásos kísérletektől, amelyek jellemzően félvezető technológiai nagyberendezésekben készültek [Misák, 2006]. Kiindulási anyagként GaAs és InP epitaxiális kristályokat használtak (ld. 4.4. ábra), melyek közel 0,5 mm vastagságúak voltak.

A csiszolt kristályfelületeket $\text{NH}_3\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ keverékben maratták, desztillált vízben mosták, megszárították, aztán DC mágneses kamrába, vagy egyszerű vákuum-hőpárolgatós kamrába helyezték. Előzőleg egy vékony, kb. 50 nm vastagságú, és $10\text{--}15 \text{ mm}^2$ felületű aranyréteget vittek fel a kristály egyik felületére, de mindegyik kristálynak csak egyik oldalát vonták be arannyal. Ezután minden egyes példányt üvegampullába helyeztek (mely kb. 8–10 cm hosszú, és $1\text{--}1,3 \text{ cm}^3$ térfogatú volt). Ezt követően 10^{-1} Pa nyomást állítottak be, és lezárták az ampullát. A mintákat ezután melegítették és hőkezelték. A folyamat kezdetén a hőmérsékletet gyorsan növelték a választott hőmérsékletig, aztán hőkezelés következett $300\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ közötti hőmérséklettartományban, 1, 10, 30, 60 percen át. Az összes

mintát ugyanolyan folyamatnak vetették alá. A mintafelület szerkezetén jelentkező összes hőkezelő hatást mindenekelőtt megemelt hőmérsékleten, 550–700 °C-on tanulmányozták, mivel a folytonos aranyréteg szétszakadása miatti fraktálmintázatu formáció hatásai, alacsonyabb hőmérsékleten (350–450 °C-on) már ismertek voltak [Schusztar, 2003; Mojzes, 1998; Nemcsics, 2002]. A hőkezelés után az ampulákat természetesen hűtötték le szobahőmérsékletre, és közvetlenül a mérések előtt nyitották ki, bár hosszú időtartamú mintatartásnak köszönhetően, hőkezelt kristályfelület változás levegőn nem volt megfigyelhető. Összehasonlítóképpen hőkezelték hasonló mintadarabokat vákumpárológató berendezésben is, alacsony nyomáson ($<10^{-3}$ Pa).



4.4. ábra. A nanoszál-növesztés kísérleti elrendezése GaAs és InP kristályfelületen

A hőkezelt minta egész felületének morfológiai és szerkezeti vizsgálatára optikai, pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópiát (SEM, TEM), valamint röntgen és energiadiszipatív röntgen spektroszkópiát (EDS) használtak. A mintafelületeken formált nanotermékeket ultranagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkópiával (UHR TEM), a kristályos szerkezetüket pedig a kiválasztott terület elektron-diffrakciós (SAED) módszerével vizsgálták ugyanazon TEM-mel.

A hagyományos transzmissziós mikroszkópiát 200kV-on működő Philips CM 20 típusú elektronmikroszkóppal kiviteleztek, és nagyfelbontású képeket állítottak elő, a 300 kV-on működő JEOL 3010 UHR mikroszkóppal. SEM-et használtak a felület jellemzésére. TEM mintákat készítettek azon formált nanotermékek leválasztása által, melyeket előzetesen letettek a szubsztrát egy polimer mátrixára és elhelyeztek egy szénnel bevont réz rácson, illetve ugyanilyen mintákat készítettek

a felületükön nanoszerkezetekkel rendelkező GaAs és InP szubsztrát függőleges keresztirányú metszetének a csiszolása által is (Ar ionkezelést is beleértve).

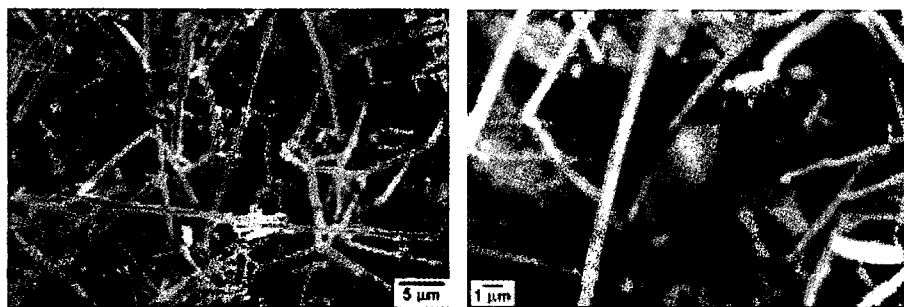
4.5.2. A kapott nanovezetékek

A hőkezelés elvégzése után az ampullákat felbontották, és a mintákat pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatnak vetették alá.

Olyan egydimenziós nanotárgyakat figyeltek meg, amelyek különböznek összetételben és alakban is. Ezek Ga_2O_3 (4.5.–4.7. ábra) és InP nanoszálak (4.8. ábra) valamint As_xO_y nanocsövek.

4.5.3. Ga_2O_3 nanoszálak

A 4.5. ábrán láthatóak az arannyal bevont GaAs hordozón történt nanotermék növesztésnek a képei.



a) teljes áttekintő kép

b) néhány nanoszál közeli képe

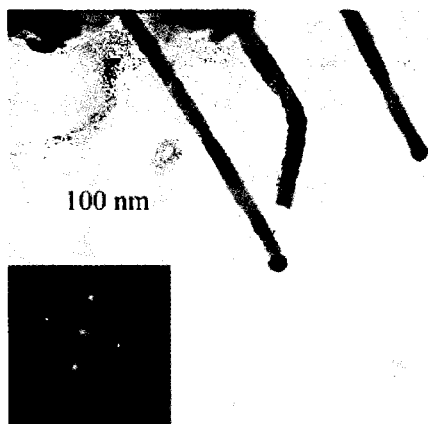
4.5. ábra. 50 nm vastagságú Au réteggel bevont GaAs hordozón történt Ga_2O_3 nanoszálnövesztés SEM képei

Amint látható a 4.5.a. ábrán a nanotermékek nagy területen, nagy sűrűségben nőnek, és ugyanolyan eloszlást mutatnak az egész hordozó felületén. A 4.5.b. ábra mutatja a Ga_2O_3 nanoszál képének egy nagyított változatát. Az átlagos hosszuk és átmérőjük egyenként 50 nm és 500 nm között volt. Egy általános nanovezetéknek véletlen irányultsága van, de néhány közülük függőleges irányba nő, valószínűleg a nanoszálnövények nagyon nagy sűrűsége miatt.

A hőkezelt GaAs mindkét felületén kerestek nanotermékeket, de főleg az arannyal bevont felületen találtak. A hordozó másik felületén is megfigyelhető volt néhány pamacszerű nanoszálcsoport, ezek azonban külön-külön helyezkedtek el, az összetételük pedig még nem tisztázott. Az viszont egyértelműen megfigyelhető volt, hogy szinte mindegyik nanoszálnak volt egy gömbszerű nanorészecske a he-

gyén, aminek az átmérője megegyezett a nanoszál átmérőjével. Így mondhatjuk, hogy a katalizátor részecske meghatározza a nanoszál méretét. Ez összhangban is áll a hagyományos VLS növesztési mechanizmusról tudottakkal.

TEM segítségével történt a Ga_2O_3 nanoszál részletes vizsgálata. A 4.6. ábrán egy TEM fotó látható, 2 db egyenként 200–300 nm hosszú nanoszálról, melyek átmérője 20–25 nm.



4.6. ábra. Két db 20–25 nm átmérőjű Ga_2O_3 nanoszál TEM képe. A képbeszűrés a megfelelő SAED mintát mutatja

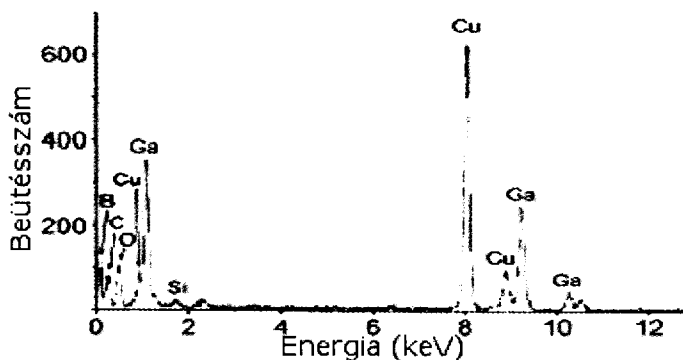
A nanoszálak többnyire egyenes irányultságúak, és az egész hossz tengelyük mentén egyforma átmérőjűek. Azonban az egyenes irányultságú nanoszálak mellett előfordultak ívben hajlottak is, melynek oka kapcsolatban lehet kristályhibákkal, különösen a nanoszálnövesztés alatti eltolódásokkal. Feltehetően hasonló a jelenség, mint a szén nanocsöveknél megfigyelt spirális növekedés (ld. 4.1. alpont). Ezek a nanoszálak túszerűek, vagyis nem üresek belül. A diffrakciós kontraszt kép megmutatja, hogy a nanoszálak kristályos szerkezetűek, de nem szimpla kristályosságúak (nem egyforma kontraszt). Az jól kivehetően látszik, hogy a nanorészecske sötétebb kontraszttal csatolódik a nanoszál csúcsához. Ez megfigyelhető jellemző volt szinte az összes tanulmányozott nanoszálon.

UHR TEM vizsgálatot használtak a rácsköz meghatározásához is, és a nanoszál kristálmódosulatainak további azonosításához is. A részletes mintaanalízis megmutatta, hogy a nanoszálak anyaga monoklin $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

A nanoszál fejének és testének az összetételét EDS segítségével vizsgálták. A nanoszál fejevizsgálatának eredményei azt mutatják, hogy az a nanorészecske, ami a nanoszál végéhez csatolódott, főleg Au-ból áll. A nanoszál testének az EDS spektrumát mutatja a 4.7. ábra.

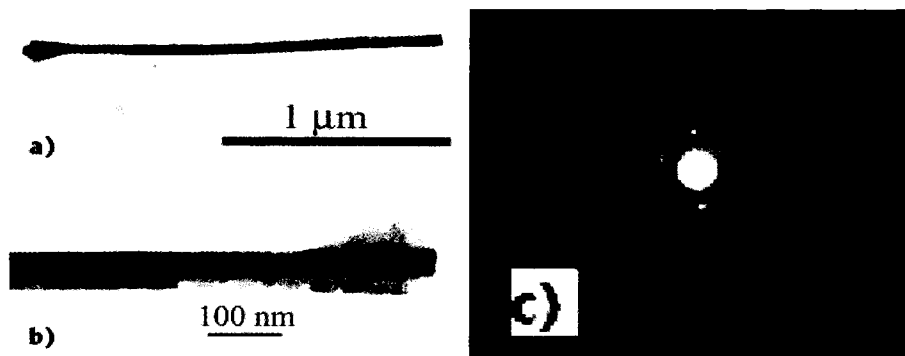
Ennek az analízise megmutatja, hogy a nanoszál tartalmaz Ga-ot és O-t. Levonható az a következtetés, hogy a vékony nanoszál anyaga gallium-oxid. Nem találtak semmi Au-tartalmat a nanoszál testében. Ez bizonyítja az Au katalitikus viselkedé-

sét a Ga_2O_3 nanoszál növesztés alatt. Az összes EDS spektrumnak van Cu és C jele, amelyek abból a szénnel bevont réz rostélyból származnak, amin a minták el voltak helyezve.



4.7. ábra. Ga_2O_3 nanoszál testének az EDS spektruma

InP nanoszálakat is tanulmányoztak TEM-mel. Ezt mutatja kisebb és nagyobb nagyítással a 4.8.a. és a 4.8.b. ábra.



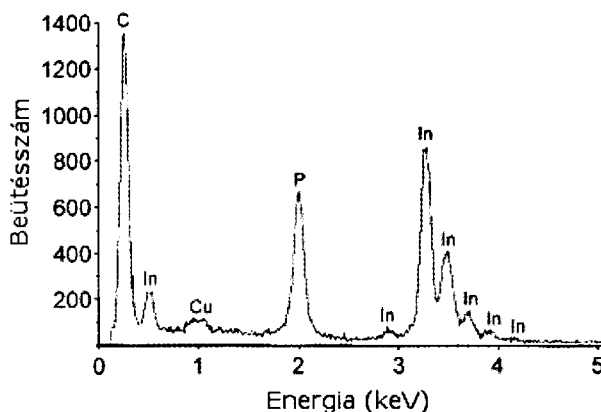
4.8. a. és b. ábra. 70 nm átmérőjű InP nanoszál TEM képei

4.8.c. ábra: Határozott területű elektron diffrakciós kép (SAED)

A nanoszál méreteinek a mérése néhányszor 10 nanoszálon történt. Az eredmények azt mutatják, hogy az InP nanoszálak rendszerint hosszabbak, mint a Ga_2O_3 nanoszálak. A többség néhány mikrométer hosszú, és 100 nm-nél kisebb átmérőjű volt. Az 4.8.b. ábrán látható közeli kép megmutatja, hogy az ábrán levő objektum két párhuzamos szálból van alkotva. A SAED-minta (4.8.c. ábra), ami szintén erről az objektumról készült, valószínűleg két, kissé rosszul orientált kristályból származik. Láthatjuk, hogy egy tipikus szálnak szimpla kristályszerkezete van hibahelyek so-

kaságával, amelyek párhuzamos vonalakként tűnnek fel az 4.8.b. ábrán, és a diffrakciós mintában az 5.c. ábrán sávként jelennek meg.

Egy vékony szálnak az EDS spektrumát mutatja a 4.9. ábra.

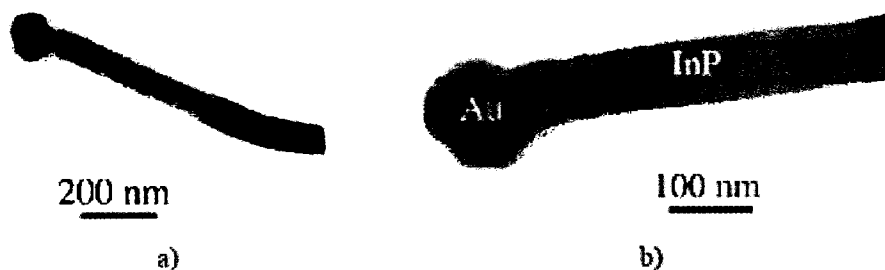


4.9. ábra. InP nanoszál testéből nyert EDS spektrum

Az ábra analízise megmutatja, hogy a nanoszál túlnyomóan indiumot és foszfort tartalmaz. Nem találtak semmilyen Au tartalmat az InP nanoszál testében. Az EDS spektrum tartalmaz C és Cu jelet, amik abból a szénnel bevont réz rácsból származnak, amin a mintadarabok el voltak helyezve.

Nagy felbontású TEM képek mutatják, hogy az InP nanoszálak egykristályok és vékony amorf réteggel vannak bevonva. Ezen réteg összetétele még nem tisztázott. A nanoszál további vizsgálatával megtalálhatjuk az aranyat a nanoszál fejében.

A sötét fej aranytartalmát (4.10. ábra) EDS analízissel is alátámasztottuk. Ez azt sugalmazza, hogy az InP szálak spontán módon nőtték ki az arannyal bevont hordozókból.

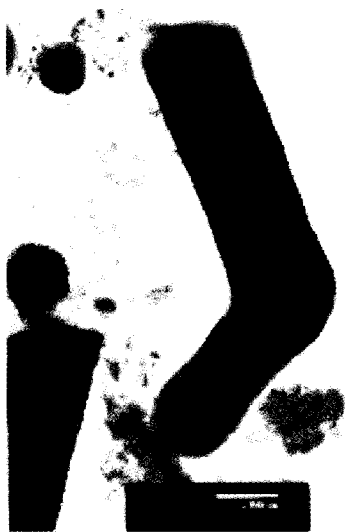


4.10. ábra. 80 nm átmérőjű, jellegzetes InP nanoszál TEM képei

Nyilvánvaló, hogy a Ga_2O_3 és az InP nanoszálak is kristályos szerkezetűek, hasonló alakúak és hasonló növesztési sajátosságúak.

Az arannyal bevont GaAs hordozókon egy másik nanotermék típus jelenléte is megfigyelhető volt ezek a As_xO_y nanocsövek. A nanotárgynak TEM felvételei megmutatták, hogy a mikrométer hosszúságú As_xO_y nanocső átmérője 250–330 nm-es tartományban változott.

Egy ilyen nanocső TEM képe látható a 4.11. ábrán.



4.11. ábra. 250 nm átmérőjű, jellegzetes As_xO_y nanocső TEM képe

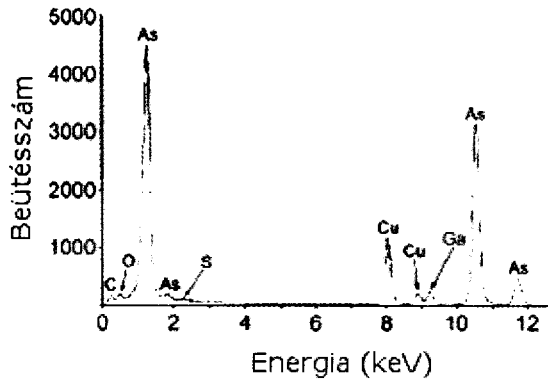
Ezen az ábrán a két gömbölyű rész a meghosszabbodott rész mellett megmutatja, hogy ez a nanotermék egy cső (legvalószínűbb az, hogy egy tört csőnek egy darabja, amelyik valahogy függőleges irányba fordult, megmutatva a cső kör alakú keresztmetszetét). A csík a hosszú, ferde rész közepén, és a kisebb kör a cső kör alakú keresztmetszetén belül (4.11. ábra) szintén bizonyítja ennek a nanotárgynak a cső jellegét. Bár diffrakciós mintát nem lehet készíteni egy elég sűrű, tömött mintán olyanokon, mint ezek a csövek, nagy felbontású képeket készítve a csövek valódi szélein, bizonyítható, hogy ezek a csövek nem kristályosak, hanem amorf szerkezetűek.

Ezen objektum EDS analízisét is elvégezték. Azonban ezek a csövek túlságosan sűrűek voltak, és a mérési feltételek így nem voltak ideálisak. Az EDS spektrum főleg As és O csúcsokat tartalmazott (4.12. ábra).

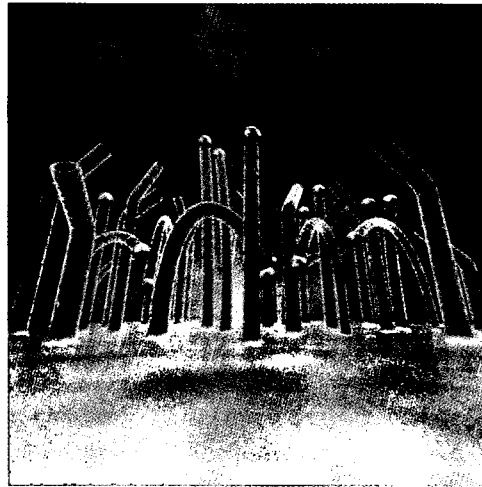
Ilyen spektrum alapján kikövetkeztethető, hogy a cső anyaga arzén-oxid.

Az arzén-oxid mennyiségi meghatározását is elvégezték az EDS spektrum alapján. Az összes eredmény analízise azt mutatja, hogy ezen sűrű csövek anyaga több arzént tartalmaz, mint oxigént (az arányok 80:20 és 65:35, a csőmérések sűrűségparaméterétől függően).

A GaAs arany rendszerről makettet készítettünk [Misnyovszki, 2006]. Ennek alapján készült egy grafikai rekonstrukció, amit a 4.13. ábra mutat.



4.12. ábra. As_2O_3 nanocső EDS spektruma



4.13. ábra. A GaAs-Au rendszerben képződő nanotermékek rekonstruált rajza. (National Geographic Magyarország Magazin, 2006. június, 147. oldal, illusztráció: Hadady éter, Mojzes Imre és Pécz Béla felvétele alapján.)

4.5.4. A vegyület-félvezető nanovezetékek tulajdonságai

A nanoszál-szintézis bemutatott módszere különbözik a jól ismert VLS módszertől, mert a zárt ampullában nem valósul meg a gáz halmazállapotú fém komponens külső, folyamatos táplálása. Megfigyelés szerint, az alkalmazott hőkezelési hőmérsékletnél, a Ga és az In gáz tartalom az ampullában nem elég ahhoz, hogy ez támogassa a nanoszál kialakulását. Ezért feltételezzük a kristály felületéből történő gallium és az indium táplálás utánpótlását [Iván, 2005].

Beszéljünk a nyert nanotermékek közötti különbségekről, és növesztési mechanizmusaik közötti különbségekről is. A növesztési feltételek (leszívott tér, megfelelő hőmérséklet és a hőkezelés időtartama) mindkét tanulmányozott hordozótípus (GaAs, InP) esetén ugyanolyanok voltak, mégis különbségeket figyeltek meg a

kapott nanotermekekben. GaAs hordozó esetén két különböző összetételű és formájú nanotárgy (Ga_2O_3 nanoszál és As_xO_y nanocső) növekedését figyelték meg. A kísérletek megmutatták, hogy a Ga_2O_3 nanoszál jelenléte a domináns. Ugyanakkor InP hordozón csak InP nanoszálakat figyeltek meg. Az Au szerepe a nanotermék kialakulásában fontos katalizátor. Ugyanakkor más hordozófelületeken néhány önmagában álló bokor formájú nanoszálhalom elkülönített ösvényeket formál, nem tisztázott természettel.

Próbáltak nanotermekeket növesztetni GaAs és InP hordozónak a hőkezelésével, vákumpárologtató elrendezésben is, alacsony nyomáson (10^{-3} Pa), folyamatos szivattyúzás mellett, de a kristályfelületen nanotárgyakat nem találtak. Ez kiemeli a lezárt ampullában visszamaradt oxigén és vízgőz kivételes szerepét a nanotermekek kialakulásában, és az ő kötelező jelenlétüket a leszívott, zárt térben a hőkezelés alatt.

Az evidens, hogy az oxigén mennyisége (abszorbeált oxigén az ampulla falakon és a szubsztrát felületein, O_2 és vízgőz a visszamaradt levegőben) ugyanannyi mindkét esetben. A lezárt ampullában a megbecsült oxigén mennyiség 0,1 Pa-os gáznyomással, közel $3 \cdot 10^{-12}$ kg volt, amely teljesen elegendő az oxid nanotermekek (Ga_2O_3 és As_xO_y) megfigyelt mennyiségének az előállításához.

Két különböző mechanizmust feltételeznek a megfigyelt nanotermekek szintézisére: VS mechanizmust az As_xO_y nanocsöveknél, és kevert VLS mechanizmust a Ga_2O_3 és az InP nanoszálaknál.

Az As_xO_y nanocsövek kialakulása megmagyarázható a VS mechanizmus alapján. A GaAs hordozónak megemelt hőmérsékleten (600–700 °C-on) történő hőkezelése, az arannyal bevont hordozóból intenzív arzén párolgást eredményez [Mojzes, 1982], ez arzén kiáramlást, aztán gáz halmazállapotú arzénoxidot hoz létre. Aztán a gáz kondenzálódik a kristályfelületen és valószínűleg az ampulla falain is.

Ga_2O_3 és InP nanoszálak növesztése csak 600 °C-ot meghaladó hőmérsékleten figyelhető meg, alacsonyabb hőmérsékleten csak felület domborzatok képződtek [Mojzes, 1998; Nemcsics, 2002; Schusztter, 2003; Iván, 2005].

A zárt térben történő nanoszálnövesztés magyarázatára javasolják a kevert VLS mechanizmust is. A következő tények a VLS mechanizmus javára mutatnak: a nanoszál fejében levő Au jelenléte, és a folyékony Au-fém (Ga, In) csatlakozás is, mert a Ga és az In is eutektikus összetételt formál az arannyal. Az eutektikus pont megfelelő hőmérséklete rendre 339,4 és 454,3 °C.

Alacsony hőmérsékleten (350 °C alatt) az arany kölcsönhatása a GaAs-del és InP-dal hasonlóan megy végbe. A hőkezelés alatt magasabb hőmérsékleten (350 °C fölött) az aranyréteg fémtartalma növekszik. Ez a folyamat a kontaktus-réteg olvadásához vezet, mert a fémtartalom növekedés az olvadáspont csökkenését is eredményezi a különböző Au-tartalmú fém vegyületek kialakulásában, s ezeken a SEM képeken fraktálszerű felületi mintának látszanak [Mojzes, 1998; Nemcsics, 2002;

Schusztér, 2003; Iván, 2005; Misák, 2006]. Az olvadás alatt az illékony komponensnek (As, P) a hordozóból történő párolgása gyorsított [Pécz, 1992; Pécz, 1991; Pécz, 1992]. Mikor a hőkezelési hőmérséklet túllépi a 600 °C-ot, ezek a vegyületek olvadt állapotban vannak a kristályfelületen (mert a hőkezelési hőmérséklet túllépi mindkét hordozótípus esetén az eutektikus pontot) és szögletes alakú gödörként látszanak a SEM képeken. Ezek a fém-Au tartalmú gödrök a nanoszál-növesztésnek a kiinduló pontjai. Megmutatható, hogy az illékony komponens mennyisége mindkét esetben elegendő a megfigyelt nanoszálmennyiség számára. InP esetén In_2O_3 nanoszálak nem voltak megfigyelhetők, a kissé megemelt hőkezelési hőmérséklet ellenére sem, bár sokkal magasabb hőmérsékleten (~1000 °C) és hosszú időtartamú hőkezelés esetén a megjelenésük elvárt. Az evidens kérdés: miért találtak ugyanazon növesztési feltételek mellett két összetételileg különböző nanoszálát (Ga_2O_3 és InP)? Az ok nem teljesen tisztázott még. A különbségeket kötési energiákban, ellenhatás kinetikában valószínűleg együtt kell figyelembe venni azon vegyületek részletes analíziseivel, amelyeket az ampullában alakítanak ki.

4.6. Szilárdtestek és vékonyrétegek nanomechanikai tulajdonságai

A szilárd testek és vékonyrétegek mechanikai tulajdonságai meghatározzák a felület tribológiai jellemzőit. A felületek mechanikai jellemzőit, különböző szinten, így makro- mikro- nanoszinten lehet meghatározni és jellemezni. A leggyakrabban vizsgált mechanikai tulajdonságok:

- Rugalmas, plasztikus deformációs tulajdonságok
- Keménység
- Young-modulus
- Karcolási ellenállás
- Réteghordozó adhézió
- Maradék feszültség
- Időbeli törési és relaxációs folyamatok
- Törés
- Fáradás

Ezeknek a tulajdonságoknak vagy közülük néhányak méréséből következtetéseket vonhatunk le a strukturális inhomogenitásokra, a felület alatti illetőleg közeli anyagtartományok tulajdonságaira, a határfelületek állapotára, különböző eltemetett rétegekre. A fenti tulajdonságok mérésére kereskedelmi forgalomban mérő és vizsgáló műszerek igen széles skálája áll rendelkezésünkre. E mechanikai paraméterek közül elsősorban a keménység az, aminek mérésére kifinomult módszerek és

elterjedt méréstechnikai megoldások léteznek. Ezek egyik legelterjedtebb változata a kvázistatikus indentáció. Ennek során a mérendő anyagba valamely szabványosított kialakítású mérőcsúcsot (gúlát) meghatározott nyomással nyomunk be, és mérjük a behatás következtében létrejövő alakváltozást. A felület keménységét az ún. keménységi szám (Hardness Number, GPa, vagy kg/mm^2) megfelel az indenter alatt levő nyomásnak (Brinell, Rockwell, és Vickers). A makro keménységmérést igen elterjedten használják, mivel olcsó és egyszerű következtetés vonható le a mért érték és az anyag alkalmazhatósága közötti kapcsolatról. A nagyon kis terheléseket (néhány mN-től nN) alkalmazunk a felületre, akkor a felület felső rétege („skin”), amely lehet akár egy monoréteg is, mechanikai tulajdonságáról kapunk információt. Ezt a mérést elsősorban akkor használjuk, amikor vékony esetleg monoréteg vastagságú rétegek mechanikai tulajdonságait vizsgáljuk. Ezekhez a vizsgálatokhoz általában igen kis mennyiségű, néhány milligramm nagyságrendű anyagra van szükség.

További mechanikai tulajdonságok, így például a Young-modulus mérésére is a mérési technológiák széles köre áll rendelkezésünkre. Ha vékonyrétegek tulajdonságait vizsgáljuk, óhatatlanul számolni kell a hordozó hatásával. Ilyenkor a vékonyréteg saját mechanikai paramétereinek meghatározása külön metodikai fejlesztést igényelhet. Általában elfogadott, hogy a mérések során a benyomás mélysége ne haladja meg a mérendő réteg vastagságának 30%-át. A keménységmérést általában három tartományra szokták osztani:

- Ultramikrokeménység. Ekkor a nyomóerő $50 \mu\text{N}$ és $10\text{--}20 \text{ mN}$ közé esik.
- Mikrokeménység, a nyomóerő 20 mN és $5\text{--}0 \text{ N}$ közé esik.
- Makrokeménység, $5\text{--}10 \text{ N}$ és 100 N és e feletti nyomóerő.

Az ultramikro- és a mikrokeménység tartományában általában terhelésfüggőek a jelenségek, míg a mikrokeménység tartomány felső részében és a makrotartományban e jelenségek általában függetlenek a terhelés nagyságától.

A leggyakrabban használt nanoindentációs műszerek úgy működnek, hogy a terhelés eltávolítása után leképezik és megméri a keletkező deformációt. A készülékek másik része, amelyben a keletkező deformáció mélységfüggését is vizsgálhatjuk a deformációt mind a terhelés alatt, mind a terhelés eltávolítása során folyamatosan vizsgáljuk [Nagy, 2001].

A fenti elven működő készülékeknek igen széles köre kapható kereskedelmi forgalomban. A mérendő mintadarab egy mozgatható asztalon helyezkedik el, a mérendő mintába egy mérőcsúcsot nyomunk bele, a nyomóerőt általában elektromágneses úton állítjuk elő. A mérőcsúcs elmozdulását kapacitív úton regisztráljuk, ami nagy pontosságú mérést tesz lehetővé. A mérőcsúcs kialakítása különböző módon és anyagokból történhet. A mérés során nemcsak mechanikai deformációt

mérhetünk. Elterjedt módszer az akusztikus emisszió mérése deformáció során, amely különböző repedések keletkezésére és mozgására vonatkozóan nyújt információt.

A mechanikai tulajdonságok mérése történhet nem csak tengelyirányú nyomás alkalmazásával, hanem a mérés során a nyomóerőre merőlegesen elmozdíthatjuk a mérendő felületet, ekkor a felületen karcolásokat hozunk létre. A karcolási árkok képződéséből további következtetéseket vonhatunk le az anyag keménységéről, esetenként a réteghordozón történő tapadásából.

A keletkező objektumok három csoportra oszthatóak, ezek:

- A rugalmas érintkezés során a mérőcsúcs eltávolítása után a felületen nem marad vissza alakváltozás.
- Ha a felület kemény, akkor a visszamaradó deformáció leképezi a nyomócsúcs paramétereit.
- A felület tulajdonságai az elasztikus és a plasztikus tulajdonságok között helyezkednek el, ekkor a nyomócsúcs eltávolítása után a visszamaradt deformáció időben változik. Ekkor a nyomócsúcs leképezése kevésbé karakterisztikus lesz.

A fentiek szerint keletkező alakzatok jellege függ a rétegelőállítási technológiától. Ezt szemléltetjük a 4.2. táblázatban.

4.2. táblázat.
A különböző anyagú, 400 nm vastag bevonatok keménységének és rugalmassági modulusának nanoindentációval mért értékei

Bevonat típusa	Keménység (GPa)	Rugalmassági modulus (GPa)
Katódkisüléssel előállított szén (a-C)	38	300
Ionsugaras módszerrel előállított szén (a-C:H)	19	150
PECVD szén* (a-C:H)	17	140
DC porlasztott szén (a-C:H)	15	140
Tömbi grafit	Nagyon puha	9–15
Gyémánt	80–104	900–1050
Ionsugarasan porlasztott Al_2O_3	8,3	140

Bevonat típusa	Keménység (GPa)	Rugalmassági modulus (GPa)
RF porlasztott SiC	27	255
Szilícium egykristály	11	220

* (PECVD – Plasma Enhanced Chemical Vapor Depositions)

Mint fentebb említettük a rétegek karcolással is vizsgálhatóak. Ezeket a tulajdonságokat a 4.3. táblázatban összegeztük.

4.3. táblázat. Néhány rétegtípus karcolási tulajdonságai

Bevonat típusa	Kritikus terhelés (mN)	Súrlódási együttható a karcoláskor	Karcolások SEM megfigyelése	
			Karc szélessége (μm)	A keletkező törmelék mennyisége**
Katód kisüléssel előállított szén	19,0	0,2	0,9	Alacsony
Ionsugaras módszerrel előállított szén	10,5	0,15	0,9	Közepes
PECVD szén*	9,0	0,13	1,0	Közepes
DC-porlasztott szén	6,0–9,0	0,2	0,9	Közepes
Ionsugarasan porlasztott Al_2O_3	Mély hornyok*	0,55	1,6	Nagyon nagy
RF-porlasztott SiC	12,5	0,40	1,1	Közepes
Al_2O_3 -TiC hordozón	7,0	0,30	1,5	Nagy

*A kezdetén benyomva

**A törmelék mennyisége a karcolás végén a katasztrofális meghibásodás után

A tribológiai tulajdonságokat folyadékokban is vizsgálhatjuk. Az elektrorheológus folyadékok a kolloidoknak az a csoportja, amelyeknél a viszkozitás függ a folyadékra adott elektromos télerőtől. Az anyagra adott nagy elektromos térerő (nagyobb, mint 1000V/mm) hatására a folyadék anizotróppá válik. (ERF – Electrorheological Fluid).

4.7. Felületi plazmonok

A felületiplazmon-polaritonok (röviden felületi plazmonok) egy fém felületén gerjesztett elektronsűrűségoscillációból és a hozzá csatolt, a felületre merőleges elektromos vektorú elektronmágneses térből állnak, és a fém-vákuum (dielektrikum) határfelület mentén, ahhoz kötődve terjednek. Ezt az elektromágneses teret a Maxwell-egyenletek írják le. A jelenség kialakulásához a következő feltételeknek kell teljesülniük:

- A dielektrikum dielektromos állandójának valós, pozitív értékűnek kell lennie,
- A fém dielektromos állandója komplex, valós tagjának negatívnak kell lennie és olyan abszolút értékűnek, amely nagyobb, mint a képzetes rész. Ez számos fémre, például az aranyra és az ezüstre, teljesül.

A fém dielektromos állandójának képzetes része határozza meg, hogy milyen gyorsan cseng le a plazmonoscilláció, miközben energiája hővé alakul. Ezért az a jó, ha az imaginárius komponens kicsiny. Ekkor – például fénnel gerjesztve a plazmonokat – éles rezonanciagörbét kaphatunk, a maximum közelében közel 100%-os gerjedési hatásfokkal. Ebből a szempontból az ezüst a legjobb anyag, de az arany sem rossz [Kroó, 2007].

Az ezekben a rétegekben gerjesztett hullám a fém felülete mentén terjed, de a felületre merőlegesen nem. Nagyon fontos megállapítás, hogy az ún. diffrakciós limit a felületi plazmonokra nem érvényes, így a felbontó képesség korlátlan. Az utóbbi években elvégzett kutatások eredményeként igen sok a hullámhossznál kisebb szerkezet vizsgálata is lehetővé vált. A plazmonok a nanoelektronikai áramkörökben is szerepet játszanak, a méretezésnél figyelembe kell venni azokat [Csurgay, 2004].

4.8. Összefoglalás

Ebben a fejezetben áttekintettük a gyakrabban használt nanostrukturák néhány anyagtudományi jellemzőjét. A mérési eljárások meglehetősen nagy bizonytalanságot eredményeznek, erre talán legjobb példa a nanocsövek hővezetése.

Ezek a mérési bizonytalanságok szükségessé teszik a mérési módszerek egységesítését és az irodalomban található értékek kritikus elemzését.

4.9. Irodalomjegyzék a 4. fejezethez

- [Burke, 2002] Burke, P.J.: Lüttinger Liquid Theory as Model of the Gigahertz Electrical Properties of Carbon Nanotubes. IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol. 1, No.3. pp. 367–379 (2002)
- [Csik, 2003] Csik A.: Multirétegek, mint speciális nanostruktúrák. Fizikai Szemle, LIII. évf. 6. szám, 207–210. oldal
- [Csurgay, 2004] Csurgay, Á., I., Porod, W.: Surface plasmon waves in nanoelectronic circuits. Int. J Circuit Theory and Appl., vol. 32, pp.339–361 (2004)
- [Grimes, 2007] Grimes, C.A.: Synthesis and application of highly ordered arrays of TiO₂. J.Mater. Chem., vol. 17, pp.1451–1457 (2007)
- [Gyulai 2003] Gyulai J.: A részecske gyorsítóktól a nanotechnológiáig. Fizikai Szemle, LIII. évf. 2. szám 54–57 oldal.
- [Hasegawa, 2006] Hasegawa, H., Kasai, S., Hashimize, T.: Future of heterostructure Microelectronics and Roles of Materials research for Its progress. IEEE Trans. Electron., vol. E-89C, No7, pp. 874–882 (2006)
- [Hoffmann, 1997] Hoffmann Á.: Nemesfém vékonyrétegek vizsgálata csillapított totálreflexiós módszerrel című PhD értekezés. BME Elektronikai Technológia Tanszék.
- [Ivan, 2002] Ivan, I, Kikineshi, A.: Stimulated Interdiffusion and Expansion in Amorphous Chalcogenide Multilayers. J. Optoelectro. and Adv. Mat., vol. 4, No 3., pp 743–746 (2002)
- [Iván, 2005] Iván I., Pécz B., Kökényesi S., Mojzes I., Misák S., Szabó I.: Nanowire growth on GaAs and InP crystal surfaces. Proc. First International Workshop on Semiconductor Nanocrystals, SEMINANO2005, Budapest, Hungary, September 10–12, 2005.–Vol.1 (Semiconductor Nanocrystals).pp. 23–26. (2005)
- [Kikineshi, 2004] Kikineshi, A., Malyovanik, M., Messaddeg, Y., Pinzenik, V., Shiplyak, M., Beke, D. L.: Photo-induced transformations in chalcogenide nanocomposite layers. J. Non-Crystalline Sol., vol. 338–340, pp. 561–564 (2004)
- [Krishnamachari, 2005] Krishnamachari, U., Borgstrom, M., et al.: Defect-free InP nanowires grown in [001] direction on InP. Appl. Phys. Letters, vol. 55., No 11., pp. 2077–2079 (2004)
- [Kroó, 2007] Kroó, N.: Fényes új világ: Egy új típusú fény és alkalmazásai. Fizikai Szemle, LVII. évf. 2.sz. pp. 37–42. (2007)
- [Márk, 2006] Márk, G. I.: Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban. Fizikai Szemle, LVI. évf. 6.sz. pp. 190–194. (2006)

- [Misák, 2006] S. Misák, S., Mojzes, I., Iván, I. Pécz, B., Kökényesi, S.: Synthesis of semiconductor nanowires. *Debreceni Műszaki Közlemények*, V. évf., 2. sz., pp. 81–95. (2006)
- [Misnyovszki, 2006] Misnyovszki Ádám: Pályamunka a kutató diák mozgalomban. Témavezető: Mojzes I.
- [Mohney, 2005] Mohney, S.E., Wang, Y., Cabassi, M.A., Lew, K.K., Dey, S., Redwing, J.M., Mayer, T.S.: Measuring the specific contact resistance of contacts to semiconductor nanowires. *Solid – State Electronics*, vol. 49, No2, pp. 227–232 (2005)
- [Mojzes, 1982] Mojzes I., Sebestyen T., Szigethy D.: Volatile component loss and contact resistance of metals on GaAs and GaP during annealing. *Solid-State Electronics*, 1982. V.25, No.6. pp. 449–460. (1982)
- [Mojzes, 1998] Mojzes I., Kovács B., Schusztér M., Kun I., Máté L., Dobos L., Dávid L.: Fractal Behaviour of the Surface of in situ Heat Treated Metal-InP Contacts. *Thin Solid Films*, V.317, No.1–2, pp. 69–71. (1998)
- [Mojzes, 2005] Mojzes I.: *Mikroelektronika és technológia*. Műegyetemi Kiadó, (2005)
- [Nagy, 2001] Nagy P.: Felületek morfológiájának vizsgálata pásztázó tűszondás módszerekkel. PhD értekezés, 2001
- [Nemcsics, 2002] Nemcsics Á., Schusztér M., Dobos L., Ballai Gy.: Morphological investigation of the electrochemically etched GaAs (001) surface. *Materials Science and Engineering B*. V.90, No.1–2. pp. 67–71. (2002)
- [Pécz, 1991] Pécz B., Veresegyházy R., Radnóczy G., Barna A., Mojzes I., Geszti O., Vincze Gy.: Cross-sectional transmission electron microscopic study of Au/GaP and Au/InP contacts. *J. Appl. Phys.* V.70, No.1. pp. 332–336. (1991)
- [Pécz, 1992] Pécz B., Radnóczy G., Horváth Zs.J., Barna P.B. The effect of ion beam treatment and subsequent annealing on Au/GaAs contacts. *J. Appl. Phys.* 1992. V.71, No.7. pp. 3408–3413. (1992)
- [Pécz, 1992] Pécz B., Radnóczy G., Barna P.B., Zsoldos É.: Regrowth of a thin InP surface covering layer in the Au/InP system during annealing. *Appl. Phys. Lett.*, V.61, No.1. pp. 105–107. (1992)
- [Rahul, 2003] Rahul R., Shashank, Sh. Mahendra, K., Apparao, R.M.: Synthesis and Characterization of Semiconducting Nanowires. *Am. Phys. Soc. The 70th Annual Meeting*, Meeting ID:SES03, abstract NoHc.010 (2003)

- [Romaneh, 2005] Romaneh, J., Gamini, S.: Gallium oxide nanostructures. Am. Phys. Soc. APS March Meeting, March 21–25, 2005. Abstract No. U25.011 (2005)
- [Schusztter, 2003] Schusztter M., Bodnár Z., Dobos L., Mojzes I.: A novel evaluation method to determine the fractal dimension of SEM images: a study of Au/Pd/GaAs contacts during heat treatment. Phys. stat. sol. V.(c) O, No.6, pp.1051–1054. (2003)
- [Wagner, 1970] Wagner, R.S.: Whisker technology. Wiley, New York, 1970.
- [Yang, 2004] Yang, Q., Tang, K., Li, Q., Yin, H., Wang, Ch., Qian, Y.: The fabrication of MP (M=In and Ga) nanowires by a new Ullmann reaction. Nanotechnology, vol. 15, pp. 918–922 (2004)
- [Zhi, 2004] Zhi, C.Y., Bai, X.D., Wang, E.G.: Synthesis of semiconductor nanowires by annealing. Appl. Phys. Lett., vol. 85, No 10 id. 1802, (2004)

5. Mérés és manipuláció a nanovilágban

A nanotechnológiai kutatások kétségtelenül legfontosabb eszközei a különböző mikroszkópok. A nanométeres mérettartományban azonban nem elegendő már a hagyományos optikai mikroszkópok maximális felbontóképessége sem, ezért új, a fénymikroszkópoktól alapelveiben is különböző eszközt kell használnunk a nanostruktúrák megfigyelésére. Az egyik lehetőségünk az, hogy építünk olyan mikroszkópot, aminek elve gyakorlatilag megegyezik az optikai mikroszkópéval, azonban elektromágneses hullámok (fény) helyett elektronsugárral „világítjuk át” a vizsgálandó mintánkat. Ez az eszköz a transzmissziós elektronmikroszkóp. Ennek azonban van egy hátránya: nagyon gondos mintaelőkészítést (elvékonyítást) kíván, hiszen az elektronsugárral át kell tudni világítani a mintát. Előnye, hogy a nagyfeszültséggel gyorsított elektron hullámhossza jóval kisebb a látható fényénél: $\lambda = h/p$, ahol h a Planck-állandó, és p a részecske impulzusa.

A másik lehetőségünk, hogy a mintát jól fókuszált elektronsugárral bombázza az általa visszaszórt részecskéket vagy a besugárzás hatására kilépő elektromágneses sugárzást detektáljuk. Ezen az elven működik a pásztázó elektronmikroszkóp (SEM – Scanning Electron Microscope). Ennek előnye, hogy rendkívül nagy mélységélességgel rendelkezik, azonban felbontásban csak a legjobb eszközök érik el a nanométeres tartományt, ráadásul az elektrosztatikus töltődés miatt szigetelő mintákat nem tudunk vele közvetlenül megfigyelni, csak akkor, ha vékony vezető (pl.: arany) réteget párologtatunk a mintára.

Ebben a fejezetben áttekintjük az SPM módszerek történetét, a mikroszkópok általános felépítését. Bővebben tárgyaljuk az SPM eszközcsaládba tartozó két legismertebb mikroszkópot, a pásztázó alagútmikroszkópot, és az atomerő-mikroszkópot, megemlítenénk néhány alkalmazási területet. Ezen kívül röviden ismertetünk néhány olyan eljárást, amit az alkalmazás szempontjából fontosnak, a működésük szempontjából pedig érdekesnek tartunk.

5.1. A pásztázószondás mikroszkópia

Az atomi felbontásra is képes mikroszkópok egyik nagy családja az összefoglaló néven pásztázószondás mikroszkópok (SPM – Scanning Probe Microscope). Ezen belül körülbelül 20 különböző eszközt különíthetünk el az alapján, hogy milyen fizikai jelenség szolgál a detektálás alapjául. Az alapötlet tulajdonképpen egyszerű: a szonda (probe) a minta felett pásztáz egy területet lefedve. A szonda érzékeli az alatta lévő minta fizikai-geometria tulajdonságait¹, és egy számítógéppel feldolgozva a szonda adatait felrajzolható a minta „térképe”.

5.2. Az SPM története

A pásztázószondás mikroszkópia úttörője a pásztázó alagútmikroszkóp (STM – Scanning Tunneling Microscope) volt, amit 1981-ben Gerd Binnig és Heinrich Rohrer talált fel az IBM zürichi kutatóközpontjában². Felfedezésükért 1986-ban kaptak Nobel-díjat az elektronmikroszkópia vitathatatlanul legnagyobb alakjával, Ernt Ruskával megosztva. Megjegyzendő, hogy az első alagútáramon alapuló topográfias eljárást először nem ők, hanem jóval korábban (1965 és 1971 között) Russell D. Young dolgozta ki. Binnig és Rohrer munkája során felhasználta Young korábbi tapasztalatait, azonban a Young-féle eszközhöz képest jelentős lépést tettek előre: mikroszkópuk képes volt közel atomi szintű felbontásra (Az atomi felbontás azt jelenti, hogy az egyes atomok külön-külön képződnek le a mikroszkópos felvételen.)

Ezek után sorra jelentek meg a pásztázószondás elven működő anyagvizsgáló eszközök, többek között az atomerő-mikroszkóp (1986 – Binnig, Quate, és Gerber), a mágneses erő mikroszkópok (MFM – Magnetic Force Microscope) ..., stb.

Az elmúlt 20 évben rohamosan fejlődtek a mikroszkópos technikák. A fejlődés egyrészt a mikromegmunkálási technológiák finomodása, másrészt az adatfeldolgozást végző egységek, a számítógépek számítási kapacitásának robbanásszerű növekedése tette lehetővé. A kezdeti anyagvizsgáló módszerek specializálódtak, megjelentek a biológiai minták vizsgálatára szolgáló folyadékcellás SPM-ek is.

¹ Az, hogy konkrétan milyen tulajdonságot vizsgálunk, az a konkrét eszköztől függ. Az általánosság megszorítása nélkül ennél pontosabb megfogalmazással nem élhetünk.

² Ez a kutatóközpont tekinthető az SPM módszerek bölcsőjének, egyrészt az első működőképes, igazán nagy felbontású STM miatt, másrészt a később ismertetett közeltéri mikroszkóp miatt.

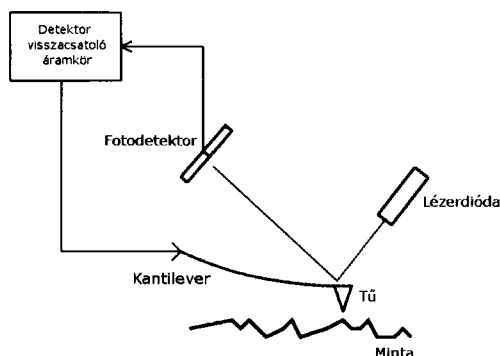
5.3. Az SPM eszközök nagy családja

Ahogy azt korábban láttuk, az SPM, mint összefoglaló név több, lényegesen különböző eljárást foglal magában. Ebben a részben a legismertebb, és alkalmazás szempontjából leglényegesebb típusokat tekintjük át. Megjegyzendő azonban, hogy az eszközök kategorizálása nem egyértelmű, hiszen az azonos, vagy közel azonos működési alapelvből kiindulva ezen módszereket gyakran egy nagyobb műszerbe integrálják. Jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható legmodernebb eszközök 10–15, vagy még több mérési móddal rendelkeznek, magában foglalva az atomerő és alagútmikroszkópokat, a közeltéri optikai mikroszkópot, illetve megvalósíthatnak spektroszkópai alkalmazásokat.

5.4. Az atomerő-mikroszkóp

5.4.1. Felépítés, működési elv

Az AFM működése hasonló a mikrotűs profilmérőkéhez, azonban annál jóval kifinomultabb eszközről van szó. Egy hegyes tűt a minta felületén mozgatjuk. A tű egy vékony, és ezáltal könnyen hajló konzol (kantilever) végén található. A tű követi a minta felületén lévő kitüremkedéseket és bemélyedéseket. A konzol helyzetét általában egy optikai rendszer méri. Megjegyzendő, hogy – ahogy a legtöbb SPM esetében – az AFM működtetése nem igényel különlegesebb környezetet (például vákuumot), a minta és az AFM hegy között egyszerűen levegő is lehet. Ebben az esetben azonban zavaró tényező lehet a levegő páratartalma. Ha ugyanis a relatív páratartalom magas (kb. 50%-nál nagyobb), akkor a légnedvesség kicsapódhat az AFM hegyre, ami negatívan befolyásolja a képminőséget.

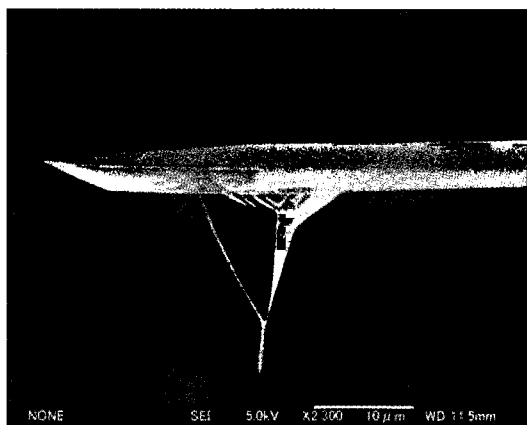


5.1. ábra. Az AFM működésének vázlata

5.4.1.1. A kantilever és AFM hegy

A kantilever az a rendkívül kis méretű, hegyes (ideálisan egy atomban végződő) tűben végződő konzol, ami a pásztázást végzi. Anyaga legtöbbször szilícium, vagy szilícium-nitrid.

A következő képen egy tipikus AFM kantileverről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvétel látható.



5.2. ábra. AFM hegyről készült SEM felvétel

Az AFM hegy kialakítása sokkal nagyobb figyelmet és hozzáértést igényel, mint az STM hegyé. Míg az STM hegy konkrét geometriája gyakorlatilag nem befolyásolja a képalkotást, addig az AFM esetében a mintáról készült „térképet” jelentősen eltorzíthatja, ha rossz minőségű hegyet használunk.

Az AFM hegy kialakításának több elterjedt módja van:

- Elektrokémiai maratással:
Tulajdonképpen megegyezik a mikroelektronikában gyakran használt eljárással. Egy passzíváló réteggel (például oxiddal) megóvjuk azokat a részeket, amelyeket nem kívánunk marni, majd a munkadarabot az anyagához megfelelő maratószerbe helyezzük. (Ez a maratószer sokféle lehet, pl. fluorsav) A maratószeren keresztül zárunk egy áramkört, amibe bekapcsoljuk a munkadarabot. Így az átfolyó áram nagyságával tudjuk szabályozni a maratás sebességét.
- Fókuszált ionnyalábbal (FIB – Focused Ion Beam):
A mechanikai úton kialakított hegyre elektromos térben gyorsított ionokat (például argont) lőnek, és ezzel alakítják ki a kis hegygörbületet. Az eljárás előnye, hogy reprodukálható, és jó minőségű végeredményt ad, azonban speciális eszközök igényel.

- **Elektronsugaras leválasztással (EBD – Electron Beam Deposition):**

Az elektronsugaras leválasztás egy olyan maszk nélküli eljárás, ami alkalmas nanométeres pontosságú alakzatok előállítására. AFM hegyet ezzel a módszerrel a következőképp alakítanak ki:

- Alapanyagképp egy piramis alakú hegyet használnak, amit előzőleg például elektrokémiai maratással alakítanak ki.
- Fókuszált elektronnyalábot irányítanak a piramis csúcsára
- A piramis csúcsára az elektronnyaláb hatására disszociált háttérgázok csapódnak le. A lecsapódott anyag leggyakrabban szén.

Ezzel az eljárással nagyon jól reprodukálható eredményt kaphatunk, azonban az elért nagy hossz-átmérő arány miatt a hegy nagyon törekeny lesz, ezért az esetlegesen fellépő oldalirányú terhelés korlátozza az AFM-ekben való alkalmazását.

- Szén nanocső „ragasztásával”

Az előzőleg előkészített AFM hegyre szén nanocsövet helyeznek (ezt „pick-up” technikával valósítják meg). A nanocsövet van der Waals erő tartja a helyén. A módszer hátránya, hogy gyakorlatilag nem reprodukálható, csak egy-egy AFM hegy preparálható. A végeredmény azonban egy gyakorlatilag tökéletes eszköz.

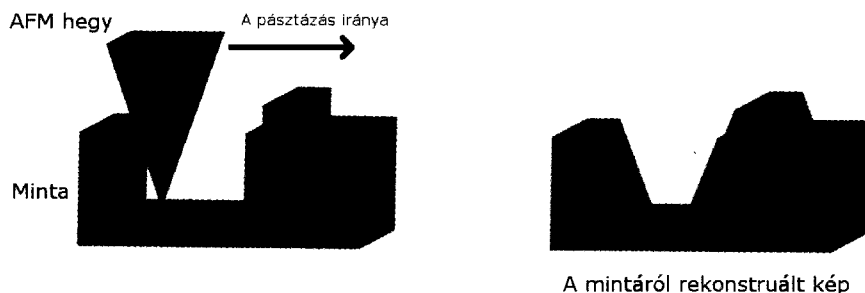
Legfontosabb technológiai paramétereik a rugóállandó (spring constant), és a rezonancia-frekvencia. A rugóállandó értéke a konkrét kialakítástól függ, de általánosságban elmondható, hogy a „hagyományos”, vagyis makroszkopikus rugókhöz képest rendkívül kicsi, 0,1 N/m és 100 N/m közé esik. (Contact mód esetében kívánatos a minél kisebb rugóállandó, a non-contact módok esetében nem elsődleges szempont a kis rugóállandó.)

A rezonancia-frekvenciának elsősorban a non-contact módok esetében van szerepe. Értéke leggyakrabban 10 és 500 kHz közé esik, contact mód esetében kisebb, non-contact, illetve tapping mód esetében nagyobb.

A kantilever hátsó oldalát gyakran arany vagy alumínium tükröző felülettel is ellátják annak érdekében, hogy az optikai elmozdulásmérő egység pontosságát javítsák.

A kantileverek gyártására több eljárás ismert, a világ számos pontján találunk erre szakosodott vállalatokat. Legelterjedtebb gyártási eljárások a mikrolitográfia, az elektrokémiai maratás. A legjobb felbontást adó, és legdrágább AFM kantilevereknek a hegyére egy szén nanocsövet helyeznek, így a hegy görbületi sugara a 1–10 nm közötti tartományba esik.

Megjegyzendő, hogy az AFM tip geometriája jelentősen befolyásolja a képalkotást. Példaként tekintsünk egy piramis alakú tűt, ami egy lépcsős struktúrán pászta.



5.3. ábra. Az AFM hegy szerepe a képalkotásban

Látható, hogy a tip emelkedési szögétől függően „elkeni” az éles lépcsőket. Ez a képalkotási hiba szoftveresen kiküszöbölhető, amennyiben pontosan ismert a tű geometriája. Elvileg javítja a képalkotási hibát, ha nagy hossz-átmérő arányú (*aspect ratio*) hegyet használunk, azonban az ideálisan vékony és hosszú AFM hegyek használatát behatárolja, hogy a hegynek esetenként oldalirányú terhelést is el kell viselnie. (Például akkor, ha a pásztázás közben egy „lépcsőnek” ütközik.) Az ideális megoldás a szén nanocsővel ellátott hegy, ahol az emelkedési szög a mintához képest gyakorlatilag 90° , azonban ezeknek a hegyeknek a kialakítása nehézkes, valamint túlságosan hosszú nanocső, azonban ezeknek a hegyeknek a kialakítása nehézkes, valamint a túlságosan hosszú nanocső könnyen eltörhet a képalkotás közben.

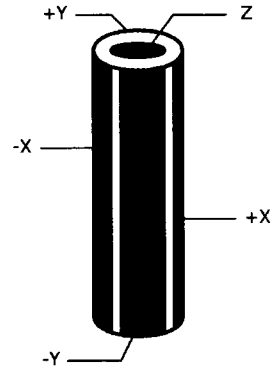
A kantilever ezen kívül mérési hibát okozhat akkor is, ha contact módban „puha” mintát vizsgálunk: a tű egy kissé összenyomja az adott testet. Ez leggyakrabban biológiai minták esetében jön létre (például DNS molekula).

5.4.1.2. Piezo mozgató egység

A kantilever mozgatását egy piezoelektromos elven működő mozgató egység végzi. A piezoelektromos tulajdonság azt jelenti, hogy az adott anyag elektromos feszültség hatására deformációt szenved.

Az AFM berendezésekben leggyakrabban az ún. négyosztatú mozgatót használják, aminek sematikus szerkezete az 5.4. ábrán látható.

Az alkalmazás szempontjából fontos piezoelektromos anyagok között elsősorban kerámiákat, és szervesetlen kristályokat találunk (például Lítium-nióbát – LiNbO_3 , bárium-titanát – BaTiO_3). A piezoelektromos együtttható tipikus értéke ezeknél az anyagoknál 10^{-11} m/V nagyságrendjébe esik. Ebből látszik, hogy a piezoelektromos anyagokkal rendkívül pontos pozicionálást végezhetünk el, feltéve, hogy a maximális elmozdulás kicsi.



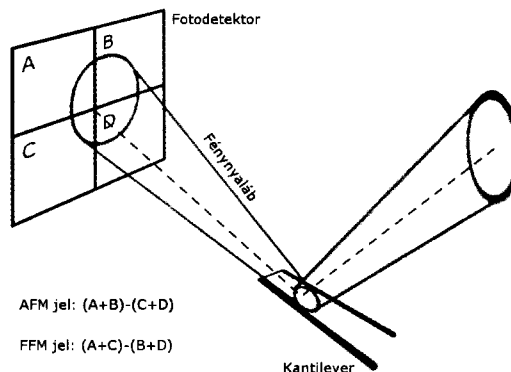
5.4. ábra. Piezoelektromos henger SPM mozgathoz

Az SPM módszerek esetében leggyakrabban egy speciális kerámiából, ólom-cirkónium-titanátból (PZT) szinterelt hengert használnak.

5.4.1.3. Elmozdulásmérő egység

A kantilever mintára merőleges elmozdulásának mérésére szolgál. A leggyakoribb megvalósítása optikai (ezen belül megkülönböztetünk interferometrikus és nem-interferometrikus módszereket), azonban léteznek más megoldások is.

A legelterjedtebb megoldás egy négyosztatú töltéscsatolt eszköz (CCD – Charge-Coupled Device), esetleg ugyanilyen geometriai elrendezésű fotodióda, amely mérési elvét tekintve gyakorlatilag megegyezik az optikai adattárolók (CD, DVD, HD-DVD, Blu-Ray) olvasófejében lévő kiolvasó detektorával, azzal az eltéréssel, hogy az optikai adattárolás esetében az információt intenzitásváltozás hordozza, míg az AFM esetében a visszaverődött lézernyalábfolt helyzete lesz a kiolvasandó jel.



5.5. ábra. Az AFM optikai detektálása

Ebben az elrendezésben a magassági információt a két felső és a két alsó detektorszektor jelének különbsége állítja elő. Ez gyakorlatilag maga az AFM jel. A visszaverődött folt vízszintes helyzete adja az ún. FFM jelet. (FFM – Friction Force Microscope) Ez tulajdonképpen a kantileverre ható vízszintes irányú erőt méri. Topográfiai képalkotásra ugyanúgy alkalmas, mint az AFM jel, azonban annál kevésbé hatékony.

5.4.1.4. Elektronikus kiszolgáló egység, képfeldolgozás

Az elmozdulásmérő egység kimeneti jele a kiolvasás konkrét módjától függetlenül elektromos feszültség, pontosabban egy $U(x,y)$ feszültség-hely függvény. Ezt a jelet egy számítógép gyűjti össze, és dolgozza fel. Az adatfeldolgozás kulcseleme maga a képalkotás. A kép megalkotásához az adatfeldolgozó egység egy térképen ábrázolja a feszültség jelet. Az ábrázolásnál több igényt is ki kell elégíteni:

- Adatok pontos leolvasására alkalmas legyen
- Látványos legyen

Ezt a két követelményt egyszerre teljesíteni szinte lehetetlen. Ha a látványosságot tartjuk elsődleges célnak, akkor általában színes, vagy színezett szürkeshálós módon ábrázoljuk a minta felületéről érkező jelet, ami virtuálisan háromdimenziós képet szolgáltat.

Ha az adatok pontos leolvasása a fő célunk, akkor legcélszerűbb keresztmetszeti képet felvenni, ami egy adott egyenes mentén ábrázolja a minta topográfiai tulajdonságait.

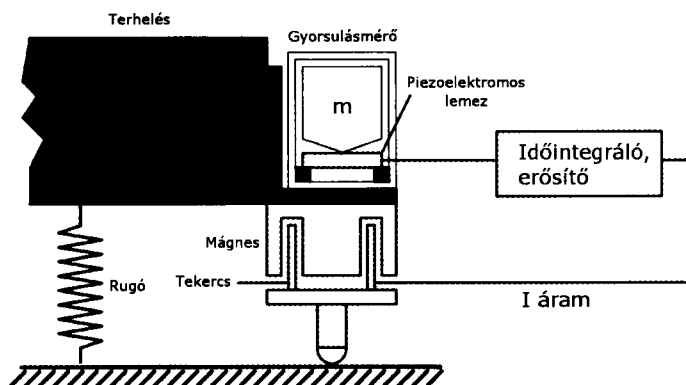
5.4.1.5. Rezgésmentesítés

Az eddigiekből látható, hogy az AFM – a többi SPM eszközhöz hasonlóan – egy rendkívül érzékeny műszer. A detektálás módja miatt a külső rezgések zajként jelennek meg a képen. A megfelelő felbontás eléréséhez elengedhetetlen, hogy a lehető legkisebbre csökkentsük a kantilever, és ezzel együtt a teljes műszer rezgését. A külső rezgéseknek több forrása is lehet (a legjelentősebbek az utcai forgalom, az épületben lévő emberek lépései által keltett rezgések, az épületgépeszeti berendezések, a szél, és a szeizmikus eredetű rezgések).

A modern, és széles frekvenciatartományon működő rezgésmentesített asztalokban *aktív* és *passzív* rezgésmentesítés is megtalálható.

- A passzív rezgésmentesítés gyakorlatilag egy csillapított rugós alátámasztást jelent. Leginkább magasabb frekvenciákon hatékony. A pusztán passzív rezgésmentesítésnek nagy hátránya, hogy alacsonyabb frekvenciákon a transzmittanciája 1-nél nagyobb lehet, vagyis a rezgéseket fel is erősítheti.

- Az aktív rezgésmentesítés ugyanúgy egy csillapított rugós alátámasztás, mint a passzív, azonban van egy jelentős különbség: a csillapítás mértéke itt (elektromosan) változtatható. A csillapítás egy mágnesbe csúszó, áramjárta tekercs. A tekercset egy gyorsuláserzékelőhöz kötött időintegráló erősítő jele hajtja meg. Az 5.6. ábrán az aktív rezgésmentesítés egyik megvalósítása látható.



5.6. ábra. Aktív rezgésmentesítés egyik megvalósítása

Az aktív rezgésmentesítés segítségével jó hatékonysággal szűrhetőek az alacsony frekvenciás rezgések.

Az legmodernebb technológiával -40 dB-es csillapítás érhető el az 1 Hz– 1 kHz frekvenciájú tartományban. (Az épületekben mérhető rezgések nagy része ebbe a frekvenciatartományba esik.)

5.4.2. Képzalkotási módok

5.4.2.1. Statikus mód

Klasszikus fizikai képben a statikus mód azt jelenti, hogy az AFM hegy a minta felületéhez hozzáérve pásztáz. Nem ilyen egyszerű a kép akkor, ha figyelembe vesszük, hogy atomi szinten már kvantummechanikai effektusokkal kell számolnunk, és ezen az absztrakciós szinten már nem is mondhatjuk, hogy a „minta felületéhez hozzáérve”, hiszen a minta felülete sem definiálható egyértelműen. Ehelyett inkább azt mondhatjuk, hogy az AFM tip a minta elektromos terében egy ekvipotenciális vonalon (illetve felületen) halad.

5.4.2.2. Dinamikus módok

Ebben a képalkotási módban a kantilevert egy meghajtó mechanikai jellel megrezgetjük. A rezgés frekvenciája szabad rezgetésnél közel esik a kantilever sajátfrekvenciájához. Ha ezután a kantilevert közelítjük a mintához, a minta-hegy kölcsönhatás miatt megváltozik a rezgés amplitudója és a fázisa a meghajtó jelhez képest. Ezt a rezgést mérve és kielemezve alkotja meg a képet a számítógép. Attól függően, hogy az amplitudó, vagy a frekvenciamodulációt mérjük, AM és FM módokról beszélünk.

A dinamikus mód egyik hátránya, hogy a moduláció nem pillanatszerűen megy végbe az amplitudóban: a tipikus időlépték, amin az amplitudómoduláció fellép:

$$\tau_{AM} \approx \frac{2Q}{f_0}, \quad (5.1)$$

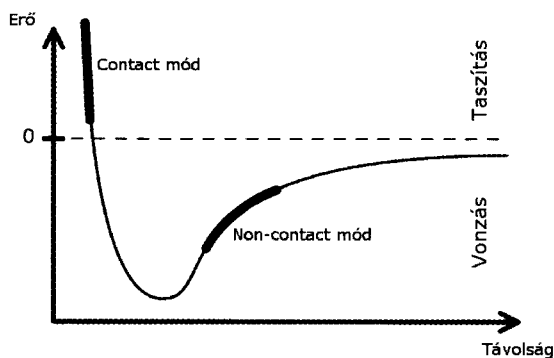
ahol Q a kantileverre jellemző jósági tényező. Látható, hogy ha a Q nagy, akkor az AM AFM mód lassú lehet, azonban ebben az esetben a rendszer zaja kisebb.

Az FM mód esetében ez a karakterisztikus kölcsönhatási idő:

$$\tau_{FM} \approx \frac{1}{f_0} \quad (5.2)$$

Az FM mód bevezetésével az eszköz felbontása drasztikusan javulhat, vákuumban elérhető az atomi felbontás.

A képalkotási módok közötti különbséget legegyszerűbben úgy érthetjük meg, ha felrajzoljuk az atomi Lennard-Jones potenciált, és bejelöljük rajta a statikus és dinamikus módok működési tartományát. (Itt jegyzendő meg, hogy a minta és az AFM hegy között nem csupán a Lennard-Jones potenciál hat. Vannak makroszkopikus jellegű erők is – például elektrosztatikus erő –, amik negatívan befolyásolják a képalkotást. Ezeket a nem kívánt erőket egyedül az FM dinamikus mód küszöböli ki.)



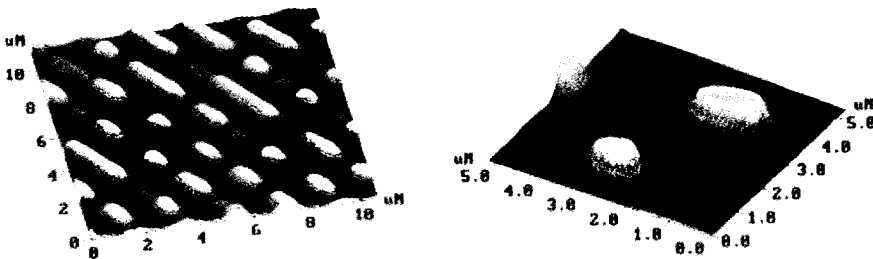
5.7. ábra. A minta és az AFM közötti erő távolság-függése, és a mérési módok

5.4.3. Felhasználási területek

A továbbiakban az SPM módszerek néhány felhasználási területét említjük meg, mintegy példaképpen. A mikroszkópok felhasználása annyira szerteágazó, hogy szinte lehetetlen egy fejezetben összefoglalni a lehetséges alkalmazásokat, azért inkább csak ízelítőt adunk belőle. Bővebb olvasásra ajánljuk az Irodalomjegyzékben található [Bhushan, 2004] és [Paesler, 1996] megfelelő fejezeteit valamint egy magyar nyelvű értekezést [Pungor, 1996].

5.4.3.1 Adattárolás

Az SPM technikákkal lehetőség nyílik a gyárilag sajtolt CD-k és DVD-k minősítésére. A negatív – leggyakrabban nikkelből készült – nyomóforma felületén lévő kiemelkedések alakítják ki a polikarbonát lemez sajtolása után a bitinformációt hordozó piteket („gödröket”). Az egyes legyártott lemezek minősége függ a nikkel lemez anyagi minőségétől és kopásától. A nikkel mágneses tulajdonságai miatt nehézkes a SEM vizsgálata, ezért gyakran AFM-mel ellenőrzik, hogy a lemez alkalmas-e újabb széria CD vagy DVD nyomására. Az elsődleges vizsgálandó paraméter a pit geometriája, amire kétségtelenül az AFM a legalkalmasabb eszköz.



5.8. ábra. Nikkel nyomólapról készült AFM felvétel

A legyártott lemez minőségét, illetve olvashatóságát az befolyásolja leginkább, hogy a pitek mélysége mennyire közelíti meg az elméletileg ideális $\lambda/4$ értéket. (Itt λ a kiolvasó lézer hullámhossza, CD esetén 780 nm, DVD esetében 650 nm, Blu-Ray esetén 405 nm.)

5.4.3.2. Félvezető eszközök és elektronika

A félvezető eszközök megfigyelése SPM mikroszkóppal egy bevett módszer az eszköz fejlesztése közben. A legtöbb félvezetőstruktúra esetében jól használhatók az

SPM-ek (elsősorban az AFM-ek és az STM-ek), a különböző felépítésű tranzisztoroktól elkezdve a LED-ekig. Általánosságban elmondható, hogy abban az esetben különösen fontos az AFM által elérhető felbontás, amikor az eszköz működése heterostruktúrára alapul.

5.5. A pásztázó alagútmikroszkóp

5.5.1. Felépítés, működési elv

Az STM működésének fizikai alapját, valamint a detektálásban közvetlenül résztvevő STM hegy felépítését tekintjük át ebben az alfejezetben. Az alagúteffektusnak egy egyszerűbb esetét tárgyaljuk itt, amely rávilágít a mikroszkóp működésének alapjára.

5.5.1.1. Az alagúteffektus

Az STM működésének alapja egy kvantummechanikai jelenség, az alagúteffektus. A klasszikus mechanika szabálya szerint egy potenciálgáton csak olyan részecske haladhat át, melynek energiája meghaladja a potenciálgát magasságát.

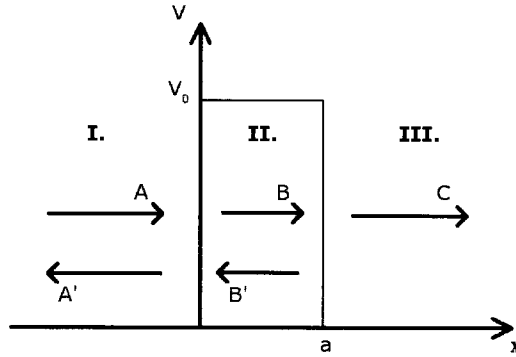
Vegyünk egy elektront, melynek adott a mozgási energiája, és beleütközik egy véges kiterjedésű potenciálgátba (ez a gát lehet például egy vékony szigetelő réteg). Az elektron mozgását a Schrödinger-egyenlet írja le.

Egydimenziós esetben és véges, L szélességű négyzetes potenciálgát esetében a Schrödinger-egyenlet:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi + V\Psi = E\Psi \quad (5.3)$$

A kvantummechanikai hullámfüggvény két matematikai tulajdonsága, hogy folytonos, és a potenciálfüggvény véges szakadási helyein (ebben az esetben erről van szó) az első deriváltja is folytonos. Ezeket a feltételeket peremfeltételként felhasználjuk. (A kvantummechanikai alapvetések kimerítő tárgyalását lásd. [Nagy, 2000]-ben.)

Ezt az egyenletet oldjuk meg az 5.9. ábrán látható 3 térrészre. Az egyes megoldásokat az ábrának megfelelően indexeltük. (Az ábrán bejelöltük az egyes hullámamplitúdókat is.)



5.9. ábra. Az alagúteffektus levezetéséhez

- I. térrész (itt $V = 0$):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x^2} = E \Psi_1 \quad (5.4)$$

Ennek megoldásának általános alakja:

$$\Psi_1 = A e^{ikx} - A' e^{-ikx} \quad (5.5)$$

A k (hullámszám) értékét a Schrödinger-egyenletbe való visszahelyettesítéssel nyerjük:

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (5.6)$$

- II. térrész:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + V \Psi_2 = E \Psi_2 \quad (5.7)$$

$$\Psi_2 = B e^{i\alpha x} - B' e^{-i\alpha x} \quad (5.8)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} \quad (5.9)$$

- III. térrész: itt a megoldásban csak kifutó síkhullámot tételezünk fel.

$$\Psi_3 = C e^{ikx} \quad (5.10)$$

Ha ezeket a megoldásokat visszahelyettesítjük a Schrödinger-egyenletbe, és felírjuk a peremfeltételeket, akkor az egyes hullámfüggvény-amplitudókra (A , A' , B , B' és C) kapunk egy egyenletrendszert, mely a következő alakot ölti:

$$A - A' = B - B' \quad (5.11)$$

$$\kappa A + \kappa A' = \alpha B + \alpha B' \quad (5.12)$$

$$B e^{i\alpha x} - B' e^{-i\alpha x} = C e^{i\kappa a} \quad (5.13)$$

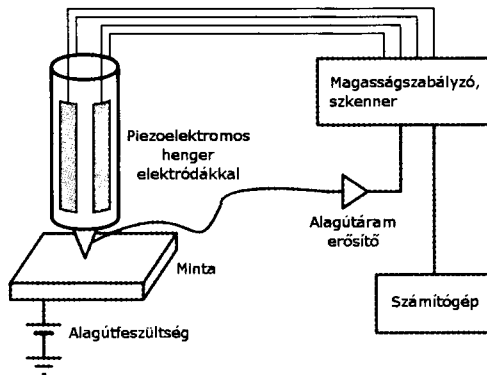
$$\alpha B e^{i\alpha x} + \alpha B' e^{-i\alpha x} = \kappa C e^{i\kappa a} \quad (5.14)$$

Ha a transzmissziós együtthatót, azaz az $T = (C/A)^2$ arányt kifejezzük az egyenletrendszerből, és azzal a feltételezéssel élünk, hogy a potenciálgát keskeny és alacsony, a T -re az alábbi közelítő összefüggést kapjuk:

$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-2\alpha a} \quad (5.15)$$

A fentiekből látszik, hogy az áthaladás valószínűsége a szigetelő vastagságától exponenciálisan függ. Vagyis ha két, vékony (nanométeres nagyságrendű) szigetelővel elválasztott vezető között potenciálkülönbséget hozunk létre, akkor a szigetelő vastagságától erősen függő áram fog folyni.

Ezzel tulajdonképpen el is érkeztünk az STM (egyik lehetséges) „receptjéhez”: vegyünk két vezetőt (az egyik a mérendő minta, a másik a *probe*), hozzunk létre közöttük néhány nm vastagságú szigetelő réteget (az esetek többségében megfelelő a levegő is, igényesebb megoldások esetében vákuum), mozgassuk a szondát a minta felett úgy, hogy közben mérjük az alagútáramot. Itt a szonda egy adott síkban mozog. Az alagútáram és a szonda pozíciójának ismeretében felrajzolható a minta „térképe”. A másik lehetséges eljárás, hogy egy visszacsatoló áramkör segítségével az alagútáramot tartjuk állandó értékön. Ennek érdekében a szondát a mintára merőleges irányban mozgatni kell, és eközben regisztrálni a szonda helyének térbeli koordinátáit. A függőleges mozgatót is piezoelektromos módon oldják meg.



5.10. ábra. Az STM blokkvázlata

5.5.1.2. Az STM hegy

Az STM hegy természetesen vezető kell, hogy legyen, ezen kívül pedig követelmény az anyagával szemben, hogy ellenálló legyen. Leggyakrabban volfrámot, illetve platina-irídium ötvözetből készült hegyet használnak. A „hegyezés” legkifinomultabb, és leghatékonyabb módja itt is az elektrokémiai maratás: a volfrám esetében kálium-hidroxid (KOH), a platina-irídium ötvözet esetében kálium-klorid vizes oldatában végezzük az eljárást.

Az STM hegygel szemben nincsenek olyan konkrét követelmények, mint az AFM esetében, hiszen az STM képalkotását alig befolyásolják a mikroszkóp hegyének geometriai viszonyai. A legegyszerűbb STM alkalmazásokban gyakran elég egy finom vágóeszközzel kis szögben elvágni egy volfrám huzalt. Az ilyen módszerrel elkészített STM hegyek geometriája véletlenszerűen alakul ki, a csúcs görbületi sugara $0,1\ \mu\text{m}$ és $1\ \mu\text{m}$ közé esik. A felületén lévő egyenetlenségek gondot okozhatnak akkor, ha a vizsgált mintán nm-nél nagyobb kitüremkedések vannak. Ha azonban a minta közel atomi simaságú, akkor mechanikai vágással készített hegyekkel is elérhető az atomi felbontás.

5.5.2. Felhasználási területek

Az STM alapelvéből látszik, hogy ezzel a módszerrel csak vezető, vagy félvezető minták vizsgálhatók. Fő előnye azonban más eljárásokkal szemben, hogy az esetek túlnyomó részében nem igényel nehézkes mintaelőkészítést, illetve nagyvákuumot sem. (Ellentétben az transzmissziós elektronmikroszkópiával, ahol speciális módszerekkel elő kell készíteni – elvékonyítani – a mintát, valamint az elektronforrás és a minta között ultranagy vákuumot, azaz 10^{-9} Torr-nál kisebb nyomást) kell létrehozni.)

5.5.2.1. Atomi, illetve közel atomi szintű manipuláció

A nanovilágban a megfigyelés eszközei, a mikroszkópok funkciójukban összefonódnak a nanoméretű objektumok célzott elhelyezését végző eszközökkel. Ez az összefonódás egyedülálló a nanotechnológiában: a mikro- és makrovilágban a megfigyelés eszközei egyértelműen elkülönültek a manipuláció eszközeitől.

A nanotudomány művelése során kikerülhetetlen és gyakran nehezen megoldható feladat a létrehozott nanoméretű objektumok célzott mozgatása. A jellemző méretek csökkenése egyre bonyolultabb és egyúttal drágább „gyártó gépek” létrehozását kívánják meg: a mikrotechnológia korában megszokott eszközök (pl.: mikrométeres pontosságú pozicionálók, mikrocsipeszek stb.) a $100\ \text{nm}$ -es körüli mérettartományban nem tudják ellátni funkcióikat. Természetesen a téma fontosságát

gát az adja, hogy a nanoméretű eszközök tömeggyártását valamilyen sorozatgyártásra is alkalmas eszközzel kell tudni megoldani. Jelenleg talán ez a legnagyobb probléma, ami a nanoeszközök robbanásszerű elterjedését megakadályozza. A legtöbb, szakirodalomban publikált nanoeszköz esetében még mindig a véletlen végzi el az összeszerelést. (Például két elektróda közé kívánunk szén nanocsövet felhelyezni. A leggyakoribb módszer az, hogy a nanocsövekből álló port az elektróda felszínére hintjük, majd mikroszkóppal megvizsgáljuk, hogy valamely nanocső a kívánt pozícióba állt-e be. Ha nem, a port eltávolítjuk a felszínről, és újra próbálkozunk.)

Megjegyzendő, hogy a célzott manipuláció nem az egyetlen lehetőség a nanoméretű tárgyak elhelyezésére. A fizikai-kémiai elveken nyugvó önszerveződés tudatos felhasználásával szintén ki tudunk alakítani előre tervezhető komplexebb rendszereket. A gyártás szempontjából nagy valószínűséggel az önszerveződés kihasználása tűnik a legjobb megoldásnak. Az itt tárgyalt manipulációs eljárásoknak valószínűleg pusztán az alap kutatásban, esetleg a kutatás-fejlesztésben marad szerep.

A manipuláció célja a nanotechnológiában a (méret szerint növekvő sorrendben felsorolt) következő objektumok mozgatása:

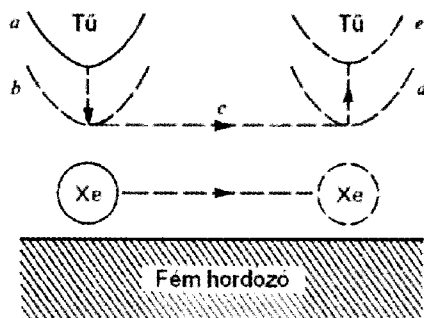
- atomok,
- molekulák, molekulaklaszterek,
- egyfalú és többfalú szén nanocsövek,
- nanowhiskerek, nanovezetékek.

A mozgatást mindeddig minden esetben úgy valósították meg, hogy valamely pásztázószondás elvű mikroszkópnak használták fel a kantileverjét, illetve a tűjét.

A parányi méretek tartományában a van der Waals, és egyéb másodlagos kötések szerepe felértékelődik. Ennek köszönhető, hogy nem kell külön gondoskodnunk a céltárgy megfogásáról, hiszen az külön szerszám nélkül is a manipulációt végző eszközre „felragad”. (A korábban említett szén nanocsővel preparált AFM hegy is ezzel a módszerrel készül.)

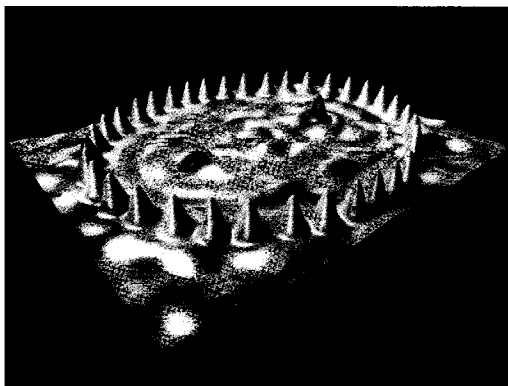
Az atomok „tologatását” STM-mel oldhatjuk meg a leghatékonyabban, ahogyan azt [Eigler, 1990]-ben részletesen leírják.

Először atomi felbontású képalkotással megkeressük a mozgati kívánt, felületen kötött atomot. Az STM tűt az atom felé helyezzük, majd az alagútáram növelésével csökkentjük a tű és az atom közötti távolságot. Ha a megfelelő alagútáram értéket állítottuk be, akkor ezek után az atom együtt fog mozogni a minta felszínén. Mozgassuk tehát a tűt a kiválasztott pozícióig, majd csökkentjük az alagútáram értékét, aminek hatására az atom-tű kölcsönhatás gyengül, és az atom-felszín kötőerő hatására ismét megkötődik a felszínen. Ezeket a lépéseket szemlélteti az 5.11. ábra.



5.11. ábra. Xenon atomok mozgatása STM-mel

Az AFM, illetve STM hegye ezek szerint alkalmas arra, hogy parányi struktúrákat mozgassunk vele. Mozgathatunk közvetlenül atomokat is, amennyiben az elmozdítani kívánt részecskék egy speciálisan előkészített felületen vannak. Az atomi szintű manipuláció legszebb példája a „kvantumkorall” [Manoharan, 2000], amely az 5.12. ábrán látható (SPM felvétel). Ebben az esetben kobalt atomokat helyeztek atomi pontossággal kialakított réz Cu(111) felületre. A kobalt atomokat ellipszis alakban helyezték el. A képen az elektron valószínűsűrségében tapasztalható állóhullámokat láthatjuk.

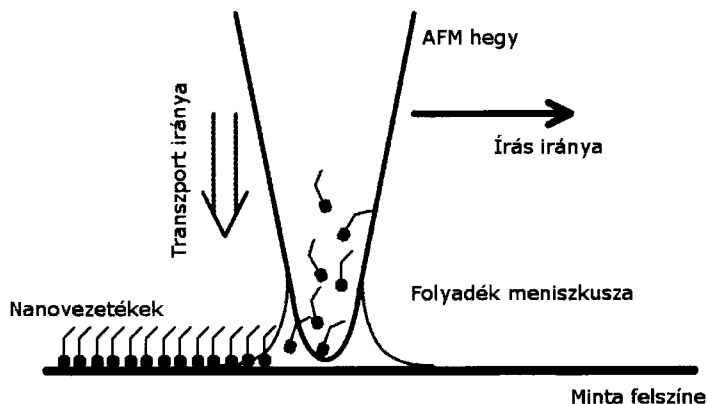


5.12. ábra. Kvantumkorall – példa az atomi szintű manipulációra

Az atomok mozgatásán kívül különböző ötletes technikák alkalmazásával lehetőség nyílik a nanométeres mérettartományba eső makromolekulák, vagy nanostruktúrák irányított elhelyezésére is. Az egyik ilyen technika a „tollmártogató” (DPN – Dip-Pen Nanolithography) eljárás.

Az AFM tűt egy oldatba mártják, és a felületen húzzák. Az AFM hegy és a minta felülete között kialakuló folyadékfelszín (meniszkusz) alatt megy végbe az oldatban lévő molekulák substráthoz való kötődése. A folyamat csak abban az esetben

mehet végbe, ha az oldat fázisban lévő részecskének van olyan része, ami jól kötődhet a minta anyagához.



5.13. ábra. Dip-pen technika

5.5.2.2. Nanolitográfia

Az STM hegyből a mintába alagutazó elektronokat arra is felhasználhatjuk, hogy a mintára felvitt rezisztbe előre programozott alakzatokat rajzoljunk. (Ez az eljárás tulajdonképpen egy speciális elektronsugaras litográfias módszernek is tekinthető.) A szokásos elektronsugaras litográfiánál megszokott rezisztanyagokat itt is használhatjuk, például a PMMA-t, és a SAL601-et. Az elérhető felbontás 100 nm-nél is kisebb lehet.

A konkrét eljárás lépései a következők:

- A szeleteket fluorsav oldattal megtisztítják a felszínen lévő oxidrétegtől.
- Felviszik a rezisztet kb 50–100 nm-es vastagságban.
- Az expozíció itt tulajdonképpen abból áll, hogy az STM tűvel a kívánt minta szerint pásztázunk. Eközben a hegy és a szubsztrát közé akkora feszültséget kell kapcsolni, ami lehetővé teszi, hogy az STM tűből elektronok emittálódjanak a rezisztbe.

Ezek után az előhívás megegyezik a hagyományos elektronlitográfiánál megszokottal.

5.6. Egyéb SPM eszközök

5.6.1. Közeltéri optikai pásztázó mikroszkóp (NSOM)

A hagyományos optikai mikroszkópokban a megvilágító fényforrás a mintától távol helyezkedik el. Ennek köszönhető, hogy a felbontást korlátozza a diffrakciós limit. Klasszikus hullámoptikából ismert, hogy f fókusz távolságú, a apertúrájú optikai rendszeren áthaladó λ hullámhosszúságú nyaláb által létrehozott folt legkisebb lehetséges átmérője:

$$d = 1,22 \frac{\lambda f}{a} \quad (5.16)$$

Innen látszik, hogy amennyiben a fényforrás távolférfi sugárfónak tekinthető (ez gyakorlatilag a hagyományos fénymikroszkóp), akkor a rendszer felbontása nem növelhető minden határon túl. Általánosságban elmondható, hogy a hagyományos optikai mikroszkóp felbontása nem lehet nagyobb, mint a megvilágító fény hullámhosszának tizedrésze, vagyis kb. 100 nm.

Már 1928-ban Syngé felvetette [Syngé, 1928], hogy a diffrakciós limit nem határolja be a felbontást, ha a mintát rendkívül közel helyezzük el a fényforráshoz. Több évtizedig kellett azonban várni, amíg ez az elv megvalósíthatóvá vált.

Nem megfelelő módon a mikrohullámú adatközlés fénykorában E.A. Ash és G. Nicholls mikrohullámmal demonstrálja [Ash, 1972] Syngé feltevésének helyességét. Az első, fénnel működő eszközt az IBM zürichi kutatóközpontjában 1984-ben helyezte üzembe Pohl és kutatócsoportja. NSOM (NSOM – Near-Field Scanning Optical Microscopy) [Pohl, 1984], [Paesler, 1996].

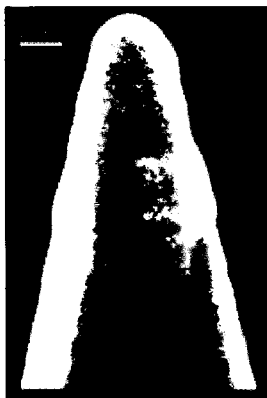
A közeltéri mikroszkópok esetében a fényforrást a mintához rendkívül közel, tipikusan 5–50 nm-re helyezik el. Ezt egyedül speciális optikai szállal lehet megvalósítani. (A NSOM-okban használt optikai szálak hegye kúpszerűen van kialakítva, és külső oldalára fém bevonatot – általában alumíniumot – hoznak létre. Az így elérhető legkisebb foltméret 10 nm-es nagyságrendű, ami a látható fény diffrakciós limite alatt van.) A fényforrás leggyakrabban látható hullámhossztartományban sugárfzó lézérdióda.

Az 5.14. ábrán egy NSOM célokra előkészített fényvezető szál végéről készült mikroszkópos felvételt láthatunk. A hegy külső bevonata ebben az esetben alumínium.

A NSOM eszközöknek több képalkotási módjuk ismert, és bizonyos esetekben spektroszkópiái alkalmazásra is alkalmas:

- Transzmissziós mód: a detektor és a fényforrás között helyezkedik el a minta.
- Reflexiós mód: a detektor a mintáról visszavert (visszaszórt) fényt érzékeli.
- „Begyűjtő” mód: külső fényforrás mintáról visszaverődő fénye becsatolódik az optikai szálba, és ezt a becsatolt intenzitást mérjük.

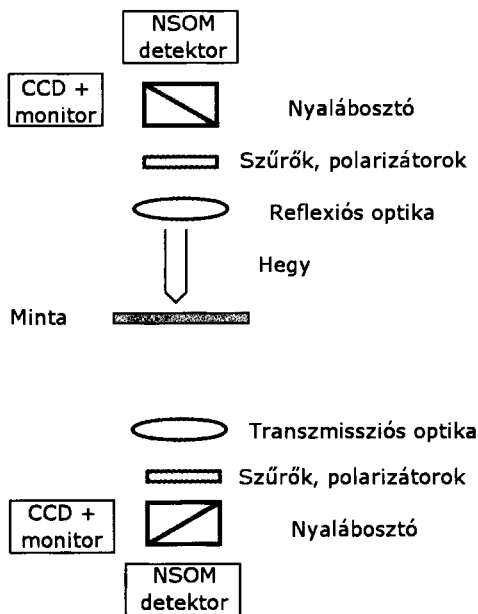
- Kivilágítás+detektálás: ez a mód a reflexiós és begyűjtő módok kombinációja: az optikai szálnak itt kettős szerep jut: fényforrásként és detektorként is funkcionál.



5.14. ábra. NSOM hegy

A NSOM alkalmazási lehetőségei meglehetősen szerteágazóak. Leggyakrabban biológiai kutatásokban használják a NSOM eszközöket, ami érthető is, hiszen a biológiai minták megfigyelésére az optikai mikroszkóp a legalkalmasabb.

Egy tipikus NSOM elrendezést láthatunk az 5.15. ábrán.



5.15. ábra. Tipikus NSOM elrendezés

A fenti elrendezéshez természetesen hozzátartozik egy adatfeldolgozó rendszer is, amely a megfelelő szűrési módszerek alkalmazása után megalkotják a képet.

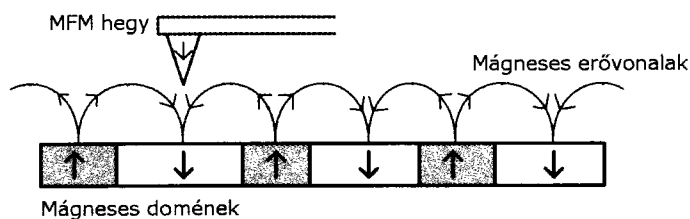
5.6.2. Mágneses szerkezetmeghatározás (MFM – Magnetic Force Microscopy)

Képkalkotásra és mintaanalízisre felhasználhatjuk a minta és a hegy között fellépő mágneses kölcsönhatást is. Ha a hegyet ferromágneses bevonattal látjuk el (például 10 nm rétegvastagságú vas réteg párologtatásával), az SPM kantilever a minta és a hegy közötti mágneses kölcsönhatásról szolgáltat információt. Felvetődhet a kérdés, hogy a mágneses „erőtérkép” felrajzolásánál nem zavar-e a minta topográfiája, azaz az AFM-eknél megismert atomi erőhatás. A válasz egyértelmű nem, hiszen a mágneses kölcsönhatás hatótávolsága az atomi potenciál által létrehozott elektromos kölcsönhatásnál nagyságrendekkel nagyobb. Ebből következően az MFM alkalmazásoknál a minta-hegy távolság nagyobb kell, hogy legyen, mint az AFM alkalmazásnál. A mágneses erőterkép felbontása ezáltal kisebb, mint az AFM képé, 50 nm körüli felbontás azonban nagyobb nehézségek nélkül is elérhető.

Az MFM legnyilvánvalóbb alkalmazási területe egyértelműen az információs technológiával kapcsolatos. Jelenleg kereskedelmi forgalomban nem létezik jobb megoldás a személyi számítógépekben az adatok tartós, nagy mennyiségű, az optikai tárolókhoz képest gyors kiolvasást biztosító elhelyezésére, mint a merevlemez. Az adatsűrűség a mágneses elven működő merevlemezek megjelenése óta drasztikusan megnövekedett. A kiolvasás fizikai elve az elmúlt 20 évben többször is jelentősen átalakult (A fejlődés az induktív író-olvasó fejtől az óriás mágneses ellenállást felhasználó eszközökön át egészen a spinszelepekig tart), azonban a mágneses adattároló lemez fizikai alapjai változatlanok. Egy arra alkalmas anyagban célzottan meghatározzuk a kis méretű mágneses tartományok (domének) mágnesezettségének irányát, ami a bitinformációt hordozza.

Az MFM alkalmazásával minősíthetők az adattárolásra használt lemezek. Szélsőséges esetben MFM segítségével adatmentés is végezhető egy winchesterről, amennyiben a merevlemez mágneses adathordozó rétege nem szenvedett károsodást.

Az 5.16. ábrán látható az MFM képkalkotás sematikus rajza.



5.16. ábra. Az MFM működése

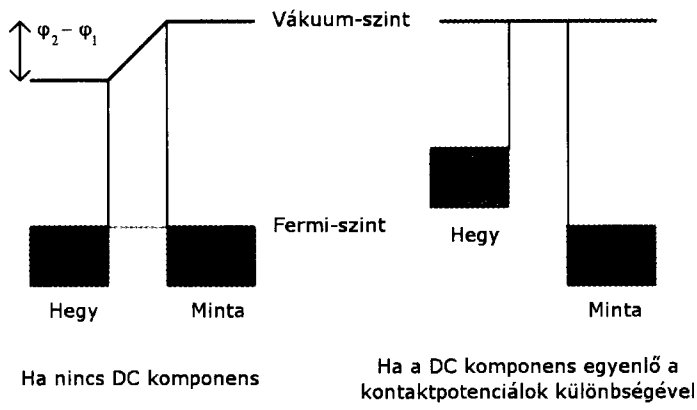
5.6.3. Anyagösszetétel-meghatározás: a KPFM

A pásztázószondás eljárások között van olyan is, amely nem csupán a minta felületének feltérképezésére alkalmas, hanem lokális összetétel-meghatározásra is.

A Kelvin szondás mikroszkópia (KPFM – Kelvin Probe Force Microscopy) tulajdonképpen egy olyan mérési eljárás, amely során pásztázás közben mérjük a minta kilépési munkáját [Nonnenmacher, 1991].

A módszer azon alapul, hogy a vezető (fémmeel bevont szilícium, vagy fémmeel bevont szilícium-nitrid) AFM tű és a minta közötti elektrosztatikus erőt mérjük. A minta és az AFM hegy közé olyan feszültséget kapcsolunk, amelynek van egyenáramú (DC) és váltóáramú (AC) komponense.

A következő ábra mutatja a hegy és a minta sávszerkezeti grafikonját a vákuumszintek és a Fermi-szintek feltüntetésével. A kontaktpotenciálok közötti különbség a mérendő mennyiség. (A kontaktpotenciálból kalibrálás után meghatározható a kilépési munka, ami pedig anyagi konstans.) Ha a minta és a hegy között nincs potenciálkülönbség, akkor a Fermi-nívók megegyeznek. Ekkor a vákuumszintek között jelenik meg egy $\varphi_2 - \varphi_1$ nagyságú különbség. Ezt a $\varphi_2 - \varphi_1$ különbséget fogjuk meghatározni a hegy és a minta közötti elektrosztatikus erő mérésével.



5.17. ábra.
A minta és
az AFM hegy
nívósémája

A mért erőben megjelenik a kontaktpotenciál:

$$F = \frac{dC}{dz} [(V_{DC} + V_{AC} \sin 2\pi f_{AC} t) - (\varphi_2 - \varphi_1)]^2 \quad (5.17)$$

Itt C a hegy és a minta közötti kapacitás, z a távolság, φ_2 a minta, φ_1 a hegy kilépési munkája.

Ezt kifejtve, valamint a tagokat frekvencia szerint szétválogatva az alábbi összefüggést kapjuk:

$$F = \frac{dC}{dz} \left[\frac{[V_{DC} - (\varphi_2 - \varphi_1)]^2}{2} + \frac{V_{AC}^2}{4} \right] + \frac{dC}{dz} \cdot V_{AC} [V_{DC} - (\varphi_2 - \varphi_1)] \sin 2\pi f_2 t - \frac{dC}{dz} \cdot \frac{V_{AC}^2}{4} \cos 4\pi f_2 t \quad (5.18)$$

Innen legegyszerűbben úgy határozhatjuk meg a $\varphi_2 - \varphi_1$ -et, ha egy visszacsatoló áramkör segítségével a hegy és minta közötti feszültség DC komponensét egyenlővé tesszük $\varphi_2 - \varphi_1$ -gyel, ekkor ugyanis az erő Fourier-spektrumában eltűnik az f_2 frekvenciájú komponens, amit egy Lock-in erősítővel könnyen detektálhatunk.

5.7. Mikroszkópos technikák összehasonlítása

Család	Név	Működés elve	Előnyök	Hátrányok
Optikai	Optikai mikroszkóp	Optikai transzmissziós, vagy reflexiós	– Egyszerű – Kiforrott technológia	– Diffrakciólimitált – Korlátozott mélységélesség
Elektron	Pásztázó elektronmikroszkóp SEM (scanning electron microscope)	Mintából kilépő (vagy visszaszórt, vagy szekunder) elektronok detektálása	– Nagy mélységélesség („háromdimenziós kép”) – spektroszkópiai lehetőség (EDS)	– szigetelő minták esetében mintaelőkészítést igényel – Vákuumot igényel
	Transzmissziós elektronmikroszkóp TEM (transmission electron microscope)	Nagyenergiájú elektronokkal világítjuk át a mintát	Atomi felbontás	– Körülményes mintaelőkészítés (ionsugaras vékonyítás) – Költséges – Ultranagy vákuumot igényel

A táblázat folytatása a következő oldalon található.

Család	Név	Működés elve	Előnyök	Hátrányok
SPM	Atomerő-mikroszkóp AFM (Atomic Force Microscope)	Minta és AFM hegy közötti erőhatás mérése	<ul style="list-style-type: none"> – Sokrétű felhasználás – Nem igényel mintaelőkészítést – Nincs szükség különleges atmoszférára 	<ul style="list-style-type: none"> – Atomi felbontás csak speciális körülmények között elérhető – Rezgésre fokozottan érzékeny
	Pásztázó alagút-mikroszkóp STM (Scanning Tunneling Microscope)	Minta és SPM hegy közötti alagútáram mérése	<ul style="list-style-type: none"> – Nem igényel mintaelőkészítést – Nincs szükség különleges atmoszférára 	<ul style="list-style-type: none"> – Csak vezető (esetleg félvezető) minta vizsgálható
	Köztéri optikai mikroszkóp NSOM (Near-Field Optical Microscope)	Rendkívül kis apertúrájú fényforrást használó transzmissziós, vagy reflexiós optikai	<ul style="list-style-type: none"> – Spektroszkópiai alkalmazás – Diffrakciós limit nem korlátozza a felbontást 	

5.8. Összefoglalás

Ebben a fejezetben megismerte az Olvasó a nanotudomány „szemeit”, a pásztázószondás mikroszkópokat. Bemutattuk az egyes mikroszkópok működési alapelveit, valamint példák szintjén tárgyaltunk néhány alkalmazásukat, bővebben tárgyalva a nanoméretű tárgyak manipulációját.

A célunk az volt, hogy az Olvasónak egy átfogó képet nyújtsunk a képalkotásra a nanoméreték szintjén is képes eszközök működéséről. Természetesen a teljes téma részletekbe menő tárgyalására egy könyvfejezeten belül nem nyíltatott alkalom, azonban reméljük, hogy az alapismereteken túlmutató információkkal szolgáltunk.

5.9. Irodalomjegyzék az 5. fejezethez

- [Ash, 1972] E.A. Ash, G. Nicholls: Super-resolution Aperture Scanning Microscope, *Nature*, 237, p.510–512, 1972
- [Bhushan, 2004] Bhushan B.(szerk.): Handbook of Nanotechnology, Springer, 2004.
- [Binning, 1986] G. Binning, C. F. Quate, Ch. Gerber: Atomic Force Microscope *Phys. Rev. Letters*, 56 (9) p.930–933, 1986
- [Eigler, 1990] D.M. Eigler, E.K. Schweizer,: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, 344, p. 524–526, 1990
- [Manoharan, 2000] H. C. Manoharan, C. P. Lutz, D. M. Eigler: Quantum mirages formed by coherent projection of electronic structure, *Nature*, 403, p. 512–515, 2000
- [Nagy, 2000] Nagy K.: Kvantummechanika, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2000.
- [Nonnenmacher, 1991] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe: Kelvin probe force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 58, 2921, 1991,
- [Paesler, 1996] M.A. Paesler, P.J. Moyer: Near-field Optics – Theory, Instrumentation and Applications, Wiley, 1996
- [Pohl, 1984] D.W. Pohl, W. Denk, M. Lanz: Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$ *Appl. Phys. Letters*, 44 (7) p.651–653, 1984
- [Pungor, 1996] Pásztázó alagúteffektuson és erőkölsönhatáson alapuló mikroszkópia műszertechnikai és mérés technikai megfontolásai (PhD értekezés, Budapest)
- [Synge, 1928] E.H. Synge: A suggested method for extending the microscopic resolution into the ultramicroscopic region, *Phil. Mag.* 6, 356, 1928

*Ha az erőd kevés, a fele
úton kidőlsz, de ne feküdj le
az út elején.
Konfuciusz (Kr.e. 551–479)*

6. Nanoelektronika

A nanotechnológiának két legismertebb alapterméke a nanocsövek és a nanovezetékek. Azonban ezek működését már nem tudjuk az eddigi ismereteink alapján magyarázni. A nanométeres tartomány következménye, hogy a korábbi modellek általában alkalmatlanok az eszközök leírására. A vizsgálatok során egy sor új jelenséggel találkoztak, amelyek okaira többnyire csak feltételezések léteznek. Viszont, hogy tervezni tudjunk ezen nanoméretű eszközökkel, szükséges, hogy mélyebben megismerkedjünk fizikai hátterükkel, kiváltképp a vezetőképességükkel, legyen szó akár hő- akár elektrontranszportról. A jelen fejezet célja, hogy ezeknek az építőelemeknek a nanoelektronikai alkalmazását mutassa be. Itt sem törekedhetünk teljességre, figyelmünket inkább arra összpontosítjuk, hogy milyen problémák várnak még megoldásra.

6.1. Elektromos vezetés és transzportfolyamatok nanoobjektumokban

Kétféle objektumot vizsgálunk: csöveket és vezetékeket.

6.1.1. Elektromos vezetőképesség és transzport nanocsövekben

Ahhoz, hogy a nanoobjektumokat elektronikus eszközökben alkalmazzuk, ismernünk kell vezetési tulajdonságaikat. Számos nanocső illetve nanovezeték elektromos tulajdonságait, vezetőképességét, áram-feszültség karakterisztikáját sikerült meghatározni; még most sem tudni túl sokat az elektromos transzportról ezen eszközökben. Az elektronok ballisztikusan haladnak bennük [Hone, 1999].

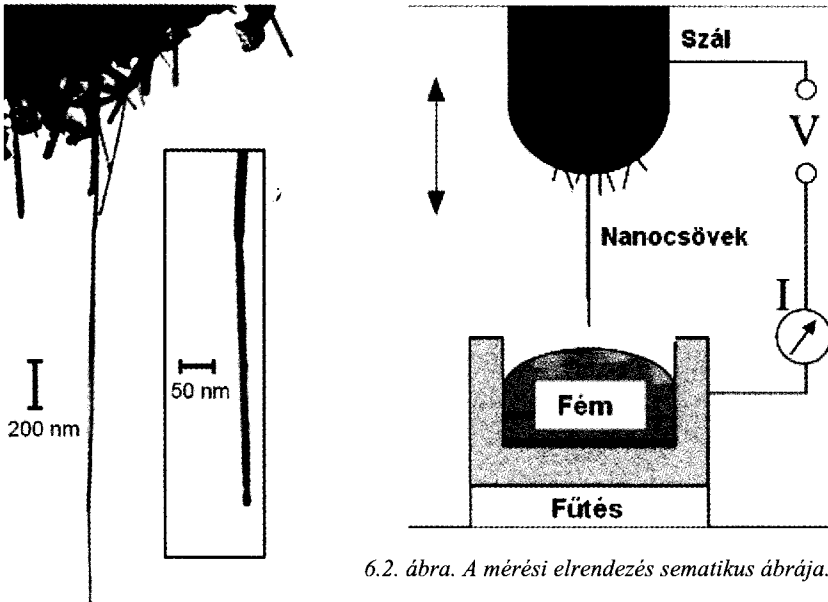
A kvantált vezetőképesség a nagytisztaságú vezetők és ezeken található beszűkülések hullámvezető (elektronhullám) tulajdonságából ered. Amikor a vezetők

hossza rövidebb, mint az elektron szabad úthossza, akkor az elektron transzport ballisztikus. Ebben az esetben minden egyes transzverzális hullámmódus, amely tekinthető egy-egy vezető csatornának, G_0 értékkel járul hozzá a teljes vezetőképességhez, ahol G_0 a vezetőképesség kvantum (conductance quantum $G_0 = (12,9 \text{ kohm})^{-1}$). Számítások szerint az egyfalú nanocsöveknek két ilyen vezető csatornája van, amely előrevetíti, hogy egy SWNT vezetőképessége $2G_0$ lesz, függetlenül az átmérőtől és a hosszától.

Nagyon fontos következménye a ballisztikus transzportnak, hogy nem disszipálódik energia a vezetőben. A Joule-hő tehát nem a nanocsőben, hanem a nanocsövet a makroszkopikus egységekkel összekötő hozzávezetésekben és a kontaktusokon disszipálódik. Ezek a tulajdonságok rugalmas szóródás esetén állnak fenn, amelyet kiválthatnak például szennyeződések és rácshibák egyaránt. Mindemellett a rugalmas szóródás hatással van a transzmissziós együtthatóra, aminek következtében csökken a vezetőképesség. Innentől kezdve viszont már nem lesz teljesen kvantált a vezetőképesség, hiszen a különféle hibák következtében fellépő szóródás függvénye lesz a konduktancia kvantum.

Az itt tárgyalásra kerülő kísérlet mérési elrendezése a következő. Többfalú szén nanocsöveket használtak. A nanocsövek $1\text{--}10 \mu\text{m}$ hosszúak és kifejezetten egyenesek. Nagy felbontóképességű transzmissziós elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok szerint a külső átmérőjük $5\text{--}25 \text{ nm}$, belső átmérőjük $1\text{--}4 \text{ nm}$ és a legtöbb esetben 15 réteget számoltak. Ezek a nanocsövek be vannak ágyazódva egy szálba, ami az ívkisülés során keletkezik, tehát itt ívkisüléssel technológiával előállított anyagokat tárgyalunk. Ezek a szálak számszerűen $50 \mu\text{m}$ átmérőűek. Maguk a szálak nanocsövekből és szén szemcsékből állnak, nagyon tiszták. TEM-os vizsgálatok megmutatták, hogy számos, meglehetősen hosszú (több, mint $3 \mu\text{m}$) nanocső áll ki a szál hegyéből. Ezek általában több nanocsővel vannak egy kötegben, de a végükön mindig csak egy cső van. A szálát hozzáerősítik egy aranyvezetékhez, és az így kapott nanocsőkontaktust teszik az SPM (SPM – Scanning Probe Microscope) tűjének a helyére, így azt könnyedén lehet mozgatni az SPM mozgatószerkezetével (6.1. ábra).

Egy fűthető réztartályba higanyt töltenek (de egyéb, alacsony olvadáspontú fém is használható), és ezt a nanocsőkontaktus alá helyezik (6.2. ábra). Ez a folyékony fém fogja a másik kontaktust adni (LMC – Liquid Metal Contact), minek következtében egy könnyen reprodukálható kontaktust tudunk létrehozni, a higany ugyanis nem nedvesíti a nanocsövet. A TEM-os vizsgálatok kimutatták, hogy a fémbemártás előtt a nanocsöveket tiszta szénszemcsék borítják, míg utána teljesen mentesek lesznek tőlük. A 6.1. ábrán már egy ilyen, szennyezőktől teljesen megtisztított nanocsőköteget láthatunk.

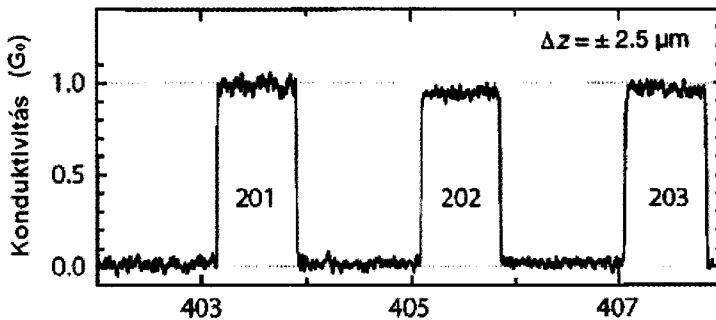


6.2. ábra. A mérési elrendezés sematikus ábrája.

6.1. ábra. TEM mikroszkópos felvétel, egy a vizsgálatokhoz használt szálról. Az itt látható minta ~ 1 mm hosszú és 0.05 nm átmérőjű. A kinyúló nanocső kb 2.2 μ m hosszú és 14 nm átmérőjű, szénzemcséktől teljesen mentes. Ezzel a nanocsővel egy kötegben több nanocső is látható, a második körülbelül 400 nm-el rövidebb.

A mérés során tehát a nanocsőkontaktust beleeresztik a LMC-ba. A fémes kapcsolat létrejötte után ciklikusan beleengedik, majd kihúzzák.

Jellegzetes mérés eredményét mutatja a 6.3. ábra.



6.3. ábra. A mért vezetőképesség az idő függvényében. A mérés során a fejet ± 2.5 μ m-el mozdítottuk el, vagyis minden esetben legfeljebb egy nanocső érintkezett a LMC-vel. Több ciklus látható a képen, bizonyítva ezzel a mérés reprodukálhatóságát.

Mint a 6.3. ábrán látható egy nagyjából vízszintes szakasz található a $1G_0$ és 0-nál, e két érték között viszont éles átmenet látható, tehát ahogy beleér a nanocsőkontaktus az LMC-ba, a konduktivitás felugrik 0-ról $1G_0$ -ra, sőt láthatóan mindegy hogy a nanocsőből milyen hosszú szakasz érintkezik a LMC-al. Az észlelt vezetőképesség megegyezik a feltételezett ballisztikus transzporttal, viszont összeegyeztethetetlen a klasszikus vezetőképesség fogalmával, ahol a konduktivitás a hosszal fordított arányban növekszik. Az így megfigyelt ballisztikus tulajdonságok és a G_0 körüli vezetőképességből már következtethetünk arra, hogy a nanocsövek valóban kvantum ellenállások. Az itt kapott eredmények a rendelkezésre álló egyéb kísérleti bizonyítékok tükrében általános tulajdonságnak tekinthetők.

A legtöbb esetben nem egyszerűen egy G_0 -ás ugrást tapasztalunk, hanem ugrások sorozatát. Ezek az ugrások akkor jelentkeznek, amikor más nanocsövek is kontaktusba kerülnek a LMC-al.

6.1.2. Termikus vezetőképesség és fonon transzport

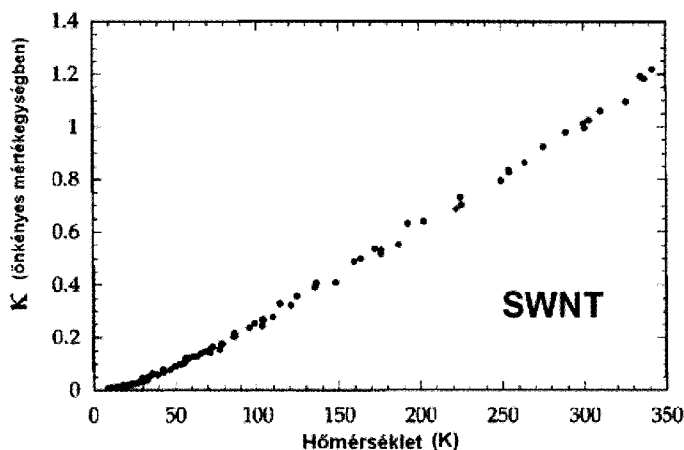
Az eddigiekben főleg az elektromos transzportról volt szó, illetve ebből adódóan a nondisszipatív tulajdonságokról. Viszont épp csak megemlítettük, hogy a nanocsövek feltételezhetően kiváló hővezetők is, de mélyebben nem vizsgáltuk meg ezen tulajdonságukat. A következőkben szennyezőktől mentes szén nanocsövek, pontosabban SWNT-ok, hőmérsékletfüggő hővezető képességét fogjuk megvizsgálni 8–350 K-es tartományban.

6.1.2.1. Hővezetőképesség vizsgálata szén nanocsövekben

Szénelapú anyagoknál (gyémánt és természetes grafit) mérték eddig a legnagyobb hővezetést normál hőmérsékleti viszonyok között [Leo, 2000]. A szén nanocsövek felfedezésekor sokakban felvetődött, hogy ez az újfajta szén talán még jobban is vezet, mint az eddigi szénszármazékok. Viszont a méréseknek nagy problémája volt, hogy többnyire csak rossz minőségű nanocsöveket sikerült készíteni. Mára azonban sokat fejlődött az előállítási technológiájuk, aminek köszönhetően már lehetséges a nagytisztaságú, szennyezőktől mentes közel egyenes eloszlású SWNT-okból álló kötegek növesztése. Ezek a nanocsövek már alkalmasak hő és elektromos tulajdonságok vizsgálatára.

A termikus vezetőképességet összehasonlításos módszerrel mérték. A fonatokból (hozzávetőleg $5\text{ mm}/2\text{ mm}/2\text{ mm}$) kis mintákat készítettek, amiket sorosan hozzáerősítettek egy konstantán rúdhoz. A rúd hőmérsékletfüggő hővezető képességét már előzőleg megmérték. Differenciál-termoelemeket kapcsoltak közvetlenül a mintához és a rúdhoz, amelyek segítségével mérni lehet a hőmérsékletesést mindegyiken. Egy hőforrást helyeztek el a rúd végén, aminek következtében egy

hőáram indul meg a konstantán rúdon és a mintán keresztül. Összehasonlítva a hőmérsékleteséseket, a hővezetőképesség már számítható.



6.4. ábra. Hővezetés a hőmérséklet függvényében (nem SI mértékegységben) [Leo, 2000].

A 6.4. ábrán megfigyelhetjük a mért termikus vezetőképességet (κ) a hőmérséklet függvényében, egy átlagos SWNT-re. 350 K és 40 K között a κ egyenletesen csökken a hőmérséklettel, csak egy enyhe görbület látható az ábrán.

A hővezetés hőmérsékletfüggése szembetűnően különbözik a grafitétól, habár mind a kettő azonos síkokból építkezik. Egy jó minőségű természetes szén ab-síkjában (grafit sík mentén) a termikus vezetőképesség, ami lényegében akusztikus fononok következménye, a hőmérséklettel körülbelül $T^{2/3}$ függést mutat egészen 150 K-ig. Ebben a pontban a fononok közti úgynevezett átfordulási szóródás következtében a vezetőképesség határozottan csökkenni kezd növekvő hőmérséklet mellett. A mért termikus vezetőképesség nagyon tiszta grafit minták esetén 2000 W/mK szobahőmérsékleten, és a csúcsnál elérheti a 6000 W/mK értéket is.

6.1.2.2. Fononok nanoméretű rendszerekben

A hővezetést tudományosan magyarázni csak a fononok ismeretében lehetséges [Simpkins, 2006]. Az előbbieken már felmerült ez a fogalom, de mik is ezek a fononok? Amikor egy anyag egyik végét melegítjük energia fog áramlani a melegebb végétől a hidegebb felé. Szilárd testekben a hőt szállíthatják az elmozdulni képes elektronok, vagy az atomok, oly módon, hogy rezegni fognak saját egyensúlyi pontjuk körül. Az atomoknak ez a rezgése nem véletlenszerű, hanem együttesen mozognak, és közösen egy hullámot képeznek. Ezeket a hullámokat hívjuk fono-

noknak. Szigetelőkben például mozgásképes elektronok hiányában csak fononok képesek az energia továbbítására. Maga a fogalom nem új és már régóta használják termikus viselkedések leírására.

A nanoméretű struktúrákban azonban már nem keletkezhetnek akármilyen fonon hullámok, ahogy tetszőleges energiájú, illetve koherens hullámhosszú elektronok sem. Az összes lehetséges fonon közül a leghosszabb hullámhosszhoz tartozik a legkisebb energia. Nagyobb hullámhosszak, és így kisebb energiájú fononok nem lehetnek. Kisebb struktúrákban a maximális hullámhossz csökken, ennek megfelelően pedig a minimális fononenergia növekszik. Amikor már olyan kis méretre megyünk le, hogy a minimális fononenergia túllépi a termikus energiát, akkor már a kvantumfizika törvénye lépnek életbe. Ezek alapján arra lehet következtetni, hogy a fonontranszport is kvantált lehet, ahogyan az elektrontranszport. Ez kissé meglepő, mivel az elektronok töltéssel és tömeggel is rendelkeznek, míg fononok egyikkel sem. Továbbá az elektronokra és fononokra más kvantumstatistikák érvényesek. Mégis az elméleti kutatások is a fonontranszport kvantáltságát jósolták. Mérésük azonban sokkal problémásabb, mint a vezetőképesség esetén.

A nanotechnológia a hőszigetelés terén is szerephez jut. Nanoméretű rétegek laminálásával igen jó hőszigetelő anyagokat lehet előállítani. Ezek volfrám és alumínium-oxid nanoméretű vastagságú rétegek laminálásából keletkeznek. Hőszigetelő képességüket még 1000 °C felett is megtartják a hővezetés értéke ekkor kb. 6 W/mK.¹

6.1.3. Elektromos vezetés és transzportmechanizmusok nanovezetékekben

A nanovezetékek a nanocsövekhez hasonlóan alapelemei lehetnek a jövő elektronikus eszközeinek. Bőséges irodalma van a lehetséges felhasználásuknak, adalékolásuknak, de elektromos hordozóik tulajdonságáról, azok transzport mechanizmusáról eddig kevés megcáfолhatatlan eredmény született, többnyire elméletek léteznek, amik még bizonyításra szorulnak.

A következőkben nanovezeték elektromos tulajdonságait fogjuk megvizsgálni elektromos vezetés szempontjából, illetve a megfigyelt vezetési tulajdonságok lehetséges magyarázatait tekintjük át. Példánk anyaga a GaN [Lee, 2004]. A GaN tipikusan n-típusú vezetést mutat, amennyiben nem szándékosan adalékoltuk p-típusúra. A vegyület-félvezetők esetén ezt az úgynevezett „nitrogen-site oxygen”-nek (O_N) tudták be. A nanovezetékek esetében azonban figyelembe kell venni az előállítás során használt VLS (VLS – Vapor-Liquid-Solid) modell következményeit, illetve a nagy felület/térfogat arányt, ami során már teljesen más

¹ NANO, 9/3/3

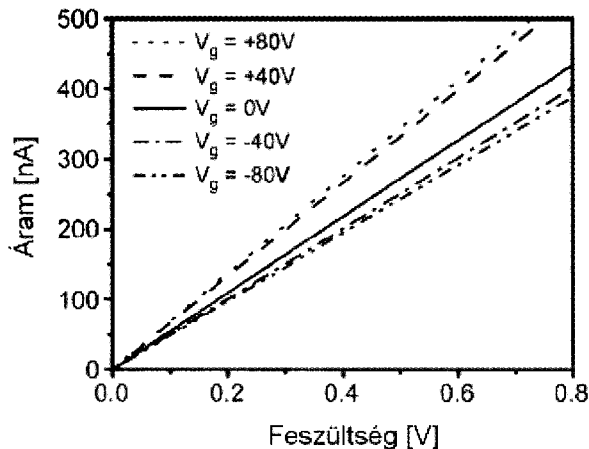
mechanizmus magyarázhatja az n-típusú tulajdonságot. Ennek megvizsgálásra NW-FET-et (NW – Nanowire) készítettek, és ennek tulajdonságaiból próbáltak levonni következtetéseket. A kísérletek során 200 nm-es $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ hordozóra helyezték a vezetékeket, majd elektronlitográfiával Au/Ti kontaktusokat alakítottak ki. Gatefeszültségfüggő karakterisztika felvételéhez pedig az n-Si hordozót használták általános gate kontaktusnak. A GaN NW-ek 10–20 μm hosszúak és 67 ± 20 nm átmérőjű egykristályok.

A gate-függő karakterisztika a 6.5. ábrán látható. Az adalékolatlan minták ohmos viselkedést mutattak, és a vártaknak megfelelően n-típusúak. Ez egyértelműen következik abból, hogy a gate feszültség csökkentésével a vezetés is csökken. A teljes kiürítést nem sikerült elérni, mielőtt az oxidréteg átütött volna. Ez kb. 100 V-nál történt meg, ami ~ 5 mV/cm-es térerősségnek felel meg.

A vezetést normalizálva a vezeték méreteivel, megkapjuk a vezetőképességet, σ -t. A

$$\sigma = en\mu \quad (6.1)$$

képletből pedig becsülhető az elektronsűrűség. Az eredményeket 20 mérés átlagolásából származtatták. A becsült töltés hordozó sűrűség $3 \cdot 10^{18} - 10 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.



6.5. ábra. A mért I - V görbék különböző gate feszültségek mellett

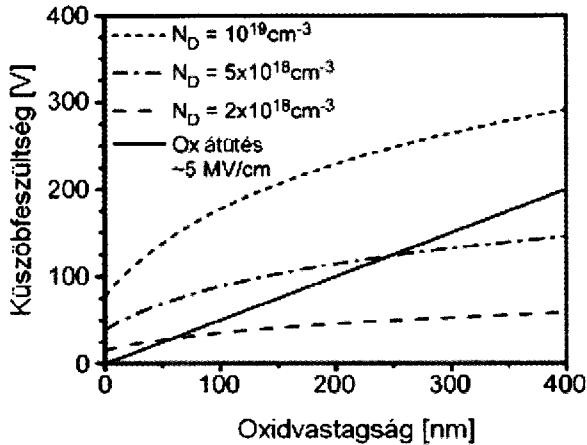
A 6.5. ábrán látható, hogy nagyon nagy gate feszültségek szükségesek, ahhoz hogy jelentősebben megváltozzon a vezetés. Ez elsősorban a nagy töltéshordozó-sűrűségnek és a nagy vezetékátmérőnek a következménye. Ez jól érzékelhető, ha megnézzük, hogy függ a küszöbfeszültség (V_{th}) a paraméterektől.

$$V_{th} = Q_{NW} / C, \quad (6.2)$$

ahol Q_{NW} az összes mozgásra képes töltéshordozó, ami egyenesen arányos a töltéshordozó sűrűséggel. C a hosszegységre jutó kapacitás, amit

$$C = \frac{1}{2 \ln(2h/a)} \quad (6.3)$$

képlettel számolhatunk, ahol a a vezeték átmérője, a h pedig az átmérő plusz az oxidréteg vastagsága. A V_{th} görbe az oxidvastagság függvényében a 6.6. ábrán látható több töltéshordozó-sűrűség mellett. A számításokat 70 nm-es vezetékátmérővel végezték. A letörési feszültséget is feltüntettük az oxidvastagság függvényében. Ahogy várható volt, V_{th} növekszik mind az oxidréteg, mind pedig a töltéshordozó-sűrűség növekedtével. Mindemellett láthatjuk, hogy a vizsgált, ~ 200 nm átmérőjű nanovezetékek esetén az átütés előbb megtörténik, mint a teljes kiürítés, amennyiben a töltéshordozó-sűrűség meghaladja az $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ -t. Egy másik jelentős következménye az eredményeknek, hogy az oxidvastagsággal a letörési feszültség lineárisan a küszöbfeszültség logaritmikusan növekszik. Ez a tulajdonsága a NW-FET-nek alapvetően különböző, mint a hagyományos FET-ké, ahol mind a két feszültség lineáris kapcsolatban van az oxidvastagsággal².



6.6. ábra. A küszöbfeszültség az oxidvastagság függvényében, különböző hordozósűrűség mellett

A nanocsövek mind nagy áramok, mind viákban történő alkalmazásokban adnak lehetőséget [Vajtai, 2006].

² Bódis Balázs, Tibenszky Zoltán, Póser István, Nagy Károly, Zádor Péter Dávid eredményei alapján

6.1.4. Nanovezetékek elektromos paramétereinek módosítása

Alapesetben a nanovezetékek elektromos tulajdonságai ismeretlenek, vizsgálatok szükségesek, hogy megállapítsuk n-típusú vagy p-típusú a vezetés, a konduktivitás is viszonylag nagy szórást mutat, ami főként a geometriai eltérésekből adódik. Tudatos adalékolással befolyásolhatóak a nanovezetékek elektromos paramétere. Az adalékolásra nézünk példát a következőkben Si nanovezetéken keresztül [Huang, 2002].

A SiNW-nek leggyakoribb előállítási technikája a VLS növesztés. Ennek során aranyat használnak a szükséges gázok bomlásának katalizálásához. Általában szilánt (SiH_4) használnak, amiből Si-Au ötvözet képződik, majd amikor túltelítődik, a Si kicsapódik. Az adalékoláshoz a szilán mellé diboránt (diborane B_2H_6) vagy újabban trimetil-bórt (TMB (CH_3)₃B) használnak. Az eredmény egy p-típusú vezetést mutató nanovezeték. Az adalékolás erőssége változtatható a növesztés során használt gázok arányával, ezzel pedig a vezetőképesség is változik.

A nanotechnológiában a nanoeszközök paramétereinek megváltoztatását funkcionizálásnak is nevezik. A nanométeres tartományba eső hibák, a széntől különböző anyagok beépülése a szén anyagú nanoobjektumokba módosíthatják az elektronszerkezetet. A szén nanocsövek előállítási technológiája is jelentős befolyást gyakorol a hibák sajátosságaira, az ívkisüléssel előállított anyag kevesebb, a katalitikus bontással előállított termékek több hibahelyet tartalmaznak. A hibahelyek kapcsolódást jelenthetnek a környezet anyagainak is, ami az érzékelés alapfunkciója [Clement, 2001].

A funkcionizására számos módszert leírtak [Gergely, 2007], és az a gyanúnk, hogy még többet titokban tartanak. Az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a golyós malmos őrlés [Csanády, 2007]. A folyamatot általában valamilyen gáz atmoszférában végzik, az ütközés során összetört nanocsövekben képződő hibák helyére kötnek be a gázmolekulák.

A nedves kémiai funkcionizálás során a savas kezelés szakítja szét a szén-szén kötést, így teremtve kapcsolódási pontokat.

6.2. Építőelemek

Az első jelentések a szén nanocső tér vezérlésű tranzisztorokról (CNTFET – Carbon Nanotube Field Effect Transistor) 1998-ban jelentek meg. Ezeknek az eszközöknek a szerkezete igen egyszerű volt. A szén nanocsövet úgy helyezték el, hogy az hidat képezzen két arany vagy platina elektróda között, amelyek a tranzisztor source-aként és drain-jeként szolgáltak. Az elektródákat litográfiával hozták

létre, egy szilícium szeletre növesztett oxid rétegen. Ebben az elrendezésben a szilícium szelet „back gate”-ként szolgál [Simpkins, 2006].

Ezeknek a CNTFET-eknek a karakterisztikája hasonló a p-típusú MOS-FET-ekéhez. A teljesítményük megfelelő volt, de az eszközök nagy kontaktusellenállással rendelkeztek, ami limitálta a vezetőképességet 10^{-9} A/V körüli értékre.

Tranzisztor nélküli Static Random Access Memory. Ez egy fém-szigetelő-félvezető (n-típusú) – félvezető (p-típusú) struktúra, ahol a szigetelő mindössze 3 nm vastag. Ez tehát lényegében egy tunel és egy p-n átmenet sorbakapcsolása, amely tirisztor-jellegű karakterisztikát eredményez. Ha az ellenállás terhelésvonalát behúzzuk, két stabil állapotot kapunk, ezt feleltetjük meg a 0-nak és az 1-nek. A különösen erős nem-linearitással rendelkező I-V karakterisztika miatt alacsony a teljesítményfelvétele és a gyors kiolvasásához nagy kiolvasó árama van.

Rezonáns tunel eszközök előállítása Si-ből speciális technológiai nehézséget jelent. A kulcskérdés az, hogy hogyan tudunk a szilícium-oxid tunelréteg tetejére kristályos Si kvantum huzalokat (QW) tartalmazó réteget növeszteni. Ha a növesztést egyszerűn elvégezzük, az amorf SiO_2 tetején nőtt Si-réteg maga is amorf, legfeljebb mikrokristályos lesz.

Ezért a növesztést úgy végzik, hogy kisméretű, szubnanométeres hiányokat (voids) hoznak létre az oxidban s ekkor ezeken a hiányokon keresztül az alul lévő egykristályos szilícium, mintegy magképzőként szerepel. Igen lényeges, hogy ezek a hiányok kicsik legyenek, számuk is csak olyan lehet, hogy a barrier folytonosnak tűnjön.

Nagy barrieres szilícium alapú, heteroátmenetek az eszközfelkészítés megoldandó feladatai. Ilyen rendszer a Si-ZnS, ahol, a ZnS tiltott sáv szélessége kiugróan nagy, 3,6 eV, és viszonylag nagy statikus dielektrikus állandója, ami 8,6. Ezek a rendszerek alkalmasak lesznek gate elektróda alatti szigetelőnek, nagysebességű térvezérlésű tranzisztorok építőelemeként, barrier anyagoknak rezonáns tunneling és kvantum tranzisztorokban, valamint lézerszerkezetekben.

6.3. Az alapvető logikai kapuk megépítése a nanoelektronika eszköztárával

A digitális áramkörök elemi építőköve a logikai kapu. A legtöbb logikai kapunak két bemenete és egy kimenete van. Az adott pillanatban mindegyik terminál vagy 0 (alacsony) vagy 1 (magas) állapotban van. A legtöbb logikai kapuban ezek az állapotok igen gyakran és igen gyorsan változnak. Elfogadott, hogy az alacsony állapot 0 Voltnak a magas állapot +5 Voltnak felel meg. A digitális technikában a logikai kapuknak alapvetően 7 típusát különböztetjük meg.

AND kapu onnan kapta nevét, hogy ha a 0 állapotot elnevezzük „hamisnak” és az 1-et „valódinak”, akkor a kapu úgy működik, mint egy logikai „and” operátor. Az alábbiakban az igazságtáblázat segítségével szemléltetjük a működést.

Az alábbiakban a bemenetek az ábra bal oldalán, a kimenetek jobb oldalán találhatók. A kimenet akkor igaz, ha mindkét bemenet is igaz, egyébként valamennyi ettől eltérő állapot hamis.



AND gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Az OR (vagy) kapu onnan kapta a nevét, hogy kimenete akkor igaz, ha az egyik vagy mindkét állapota igaz. Ha mindkét bemenet állapota hamis, akkor a kimenet állapota is az.



OR gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Az XOR vagy (kizárólagos vagy) úgy működik, mint a logikai sem/vagy. A kimenet igaz, ha egyik, de nem mindegyik bemenet igaz. A kimenet hamis, ha mindkét bemenet hamis, vagy ha mindkét bemenet igaz. Másként úgy is vizsgálhatjuk ezt az áramkört, hogy a kimenet 1, ha a bemenetek különböző állapotúak, de 0 a bemenetek értéke egyezik.



XOR gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Logikai inverter, amit gyakran NOT kapunak is neveznek, ennek csak egy bemenete van. Ez megváltoztatja a logikai szintet ellentettjére. Az inverternek sok más egyéb változata is létezik, ezért célszerűbb az NOT kapunevet használni.



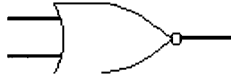
Inverter or NOT gate	
Input	Output
1	0
0	1

A NAND kapu úgy működik, mintha egy AND kaput egy NOT kapu követne. Ez az áramköri elem úgy működik, hogy a „AND” műveletet egy tagadás követ. A kimenet akkor hamis, ha mindkét bemenet igaz, egyébként a kimenet igaz.



NAND gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A NOR kapu egy OR kapu, amelyet egy logikai inverter követ. Kimenete akkor igaz, ha mindkét bemenete hamis. Egyébként a kimenet hamis állapotban van.



NOR gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Az XNOR (kizárólag NOR kapu) egy X kapu, amelyet egy inverter követ. Kimenete akkor igaz, ha a bemenetek megegyeznek, és hamis, ha különbözőek.



XNOR gate		
Input 1	Input 2	Output
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

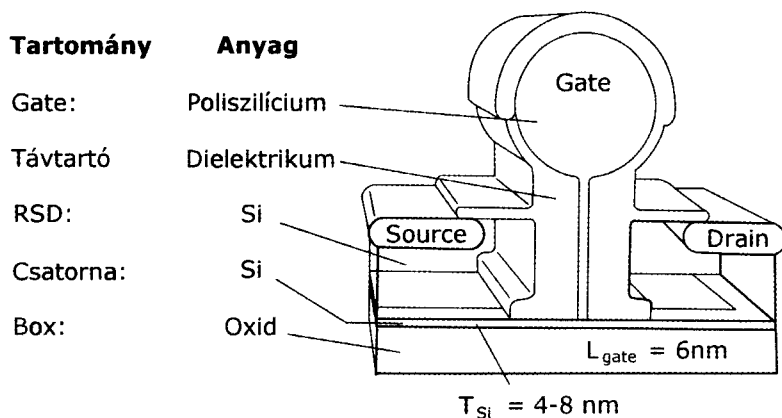
A különböző logikai kapuk kombinációjából komplex logikai áramköröket hozhatunk létre. Elméletileg nincs határa, hogy az egyes eszközökből logikai láncokat hozzunk létre. A digitális integrált áramkörökben azonban az egyes logikai kapuk megvalósítása meghatározott térfogatot igényel. Így az egy integrált áramkörrel megvalósítható elemek száma igen magas, de korlátos.

A fentiekben vázolt eszközökről találhatók publikációk, gyakorlati, megvalósított ipari kivitelről azonban nincs információnk.

6.4. Kisméretű MOS-eszközök

A méretek csökkenése a MOS-technológiában elsősorban a kapuelektroda csökkentésén keresztül jelent számottevő előnyt. A méretcsökkenésnek azonban egyéb konstrukciós változásokkal kell társulnia.

A 6.7. ábrán egy ilyen 6 nm-es gate hosszúságú eszköz konstrukcióját mutatjuk be.



6.7. ábra 6 nm-es gate hosszúságú MOS-eszköz

Látható, hogy az eszköz jelentősen eltér a megszokott kétdimenziós struktúrától. A gate elektróda kiemelkedik a felületből kialakítására poliszilíciumot használunk.

Az anyagválasztás lényeges szerephez jut CMOS-áramkörökben alkalmazott dielektrikum anyaga is. A 6.1. táblázat a dielektrikumok relatív dielektromos állandójának 1 MHz-en mért értékét szemlélteti.

Bár az anyagok jelentős részénél a dielektromos állandó értéke nagyobb, mint a szilícium-dioxid 3,9-es értéke, más előnyös tulajdonságok mégis jelentős alkalmazástechnikai előnnyel kecsegtetnek. Így az alumínium-nitrid lézersugár hatására vezetővé alakítható, az alumínium-trioxid előnyös kémiai tulajdonságokkal bír, a berillium-oxid pedig kiváló hővezető. A dielektromos állandó tekintetében kedvező szinte valamennyi anyag szerves vegyület, így tehát megszűnik a korábban domináns szervetlen vegyületek alkalmazása.

Az alkalmazott anyagok között feltűnnek ritkaföldfémek is. Ezek előnye, hogy az összetételük változtatásával jól követhető módon változnak elektromos, optikai és mechanikai paramétereik is. Néhány anyag a felsoroltak közül: SiN, SiON, ZrAlO, ZrON, HfSiON, HfO, HfAlO, Zr-szilikátok, ZrO₂, HfO₂, PrO₃.

6.1. táblázat. Dielektrikumok relatív dielektromos állandója 1 MHz-en

Anyag	Relatív diel. állandó
AlN	8,6
Al ₂ O ₃	9,5
BeO	6,5...6,7
CVD gyémánt	5,7
Ta ₂ O ₅	25...27
Corning üveg (7059, alkálimentes)	5,8
SiO ₂	3,9
Szerves adalékolású szilikátüveg	2,5
OSG, SiOF	3,5
Szénnel adalékolt oxid (CDO)	3,0
Spin-on polimer	2,6

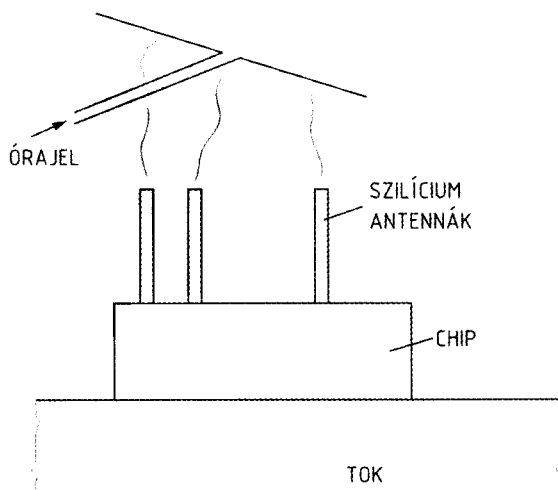
A kisméretű eszközöket tartalmazó integrált áramkörökben lényeges változásra fog átmenni a chipék konstrukciója is. A korábban kétdimenziós jellegű és alapvetően a felület mentén szervezett chipék háromdimenziósak lesznek, amelyet például két chip egymás felé fordításával és összeerősítésével érnek el. A konstrukció nehézsége, hogy ilyen módon lényegében egy bimetál képződik, és nehezzé válik a felső chipből keletkező hő elvezetése.

A konstrukció során jelenleg a hővezetés mellett a chip felületén terjedő órajelek sebessége jelent gátló tényezőt. A chipék mérete növekedésével ugyanis az órajeleket a chip egyre távolabb pontjára kell elvezetni. Ezt a nehézséget – többek között – úgy is át lehet hidalni, hogy az órajelet a chip felületére a chip felett elhelyezett antennáról sugárzással juttatjuk a chip megfelelő helyére. E megoldás esetén az ún. off-chip antenna sugárzását a szilícium chip felületén kialakított bot antennák veszik és juttatják el a vezérlendő áramkör részlethez (ld. 6.8. ábra).

Az itt ismertetett megoldással kísérleti célra 24 GHz-es órajel frekvenciát értek el, ami lényegében egy nagyságrendes javulást jelent a kereskedelmi forgalomban kapható processzorok órajeléhez képest. Ezek az áramkörök 10⁵–10⁶-on kapuáramkört tartalmaznak. A chip mérete jellemzően 10 x 10 mm, a szeletátmérő jellemzően 300 mm. Speciális technológiai nehézséget jelent, hogy ezek az áramkörök 200–800 kivezetéssel rendelkeznek.

Jelentős változások történetek a fémezések terén is. A hagyományos alumínium fémezést felváltották réz alapú fémezések. Feltehetően e területen is jelentős

szerephez juthatnak a többfalú szén nanocsövek. Kísérleti alkalmazásukban a nanocsövek 10^{10} A/cm²-es áramsűrűséget értek el 250 °C-os réteghőmérséklet esetén, igaz, hogy élettartamuk e hőmérsékleten mindössze 300 óra volt.



6.8. ábra. A tok felső felületéről a chip-re sugárzott órajel jelentősen megnöveli a működési sebességet

A réz technológiai alkalmazását az a tény is nehezíti, hogy a fentebb említett dielektrikumokat a dielektromos állandó csökkentése céljából porózus kivitelben készítik el. Ez a réz behatolásával és lehetséges rövidzárok kialakulásával jár együtt. A réz ugyancsak nehezen párosítható a szerves dielektrikumokkal. Ezek közül kiemelnénk SiLk (Dow Chemical Company) által kifejlesztett anyagot, amely felvitelkor gumyszerű és centrifugálható, majd ezt később kiégetve üvegszerű struktúrát eredményez.

Kísérletek folynak a fulleren fémmezésekben történő alkalmazásával is.

A kis méretek kialakításában természetesen meghatározó szerep jut a litográfiának. Cáfolva a korábbi prognózisokat, a litográfia döntően még mindig fotolitográfiát jelent, igaz, hogy egyre egzotikusabb anyagú világítótestek, egyre távolibb vonalas színeiket használják megvilágításra, ami a fénysugár csökkenésével jár, tehát a megvilágítási idő növekszik.

A 6.2. táblázatban a litográfiás lehetőségeket foglaljuk össze.

Az Intel a kilencven nanométeres technológiát kizárólag a 300 mm átmérőjű szeleteken kivitelezte. A gate elektróda hossza ebben a technológiában mindössze 50 nanométer. Összehasonlításképpen az Intel Pentium IV processzorában levő tranzistorok megfelelő paramétere 60 nanométer. A gate oxid vastagsága mindössze 1,2 nanométer, ami azt jelenti, hogy mindössze 5 atomi rétegből áll. Az előfeszített szilíciumból kialakított struktúra előnye, hogy 10–20%-kal meg lehetett növelni a

meghajtó áramokat. A 90 nanométeres technológia olyan SRAM típusú chippek előállítását tette lehetővé, amelyek 52 MB-os tárolási kapacitást valósítanak meg, mindössze 109 mm²-en.

6.2. táblázat. Fotolitográfia és felbontás

Fényforrás anyaga	Elérhető minimális méret (nm)
I, KrF, ArF	100 nm
I, KrF, ArF, F2, e-sugár	70 nm
KrF, ArF, F2, e-sugár, EUV	157 nm
i-vonal	365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm

Az Intel 90 nanométeres technológiája hét rézből kialakított csatlakozó réteget tartalmaz, előállítása a 248 nanométeres és a 193 nanométeres litográfiák kombinálásával történik³.

A következő lépcsőfok a 45 nanométeres technológia lesz, amely nagy dielektromos állandójú gate-oxidot fog alkalmazni. Ebben hafnium alapú lesz a dielektrikum, de a szivárgási áram mindössze tizede lesz, mint lenne SiO₂ esetében. A hafnium alapú technológia azonban nem kompatibilis a poliszilícium kapus technológiával.

A kisméretű MOS eszközök méretét két folyamat határozza meg: az egyik a nagy meghajtó áram, ami az eszközök optimalizálásához szükséges, és a kis szivárgási áram, ami a disszipációt csökkenti. A konfliktus középpontjában a kapuelektróda dielektrikuma áll. Minél vékonyabb a dielektrikum, annál nagyobb lehet a meghajtó áram, de annál nagyobb a szivárgási áram is.

Az ipari megoldások különféle utakat követnek. Az egyik megoldás, hogy a dielektromos anyag vastagságát azonos értéken tartjuk, és ehhez optimalizáljuk a tranzistor egyéb paraméterét, így például az adalékolást vagy a konstrukciót.

A másik megoldás, hogy olyan dielektrikumot alkalmazunk, amelyek dielektromos állandója nagyobb, mint a szilícium-dioxidé. A nagy dielektromos állandójú anyagot elegendő vékonyabban felvinni, ezzel együtt megfelelő védelmet kapunk a szivárgási áramok ellen.

Ma még az anyagok igen széles körével folynak a kísérletek, beleértve különböző szilícium, praezodim, cirkónium és hafnium vegyületeket. Az elmúlt időszakban a kísérletek egyre inkább a hafnium vegyületekre koncentráálódtak ezek közül is elsősorban a hafnium-dioxidra. Ez az anyag jól alkalmazható a hagyományos félvezető technológia többi elemével együtt, nitrogénnel adalékolható. Feltehetően

³ Si2002/09/36

ez lesz az első anyag, amely helyettesíteni fogja a szilícium-dioxidot. Távlatilag érdekesekek lehetnek még különféle lantán vegyületek, így a lantán-oxid is⁴.

A MOS struktúrák tárgyunk szempontjából fontos eleme az egyelektronos tranzisztor. Itt a kvantumpöttyöt két alagút átmenet szigeteli el a forrás és a nyelő elektródától [Khoury, 2000]

6.5. Nanokijelzők

Új kijelző technológia kifejlesztésében is betörték a nanoanyagok. Az elektroforetikus kijelzőben a képet töltött titán-dioxid pigmentek hozzák létre, amelyek egy mikrométerű gömböcskékben helyezkednek el. A gömböket elektromos térerőben mozgatják. E konstrukció nagy előnye, hogy szitanyomással alakítható ki, így tehát előállítása olcsó⁵.

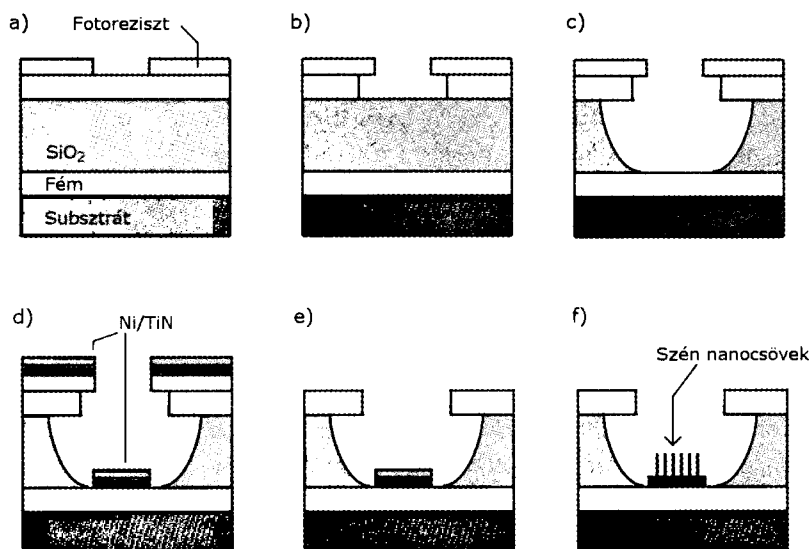
Ezek a kijelzők várhatóan így ideig még nem lesznek versenytársai az OLED-eszközöknek (OLED – Organic Light Emitting Diode). Ezek piaci részesedése ugyanis elsősorban a mobiltelefonok és az Mp3 lejátszók miatt, igen jelentős növekedést mutat.

A nanoelektronika egyik lényeges kapcsolódási pontja, a kijelzőkhöz csatlakozik. Segítségével olyan önillesztő gyártási lépéssorozat alakítható ki, ahol a szén nanocsövek segítségével valósítjuk meg, a katódot, azaz az elektronemissziót. A technológia egyes lépéseit a 6.9. ábrán mutatjuk be.

A nanokatódokat szilícium hordozókból alakítják ki. A szilícium felületére szénréteget, arra SiO_2 réteget, majd annak tetejére adalékolt poliszilícium réteget választunk le. Elektronlitográfia segítségével a szelet felületére felvitt lakkrétegben ablakot nyitunk. (6.9.a. ábra). A többlépcsős marás következtében egészen a szilícium felületén lévő fém felszínéig átmarjuk a szendvicsszerkezetet (6.9. ábra b. c.). Az így kialakított üregeket tartalmazó szelet felületére Ni/TiN rétegeket viszünk fel (6.9. d. ábra). A beáldozható rétegeket eltávolítva kialakítjuk azokat a nikkell felületeket, amelyek a nanocsövek fogadására szolgálnak. Ezeknek a kis fémszigeteknek az átmérője mindössze 2 mikron. Erre a felületre önillesztéssel a felület középpontjába egyetlen szál szén nanocsövet növesztünk. A többfalú szén nanocső átmérője 30 nm.

⁴ SI2003/02/38

⁵ NANO, 9/2/9



6.9. ábra. Mikrokatód kialakítása szén nanocső segítségével

a. ablaknyitás az adalékolt poliszilícium felett; b. a poliszilícium réteg átmarása; c. a SiO₂; d. Ni/TiN elektródák kialakítása; e. a szén nanocsövek helyének kialakítása; f. szén nanocsövek fű-szerű elhelyezése

(Forrás: http://www.cerncourier.com/main/article/41/10/13/1cernphysw4_12-01)

6.6. Nanofotonika

OLED amely fényemittáló szerves anyagok emittálásán alapul előállítható, ragasztható kimenetben is a p-n átmenet létrehozására egy optikailag átlátszó adalékolt szerves anyagot használnak. Az anyagösszetétel igen lényegesen befolyásolja az elérhető optikai tulajdonságokat. A fényesség 136 cd/AV 1,0 mA/cm² áramsűrűség mellett. Az OLED-ek alkalmazási területe elsősorban mobiltelefonokban, kamerákban és univerzális kommunikátorokban várható⁶.

Az infokommunikációs eszközökben jelentős szerep vár a függőleges üregű lézerekre (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Bár struktúrájuk lényegesen bonyolultabb, mint a hagyományos stripe (csík, vagy szalag) lézereké nagyon nagy előnyük, hogy a lézersugár a felületről függőlegesen lép ki.

⁶ NANO, 9/2/9

Ilyen VCSEL lézereket létrehoztak felületi plazma rezonanciával, elektronlitográfiával megmunkált periodikus ezüstrétegekkel. Az eszköz nagy kimenő teljesítménnyel és kis telítési árammal rendelkezett⁷. A függőleges üregű lézerek elsősorban adatátviteli feladatok elvégzésére használatosak, mivel a sugarak tulajdonságai nem elég jók. Ezek tökéletesítésében elsősorban konstrukciós megoldásokat próbálnak alkalmazni. Ezek kombinációjával elérik, hogy egymódusú tranzverzális hullámok keletkezzenek csak⁸.

A lézerhatást mutató anyagok köre normál polimereket is tartalmaz. Ezek a polimer alapú többrétegű lézerszerkezetek PMMA-ból állnak és rodaminnal adalékolják azokat. A lézerek mechanikai nyomásra hangolhatóak, így hullámhosszuk 662 nm-től 600 nm-ig változtatható [Foulger, 2006].

A hagyományos fényforrások terén is hódít a nanotechnológia. Olyan új izzólámpa konstrukciókat állítottak elő, ahol a volfrám szálat szén nanocsővel helyettesítették. A nanocsöveket CVD eljárással állították elő, és alkohollal ragasztották össze. Mintegy 40 W teljesítményt értek el, és ezt 3–5 V-os begyújtási feszültség mellett érték el, több fényt sugároznak ki, mint a volfrám szál, mivel ezek kombinálják a feketetest-sugárzást és az elektrolumineszcenciát. A lámpák ipari előállítására 2008-ra várható [Wei, 2004].

A hagyományos világító diódák tulajdonságai is javíthatóak szén nanocsövekkel. A világító diódákat mások úgy tekintik mint az izzólámpák és a fénycsövek helyettesítőjét. A jelenlegi világító diódák leggyengébb pontja az a fémkontaktus, amellyel az áramot a félvezetőbe vezetjük. Ha ezt a fémkontaktust szén nanocsövekkel helyettesítjük, a kontaktus-ellenállást 33%-kal csökkenthetjük [Pearton, 2004].

A jelenleg legfejlettebbnek tekinthető szerves LED diódák mintegy 1000 cd/m² felületi fényességűek és hatásfokuk is nagyon jó, 95 cd/A⁹.

A nanofotonika fontos alkatrészei a nanoméretű fényvezető szálak. Ezek a nanoszalagok kötik össze a fotonikai elemeket, így olyan olyan SnO₂ nanoszalagokat készítettek, amelyek optikai fényvezető szálként alkalmazhatók a fotonikai eszközökben¹⁰. Az SnO₂ nanoszálak hossza eléri az 1500 mikrométert, négyzetű keresztmetszetük 100x400 nanométer. Az ilyen szálak az ismert optikai fényvezető szálakhoz hasonlóan igen kicsiny veszteséggel vezetik a látható vagy az ibolyántúli fényt. Y-csatlakozók, egy mikrométer nagyságú görbületek, elágazások hálózatai alakíthatók ki belőlük. A nanoszálak végeire csatlakoztathatók, például a ZnS nanoszál-fényforrások és a megfelelő detektorok, amelyek egyben egy fotonikai

⁷ <http://panasonic.net>

⁸ Si2004/03/26

⁹ NANO, 12/10/5

¹⁰ Law és társai, Science, (2004)305,1269

„áramkört” alkotnak. Az alkalmazási célok között szerepel az on-chip optikai logikai elemek, vagy kémiai szenzorok előállítás.

A fotonika szempontjából lényeges CdS anyagból is előállíthatunk egy dimenziós nanostruktúrákat, a VLS (VLS – Vapor-Liquid-Solid) folyamat segítségével. Mind nanohuzalok, mind szalagok, mind fűrészszerű struktúrák keletkeznek a hőkezelési folyamat során.

A szén nanocsövek sikerrel kecsegtetnek a világítási feladatok megoldásban is. Egy trióda elrendezésű struktúrával 25–40 inch átlójú sík fényforrások állíthatóak elő (FEL – Field Emission Lamp) [Cho, 2007]

6.7. A vegyület-félvezető alapú nanoelektronika

A vegyület-félvezető anyagok tulajdonságai meghatározóak a létrehozható eszközök szempontjából. A legfontosabb tulajdonságokat a 6.3. táblázatban foglaljuk össze.

6.3. táblázat.

Különféle félvezető anyagok tulajdonságai

Forrás: IEEE Spectrum vol.39, No 5, p.31 May 2002

Jellemző	Egység	Si	AlGaAs/ InGaAs	InAlAs/ InGaAs	SiC	AlGaN/ GaN
Sávszélesség	eV	1,1	1,42	1,35	3,26	3,49
Mozgékonyosság (300 K)	cm ² /Vs	1500	8500	5400	700	1–2000
Hővezetés	W/cm·K	1,5	0,5	0,7	4,5	>1,5
Relatív diel. állandó	–	11,8	12,8	12,5	10,0	9,0

A vegyület-félvezető alapú nanoelektronika speciális feladatok elvégzésére lesz alkalmas. A GaAs – alapú áramkörök nem lesznek a Si-CMOS áramkörök vetélytársai, mivel áruk magas.

Hasonló esetre példa a mágneses buborékmemória, amely bár a laboratóriumban igen kiváló tulajdonságokkal rendelkezik, de az árversenyben elbukott.

A III–V kvantumeszközökkel le lehet csökkenteni az elemszámot, de még ha huszadrészére csökkenne az elemszám, akkor is az árban még mindig versenyképtelen lenne maga az eszköz.

A vegyület-félvezető alapú eszközök versenytársai a szerves alapú elemek is, ugyanis a jelenleg ismeretes szerves anyagok nem jelentenek közvetlen alternatívát a szilíciumalapú integrált eszközöknek. Alkalmazásuk elsősorban az olcsó eszközök terén várható. Mivel a szilícium integrált elemek előállítása egykristályokat, hetteket és nagyszámú egymás után következő nagyszámú technológiai lépés megvalósítását követeli a szerves eszközök előállítása lényegesen olcsóbb és gyorsabb. A szerves anyagokból előállított vékonyréteg tranzistorokban a mozgékonyág értéke általában nem haladja meg az $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ értéket. A szerves anyagokból felépített eszközök megbízhatósága ma már eléri az ipari megbízhatóság határát¹¹.

A korszerű lézerekben is fontos szerepe van és marad a vegyület-félvezetőeknek. Elvben mind a kvantumpöttyök, mint a nanoporozus szilícium potenciálisan alkalmas arra, hogy olyan lézereket készítsünk belőlük, amelyek hangolhatóak. Ez egy nagy előnyük a hagyományos lézertanyagokkal, így a szilárdtest lézerekkel szemben is.

6.8. Spintronika

A *spintronika* azt az elvet használja, hogy a mágnesességet az elektronok spinjének iránya határozza meg. A spin tulajdonságainak kutatása vezetett el a spintronika létrehozásához. A mágneses fejek olvasója kihasználja ezt az effektust, amely, mint látjuk már, kereskedelmi forgalomban kapható. Működési elve a óriás mágneses ellenállás.

Az a jelenség, amelyet ballisztikus mágneses ellenállásnak nevezünk, a bemutatott kísérleti eredmények szerint egy négyzetinch felületen terabit nagyságrendű információ tárolást tesz lehetővé. Ez az információsűrűség egy nagyságrenddel nagyobb, a gigantikus mágneses ellenállás változáson alapuló tárolási módszerben elért sűrűséghez képest

A nanoelektronika gyorsan fejlődő területének tartják a spintronika elvein megépített tranzisztort.

6.9. Nanotechnológia és mobil telefónia

Egy technológia akkor számíthat sikerre, ha valamely tömeges fogyasztási cikkben is alkalmazásra kerül. Láttuk ezt a félvezető lézer viszonylatában, hogy az akkor lett igazán olcsó tömegcikk, amikor a CD-lejátszókat kezdték tömegesen alkalmazni. Igaz ez fordítva is, hogy akkor lesz az alkalmazás igazán elterjedt, ha az alkatrészek

¹¹ Si2004/02/22

(is) elegendően olcsóak. Feltehetően így lesz ez a nanotechnológiával előállítható termékek esetében is.

A nanohuzalok és a nanocsövek megnyitják az utat a műanyag alapú elektronika felé is. A műanyagról mint alapanyagról pedig az a benyomásunk, hogy az egy igazán olcsó anyag.

A vékonyréteg tranzisztorok alkalmazása ismét előtérbe került, gondoljunk csak a kijelzőkre. A jelenlegi vékonyréteg-tranzisztor (TFT – Thin Film Transistor) előállítási technológia ugyanis jelentősen leszűkíti az alkalmazható hordozók körét, így kizárja, hogy a polikristályos szilícium technológiát műanyaghordozón valósítsuk meg, mivel a folyamat hőmérséklete magas. Az amorf szilíciumban és a szerves félvezetőkben előállított tranzisztorokban viszont a mozgékonyosság rendkívül kicsi.

E problémák kiküszöbölésére alkalmasnak látszanak a szilícium nanohuzalból és a CdS nanoszalagból álló vékonyrétegek.

Ezeknek öt előnyös tulajdonságuk van:

- javítanak a jelenlegi technológiai színvonalon,
- új alkalmazásokat tesznek lehetővé,
- különféle hordozókon megvalósíthatóak,
- alacsony hőmérsékletű folyamatokat alkalmaznak,
- az anyagok sokféleségét alkalmazhatjuk, így a magas mozgékonyosságú InAs-et vagy InP-ot is.

Az eljárás során a 20–40 nm átmérőjű Si nanohuzalokat oldatba viszik, és a hordozó felületére folytatják. A nanohuzalok így egy irányba állnak be, mintegy 500–1000 nm távolságra egymástól és vékony réteget hoznak létre. A távolság a koncentrációval és az átfolyási idővel beállítható. Ezután hagyományos fotolitográfiával kialakítják a source és a drain elektródákat. Egy lépésben tranzisztor sorok (array) hozhatóak létre. A struktúrában mért mozgékonyosság $\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ volt, ami jelentősen meghaladja az amorf szilíciumban és a szerves anyagokból kialakított építőelemeken mérhető $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ értéket.

Mivel a teljes folyamat szobahőmérsékleten zajlik – a külön technológiával előállított nanohuzalok kivételével – a folyamat elvezethet az első nanoelektronikai eszközök gyakorlati alkalmazásához. A potenciális alkalmazási területek a lapos kijelzők, RF kommunikáció, eldobható számítógép és adattároló eszköz, az elektromos papír és az intelligens textíliák.

Az alkalmazások közül megemlíthetjük még a különféle hangolásra használható mozgó elemeket, bár ezek inkább a mikroelektromechanikai elemek (MEMS), amelyek a mikroelektronikai és a nanotechnológia átmeneti területéhez tartoznak.

Nézzünk most egy másik olyan területet amely mind a mobil telefónia, mind más hordozható eszközök szempontjából kulcsfontosságú.

A kombinált eszközök alkalmazása, az eszközfejlesztésnek ez az új iránya integrálja a mobil távközlési eszközöket különböző érzékelőkkel és jelfelfogókkal, amelyek lehetővé teszik, hogy a felhasználók egészségügyi állapotukra, biztonságukra vonatkozó információkat közölhessenek. A rendszerben kiemelt szerepet kapnak azok az alkalmazások, amelyek a legszélsőségesebb körülmények között is megtartják működőképességüket¹².

Különösen a távközlési alkalmazások szempontjából fontos szerephez fognak jutni Si/SiGe-p-MOSFET eszközök. Technológiájuk során igen lényeges, hogy meggátoljuk a SiGe vegyületfélvezető anyagból a Ge kidiffundálását [Yang, 2001].

6.10. Energiatárolás nanotechnológia segítségével

A bennünket körülvevő eszközök egyre nagyobb mértékben személyre szabottak és hordozhatóak. E tulajdonságok megkövetelik, hogy az egyes készülékek önálló energiaforrással rendelkezzenek. Az energiatarolás másik jelentős kihívása az elektromos és/vagy vegyes üzemelésű személygépkocsi. Az energiataroló eszközök közül legkiforrottabb technológiája az ólomakkumulátornak van. Ismerjük azonban egészségkárosító és környezetszennyező hatását is. Az ólomakkumulátor kb. 100 éves fejlődéstörténete során kapacitása kb. 50%-kal nőtt és kialakultak a kevés vagy gondozást egyáltalán nem igénylő változatai is. A hátrányok, itt elsősorban jelentős súlyt kell megemlíteni, arra késztették az iparágat, hogy új típusú energiataroló rendszert dolgozzanak ki. A terület fejlődésének igen jelentős lökést adott a mobiltelefonía kialakulása és fejlődése, itt ugyanis követelményként jelent meg a kis térfogatú, könnyű és viszonylag nagy kapacitású áramforrás kifejlesztése.

Talán más szempontból sem haszontalan, ha felidézzük, hogy milyen akkumulátorokat is használunk mobiltelefonjainkban. Ezt szemlélteti a 6.4. összehasonlító táblázatunk.

Összevetve az adatokat, látható az a jelentős különbség, amely az egyes akkumulátorfajták között van.

Az e területen történő alkalmazásokra kifejlesztett akkumulátorok alapelemei a lítium és a grafit. Az ilyen típusú energiatarolók fejlődési üteme lényegesen meghaladta az ólomakkumulátorok fejlődését. Az új típusú energiatarolók kapacitása ugyanis évente mintegy 10%-kal növekedett. Az alapstruktúráként használt lítium-grafit rendszer szintén többféle fejlődési fázison ment át, különféle adalékanyagok és felületi megmunkálások segítségével érték el ezt a gyors fejlődési ütemet. Ez vezetett a nanotechnológia alkalmazásához e területen, amely a szén nanocsövek első tömeges alkalmazását jelenti. A szén nanocsövek ugyanis jelentő-

¹² Mst4/02/21

sen nagyobb felületet jelentenek, mint a tömbi grafit, ezáltal növekszik a grafit anód kapacitása. Ez a kapacitás elvben 372 milliamperóra/gramm lenne, ha LiC_6 vegyületképződéssel számolunk. Ezt a határértéket azonban a rendszerben levő hibahelyek az érték 80-90%-ára lerontják. Ha a grafitot azonban 3%-nyi bórral adalékoljuk ez a kapacitást 50%-kal megnöveli. E jelenség magyarázata, hogy a bór atomokon az elektronok könnyen lokalizálódnak deformálva a grafit rácsát. A töltés során ugyanis a grafit anód mintegy 30%-os térfogatnövekedést mutat, ami egyértelműen a benne felhalmozódott elektronoknak köszönhető. A töltés többek között ezért is korlátozott, hiszen az ilyen jelentős mechanikai deformáció töréshez vezethet. Többek között itt is jelentkezik a szén nanocsövek alkalmazásának előnye, mivel a szén nanocső mechanikai tulajdonságai lényegesen jobbak, mint a grafité, szakítószilárdsága még az acélhuzalok vonatkozó értékét is hétszeresen meghaladja.

6.4. táblázat. A mobilfóniában használt energiatárolók típusai

	SLA (Sealed Liquid Acid)	NiCd	NiMH	Li-ion	Li-poli
Energiasűrűség Wh/kg	30	40–60	60–80	100	150–200
Ciklusok 80%	200–50	1500	500	500–1000	100–500
Belső ellenállás 3,6 V-on ($\text{m}\Omega$)	–	100–200	150–250	150–250	n.a.
Cellafeszültség V	2,0	1,25	1,25	3,6	2,7
Kisütő áram	0,2 C	$\geq C$	(0,5–1,0) C	$\leq 1C$	0,2 C
Szervízigény	90–180	30	60–90	Nincs	n.a.

Ezek a felismerések lehetővé tették, hogy szén nanocsövek felhasználásával olyan akkumulátorokat állítsanak elő, amelyek – elsősorban hegyi terepen alkalmazott – buszok meghajtására is alkalmasnak bizonyultak.

A lítiummal és a bórral adalékolt nanocső rendszer tüzelő-anyagcellaként is alkalmazható, elsősorban a 100 Wh feletti teljesítménytartományokban is.

Az energiatárolás terén szóba jöhetnek a polipropilén-karbonát anyagú dielektikumok is, ezek kapacitása elérheti a 10.000 F kapacitást, ami a Földgolyó kapacitásának sokszorososa. Az anyag szilárdsága lehetővé teszi, hogy a rendszerben tárolt töltést igen hirtelen leadja. Az energiatárolás terén végrehajtott fejlesztések a kapacitás növelésén túl a méretcsökkenésre és a mechanikai tulajdonságok javítására irányulnak.

A szilárdoxid-alapú tüzelőanyagcella (SOFC – Solid Oxid Fuel Cell) igen perspektivikus területe a nanoanyagoknak. Itt elsősorban a nagyobb felületet és a korrózióknak való jobb ellenállást lehet kihasználni. Jelentősen megnő a katalitikus felület, lecsökkenthető a létrehozás hőmérséklete és így a költsége. [Sarkar, 2004].

6.11. A gyémánt nanostruktúrák

Mesterséges gyémánt rudakat (ADNR – Agregated Diamond Nanorod) állítottak elő C_{60} fullerén molekulákat GPa-os nyomáson kezelve 2500 K fokon. Az így előállított mesterséges gyémánt kevésbé összenyomható, mint a természetes gyémánt. Ez által gyémánt indenter előállítására kiválóan alkalmas, és meg tudja karcolni a IIa típusú természetes gyémántot. Az anyag kiválóan alkalmazható lesz fémek és kerámiák megmunkálására.

Az így előállított mesterséges gyémántoknak átmérője 5 és 20 nm közé esett, hosszuk elérte az egy mikrométert.

Mágneses tulajdonságokkal rendelkező mesterséges gyémántot állítottak elő szén-nitrogénnel történő implantálásával. Így szobahőmérsékleten is sikerült mágneses tulajdonságokat létrehozni, és azt az implantációs dózis segítségével befolyásolni.

6.5. táblázat. A gyémánt legfontosabb tulajdonságai¹³

Sűrűség (g/cm ³)	3.50
Young-modulus (GPa)	1050
Keménység (GPa)	45
Hőtágulási együttható ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	1.1
Súrlódási állandó	0,02
Elektromos ellenállás (ohm.cm)	$> 10^{13}$
Hővezetés (W/mK)	400
Bomlási hőmérséklet nitrogénben ($^{\circ}\text{C}$)	1500

Megjegyezzük még, hogy míg a réz hővezetési tényezője 200 $^{\circ}\text{C}$ -ig lényegében állandó, addig gyémánt hővezetése ebben a hőfoktartományban megfelelődik.

¹³ <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=262> (2007.05.10.)

Egyéb jellegzetes tulajdonságai:

- nagy fénytörés és színszórás, ami a kő lapjain – a sokszoros fénytörés és tükrözés során – többszörösen színekre bontja a fehér fényt (ez a hatás megfelelő csiszolással – briliáns alak – fokozható),
- dörzsölésre pozitív töltést nyer,
- 770 °C-on oxigén jelenlétében CO₂-dá ég el, nitrogén gázban elektromos ív hatására grafitná alakul át; savak, lúgok nem támadják meg, csak K₂Cr₂O₇ és H₂SO₄ elegye vagy K₂CO₃-olvadék marja meg¹⁴.

A lehető legnagyobb termikus vezetéshez további előnyként társul az, hogy a gyémántban tapasztalható a legnagyobb mozgékonyság a széles tiltott sávú félvezetők között^{15,16}. Tárgyunk szempontjából legnagyobb jelentőséggel a szilícium egykristály felületére növesztett gyémántrétegek bírnak.

A gyémánt nanostruktúrák egyike az igen perspektivikus struktúráknak. Alapvető tulajdonságai az alábbiakban jellemezhetők:

- minden más anyagnál nagyobb szilárdság,
- kémiaiilag nem vegyül,
- biokompatibilis,
- alacsony súrlódási tényező (kisebb, mint 0,1),
- minden más anyagnál nagyobb hővezetés,
- szigetelő, félvezető vagy fém típusú vezetés,
- optikailag az infravöröstől a távoli ultraibolyától átlátszó.

A gyémánt nanostruktúrák előállításánál kiinduló anyagként általában 2 inch átmérőjű, a mikroelektronikai technológiában megszokott minőségű szilícium szeletek szolgálnak. A szilícium felületére CVD plazma eljárással választják le a gyémántréteget. A technológia igen erősen emlékeztet a mikroelektronikai technológiákra, az egyes lépéseket nagytisztaságú munkatérben végzik. Az így előállított rétegeket fotolitográfias eljárással munkálják meg, és plazma módszerrel javítanak a felület minőségén, ez által 3–5 nm sugarú élek is előállíthatóak. Ez a sugár a vágási, metszési alkalmazásoknál kulcsfontosságú és az elérhető érték lényegesen meghaladja a fém éleknél elérhető 10.000 nm-es értéket. Az így előállított éleket elsősorban szemsebészeti eljárásokhoz használt orvosi műszerekben alkalmazzák. A mesterségesen előállított gyémánt élek kisebb, mint 5 nm, a természetes gyémánt kisebb, mint 100 nm, az élezett acél kisebb, mint 3.000 nm sugarú élek kialakítását

¹⁴ <http://hu.wikipedia.org/wiki/Gy%C3%A9m%C3%A1nt>

¹⁵ <http://www.electronicstalk.com/news/dyn/dyn115.html>

¹⁶ A szélessávú vegyület félvezetők közül a gyémántban észlelhetjük a legnagyobb töltéshordozó mozgékonytságot

teszi lehetővé. A mesterséges előállítási technológia további előnye, hogy az eljárás jól reprodukálható élek kialakítását teszi lehetővé. További előnyös alkalmazása a nanogyémátnak különféle mikromechanikai rendszerelemek kialakításában jelentkezik. Így mikrofogaskereket, különféle oszlopos (LIGA) struktúrák kialakítását is lehetővé teszi. Optikai tulajdonságai is befolyásolhatóak, így teljesen átlátszó alkatrészek is előállíthatóak.

A nanogyémánt és a BMG kompozitok (BMG – Bulk Metallic Glas) az egyik legnagyobb növekedési ütemet mutató nanoanyagok közé tartoznak. Előállításukra CVD technológiát használnak. Mivel – mint fentebb említettük – a gyémánt súrlódási együtthatója kisebb, mint 0,1, ennek köszönhetően kenőanyagmentes fogaskerek és megmunkálóeszközök állíthatóak elő belőle. Optikailag a mély ultraibolyától egészen az infravörösig átlátszó. A mesterséges gyémánt előállítható az ún. hot filament CVD módszer segítségével is (HF-CVD – Hot Filament CVD – izzószál CVD eljárás) [Fech, 2004]. A folyamatban résztvevő gázok (CH_4 , H_2 , O_2) egy közelítőleg 2000 °C-ra izzított volfrám szálra jutnak. A gyémántot általában szilícium egykristály hordozóra választják le, amelynek hőmérséklete a leválasztás során mintegy 700 °C. A keletkező nanokristályos gyémánt szemcsenagysága közelítőleg 20 μm . A rétegeket elektronsugaras litográfiával is megmunkálhatjuk, így közelítőleg mikrométer felbontású objektumokat hozhatunk létre.

A BMG-k különböző fémadalekkel, így Pd, Fe, Zr állíthatóak elő. Nyomási szilárdságuk összemérhető az acéllal (600 MP). Mechanikai tulajdonságuk az Ashby-diagrammon igen jó helyen található.

Gyémánt nanostruktúrák kialakíthatók azokon a közel egykristályos gyémánt-hordozókon, amelyek már egy inchnél nagyobb átmérőben is rendelkezésünkre állnak¹⁷.

6.12. Nano információátvitel és -feldolgozás

A nanoelektronikai elveken alapuló memóriák a továbbiakban egyre növekvő szelektet hasíthatnak ki szilícium alapú memóriák területéből. Ezek mind a hagyományos szén nanocsövek, mind polimer alapú memóriák lehetnek. Az összeköttetést a későbbiekben nanohuzalok biztosíthatják és a tárolt információ mennyisége elérheti a 100 Gbit/cm² értéket. A technológia eltolódhat az alulról történő megközelítés felé, amely új tranzisztoranyagokat és új logikai struktúrákat eredményezhet, amelyek helyettesíthetik a CMOS-áramköröket. Az olyan tervezérlésű tranzisztorok, amelyek nanocső, vagy nanohuzal alapú csatornákból állnak valamint a kvantumtűtő alapú egyelektronos tranzisztor, amely kapacitásként szerepelhet, része

¹⁷ <http://www.aip.org/pnu/1992/split/pnu097-3.html>

lehet egy hibrid nano-mikroelektronikai struktúrának. Ezeknek az eszközöknek piaci bevezetését 2013-ra becsülik¹⁸.

A *molekuláris és nanocsöves memóriák* igen ígéretesek, és lehetővé teszik molekuláris méretű hengerek alkalmazását információ tárolásra. E rendszerek kapacitása a közeli években eléri azt a színvonalat, hogy flash memóriákban alkalmazhatjuk azokat. Figyelmet érdemel az, hogy ezek a memóriák a tápfeszültség megszüntetése után is megtartják információtartalmukat, így, ha megfelelő költséggel állítjuk elő azokat, akkor kiszoríthatják a winchestereket a személyi számítógépekből.

Az *optikai kapcsolóelemek* iránti igény elsősorban az Internet iránti igény növekedése fokozza. Ennek során szükségessé válik a hullámhossz alatti méretű optikai komponensek létrehozása.

A *kijelzők vonatkozásában* elsősorban a szórakoztató elektronikában történő falra akasztható lapos képcső megalkotása a cél. Jó néhány technológia ezt már ma is lehetővé teszi, áruk azonban nem elfogadható.

Az *e-papír* igen sokat ígérő termék, szélesebb kereskedelmi forgalomba kerülése az elkövetkezendő években várható.

Az *információtárolás* egyébként a ponthatár felé halad. Képes-e egy alapjában mechanikai rendszer, legyen az akár mikromechanikai, felvenni a versenyt az elektronikai, mágneses adattárolókkal? A jelenlegi kutatások és fejlesztések igennel válaszolnak e kérdésre.

Az egyre növekvő számú publikáció, az Innovative Mass Storage Technologies Workshop-on (2004. szeptember 28–29., Aachen, Németország) elhangzott összefoglaló előadások arról tanuskodnak, hogy a világ vezető, információs technológiával foglalkozó, cégei (IBM, Panasonic, Sony és mások) valamint sok kutatólaboratórium aktívan foglalkoznak az AFM (Atomi Erő Mikroszkóp) elvei alapján működő adattárolók kutatásaival és fejlesztéseivel. Egy megfelelő anyagból készült, nanométer-skálán „meghegyezett” és egy rugalmas lemezkére erősített tűt ugyancsak nanométer távolságban mozgatnak egy eleinte ideálisan sima műanyag, vagy más, például üveg, felület felett. Időnként egy aktuátor impulzusának megfelelően a tű behatol az anyagba, egy lenyomatot hagyva maga után, ami megfelel egy „igen” jelnek, illetve bitnek. Ha a jelek egy sor vagy spirál mentén helyezkednek el, a régi fonográf, vagy a kevésbé régi hanglemez barázdáihoz hasonló felületi szerkezet alakul ki, amely ugyanazzal a tűvel „letapogatható”, azaz a beírt információ leolvasható. A különbség és a lényeg a méretekben rejlik: a tárolt információ felületi sűrűsége elérheti a 200 Gb/cm^2 számot, ami egy nagyságrenddel nagyobb, mint a mai legfejlettebb mágneses adattárolókban. Az írás-olvasás gyorsaságát a tű (vagy inkább egy sor közelálló tű) piezoelektromos aktuátorokkal való rövidtávú de gyors mozgatása biztosítja. A „Millipede” névre keresztelt adattárolók mintapéldányai már a labora-

¹⁸ NANO, 9/2/13

tóriumi kísérletek stádiumában is bizonyítják a hozzájuk fűzött remények megvalósíthatóságát. Az egyes tűk információ átbocsátó képessége a kilobit/sec tartományba esik. Az energia-felhasználás néhány megabit/sec érték mellett a 100 mW-os tartományba esik. Egy 1024 tűs kísérletben 200 Gb/négyzetinch, ami egy 3 mm élhosszúságú négyzetre átszámítva 0,5 Gb-nek felel meg¹⁹.

6.13. Szén nanocsövek az elektronikában

A nanocsövek mindössze egyharmada fémes vezetést mutató tulajdonságú nanocső, a fennmaradó többség félvezető tulajdonságú. A nanocsövek akkor viselkednek félvezetőként, ha a tiltott sáv szélessége elegendően nagy ahhoz, hogy az elektronok ne tudjanak átlépni rajta megfelelő energiamennyiség közlése nélkül. A nanocsövek átmérőjének növekedésével egyre több elektron állapot megengedett. A tiltott sáv szélessége a 0-tól indulva elérheti szilícium tiltott sávja szélességét. Ez tehát egy igen jó lehetőség arra, hogy előre meghatározott tulajdonságú nanocsövet állítsunk elő [Mamalis, 2004].

A szén nanocsövek tulajdonságai nemcsak a saját felépítésüktől függ, hanem visszafordítható folyamatok indulhatnak el, már egészen kis mennyiségű gáz adalékolása esetén is. Így például a félvezető állapotot átfordíthatjuk vezető állapotba is. Ennek segítségével igen érzékeny gázdetektorok állíthatók elő. Ha ezekből a nanocsövekből tervezérlésű tranzisztorokat készítünk, akkor ezek is használhatók érzékelőként [Avouris, 2002].

A szén nanocsövek várható alkalmazásai között sok a különböző tranzisztor.

A kutatók nemrég jelentették egy olyan tranzisztor elkészítését, melynek a csatornáját egy 18 nm hosszú és 0,7–1,0 nm átmérőjű szén nanocső képezi. A tranzisztor tranziens árama meghaladhatja a 15 mikroampert 0,4 V feszültség mellett és már 0,35 V tápfeszültséget is tud biztosítani, amire a félvezető technika még nincs is felkészülve.

Kifejlesztettek egy szén nanocső alapú szenzort, amely igen kicsiny CO₂ koncentrációk érzékelésére alkalmazható. A készülék lelke egy FET, amelyben a source-drain csatorna egy félvezető egyrétegű szén nanocsőből áll. A nanocsövet polietilén-imin és keményítő polimerek keverékével funkcionalizálják, majd vegyileg módosítják úgy, hogy a szenzor érzékenysége 500ppm–10% lesz a levegőben. Kicsiny mérete és fogyasztása miatt a berendezés alkalmas a vezeték nélküli érzékelésre az iparban és a medicinában.

Az eddig ismert *p*-típusú Si nanoszál mellett elkészült az *n*-típusú egykristály nanoszál is. Az ilyen *n*-típusú szálakból készült tervezérelt tranzisztorok jó paramé-

¹⁹ <http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages>

terekkel rendelkeznek, a hordozók mozgékonyága megközelíti a planáris Si FET-re jellemző nagyságot. Így lehetőség nyílik új komplementer p-n eszközök előállítására is.

A Manchesteri Egyetem (Egyesült Királyság) és a Mikroelektronika Technológia Kutatóintézet (Csernoolovka, Oroszország) munkatársainak szénatomokból grafén rétegeket sikerült előállítaniuk [Novoselov, 2004]. A grafén benzol-gyűrű szerkezetű szén réteg, melynek méretei eléri a 10 mikrométert és vastagsága egy monoatomtól néhány egymásra épült atomi réteg vastagságú lehet. Mindeddig úgy vélték, hogy a szén nanocsövek ilyen szénréteg „feltekeréséből” keletkeznek, és maga a réteg nem stabil. Ennek ellenére az eredmények azt mutatják, hogy a grafén rétegek normál körülmények közepette stabilak és kiváló szerkezettel rendelkeznek. Az anyag elektromos vezetése fémes, benne kétdimenziós ballisztikus elektron transzport figyelhető meg. A réteg volt-ámpér karakterisztikája lineáris és 10^8 A/cm^2 áramot is mértek benne. Az új anyagból olyan tervezérlésű tranzisztorok állíthatók elő, amelyekben a vezető csatorna kétdimenziós elektron- vagy lyukgáznak megfelelő állapotba kapcsolható át a kapu feszültségének irányításával. Az on/off ellenállás hányadosa ugyan elég kicsiny (kevesebb, mint 30, 300 K foknál), de elegendő a logikai elemek működéséhez. A paraméterek további javítását a p-n átmenetek és a pontkontaktusok kialakításától várják a kutatók.

A szén nanocsövek szilícium szeletek felületén ígéretes anyag kombinációt jelentenek.

Ezeket a struktúrákat 150 mm átmérőjű szilíciumhordozón alakították ki. A különlegesen nagy vezetőképességű szén nanocsövek igen lényegesek a szén nanocsöveken kialakított elektronikus eszközök szempontjából. Az elektromos ellenállás lényegében független a cső hosszától, mert a ballisztikus transzport nem engedelmeskedik az Ohm-törvénynek. A vezetés kvantummechanikai elven történik és így alakul ki az, hogy a csövek egyenkénti ellenállása 6,5 k Ω . Ezt az értéket úgy csökkenthetjük, ha több nanocsövet kapcsolunk párhuzamosan. Ez által olyan áramsűrűségeket hozhatunk létre a szén nanocsövekben, amely elérheti a 10^{10} A/cm^2 -es értéket (összehasonlításképpen megemlíthetjük, hogy a rézvezető 10^6 -on A/cm^2 -es áramértéknél olvadni kezd). Az előrejelzések szerint 10 év múlva a kikötőhuzalokon $3,3 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ áram fog átfolyni, amely a hagyományos félvezető anyagok alkalmazását csak különlegesen intenzív hűtés mellett teszi lehetővé.

A szén nanocsövek használatára eddig használt technológiai módszerek²⁰ – lézeres leválasztás, szikra kisülés – azonban nehezen egyeztetethetők össze félvezető technológia lépéseivel. Az alkalmazhatóság feltétele tehát, hogy igen rövid idő alatt a lehető legalacsonyabb hőmérséklet mellett történjen a szén nanocsövek növesztése.

²⁰ Könyvünkben nem térünk ki a szén nanocsövek előállítási részleteire. Ezek a technológiák az elektronikai technológiák alapján fejlődtek ki, amiről ld. [Mojzes, 2005].

Az első lehetséges alkalmazás feltehetően az integrált áramkörökben levő fémezéseket összekötő viákban fog történni. Ezekben az alkalmazásokban a nanocsövek harmadik igen előnyös tulajdonsága, a nagy mechanikai stabilitás is szerephez jut.

A szén nanocsövek további előnyös tulajdonsága, hogy félvezetők lehetnek, adalékolhatóak és ezáltal új típusú kapcsoló elemek hozhatók létre.

A szén nanocsövek átmérőjét változtatva a félvezető anyag tiltott sáv szélességét tudjuk befolyásolni. A szokásosan egy elektronvoltos tiltottsáv-szélességnek egy nanométer átmérőjű nanocső felel meg.

Kísérletek folynak folyamatokkal, ahol többféle sáv szélességű anyagok állíthatók elő. A szilícium sok esetben üveggel helyettesíthető. A szén nanocsövek alkalmazásával a planár mikroelektronika feltehetően kiterjeszthető lesz háromdimenziós rendszerek létrehozása felé²¹.

A szén nanocsövek megjelennek integrált eszközökben is.

A kezdeti nanoméretű eszközökben a kapu elektróda alul került kialakításra és így a chipen levő valamennyi tranzisztor számára a gate feszültség ugyanolyan értékű volt. Ha egy olyan eszközt hozunk létre, ahol az alumínium kapu elektróda alatt mindössze néhány nanométer vastagságú alumínium-oxidot, majd egy félvezető tulajdonságú nanocsövet tartalmaz, akkor a vékony dielektrikum réteg jó kapacitív csatolást hoz létre, a kapuelektróda és a szén nanocső között.

Az alumínium kapuelektródákat szilíciumhordozóra felvitt alumíniumból elektronsugaras litográfiával hozzuk létre. A fém felületén létrehozandó vékony oxidréteget ezután levegő hatásának tesszük ki, és így jön létre a vékony oxidréteg. A felhasználandó nanocsöveket diklór-etán oldatban diszpergált rendszerből választjuk le. Atomerő mikroszkóppal kiválogatjuk azokat a csöveket, amelyek átmérője közelítőleg egy nanométer. A nanocsövek kezdetben nem adalékoltak, így enyhe p-típusú vezetést mutatnak. A nanocső csatorna adalékolható egyszerűen úgy, hogy változtatjuk a kapuelektróda feszültségét. Az ilyen módon bevitt elektronok eredményezhetik a sáv áthidalását. Ez lehetővé teszi a teljes p és n adalékolás megvalósítását, a teljes adalékolási tartományban. Az ilyen struktúrák alkalmazhatóságát inverter, SRAM cella és gyűrűs oszcillátor létrehozásával bizonyították be²².

Ellenőrzött szén nanocsöves rajzolatot alakíthatunk ki szilícium felületén is.

Először a hordozó felületére nikkel vékonyréteget visznek fel. Ezt elektronsugaras litográfiával munkálják meg. A megmunkált szeleteket 700 °C-on történő hőkezeléssel nanoméretű gömböcskékké alakítják át. A szén nanocsöveket CVD eljárással viszik fel. A szén nanocsövek közötti távolság kb. 5 μm. Ahhoz, hogy ne amorf

²¹ Si2002/09/46

²² Si2001/12/46

szénréteg nőjön az így elkészített felületen, a szén nanocsövek növekedését eredményező acetilén és a marásukat eredményező ammónia arányát kell nagy pontossággal ellenőrizni²³.

6.14. Nanoérzékelők

A legtöbb nanotechnológiai módszerrel előállított struktúra alkalmas beágyazó áramkörrel kombinálva a nanoérzékelőknek. A nanoérzékelők előnyeit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- kis tömeg,
- nagy felületi érzékenység,
- linearitás (ez elsősorban a szén nanocső alapú érzékelőkre igaz),
- nagy felületi érzékenység lévén az atomok jelentős része a felületen helyezkedik el,
- kis tehetetlenség.

Az érzékelés alapja nagyon gyakran az, hogy valamilyen módon megváltoztatjuk a szén nanocső vezetőképességét, például a rá abszorbeált vegyületekkel.

A szén nanocső érzékelők érzékenységét kémiai kezelésekkel is módosíthatjuk. E folyamatok során a nanocsövek felületéhez kovalens kötással különféle molekulákat kapcsolhatunk. Ezeket funkcionális csoportoknak nevezzük, ez arra utal, hogy jelentősen módosíthatják a szén nanocsövek tulajdonságait, így pl. elektromos tulajdonságait. [Kiricsi, 2003]

Az érzékelőelem kialakítására általában valamilyen speciális rajzolatot kell kialakítani. A rajzolatok kialakítását általában igyekeznek a mikroelektronikai technológiából jól ismert Si/SiO₂ felületen kialakítani [Mojzes, 2005]. Az érzékelés gyakran két fém elektróda közötti szén nanocsővel történik. Az elektródák távolságát igyekeznek a lehető legkisebbre választani, hogy elkerüljék a hosszú szén nanocsövek előállításakor bekövetkező felcsavarodást.

A nanonyomtatás (nanolitográfia) lehetőségei ma már kiterjednek arra is, hogy 10 nm alatti tartományban hozzunk létre geometriai alakzatokat. Az alapanyag egy olyan polimer, amelyet a nyomtatás alatt az üvegesedési hőmérséklet fölé melegítünk. A leggyakrabban használt anyag az elektronlitográfiában a PMMA (PMMA – Poli-Metil-Meta-Acrlat, kereskedelmi nevén plexi)²⁴.

Az alábbiakban néhány példán szemléltetjük a nanotechnológiával létrehozott érzékelők lehetőségeit és sokszínűségét. Az áttekintésnek nem lehet célja a teljes-

²³ Si2001/12/6

²⁴ NANO, 9/2/1

ség, mivel igen gyorsan fejlődő, nagyon szerteágazó. A nanoelektronikában alapelemnek számít az egyelektronos tranzisztor. Ha egy egyelektronos tranzisztert kapcsolatba hozunk egy kantileverrel, akkor egy új típusú érzékelőt kapunk. A mechanikai vibráció ugyanis megváltoztatja a kantilever helyzetét, és ez hatással van az egyetlen elektron áthaladására²⁵.

Az érzékelők egyik legfontosabb felhasználási területe a robotika. E területen szinte valamennyi érzékelőt és ezek kombinációját is használják. A Tokiói Egyetem munkatársai olyan nanobőrt fejlesztettek ki, amely egyszerre képes a nyomás és a hőmérséklet érzékelésére. A többrétegű szerves tranzisztor alapú elektronikus áramkörök között szintén szerves hőmérsékletérzékelő rétegek vannak. A mért értékek kiolvasása mátrix alapon történik. A kutatás jelenleg olyan nanobőr kialakítására irányul, amely fényt, nedvességet és hangot is érzékel egyidejűleg²⁶.

A nanocső igen kedvező mechanikai tulajdonságai különösen előnyössé teszi alkalmazását mechanikai paraméterek megváltozásának mérésében. Mai ismereteink szerint az egyfalú szén nanocső ugyanis a legnagyobb szilárdságú anyag, Young-modulusa egy TPa nagyságrendbe esik. Lehetőség van szén nanocsővekből nyúlásmérő érzékelők kialakítására.

Az erős szerkezet, nagy rugalmassági modulus és a piezorezisztív tulajdonság indokolja a lehetőségét, hogy egy hosszú, összefüggő szenzort készítsenek nagy szerkezetek nyúlásméréséhez a struktúrahiba-detektálás (SHM – Structural Health Monitoring) számára. Korábbi kutatások kétféle megközelítést vettek figyelembe a CNT-n alapuló nyúlásméréseknek, ez a két alkalmazás a Raman-spektroszkópia²⁷ és a piezorezisztív „buckypaper” nyúlásérzékelő. A buckypaper egy olyan szén nanocsővekből előállított, szövetszerű anyag, melynek alkotóelemei, a nanocsővek körülbelül tízszer könnyebbek az acélnál, de 250-szer erősebbek nála. Ezek mellett kiváló mechanikai tulajdonságok mellett még rendkívül jó elektromos és hő vezetőképeséggel is rendelkezik²⁸.

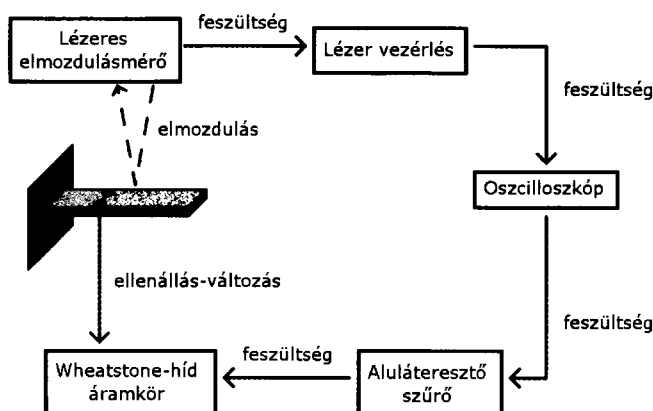
A „buckypaper” módszerénél a törékenység és a mechanikai feszültség átvitele a nanocsővekre a legnagyobb akadálya egy dinamikus nyúlásmérő szenzor kifejlesztésének. Itt cél egy olyan CNT kompozit nyúlásmérő szenzor kifejlesztése, hogy túljussunk ezeken a korlátokon. Ezzel a megközelítéssel egészen jó lineáris nyúláskarakterisztikát lehet elérni, mivel megnő a mechanikai feszültség átvitel a szenzorra, sőt mi több, ez a piezorezisztív szenzor egyszerű, és úgy méri az ellenállás változását, akár egy hagyományos nyúlásmérő műszer.

25 III-V2003/11/33

26 Proc. Nat. Acad. Sciences (Japan) Aug.17, 2005

27 <http://en.wikipedia.org/wiki/Raman-spectroscopy>

28 <http://www.physorg.com/news7435.html>



6.10. ábra.
Piezorezisztív szenzor

A nanotechnológiai érzékelők – mint fentebb vázoltuk – maguk is kis tömegűek és alkalmasak igen kis tömegű minták analízisére is. Az analízishez használt anyagmennyiség szintén a liter nanotartományába esik. Ezek az analízisek gyakran spektroszkópikus módszerek. A lézerspektroszkópiában kiemelt szerephez jutnak azok a módszerek, amelyek kis térfogatú minták analíziséből megbízható eredményeket szolgáltatnak. Egy ilyen mérési elrendezést mutat a 6.11. ábra

A fent említett speciális geometriai struktúrák lehetnek gyűrű alakúak is. A nanogyűrűk a nanostruktúrált geometriai alakzatok családjainak új elemei. A cink-oxidból álló gyűrű félvezető és piezoelektromos tulajdonságokkal rendelkezik és alkalmazható nanométer tartományban szenzornak, rezonátornak és átalakítónak. A nanogyűrűk tulajdonképpen nanoszalagok spontán szerveződésekor alakulnak ki. Egykristályos felépítésűek és önszerveződés révén jönnek létre. Kristályosodási mechanizmusuk ma még nem ismeretes.

A gyűrűk átmérője 1 és 4 μm között van, falvastagsága 10–30 nanométer között változik. Létrehozásuk csőkályhában történik, ahol 1400 °C-on Ar áramban hevítéssel cink-oxidot, indium-oxidot és lítium-karbonátot. Az anyagok aránya: 20:1:1. A gyűrűk alumínium-oxid hordozóra rakódnak le. A gyűrűk képződésében szerepet játszhat a nanoszalagok két végének eltérő polarizációja, ahol a cink és az oxigén ionok a szalag ellentétes végén helyezkednek el. A szalag két vége egyesülése után a növesztési folyamat alatt további gyűrűk képződnek, és ezek már nincsenek egymással kapcsolatban. Hasonlóan a többi korábban kifejlesztett struktúrához a nanogyűrűk lehetővé teszik nanoméretű elektromechanikus rendszerek létrehozását, amelyek alkalmasak egy-egy szerves molekula detektálására. Ezeket az érzékelőket későbbiekben feltehetően vérnyomás, véráramlási sebesség és az egyes sejteket érő mérésére lehet használni.

A cink-oxid az egyike a legismertebb wurtzit típusú kristályráccsal rendelkező anyagoknak. Ilyen anyagok még a GaN, AlN, InN, ZnS, és a ZnTe. A cink-oxidon szerzett kísérleti tapasztalatok feltehetően jól használhatók lesznek az ezen anyagból előállítható nanogyűrűs struktúrákhoz²⁹.

A nanotechnológia segítségével hőérzékelőket is készíthetünk. [Kuo, 2007]. A hőérzékelő elem maga az egyfalú nanocső, amelyet szilícium/szilícium-dioxid felületén alakítanak ki. A szén nanocső két fém (NiTi) elektróda között nő. A növesztésre fel lehet használni a ciklotron rezonanciás kémiai gőzfázisú leválasztást ECR-CVD (ECR-CVD – Electron Cyclotron Resonance – kémiai gőzfázisú leválasztás). Az így létrehozott érzékelő a szerzők által vizsgált 30–130 °C-ig terjedő tartományban lineáris. További lényeges előnyt jelent, hogy az érzékelő igen kis tömegű és ezért kis hőtehetetlenségű. A mérendő hőmérséklet eloszlását nem változtatja meg.

A nanoszenzorok igen prespektivikus területe az az alkalmazás, amelyek az emberi testen belül működnek és semmiféle vezetéket nem igényelnek a külvilág felé.

Az emberi testben működő érzékelők gyakran a kémiai és biológiai elvű érzékelők határán helyezkednek el. Más területen is alkalmaznak ilyen határterületi elven működő érzékelőket, így pl. mikroorganizmusokat az ivóvíz kémiai összetételének jelzésére. [Roose-Pehrsson, 2004].

A nehézfémek ionjait már igen kis mennyiségben kimutathatjuk két elektróda közötti vezetés mérésével. Az elektródákat szilícium felületére is felvihetjük, így 0,1 nM mennyiségű nyomokban létező fém iont is kimutathatunk. [Rajagopalan, 2004]

Az ezekben az érzékelőkben alkalmazott érzékelés elve gyakran az abszorpció, amely történhet akár folyadékban, akár polimerekben is [Grate, 2004].

6.15. Nanoméretű struktúrák létrehozására alkalmas megoldások

A nanotechnológiában jelenleg használatos módszerek sok esetben a mikroelektronikában használt technológiák továbbfejlesztéséből jöttek létre. Ezek a módszerek leggyakrabban szén alapú nanoobjektumok előállítására szolgálnak. A módszerek kiindulási alapját jelentő elektronikai technológiai lépéseket az e területről kiadott szakkönyvből ismerhetjük meg [Mojzes, 2005].

²⁹ Si2004/4/28

6.15.1. Önszerveződés

Az önszerveződés a természet egyik kedvelt módszere különféle dolgok létrehozására. Egyszerűen ez azt jelenti, hogy összekombinálunk különféle anyagokat, egy előre elhatározott módszer szerint. Az önszerveződő monorétegek, amelyeket a fentiekben említettünk, egy egyszerű példa erre.

Az önszerveződést nanotechnológiáról szóló források egy alulról történő építkezésként említik. Ilyen eljárás például egy motor összeszerelése, mert itt a motor alkatrészeiből rakják össze (a példa azért nem teljesen jó, mert a motor alkatrészei nem önmaguktól állnak össze motorrá, hanem azokat össze kell szerelni). Az önszerveződés általában kis addicionális erőforrásokat igényel. Az önszerveződés ezért gazdaságilag egy nagyon perspektivikus eljárás, és ezért van az, hogy feltehetően hamarosan alkalmazásba is kerül. Feltehetően ezt az alulról építkező, önszerveződő folyamatot kombinálják egy felülről történő építkező folyamattal. Az ilyen megoldásra példa lehet az, hogy egy felülről történő építkezési technológiával megmunkált hordozó önszerveződő alulról építkező struktúrákat hozott létre.

Végezetül az önszerveződést mint egy folyamatot kell tekintenünk, amelyben az egyes önszerveződött részek maguk is önszerveződött rendszerek részeivé válnak.

Az önszerveződésben mind az egyes rácsállandók közötti különbség, mind a felületi szabad energia különbsége jelenthet hajtóerőt, mint ezt a szilíciumra növesztett germánium rétegek esetében tapasztaljuk [Vescan, 2000].

6.15.2. A szélesebb értelemben vett litográfia

Ez a terület oly annyira széles, hogy még a hagyományos nyomtatást is magába foglalja. Nem is tudunk megemlíteni speciális technológiát, hiszen az előállítandó méretek, tartományok is igen széles skálán helyezkednek el. Bár nincs közös technológia, vannak azonban közös nehézségek, ilyenek például az illesztés. A mérettartományoktól függően az illesztés megoldására is eltérő módszereket dolgoztak ki.

Ha nézzük például a folyadéktovábbító rendszereket, ezeknek a méretét egészen 10 nanométerig csökkenthetjük. Nyilvánvaló, hogy a csökkentés során változtatnunk kell a technológiákat és az alkalmazott anyagokat is.

A litográfiai anyagok közül önállóan is hasznosítják az SU-8 típusú rezisztet, amely nagy kontrasztot adó epoxi alapú anyag. Kiváló termikus, mechanikai tulajdonságai mellett kémiai is igen ellenálló. Igen vastag rétegben (1–1000 mikrométerig) felvihető a szeletek felületére. Megvilágítása ultraibolya sugárzással történik, a 300–500 nanométeres tartományban jelentős elnyeléssel rendelkezik, így közönséges higanygőz lámpával megvilágítható. (Hg i-vonal -365 nm. Hg h-vonal -405 nm, Hg g-vonal -435 nm).

6.15.3. Nanolitográfia domborítással (DIP-PEN nanolitografia)

E technika alkalmazása során az AFM mikroszkóp tűjét használjuk arra, hogy a tinta felvitelére szolgáljon. Ezzel a módszerrel néhány nanométer széles vonalakat hozhatunk létre, ha a tinta tulajdonságait változtatjuk (ld. 5. fejezet).

A nanométeres litográfia elenőrzése egy sor igen érdekes problémát vet fel. A 90 nanométeres és annál kisebb tervezési szabályok szerint létrehozott eszközökben már nem elegendő csak a csíkszélességet mérni. Igen lényeges szerephez jutnak például marási gödrök falainak jellemzői, így például dőlésszögük. A mérés legperspektivikusabb eszköze a spektroszkópiás ellipszometria, amely roncsolásmentes és érintésmentes mérést tesz lehetővé. Ezzel a módszerrel már 65 nanométeres csíkszélesség mellett is igen jól jellemezhetőek a struktúrák³⁰.

A *műanyagra növesztett szilícium* perspektívikus módszer. Régi elképzelés, hogy az átlátszó műanyagok felületére szilíciumot növezzünk. A technológiai nehézséget az okozza, hogy azok a hőmérsékletek, amelyeken a szilíciumot növesztik, megolvasztják a hordozóként használt műanyagokat. Ha a növesztés excimer lézerrel és speciálisan csatolt plazmával végezzük, akkor olyan szilícium rétegeket hozhatunk létre, ahol a mozgékonyosság nem csökken $140 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ alá³¹.

A kémiai gőzfázisú leválasztás CVD és ennek katalitikus változata, a CCCVD igen jó eredményeket ad szén nanocsövek leválasztására, akár inhomogén felület esetében is. Így van lehetőség különféle mezoporózus anyagokra történő leválasztásra is [Urbán, 2006].

6.16. A szén nanocsövek piaca

A jelenlegi piaci elemzések azt mutatják, hogy a jelenleg létező nanotechnológiai termékek piaca mintegy 116 milliárd USD, amely nem tartalmazza az elektronikai alkalmazásokat. A 2004-es évben várhatóan a kutatás költségvetése el fogja érni a 4 milliárd USD-t. A piaci alkalmazások megítélése ma még meglehetősen ellentmondásos. A figyelem elsősorban a szén nanocsövekre irányul. Mivel a nanotechnológia fogalmára nincs elfogadott definíció, ezért igen nehéz megbecsülni magát a nanotechnológiai piacot is. Általános definícióként legalább egy funkcionális elem 100 nanométer alatti méretét és legalább egy olyan fizikai, kémiai vagy biológiai jelenség meglétét ill. előidézhetőségét kötik ki, amelyek nem lépnének fel akkor, ha a kritikus méretet 100 nanométer fölé emelnénk.

³⁰ Si2004/4/36

³¹ Si2003/10/23

Ennek megfelelően a nanotechnológiai termékeknek, megfelelően e feltételeknek, szükségképpen kell tartalmazniuk mikron vagy ennél is nagyobb részeket. Ez tehát azt jelenti, hogy a piaci szegmens meghatározásakor nemcsak a nano hanem a mikro részt is bele kell ebbe érteni. Jó példa erre a mágneses adatrögzítés ahol a adatrögzítés és olvasás a GMR jelenségen alapul, amely nanoméretű eszközben válsul meg. Mint tudjuk ezt a fejet külön nem hozzák forgalomba, hanem csak a meghajtót, mint terméket vásárolhatjuk meg. E megfontolások alapján a legtöbb elemző a nanotechnológia világpiacát 2010-re ezer milliárd dollárra teszi majd a további öt évre is növekvő trendet prognosztizál.

A szén nanocsövek jellegzetes példái a nanotechnológiai anyagoknak. A világtermelést jelenleg 1 és 5 kilogramm közé teszik. A növekedés megíósolt éves üteme eléri a 300%-ot. A nanocsövek a rendkívül fontos szerepüket kiemelkedően jó mechanikai és elektromos tulajdonságaiknak köszönhetik. A nanocsövek tulajdonságai, elsősorban könnyű fajsúlyukkal, és kiemelkedően jó átmérő/hossz arányukkal előzik meg a gyémántot. Ez felvetheti azt, hogy a nanocsövek alkalmazása elsősorban e két tulajdonságukon alapul. A gyakorlat erre rácáfolt, hiszen a nanocsöveket ma már mind akkumulátorokban, mind kijelzőkben széleskörűen alkalmazzák. A kijelzőkben történő alkalmazásukat elsősorban nagy stabilitásuknak és magas üzemi hőmérsékletüknek köszönhetik.

A szén nanocsövek további előnyös tulajdonságuk nagy hidrogénmegkötő képességük. A gyakorlati alkalmazásuk szempontjából egy hidrogén üzemű gépjármű ilyen tartálya 62 kg hidrogént kell tartalmazzon köbméterenként, ez 6,5 súlyszázaléknak felel meg. A hidrogén megkötés lehetőleg 25–100 °C közötti tartományban és nem több mint 200 atmoszféra nyomáson kell, hogy történjen. A jelenlegi publikált adatok ezeknek az értékeknek 4 és 65% közötti értékén belül helyezkednek el.

A szén nanocsövek egyik első ipari alkalmazása az SPM eszközökben alkalmazott tű érzékelők. Ezek világméretű piaca kicsi, mintegy 31 millió dollár. Ennek oka elsősorban az, hogy más anyagok felhasználásával is előállíthatunk kedvező tulajdonságú érzékelőket.

A termeléssel kapcsolatos adatokat egyébként igen nagy óvatossággal kell kezelni, mivel például a Mitsubishi cég bejelentette, hogy 120 tonna éves kapacitással kezdi meg a termelést. Ez tehát lényeges meghaladja a világon a jelenleg termelt mennyiséget, feltehetően jelentős része műanyagok erősítésére vagy akkumulátorokban történő alkalmazásokra kerül³².

6.17. Összefoglalás

Ebben a fejezetben néhány nanoelektronikai alkalmazást tekintettünk át. Ennek során a nanoelektronikához tartozónak tekintettük azokat az eszközöket is, amelyek a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenése folytán kerültek át a nanotechnológia, a nanoelektronika világába. A szorosan vett, kvantummechanikai jelenségeken alapuló eszközök többsége ma még messze van a tömegtermeléstől. Hogy a winchesterek leolvasó fejét hova soroljuk, ennek megítélését az Olvasóra bízunk.

6.18. Irodalomjegyzék a 6. fejezethez

- [Avouris, 2002] Ph. Avouris, R. Martel, V. Dericke, J. Appenzeller: Carbon nanotube transistors and circuits. *Physica*, B 323 6–14, (2002)
- [Benedek, 2000] Benedek, G., Milani, P., Ralchenko, V.G.: *Nanostructured Carbon for Advanced Applications*. NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry, vol. 24. Dordrecht, Kluwer, 2000.
- [Bhushan, 1999] Bhushan, B.: *Handbook of Micro/Nano Tribology*. Second Ed. CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [Bhushan, 2004] Bhushan, B (Ed). *Handbook of nanotechnology*. Berlin etc. Springer Verlag, 2004.
- [Charlier, 1998] J.-C. Charlier, L.-P. Issi: Electronic structure and quantum transport in carbon nanotubes. *Applied Physics A*, vol. 67, (1998)
- [Cho, 2007] Cho, W.-S., Lee, H.-J., Lee, Y.-D., Park, J.-h., Kim, J.-K., Lee, Y.-H., Ju, B.-K.: Carbon Nanotube-based Triode Field Emission Lamps Using Metal Meches with Spacers. *IEEE El.Dev. Lett.*, vol. 28, No 5, pp.386–387 (2007)
- [Clement, 2001] Clement, K.W., et al.: Carbon nanotubes: A thermoelectric nano-nose. *Chem. Phys. Lett.*, vol. 337, pp. 31–35 (2001)
- [Csanádyné, 2007] Csanády Andrásné Bodok Ágnes, előadás a Nano Törzsasztal 2007. április 26-i ülésén (Megjelenés alatt)
- [Fech, 2004] Fech, Hans : *Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites*, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Fendler, 1996] Fendler J.H., Dékány, I.: *Nanoparticles in Solids and Solutions*. NATO ASI Series, 3. High Technology, vol.18. Dordrecht, Kluwer, 1996.

- [Foulger, 2006] Stephan Foulger et al: Photonic Bandgap Composites Advanced Materials, vol. 13, pp.1898–1901, 2006.
- [Frank, 1998] Stefan Frank, Philippe Poncharal, Z. L. Wang, Walt A. de Heer: Carbon Nanotube Quantum Resistors. Science, vol. 280, 1998.06.12.
- [Gergely, 2007] Gergely, A., Telegdi, J., Mészáros, E., Pásztai, Z., Tárkányi, G., Kármán F.H., Kálmán, E.: Modification of Multi-Walled Carbon Nanotubes by Diels-Alader and Sandmayer Reactions. J. Nanosciences and Nanotechnology, vol.7, No1, pp.1–13 (2007)
- [Grate, 2004] Grate, J.W., Nelson, D.A., Skaggs, R.: Sorptive Properties of Monolayer-Protected Gold Nanoparticle Films for Chemical Vapor Sensors and Arrays. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.
- [Hone, 1999] J. Hone, M. Whitney, C. Piskoti, and A. Zettl: Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes. Physical Review B, vol 59, No. 4, pp. (1999)
- [Ishikawa, 2004] Ishikawa, Takashi.: Proc International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Jones, 2005] Jones R.A.L.: Soft machines – nanotechnology and life. Oxford, University Press, 2005.
- [Khoury, 2000] Khoury, M., Gunther, A., Militic, S., Rack, J., Goodnick, S.M.: Single-electron quantum dots in silicon MOS structures. Appl. Phys., vol. A 71, pp. 415–421 (2000)
- [Kiricsi, 2003] Kiricsi I., Kónya Z., Niesz., Koós A., Bíró L. P.: Synthesis procedures for production of carbon nanotube junctions; Proceeding of SPIE 5118 pp. 280–287 (2003)
- [Kuo, 2007] Cheng Yung Kuo, Chia Lang Chan, Chie Gau, Chien-Wei Liu, Shiusan Hua Shiau, and Jyh-Hua Ting IEEE Transactions on Nanotechnology , Vol. 6. No. 1, January 2007 pp.
- [Lee, 2004] Lee, K. et al: Single Wall Carbon Nanotubes for p-Type Ohmic Contacts to GaN Light-Emitting Diodes Nano Letters, vol.4, pp. 911–914, 2004.
- [Leo, 2000] Leo P., Kouwenhoven and Liesbeth C. Venema: Heat flow through nanobridges. Nature, vol. 404, 2000.04.27.

- [Lew, 2004] Kok-Keong Lew, Ling Pan, Timothy E. Bogart, Sarah M. Diltz, Elizabeth C. Dickey, Joan M. Redwing, Yanfeng Wang, Marco Cabassi, Theresa S. Mayer and Steven W. Novak: Structural and electrical properties of trimethylboron-doped silicon nanowires. *Applied Physics Letters*, vol. 85, No. 15, (2004).
- [Mamalis, 2004] A. G. Mamalis, L. O. G. Vogtländer, A. Markopoulos: Nanotechnology and nanostructured materials. *Trends in carbon nanotubes*, Precision Engineering, vol. 28 pp. 16–30 (2004)
- [Mojzes, 1997] Mojzes, I., Kovács B.: Nanotechnology-a dedicated tool for the future. MIL-ORG NETI Budapest, 1997.
- [Mojzes, 2005] Mojzes I. (szerk.): Mikroelektronikai és technológia. Műegyetemi Kiadó 2005.
- [Novoselov, 2004] Novoselov et. al. *Science* (2004) 306,666.
- [Picaud, 2005] Picaud F., Langlet R., Arab M., Devel. M., Girardet C., Natarajan S., Chopra S., Rao A. M.: Gas-induced variation in the dielectric properties of carbon nanotube bundles for selective sensing. *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 114316
- [Rajagopalan, 2004] Rajagopalan, V., Boussaad, S., Tao, N.J.: A Nanocontact Sensor for Heavy Metal Ion Detections. In: *Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications*. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.
- [Roose-Pehrsson, 2004] Roose-Pehrsson, S.L., Pehrsson E.P.: Environmental Applications: Sensor and Sensor Systems: Overview. In: *Nanotechnology and the Environment. Applications and Implications*. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.
- [Sarkar, 2004] Sarkar, Partho: Proc International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Simpkins, 2006] B. S. Simpkins, P. E. Pehrsson and A. R. Laracuate: Electrical conduction in GaN nanowires. *Applied Physics Letters*, vol. 88, 072111, 2006.04.10.
- [Suenaga, 2004] Suenaga, Seiichi: Proc International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Urbán, 2006] Urbán, M., Kónya, Z.: Synthesis of Multiwall Carbon Nanotubes in the Pore System and/or on the Outer Surface of Mesoporous MCM41 Structures of Various Morphology. *Nanopages*, vol. 1, No 1, pp. 97–117 (2006)

- [Vajtai, 2006] Vajtai, R. Biswas, S.K., Wei, B., Meng, G., Jung, Y.J., Ajayan, P.M.: Electrical Characterization of Carbon Nanotube Structures. Nanopages, vol.1, No1, pp. 45–68 (2006)
- [Vescan, 2000] Vescan, L., Goryll, M., Stoica, T., Gartner P., Grimm, K.: Size distribution and optical properties of self-assembled Ge on Si. Appl. Phys., A 71, pp. 423–432 (2000)
- [Wei, 2004] Jinqun Wei et al: Carbon nanotube filaments in household light bulbs Applied Physics Letters, vol. 84., pp. 4869–4871, 2004.
- [Wen, 2004] Wen, Weijia. Proc International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Yang, 2001] P F Yang, et al: Gate oxide prepared by nanometre silicon wet oxidation at low temperature for Si/SiGe PMOSFET application Institute of Physics Publishing Semicond. Sci. Technol. 16 (2001) 972–974
- [Yu Huang, 2002] Yu Huang, Xianfeng Duan, Yi Cui, and Charles M. Lieber: Gallium Nitride Nanowire Nanodevices. Nano Letters, vol. 2, no. 2, 2002

....amit az ökonómusok, a nemzetgazdászok úgy hívnak, hogy haszon: az, amit levezettek a tudományból, nagyobb volt, mint a befektetés. Arkhimédész föltalálta a parittyát. És ez talán kifizette magát. De általában véve Arisztotelész, Platón – luxus volt. Newtontól kezdve a tudomány nem volt már luxus, hanem hasznos művelet volt. És talán ez az oka, hogy azóta számítják tudománynak.

Wigner Jenő (1902–1995)

7. Alkalmazások

Ebben a fejezetben a nanotechnológiai termékek és azok alkalmazásait tekintjük át. Mint könyvünk bevezetőjében is hangsúlyoztuk, figyelmünket elsősorban a műszaki területekre koncentráljuk, mivel ezt a könyvet a műszaki felsőoktatási intézmények tankönyvének szánjuk.

7.1. Ipari alkalmazások

Az ipari alkalmazást itt iparjogvédelmi értelemben használjuk, azaz „iparszerű” jelleget értünk alatta. E fejezetnek nem lehet célja valamennyi ilyen felhasználás számbavétele, az öröndetesen sok alkalmazásból szemezgettünk.

Az alábbiakban alkalmazási példákat mutatunk be. Elsősorban ott számít a nanotechnológia sikeres alkalmazásra, ahol az jelentős értéknövelést valósít meg.

7.1.1. Nanotechnológia az építőiparban és az épületgépészetben

A fejlett országokban levő épületállomány jelentős részét a II. világháború után emelték. Ezek az épületek tehát, mintegy 50 évesek, lényegében élettartamuk vége felé járnak. Újjáépítésük, felújításuk jelentős feladat. Ebben fontos szerephez juthatnak a szálerősítésű polimerek (FRP – Fiber Reinforced Polymers) [Cheung, 2004].

Ezek az anyagok a hagyományos építőipari funkciók mellett a tűzvédelemben is szerepet játszhatnak mint az acél konstrukciók bevonó anyagai. Ebben az esetben a bevonatokat sprayként viszik fel. A beton konstrukciók javítására ezeket az anyagokat szövetként alakítják ki. Nem egyszer alkalmazásra kerül a nanocement is, amely lényegesen nagyobb rugalmassággal bír, mint hagyományos elődje. Az erősítésre szénszálakat is használhatnak (**CFRP – Carbon Fiber Reinforced Plastics**). Ezeket az anyagokat akár több méter szélességben is előállítják, és így alkalmazzák őket.

Az építőiparban egyre szélesebb körben használt vasbeton hátrányai között említik meg, hogy a betonban levő acélszálak oxidálódnak. Az acél felületén képződő oxid kezdetben javítja a vasbeton minőségét, mivel az oxid jól kötődik a beton alkotórészeihez. A további korrózió hatására azonban a vasbeton széttöredezik, a konstrukció szilárdsága jelentősen lecsökken. E hatás kivédésére jelentős és eredményes kísérletek folynak az acélszál szénszállal és nanocsővel történő helyettesítésével. Az így előállt anyagrendszer korrózióállósága kiváló, ezért elsősorban vízi és tengeri építmények létrehozása során alkalmazzák.

Eredményes kísérletek folynak olyan betonjavító anyagok kialakítására, amelyek erősítő elemként szén nanocsöveket tartalmaznak. Az így előálló szén nanocső-beton keverék irányfüggetlen mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, jól tapad a javítandó betonfelülethez, ezáltal megbízhatóan eltünteti az eredeti konstrukció hibáit.

A cement megkötésében is kimutatták, hogy nanoméretű részecskék elhelyezkedése és sűrűsége határozza meg a cement szilárdságát. Kísérlettel igazolták, hogy ekkor nincs szükség olyan jelentős hőmérsékletű és idejű izzításra, hőkezelésre a cement előállítása során. Ha valamennyi cementet ilyen módszer szerint gyártanánk, akkor a világ szén-dioxid emissziója akár 10%-kal is csökkenthető lenne. [Glun, 2007]

Az épületgépészeti alkalmazásokban is megjelent a nanotechnológia. A klíma-berendezésekben nanoméretű ezüst ionok segítségével el lehet pusztítani a kórokozókat. Megakadályozza a penészgombák és mintegy 650 különféle típusú baktériumot abban, hogy megtelepedjenek a légkondicionálóban. Ezen túlmenően az ezüst nanobevonat szagtalanít is, így a helyiség tisztábbnak és frissebb illatúnak tűnik. Az egészségügy ugyan már ősidők óta alkalmazza az ezüstöt, amely sok kórokozó számára mérgező, az emberi testre, élelmiszerekre, ruhaanyagokra azonban ártalmatlan. Az ezüst ionokkal bevont szűrő az összes porrézecske és vírus 99,99%-át eltávolítja. Azt ilyen szűrő hatásos az influenza vírusok ellen is¹.

¹ <http://www.air-max.hu/bel.php?pass=9>

7.1.2. Textilipari alkalmazások

7.1.2.1. Polimer felületek megmunkálása az új textilnyersanyagok kialakításában

A felületmódosítás mint egy széleskörben elterjedt technológiai eljárás igen jelentős technológiai tartalékokkal bír. A nanotechnológia szempontjából ide soroljuk az anyagok felületi adalékolását különféle nanorészecskékkel. E részecskék lehetnek elemi fémek vagy oxidok. E szervesetlen anyagokon kívül van lehetőség nagymolekulájú szerves anyagok adalékolásában is, ezeket dendrimereknek nevezzük. Létrehozhatunk olyan rendszereket is, ahol a felületre mikroemulziós réteget, habot vagy kompozitot viszünk fel. Látható, hogy a technológia lehetőségei milyen szélesek, sajnos ezek közül ma még igen kevés érte el az ipari alkalmazás területét és gazdaságosságát.

A felületen létrejövő, és a nanostruktúrák energetikáját igen jelentősen meghatározó energiaszintek jelentős hatást gyakorolnak a kialakuló rendszer jellemzőire. Az egyes energiaszintek olyan módon is befolyásolhatók, hogy például a felület állapotában a vezetőtől a félvezető állapotig terjedő változás állhat be. E rendszerek előállítására szinte kizárólag az alulról felfelé építkező módszer alkalmazható, amely mind gáz, mind folyadék fázisból előállítható. Az előbbiben a folyamat az égési térben zajlik le, az utóbbiban a reakció folyadékfázisban szol-gél kölcsönhatásban megy végbe. Ez által egy olyan új rendszer jöhet létre, ahol a műszálakat vagy a textilanyagokat szerves vagy szervesetlen hibrid polimerekkel vonják be. E módszer szerint egy igen nagy potenciális lehetőség új textilanyagok előállítására. A technológiában a szokásos eljárásokat és berendezéseket lehet használni, és egy műveleti lépésben különböző tulajdonságokat érhetünk el.

Ezek a textíliák, mind új intelligens tulajdonságaikkal, mind hagyományos tulajdonságaik jelentős javulásával különböznek elődeiktől. Létrehozásukban a nanocsöveknek jelentős szerepük lesz, ez lehetővé teszi, hogy az anyagok vízállósága, kopásállósága jelentősen megjavuljon.

7.1.2.2. Megvalósult nanotextíliák

		Osztályok
	→	Nanorészecskék (oxidok, fémek)
„Nano”-k	→	Polielektrolitok (Lattices)
	→	Dendrimerek (szupermolekulák)
	→	Mikroemulziók (folyadék/folyadék)

Nanorendszerek	→	Habok (folyadék/gáz, szilárd/gáz)
	→	Kompozitok (szilárd/szilárd)

[Zimehl, 2004]

Egy sor olyan új textilipari termék került kifejlesztésre, amelyek felületére nanoporokat visznek fel. Ezek az adalékanyagok öntisztítóvá, hidrofóbbá, vagy nedvszívóvá teszik a szálakat. Lehetőség van fokozottan hőálló, baktériumellenes, és negatív ionokat távoltartó porok felvitelére is. Ugyancsak lehetőség van gyulladáskésleltető textíliák létrehozására is. Ezek az anyagok gyakran por alakban tartalmaznak a gyulladáskésleltető anyagokat.

A nanoporok előállításával általában fontos lépés, hogy a porokat övező burkolatokat eltávolítsuk. Ezek nagyon gyakran szerves proteinek [Hosein, 2004].

A nedvesítési tulajdonságok változását, mind a felület mikrostruktúrájával, mind összetételével befolyásolhatjuk. Ezek közt a tulajdonságok között, kiemeljük ismét a TiO_2 -t. Ezt adalékanyagként vízhez adva, UV fény hatására 0 fokos nedvesítési szöveget értek el. [Lei Jiang, 2004].

Különlegesen kiváló hidrofób tulajdonságot mutató anyagokat kétféle módon állíthatunk elő. Az egyik, hogy durva struktúrát hozunk létre a hidrofób felületen. A másik módszer, hogy ezt a durva struktúrát olyan anyaggal vonjuk be, amelynek alacsony a felületi szabadenergiája. A durva felületi struktúra kialakítására különféle módszereket használnak, így például a polipropilén plazma polimerizációját és/vagy marását, az alumínium anodikus oxidációját. A szuperhidrofób felületek alacsony szabadenergiájú anyagokkal történő bevonására a fluor alkil-szilánt használnák. Egyes vizsgálatok megállapították, hogy a lótusz és rizs levelei annak köszönhetik szuperhidrofób tulajdonságait, hogy a mikro- és nanostruktúrák tulajdonságai megfelelő módon együttműködnek és így befolyásolják a felületükön levő vízcsepp mozgását. [Lei Jiang, 2004].

Egy öltözet ruhában több helyen is megjelennek az intelligens textilipari termékek.

A fején levő sapkában egy kivilágítható display található. A kézen levő hőmérsékletre érzékeny festékanyaggal átitatott textília a külső hőmérsékletet mutatja. A vízlepergető bevonat meggátolja a textil átnedvesedését. A zokni és a lábbeli antibakteriális adalékanyaggal van ellátva, amely a *Stafilococcus* ellen 100%-os védelmet nyújt. (AATCC teszt – 100 – 1999.)

Az ultrabolya sugárzásra érzékeny logó lehetővé teszi, hogy segítségével azonosíthassuk a személyt. Az érzékelővel ellátott kesztyű deformációt, hőmérsékletet és nedvességet is érzékel, anélkül, hogy visszahatna a kézre. Valamennyi textília el látható olyan ultrabolya elnyelő bevonattal, amely az ultrabolya sugárzás több, mint 50%-át elnyeli.

Az **elektronikus szövetet** a textilipari technológiában használt módszerekkel állítják elő. A szövetben kialakított tranzisztorokat úgy hozzák létre, hogy egy $125\text{ }\mu\text{m}$ alumínium huzalt használnak kapu elektródaként. A tranzisztor többi alkatrészét hagyományos litográfia nélkül hozzák létre. Ez úgy történik, hogy $50\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjű huzalokat fonnak egymás fölé. A felülre befűzött szálak eltávolítása után jönnek létre a tranzisztorok, amelyek lényegében megegyeznek a hagyományosnak mondható pentaszénből előállított vékonyréteg tranzisztorokhoz. Az elektronok mozgékonyasága 20 V-os feszültségen kevesebb volt, mint $0,01\text{ cm}^2/\text{Vs}$.²

A nanotextíliákban fontos szerephez jutnak a $70\text{--}500\text{ nm}$ átmérőjű szálak. Ezeket a szálakat „természetessé teszik”. Ha a terülént felületkezeljük, olyan átkapcsolható textíliákhoz jutunk, amelyek lehetővé teszik, hogy a textíliát téli (hőszigetelő), illetve nyári (laza, szellős) üzemmódok között megfordíthatóan oda-vissza átkapcsoljuk. Ugyancsak van lehetőség ilyen szupernedvesítő és víztaszító állapot közötti megfordíthatóságra. Megoldott a kasmír felületének kezelése is, ezt például ionbombázással lyukacsossá teszik.

A mágneses teret elnyelő textíliák jól alkalmazhatóak védőruhaként, ill. mobil telefonkészülékeket is becsomagolhatjuk ilyen textíliába. A nanokatonai öltözete teljes egészében antibakteriális adalékkal ellátott textíliából készül.

Ígéretes terület az **intelligens ruházat** megalkotása és elterjesztése. Ezekben a ruházati tárgyokban nem csak érzékelők, hanem az ahhoz csatlakozó jelfeldolgozó és továbbító eszközök is integrálásra kerülnek. Az érzékelők figyelik a szívverések számát, a testhőmérsékletet, a vérnyomást. Ezek folyamatos figyelése különösen fontos lehet a veszélyes munkakörülmények között dolgozók és a beteg emberek számára. A jeleket olyan antennák továbbítják, amelyek hajlékonyak, a ruha anyagába bevarrottak vagy szóttek.

Ilyen szövessel kialakíthatóak fényforrások is, így lehetőség van „Tűzoltóság”, „Rendőrség” feliratok megmintázására is. Világító diódák is csatlakoztathatóak a textíliához, áramellátásuk ekkor vezető szálakkal történik. Ezeknek a szálaknak a vezetőképessége eléri az ólomét, azaz a $4,4 \cdot 10^4\text{ S/cm}$ értéket.

A ruhába épített elektronikus rendszerek táplálásában szerephez juthatnak a hajlékony napelemek is, amelyeket a hátra erősítenek.

A TiO_2 -dal adalékolat PET szálak igen jelentős ultraibolya elnyelő képességgel rendelkeznek. [Gu, 2004]. Az adalékolás jelentősen javítja a szálak mechanikai tulajdonságait és a 200 és 400 nm közötti tartományban a sugárzások több, mint 99% -át elnyeli. Az elnyelést minősítő UPF (UPF – Ultraviolet Protection Factor) tényező az adalékolatlan PET szálban 12 , míg adalékolással legkevesebb 50 .

² Si2003/10/23

7.1.3. Bevonatok és kenőanyagok

A tárgyak, eszközök értéke növekedésével egyre nagyobb szerephez jutnak az azokat díszítő védőbevonatok. A mechanikai eszközökben a kenőanyagok hatékony felhasználása kulcskérdés. A festékek a bevonó és kenőanyagok tulajdonságai széles körben módosíthatóak nanoanyagok hozzáadásával. Így ezek az új anyagok fokozottabb ellenállóképességgel, UV sugárállósággal, jobb kenési tulajdonságokkal rendelkeznek. A leggyakrabban használt anyagok, a nano-SiO₂, amelynek nagyon nagy a fajlagos felülete, nano-TiO₂ (rutil), nano-ZnO, nano-CaCO₃ kiterjedten alkalmazott anyagnak számít. Ezek segítségével módosíthatjuk a festékeket, bevonatokat és a színezőanyagokat.

Mint a továbbiakban is látni fogjuk, a TiO₂ kiemelt szerepet játszik a nanotechnológia anyagai között. A TiO₂-ot CVD technológiával állíthatjuk elő. Kituduló anyagként a TiC₄ szolgál. Kimutatták, hogy a növesztés során kis mennyiségű SnO₂-ot hozzáadva a TiO₂ fotokatalitikus aktivitása jelentősen megnövelhető [Shi, 2004].

A köbös bór-nitrid nanorészecskék jelentősen megnövelik a velük bevont szerzőszámok élettartamát (CBN – Cubic Boron-Nitride). Ezt a bevonatot oldatból vagy sprayből felvitt rétegből elektromos tér segítségével állítják elő, így egyenletes vastagságú lesz. A réteg jó kenőanyag, rozsdálló és hidrofób.

A nanoszénporok, a szén nanocsövek, a nanomágneses anyagok (Fe₃O₄) kiterjedten alkalmazásra kerülnek a nanotribológiában.

A kerámia is megfelelő hordozóanyagnak bizonyulnak ahhoz, hogy nanoanyagokat keverjünk hozzájuk. Így α -Si₃N₄ nanowiskerek alkalmazásával kerámia golyócsapágy állítható elő. Ugyancsak van lehetőség α -Si₃N₄ huzalok előállítására.

7.1.4. Nanotechnológia és napenergia

Az emberiség jelenlegi energiaigényét elsősorban széntartalmú tüzelőanyagok elégetéséből nyerik. Az égési folyamat gyakran alacsony hatásfokú, nem megújítható és szén-dioxidot és egyéb szennyezőanyagokat termel. Ezek az anyagok, beleértve azokat a radioaktív anyagokat, amelyek a szénben található, az atmoszférába kerülnek. Ezt a kérdést a napenergia felhasználásával a legtöbb olyan helyen ki tudjuk küszöbölni, ahol a földterület ára meglehetősen olcsó és az energiátárolás hatékony. A napenergia termelése a fotovoltaiikus konverziótól függ, és meghatározza még a direkt napsütéses órák száma. A felhős időben ugyanis ezeknek az átalakítóknak a hatása csökken.

A napenergia átalakító rendszereket gyakran úgy tervezik meg, hogy azok követik a nap járását. Ehhez azonban olcsó számítástechnikai eszközökre és aktuátorokra van szükség. Ezek a tárolók lehetnek például vékony gyémántrétegek. Ezek

energiatároló-képessége megközelíti a kémiai nyersanyagok teljesítménysűrűségét és sokkal nagyobb, mint a ma használatos akkumulátorok kapacitása. A vízbontás jól szállítható és tárolható energiát jelent, amely azonban csak nagymennyiségű hidrogén tárolása vagy szállítása esetén hatékony.

A napenergia hasznosítása történhet egyénileg is. A naptól közvetlenül kb. négyzetméterenként 1 kW energia érkezik. Ha ennek a tizedét vesszük, akkor tekintetbe vesszük az éjszaka, a felhős napok és az átalakítás rossz hatásfokát. Ezt figyelembe véve egy átlag amerikai személyenkénti 10 kW-os napi fogyasztását, kb. 100 m²-es kollektort igényel. Ha ezt az USA várható 2020-as lélekszámaához viszonyítjuk (325 millió lakos), akkor az ország területének 0,35%-át kell napkollektorokkal lefedniük. A törekvés az az, hogy ezeket az eszközöket elsősorban a háztetőn helyezzük el, vagy a meglévő utak felületét alakítsuk át napelemekké.

7.1.5. Nanoélelmiszerek

A nanoélelmiszerek fejlesztésének egyik legfontosabb kiindulópontja az Apoló-17 legénysége számára kifejlesztett élelmiszerek voltak. Ennek során korábban az élelmiszertechnológiában nem alkalmazott módszereket (besugárzás, extrémálisan nagy nyomás, elektromos impulzusok, mágneses tér) használtak. Mindezek mind a baktériumok elpusztítását, mind az eredeti íz megőrzését tűzték ki célul. Az élelmiszereknek a csomagolás egyre szervezettebb része lesz, így a csomagolás önműködően jelzi például ha a szavatossági idő lejár³.

A nanoélelmiszertechnológia feltehetően egyik alapló módszere az lesz, hogy az egyes alkotórészeket kis kapszulákba zárják.

A nanoélelmiszerekben fontos szerephez jut a Q10 koenzim⁴.

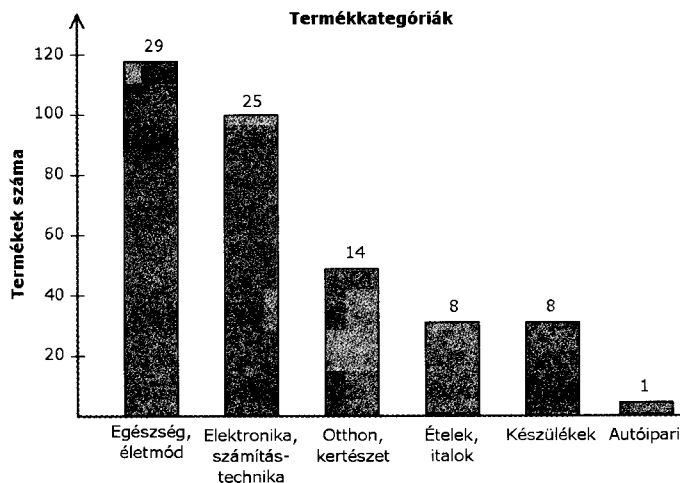
A nanoélelmiszerek és italok a nanotermekek között a negyedik helyen helyezkednek el. Ezt szemlélteti a 7.1. ábra.

7.2. Biológiai alkalmazások

A korábban szénből előállított fullerének mellett megjelentek azok az anyagok is, amelyek DNS-ből építkeznek. Ezekhez további anyagok köthetők, és így nagyon pontosan lehet felépítésüket befolyásolni. Az elvégzett modellezés azt mutatja, hogy egy ilyen fullerén közel 19 ezer molekulából áll.

³ <http://observer.guardian.co.uk/foodmonthly/story/0,9950,1214918,00.html>

⁴ <http://tabemono.info/english/news/news199.html>



7.1. ábra.
Nanotermékek
megoszlása az
egyedül alkalmazási
területek között.

7.2.1. Nanotechnológia a környezetvédelemben

Az új technológia és a környezet viszonya mindig egy igen összetett kérdés, ugyan nagyon gyakran az új technológiák sokkal „tisztábbak” és biztonságosabbak, mint a régiek voltak, de mégis hordozhatnak új veszélyeket is. Ilyen technológia a nanotechnológia is, amely nagyon gyakran kiváltja a technológiát általában ellenzők tiltakozását⁵.

Az eddig használt technológiáink általában a felülről lefelé haladás elvét követik. Ez az elv több technológiai forradalmat túlélte, ez természetesen nem jelenti kizárólagosságát. Nanotechnológia példát mutatott arra, hogy komplex módon összekeverhetünk igen sokféle anyagot, ezekből hozva létre új rendszereket. Természetesen ezek a folyamatok veszélyeket is hordozhatnak magukban. Ezen veszélyek egy részét a környezetvédelem területére utalhatjuk.

A környezetvédelem jellegzetesen olyan terület, amely igen precíz jogi szabályozást igényel. A nanotechnológia területén is történt egy kísérlet 1999-ben, a Foresight Institute a Szilícium-völgyben egy konferenciát szervezett, hogy elősegítse a nanotechnológia szabályozást. Ellentétben például a nukleáris fegyverek kutatásával – amely önmagában nagyon kevésbé szabályozott – a nanotechnológiai kutatások nem igényelnek speciális infrastruktúrát. Egyetértés volt a konferencián abban is, hogy a szabályozás ellenére is a nanotechnológia igen nagy fejlődés előtt áll.

⁵ J. and K Sale. R.Bailey: Against the Future. Witnessing the Birth of the Global Antitechnology Movement, Reason Online. Feb. 28. 2001. at <http://reason-com/rb/rb22801.html>

A szabályozás mellett igen fontos szerepet játszik a nyilvánosság ereje [Jacobstein, 2000]⁶.

A fent említett konferencia egy ajánlást fogadott el, amely lefekteti, hogy az új technológia lehetővé teszi többek között olyan anyagok kifejlesztését, amelyeknek terhelhetőség/súly aránya 50-szer jobb, mint a titáné. Ezek az új lehetőségek azonban új kockázati tényezőkkel és új felelősséggel járnak. Ezeknek a felelőségeknek az elfogadása nem opcionális kérdés, hiszen ez a technológia – precedens nélkül – sok katonai, biztonságtechnikai és környezetvédelmi vonzattal bír. Ezekhez az eddigi gyakorlatot meghaladó módon és mértékben szükség van oktatásra. Ugyancsak szükséges a megfelelő bizalom a civil társadalom részéről is. A bizalomnak ki kell terjednie arra is, hogy a társadalom elfogadja, hogy egy megbízható technológia kifejlesztése során a lehető legtöbb környezetvédelmi, biztonsági, etikai és gazdasági vonzatot tekintetbe vettünk [Reynolds, 2001].

7.2.2. Az élővilág színeiről

Ki ne csodálta volna meg a lepkék, a különféle madarak sokszínnel pompázó fényjátékát? A természet sok százmillió éve tökéletesíti ezeket a színeket, amelynek ma már a nagyfelbontású analitikai technológiáknak köszönhetően pontos fizikai magyarázatát adhatjuk. Ezek a fenomenológikus modellek hozzásegítenek bennünket ahhoz is, hogy mesterségesen állítsunk elő olyan fotonikai anyagokat és eszközöket [Mojzes, 1995], amelyek a különféle kijelzőkben és az optikai vékonyrétegekben kerülhetnek alkalmazásra. Ezek a színek mindig egy valamilyen periodikus szerkezet és a fény kölcsönhatásaként alakulnak ki. Ha a kristály periodicitása a 100 nm – 1 μm nagyságrendbe esik, ez a látható fény tartományában (továbbá a közeli ultraibolya- és infravörös-tartományban) okoz diffrakciós jelenségeket. A fénydiffrakciót okozó kristályok – az úgynevezett fotonikus kristályok – olyan fizikai rendszerek, amelyekben térben periodikusan változik a törésmutatója. Húsz évvel ezelőtt Eli Yablonovitch állított elő elsőként olyan szerkezetet, amelyeknek tiltott sávja volt az elektromágneses hullámok bizonyos hullámhossztartományában [Yablonovitch, 2001], [Márk, 2007]

Az élőlények színei kétféle fő módon keletkeznek. A pigmentszínek festékanyagok (pigmentek) hozzák létre, ezek olyan anyagok, amelyeknek a fényelnyelése, illetve visszaverése hullámhosszfüggő – kémiai, elektronszerkezeti okból. A szerkezeti (strukturális) színeket olyan biológia szerkezetek hozzák létre, amelyeknél a törésmutató szubmikronos skálán változik. Szerkezeti színeket növényeken és állatokon egyaránt megfigyelhetünk, de a szerkezeti színek legszebb és leggazda-

⁶ http://bootstrap.org/colluquium/sesion_03/session_03jacobstein.html

gabb tárházát az ízeltlábúak, elsősorban a bogarak és a lepkék adják [Rajkovits, 2001, 2007] [Bíró, 2003] [Márk, 2007].

A színeket eredményező struktúrák szerves anyagokból épülnek fel és ellentétben a mikro- és nanoelektronikai eszközökkel, általában háromdimenziós térbeni elrendezésűek. A nagyobb objektumokat – így a pikkelyeket – optikai mikroszkóppal is megfigyelhetjük. Maguk a pikkelyek azonban már csak elektronmikroszkóp segítségével tanulmányozhatóak. Mivel a szerves anyagok jelentős része kitinből épül fel – amely önmagában színtelen és a törésmutatója $n=1,56$ – a szín kialakulásához különféle pigmentek jelenlétére is szükség van.

7.3. Nanoeszközök és -anyagok orvosi alkalmazása

A nanotechnológián belül is kiemelt figyelem kíséri az orvostudományi alkalmazásokat. Ezek mind a nanoanyagokra, mind ezek felhasználásával készített orvosi eszközökre vonatkoznak. A kutatásokon belül külön figyelem kíséri a rákkutatással kapcsolatos eredményeket. Itt, és egyéb alkalmazásoknál is, a nanorészecskék nagyon gyakran a szállítóeszköz funkcióját is betöltik, ezáltal lehetőség nyílik a hatóanyagokat célzottan adott helyre juttatni és így a nem kívánatos mellékhatásokat csökkenteni.

Az eszközök közül itt a bevezetőben kiemeljük a különböző nanomembránokat, amelyek a dialízis lefolytatásában szerepet játszanak, és a fogpótlásban használt implantátumokat.

A nanoeszközök alkalmazása általánosságban kiterjed:

- diagnózis,
- megfigyelés (monitoring),
- kezelés területére.

A nanotechnológia alkalmazását tovább segítette a többi tudomány fejlődése is. Itt különösen a génkutatást emeljük ki. A nanotechnológia orvostudományi alkalmazása nagyon gyakran azt jelenti, hogy olyan anyagokat állítunk elő „megrendelésre”, amelyek mérete a nanotartományba esik, vagyis oda, ahol a DNS $\sim 2,5$ nanométeres szélességgel, az aszpirin $0,4$ nm-es nagyságával a dendrimerek $1\text{--}10$ nm-es, a proteinek $1\text{--}30$ nm-es, a vírusok $20\text{--}300$ nm-es a liposzomák ~ 150 nm-es nagysággal vannak jelen (mint ismeretes a vörösvértestek mintegy 8 mikrométer átmérőjűek). [Wagner, 2004]

A nanotechnológia alkalmazási területeit öt csoportra szokás osztani:

- hatóanyag-transzport,
- új terápiák és hatóanyagok,

- in-vivo diagnosztika,
- in-vitro diagnosztika,
- orvosi implantátumok és bioanyagok.

Valamennyi területen a fejlődés igen gyors, amit az is jelez, hogy az e területen megjelenő publikációk száma az elmúlt évtizedben négyszeresére nőtt. A gyakorlati alkalmazást az is szemlélteti, hogy a szabadalmak száma is igen gyorsan nő. Ezeknek a szabadalmaknak és publikációknak jelentős része az USA-ban (a publikációk 32%-a, a szabadalmak 53%-a), Németországban (a publikációk 8%-a, a szabadalmak 10%-a), és Japánban (a publikációk 9%-a, a szabadalmak 6%-a) jött létre. Az egyes területek fejlettségét azzal is lehetne illusztrálni, hogy a nanotechnológia orvosi alkalmazása területén működő cégek 19%-a az implantátumokkal, 17%-a pedig az in-vitro diagnosztikával foglalkozik. A terápia területén azonban a cégek mindössze 3%-a tevékenykedik.

A cégek jelentős része újonnan létrejövő, az akadémiai szférából kiváló start-up vállalkozás. Tevékenységük elsősorban az alapkutatástól az állatkísérletekig vagy a klinikai egyes fázisig terjed. Jellemzően ekkor gyógyszergyári partnereket keresnek, akik a további klinikai teszteléseket és az engedélyeztetési eljárásokat folytatják. Ugyancsak a gyógyszergyárak végzik a marketing feladatokat. Világszerte mintegy 200-ra tehető azon cégek száma, akik e területen dolgoznak, és 100-ra tehető a már piacon tehető nanotermékek száma. [Wagner, 2006]

7.3.1. Hatóanyag transzport

A hatvanas években fedezék fel a liposzómákat, egy olyan rendszert, amely az anyagtranszport szempontjából igen ígéretes. Ezek a kis buborék jellegű képződmények könnyebben haladnak át a tumorokban levő véredények falán, mint az egészséges szövetek erein. Ezt a tulajdonságukat használják fel arra, hogy a hatóanyagokat elsősorban a beteg szövetrészekbe juttassák. A piacon jelenleg rákellenes szerek, gomba jellegű fertőzések elleni anyagok és bizonyos szembetegségek gyógyítására alkalmas szerek vannak.

A liposzómákon kívül más nanoméretű szállítóeszközök is vannak a piacon. Így pl. különböző polimer nanorészecskék, valamint polimer-protein konjugátumok.

Az e területen folyó kutatások jellemzően most jutottak abba a stádiumba, hogy kezdenek az egyetemekről a klinikai kipróbálás állapotába átjutni. Az irodalomban több mint 100 hatóanyagok szállítására alkalmas nanoanyag leírását közölték.

7.3.2. Új terápiák és hatóanyagok

Ezek között szerepelnek dendrimerek is, amelyek fém ionokat is megköthetnek, így ultraszűrőkkel kiszűrhetők.

E gyógyszerek egy része a nanotermékeknek azt a tulajdonságát használja fel, hogy egységnyi tömeghez lényegesen nagyobb felület tartozik. Ezek között kiemelhetjük azokat a géleket, amelyek a vírusok felületén levő proteinekkel reagálnak, hatásosak lehetnek HIV-vírusok ellen is.

A rák ellenei küzdelemben szerepet játszó termoterápiában olyan anyagokat juttatnak a rákos sejtekbe, amelyek külső mágneses tér vagy lézersugárzás segítségével melegíthetők és így pusztíthatják el a rákos sejteket. Ez a kezelési módszer lényegesen kevesebb mellékhatást eredményez és alkalmazása jelentős anyagi megtakarításhoz vezet.

7.3.3. In-vivo diagnosztika

Az elmúlt évszázadban megtett igen jelentős diagnosztikai módszerfejlesztés olyan technikákat eredményezett, mint a röntgen, ultrahang, mágneses rezonancia és különböző nukleáris eljárások. E módszerek azonban alig nyújtanak a betegségek okaira és a betegség állapotára vonatkozó információkat. Jelentős eredményt hozott a genom és molekuláris biológiai kutatás, amely elsősorban a betegségekkel kapcsolatos molekuláris folyamatokról nyújt információt. A figyelem itt elsősorban a rák vagy az érlemeszesedés kutatására irányul. A molekuláris képalkotással megvalósított módszerek célja az, hogy olyan markereket találjanak, amely már a betegség első szindrómáinak észlelését is lehetővé tegye.

Igen ígéretesnek tűnik, a különböző nanotechnológiai alapon létrehozott molekuláris kontrasztanyagok, amelyek pl. a máj vizsgálatára sikerrel alkalmazhatók.

7.3.4. In-vitro diagnosztika

Ezen a területen elsősorban az érzékelők fejlődésében látunk jelentős előrelépést. A nanotechnológiai alapon megvalósított érzékelés egyik célja, hogy kisebb anyagmennyiségből nagyobb biztonsággal állapítsuk meg a diagnózist. A nanotechnológiai in-vitro diagnosztika egyrészt azt jelenti, hogy a molekulákhoz markerként nanorészecskéket kapcsolunk. Másrészről olyan új mérési elveket is jelent, ahol a mérési elv megvalósítását nanotechnológia teszi lehetővé.

Különösen az arany nanorészecskék alkalmazása van az érdeklődés középpontjában, sok egyéb mellett terhelességi teszt eszközt is készítenek felhasználásával.

Az új nanotechnológiai elven működő érzékelők közül kiemeljük a kantilever és a felületplazmon-rezonancián alapuló eszközöket. A kantileveres érzékelőknél a

hegy felületét bevonhatjuk DNS vagy protein molekulákkal, amelyek reakció esetén a kantilever elmozdulását eredményezik. A felületiplazmon-érzékelők alkalmazása arra, hogy különféle proteinek vagy azok DNS-sel történő reakcióját valós időben mérni tudjuk. Ezekben az elrendezésekben a reflektált fény a reakcióban részt vevő molekulák tömegétől függ. Elsősorban a különböző hatóanyagok vizsgálatára használják ezt a módszert.

Valamennyi ilyen elven működő érzékelés és általában a nanotechnológia orvosi alkalmazása előtt jelentős akadályt jelentenek az orvosi termékek engedélyeztetésével kapcsolatos szigorú szabályozások.

7.3.5. Orvosi implantátumok és bioanyagok

Ezekkel az anyagokkal szemben elsődleges követelmény, hogy élettartamuk megfelelően hosszú legyen. Ehhez jól meg kell ismernünk a beültetett, általában szeretlen implantátum és a befogadó szervezet kölcsönhatása során lezajlott folyamatokat. Az élettartam növelésében szerephez juthatnak a különböző nanobevonatok, amelyek gyakran hidroxil-apatit alapúak. Különlegesen jó eredményeket várnak nanokristályos gyémántbevonatoktól is.

A csonthelyettesítő anyagok fejlesztése terén a csonthoz erősen hasonló cementek kifejlesztése a cél. Ezek az anyagok előnyös mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és segíthetik a csonthibák javítását. Felépítésük alapján a különböző csontképző sejtek behatolhatnak az anyagba és így stimulálják a csontképződést.

Az orvostudományi alkalmazásokban a különböző nanoszálak is szerephez jutnak. Ezekből olyan szövetszerű struktúrákat is létre lehet hozni, amelyek porózusak. Lehetővé teszik a levegő cserét, de méretük révén meggátolják a baktériumok behatolását. Ugyanilyen anyagokkal gyorsítják a sebek gyógyulását, amely 3–4-szer rövidebb gyógyulási időt ígér.

A dializátorokban alkalmazott nanoanyagok a Földön mintegy 1,4 millió művese-kezelésre szoruló beteget érintenek. A korábbi cellulóz membránokat olyan anyagokra cserélik le, amelyek méreteiben közelítenek a vese természetes szűrési tulajdonságaikhoz. Ezek a pórus átmérők kb. 4 nm átmérőnek felelnek meg. A technológia fejlesztése elsősorban arra irányul, hogy minél kisebb legyen ennek az átmérőnek a szórása.

A nanotechnológia segítségével lehetőség nyílik olyan mesterséges csontszövet előállítására, amely nem tartalmaz szerves oldószert. [Jie Han, 2004].

Arany nanorudak segítségével jól detektálható a véráramlás. Ezek a mintegy 50 nm hosszú és 16 nanométer átmérőjű rudacsák 58-szor világosabbak, mint a hagyományos fluoreszcens festékek beleértve a rhodamint is⁷.

A pacemaker piaca elsősorban az érzékelők fejlődésének köszönhetően fejlődik tovább. Méreteiben és fogyasztásában egyre kisebb eszközöket hoznak létre. Távolilag felmerül a Parkinson-kór és az epilepszia kezelése hasonló eszközökkel.

A vérnyomásmérők érzékelő eleme a mindössze néhány gyártó által előállított szilícium piezorezisztív szilíciumérzékelő. Ezek megbízhatósága azonban tovább növelendő, csökkenteni kell a költségeket is⁸.

Az orvosi alkalmazásoknál szinte csak igen kisméretű orvosi eszközök jöhetnek szóba.

Mind az MEMS, mind NEMS igen sokat ígérő ebből a szempontból mint olyan kisméretű eszköz, amely ellenőrizhet anyagforgalmat (gyógyszeradagolás) illetőleg funkciót (műszív). Feltehetően azonban, hogy itt lassúbb fejlődés várható, amelyet a specifikus követelmények, így a nagy megbízhatóság határoz meg.

A vegyi anyagok különleges csoportját jelentik azok az anyagok, ahol a természetes színt, különleges struktúrák segítségével érik el [Tao, 2004] [Bíró, 2006].

Igen érdekes tulajdonságú multiréteges struktúrákat kapunk különböző törésmutatójú polimer vékonyrétegek egymásra rétegzésével (irideszcens rétegek).

Az egészségügyben elsősorban a baktériumellenes nanoszerek alkalmazását emeljük ki. Az örvendetesen terjedő alkalmazásokat anyaguk alapján csoportosíthatjuk.

Az első csoportba tartoznak a különböző fémionok, amelyeket nanooxid rézecsékkkel kombinálunk.

A második csoportba tartoznak azok a mezoporózus szilárd anyagok, amelyeket szerves baktériumellenes reagensekkel kombinálunk.

A harmadik csoportba tartoznak azok az anyagok, ahol az átmeneti vagy ritka földfémek oxidjait, nano-TiO₂-ot kombinálunk. Ezeknek nagyon erős optikai katalizátor szerepük van. Ezeket az anyagokat mind textilipari termékekben, mind funkcionális bevonatokban használják. Megtalálhatóak a mobiltelefonokban, autókban, számítógépes billentyűzetben és élelmiszer-csomagoló anyagokban is.

Az egészségügyi alkalmazásoknál – megfelelő óvatosságot tanúsítva az eredmények értékelésében – meg kell említenünk, a nanoszelen kapszulákat mint gyógyszerket és a Fe₃O₄ vegyületet, amelyeket a daganatba juttatva külső mágneses tér segítségével hőkezelést érhetünk el. Az Fe₃O₄ és arany nanoporból álló keveréket sikerrel alkalmazták a hepatitisz gyógyításában. [Jie Han, 2004]. A nanokapszulák szabályozzák az immuntevékenységet, és lassítják az öregedési folyamatokat.

Lehetőség van arra is, hogy pénzürméket antibakteriális bevonatokkal lássunk el. Ezek a bevonatok, AATCC százas osztálya szerint a baktériumok 100%-át elpusztítják. [Tao, 2004]. Környezetvédelem területéről a nanolevegőszűrőket emeljük ki, ezek között is legfontosabb a nano-TiO₂ és a Cu₂O, valamint a CeO.

⁸ Mst4/02/37

Vizek tisztítására jól használható a nanoagyag. A kipufogógázok tisztítására nanoezüstöt, nanonikkelt, nanopalládiumot és nano-CeO-t használunk.

A nanotechnológiai orvosi alkalmazások jelenleg kb. 54 milliárd eurót tesznek ki. Más előre jelzések 2008-ra a forgalmat 700 milliárd USD-ra teszik. Ez a növekedés akkor valósulhat meg, ha az alkalmazások egyre szélesebb körre terjednek ki. Az egyik ilyen alkalmazás az emberi testtel kapcsolatos, amely molekuláris szinten, azaz nanométer tartományában szervezett. Egyes előrejelzők azt prognosztizálják, hogy ez a piac évente 180 milliárd USD-t tesz ki és kiterjed a gyógyszeripari termékek mintegy felére. Nagy szerep jut a különböző analitikai módszerek így az SPM/AFM eszközök alkalmazásának is. Külön előny, hogy az SPM-et vizes oldatok analízisére is lehet alkalmazni, ami a biológiai minták vizsgálatában is igen jelentős⁹.

7.4. A katalízis

A korszerű katalíziskutatás arra irányul, hogy a kívánt termék irányában a katalizátorok szelektivitása közelítse a 100%-ot. A kétdimenziós modellanyagok előállításához mind a nanolitográfia, mind a fotolitográfia eszköztárát bevetik. Ennek segítségével érjük el, hogy a nanokatalizátorok méretét pontosan ellenőrizhessük, kialakítva a szükséges felületi struktúrát és a fém-oxid határfelületet.

Azoknak a katalizátoroknak, amelyek nagy szelektivitással és hatásfokkal rendelkeznek, egyik fajtáját az enzimek jelentik. Ezekben sok esetben a szervesetlen nanoklasztereket nagymolekulájú proteinek veszik körül. Ezek általában szobahőmérsékleten és vizes oldatokban működnek.

A katalizátorok másik típusát gyakran olyan fém nanoklaszterek alkotják, amelyeket a kémiai technológiákban használnak. Ezek nagy felülettel rendelkeznek, és általában a 400–800 Kelvin-fok hőmérséklet tartományban működnek. A folyamatokat úgy igyekeznek kialakítani, hogy a reakcióban résztvevő anyagok és a reakció eredményeképpen előállított termékek gáz fázisban áramoljanak a katalizátorok környezetében. A működés során igen fontos szerepet játszanak a környezetvédelmi aspektusok is. A felület nagyságát azzal szemléltethetjük, hogyha egy nm² technológiailag hasznos katalizátor felületre van szükségünk, ehhez 10¹⁵ mennyiségű nanorészecskét kell kialakítani. Ezek már csak háromdimenziós elrendezésben alakíthatók ki [Somorjai, 2004].

Az enzimek iránti nagy érdeklődés azt is jelzi, hogy az enzimek izolációja és tisztítása kevésbé költségigényes, mint az egyéb biotechnológiai műveletek. Ezeket gyakran különböző polimerekkel házasítják össze, amely stabilizálja az enzimek működését [Kim, 2004].

⁹ Mst4/02/31

A nanokatalizátorokat mind a kibocsátott szennyezőanyagok csökkentésére, mind a már kibocsátott szennyezőanyagok elnyelésére használják. A különböző szerves és szervetlen szennyezőanyagok lebontásában fontos szerepet játszik a fotokatalitikus TiO_2 , amelyet a tiltott sáv megváltoztatása céljából különböző nemfémekkel (Pt, Pd, Ru, Rh) adalékolják. Kiváltását a kevésbé költséges WC_x nanokatalizátorral végzik el [Shah, 2004].

A katalízisben egyre növekvő szerepet játszanak a nikkalapú katalizátorok. Ezeket méhsejtszerű monolit kivitelben állítják elő, alkalmazásukat a tüzelőanyag-cellákban látják perspektivikusnak. [Suenaga, 2004]. Ezeket a nikkel kompozitokat magnézium-oxiddal keverve a metánból történő nitrogén előállítására 99%-os hatékonysággal történhet.

7.5. Kozmetikai ipar

A kozmetikai ipar igen korán felfigyelt a nanotechnológia lehetőségeire, amikor mintegy 40 évvel ezelőtt a liposzómatechnológiát bevezette. Lényegesen változtatták a termékek oldhatóságát. Ma már lényegesen többféle fizikai változást is végrehajtanak a nanotechnológia segítségével. Alapvető kérdésként jelentkezik, hogy vajon a nanorészecskék miért nem hatolnak be a bőrbe, mint a mikrorészecskék. Erre a kérdésre ma még nem ismerjük a választ. A termékek bevizsgálásával kapcsolatban eltérő nézetek vannak, egyesek ezt cégek kompetenciájának tartják, mások állami ellenőrzést sürgetnek. Szinte valamennyi kedvelt kozmetikai jelszó – ránctalanítás, simítás, feltöltés – kezelhetőnek látszik a nanotechnológiai termékekkel¹⁰.

Mivel más vizsgálatok bizonyítják, hogy a nanotermekek a bőr mélyebb rétegeit is eléri, úgy látszik, hogy segítségükkel az E vitamint is mélyebbre lehet juttatni a bőrbe és a hajba.

Így ezt a fontos antioxidánst hatékonyabban lehet alkalmazni¹¹.

A vízmolekula átmérője ugyanis 0,3 nanométer, az így kapszulázott E vitamin körülbelül 1 nanométer¹².

A nanotermekek közé beleértjük a fullerént is, jelenleg mintegy 30 olyan kozmetikai termék van forgalomban, amely fullerént tartalmaz. A fullerén is mélyebben hatol be a bőrbe, ez feltehetően jelentős előnyt jelenthet¹³.

¹⁰ <http://www.azonano.com/news.asp?newsID=13534>

¹¹ <http://www.azonano.com/news.asp?newsID=13534>

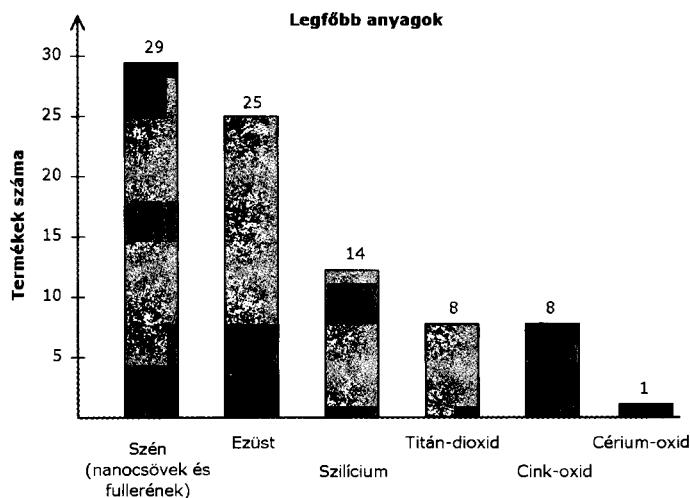
¹² <http://tabemone.info/english/news/news199.html>

¹³ <http://pubs.acs.org/cen/science/84/8413sci3.html>

A kozmetikai alkalmazások terén ausztrál kutatók elsősorban a fényvédő krémek területén jelentek meg több újdonsággal. Olyan teljesen átlátszó és felvitele után szabad szemmel nem látható cink-oxid alapú napvédő krémet fejlesztettek ki, amely nem okoz allergiát.

A cink-oxid fontos nanoanyag, alkalmazását a 7.2. ábra szemlélteti.

Ugyanezt az anyagot egyéb más kozmetikai szerekbe is beteszik, így például nedvességpótló viszkozitást növelő alkalmazások is találhatók. Feltehetően az alkalmazások nem fognak itt megállni, perspektivikusnak látszik olyan alkalmazás is, amely a bőr finom ráncait úgy tünteti el, hogy egy átlátszó diffúziót okozó réteget visz fel a felületre, megőrizve a bőr eredeti visszaverő képességét¹⁴.



7.2. ábra. A fontosabb nanoanyagok alkalmazásának szemléltetése

A fentiekből is látható, hogy az alkalmazások még csak a kezdeti stádiumban vannak, jelentős biztonságtechnikai kérdések megválaszolatlanok. Ez magyarázza azt, hogy az USA-ban, a kutatási költségvetés mintegy 4%-át használják biztonságtechnikai kutatásokra¹⁵.

Egy 2005-ös adat szerint a japán kozmetikai ipar 122 vállalata már előállított nanoterméket.

¹⁴ [Australian Nanotechnology Consumer Products Australian Government Invest Australia]

¹⁵ <http://tabemono.info/english/news/news199.html>

7.6. Összefoglalás

Az alkalmazások területéről itt csak felvillantottunk néhányat. A cél a sokszínűség szemléltetése volt

7.7. Irodalomjegyzék a 7. fejezethez

- [Bíró, 2003] Bíró, L.P.: Nanovilág: A szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyakig. Fizikai Szemle, LIII. évf. 11.sz. pp. 385–392. (2003)
- [Cheung, 2004] Cheung, Ying-Kit: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Gu, 2004] Gu, Hong-chen: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Han, 2004] Han, Jie: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Hosein, 2004] Hosein, H-A., Strongin, B.R., Douglas, T., Rosso, K.: A Bioengineering Approach to the Production of Metal and Metal Oxide Nanoparticles. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, (2004)
- [Jacobstein, 2000] Jacobstein, Neil: Nanotechnology and Molecular Manufacturing: Opportunities und Risks. Id. a 6. lábjegyzetet.
- [Kim, 2004] Kim, J., Grate, J.W.: Nano-Biotechnology in Using Enzymes for Environmental Remediation: Single-Enzyme Nanoparticles. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, (2004)
- [Lei Jiang, 2004] Lei Jiang: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Márk, 2007] Mark, G. I., Bálint Zs., Kertész K., Vértessy Zs., Bíró, L.P.: Biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái. Fizikai Szemle, LVII. évf. 4.sz. pp. 116–121. (2007)

- [Mojzes, 1995] Mojzes I., Kökényesi S.,: Fotonikai anyagok és eszközök. Műegyetemi Kiadó, 1995.
- [Rajkovits, 2001, 2007] Rajkovits, Zs., Illy, J.: Az élő természet színei. Fizikai Szemle LI. évf. 3.sz. pp.76–81 (2007)
- [Rajkovits, 2007] Rajkovits, Zs.: Szerkezeti színek az élővilágban. Fizikai Szemle LVII. 4. sz. pp. 121–126. (2007)
- [Reynolds, 2001]. Reynolds, G. H.: ELR News & Analysis Environmental Regulation of Nanotechnology: Some Preliminary Observations by 2001.
- [Shah, 2004] Shah, S.I., Rumaiz, A., Li, W.: Nanostructured Catalysis for Environmental Applications. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, (2004)
- [Shi, 2004]. Shi, Liyi: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Somorjai, 2004] Somorjai, G.A.: Fabrication of Two-Dimensional and Three-Dimensional Platinum Nanoparticle Systems for Chemisorption and Catalytic Reaction Studies. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, (2004)
- [Suenaga, 2004] Suenaga, Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Tao, 2004] Tao, X. M. : Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004.
- [Wagner, 2004] Wagner, V., Wechsler, D., Nanobiotechnologie II: Anwendungen in der Medizin und Pharmazie. VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2004
- [Wagner, 2006] Wagner, V., Zweck, A.: Nanomedizin – Innovationspotenziale in Hessen Medizintechnik und Pharmazeutische Industrie. Band 2 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung
- [Yablonovitch, 2001] Yablonovitch, E.: Photonic Crystals: Semiconductors of Light. Scientific American 2001/12 p.47.

- [Zimehl, 2004] Zimehl, Ralf: Proc. International Conference on Industrial Applications of Nanomaterials & Advanced Composites, Hong Kong, February 23–25., 2004. Presentation at Doug Engelbart's Unfinished Revolution Colloquium at Stanford University Jan. 20, 2000

A képzelet fontosabb, mint a tudás.

Albert Einstein, (1879–1955)

8. Nanotechnológia és a szellemi tulajdon védelme

A technológia mindig többféle tudás birtoklásán alapszik. Ezeket a megfelelő szellemi tulajdonvédelmi eszközökkel óvni kell, hiszen ez a vállalkozás tulajdonszerkezetében lényeges értéket jelenthet. Ebben a fejezetben ezeket a formákat tekintjük át, utalva elsősorban nanotechnológiai vonatkozásaikra.

8.1. A szellemi termék monopóliuma

A bennünket körülvevő világ részben a természet, részben az ember által létrehozott tárgyakkal övez bennünket. Az ember által létrehozott tárgyak megtestesítik azokat az ismereteket, amelyet az ember saját fejlődése során halmozott fel, és örökölt meg. Nem lehetünk biztosak abban, hogy valamennyi lényeges, a korábbi időkben megszerzett ismeret fennmaradt. Az ismeretek továbbadásának eszköze a korábbi időkben részben a közvetlen tapasztalatszerzésen keresztül történő átadás („apáról fiúra”), illetve a szájhagyomány volt. Az írásbeliség megjelenésével hamarosan az ismeretátadásban az írás és a kép egyre nagyobb szerephez jutott. Ezt a szerepet igen megerősítette a nyomtatás feltalálása

Nézzük meg, hogy milyen módon is lehet rögzíteni – és ezzel a távolevők részére megismerhetővé tenni – a műszaki megoldásokat. Tárgyunk szempontjából elsődleges jelentőségűek a különböző iparjogvédelmi és szerzői jogvédelmi dokumentumok. Ezek jelentős része ma még papír alakú, de a többségnek létezik elektronikus változata is. Jogi nehézségek miatt az országok többsége papír alakú dokumentumokat tekinti elsődlegesnek.

Ugyanez a helyzet vonatkozik a különböző folyóiratokra és könyvekre. Itt már sűrűbben előfordul, hogy valamely információ csak és kizárólag elektronikus formában létezik. (Az „elektronikus” kifejezés itt nem csak szorosan vett elektronikus megjelenési formát takar, hanem beleértjük az optikai módon tárolt illetve tovább-

bíttott információt is. Ezt a szemléletmódot használja ugyanis az Európában legtöbb helyen érvényben lévő elektronikus hírközlési törvény is).

Az információtovábbításnak ma is fontos eszköze a szóbeli közlés. A szóbeli közlések formáját a különféle rendezvényeken tartott előadások, prezentációk jelentik. Lényeges azonban, hogy ide kell érteni a sokszor informális beszélgetéseket is, amit például konferenciák szünetében, félasztal mellett folytatunk. Ezek sok esetben illetéktelen helyekre is eljutva igen nagy veszélyt jelentenek az újdonságra magára. A jogi szabályozás szerint ugyanis maga a feltaláló is lehet saját innovációjának újdonságrontója.

Egy-egy termék bemutatásában fontos szerep jut a kiállításoknak és a szakmai vásároknak, ahol mód nyílik arra, hogy a szakemberek, és a lehetséges fogyasztók nagy száma megismerkedjen egy-egy új termékkel. A nanotechnológia újszerűsége miatt ennek fokozott jelentősége van.

A termék megismerésének legtömegesebb módja az, ha azt forgalomba hozzuk.

Az ismeretszerzésben természetesen kiemelkedően fontos szerephez jut a világháló. Itt igen lényeges, hogy az elektronikus kereskedelem által használt katalógusokra, áruismertetőkre is gondoljunk. Az információ közzététele során lényeges szerepet játszik a nyelv [Stadler, 2005].

A technika állásához mindazok az ismeretek beletartoznak, amelyeket szóban vagy írásban, vagy forgalomba hozatal által a világ bármely nyelvén nyilvánosságra kerültek. (Megjegyezzük, hogy a szakirodalom többféle „technika állása” fogalmat ismer.)

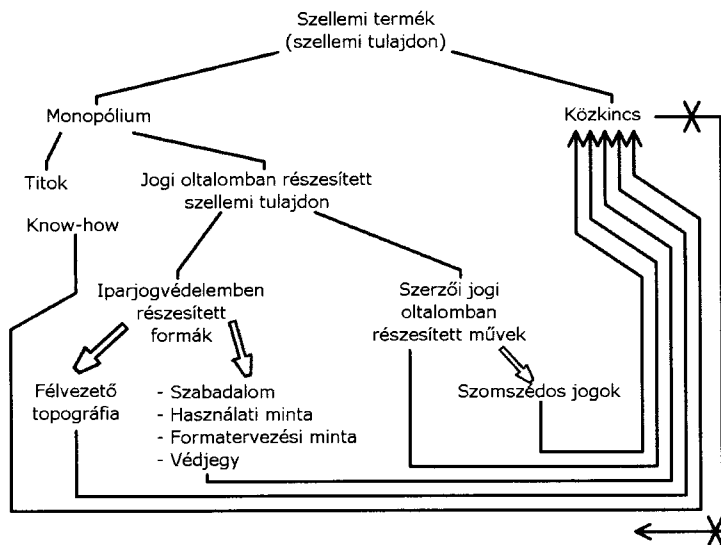
Ez az információ mennyiség átláthatatlan tömegű, esély sincs arra, hogy egy átlagos szakember ezt áttanulmányozza. Ezért lényeges megfelelően behatárolni a szakterületet, és elsősorban a nagy világnyelveken végezni a kutatást, amelynek eredménye alapján meghatározhatjuk a technika állását. A technika állásának meghaladása jelenti az új műszaki megoldást, erre az új műszaki megoldásra kaphatunk oltalmat, többek között iparvédelmi módszerekkel is.

A szellemi termék az emberi tudat egyik legérdekesebb alkotása, igen sokféleképpen jelenik meg. Az ember a képződő szellemi termékeinek egy részét tiktokban tarthatja. Ennek formája lehet az, hogy memóriájában tárolja, vagy külső információtároló módszereket vesz igénybe. Mindkét megoldásnak régóta ismerjük előnyeit és hátrányait is.

A képződő szellemi termékek egy része ismeretként vagy tárgyként is megjelenhet. Ha tárgyként (is) megjelenik, akkor azt tudni kell létrehozni. Ennek gyűjtőnévére az angolul „know-how”-nak nevezett fogalomra mindezidáig nem sikerült megfelelő magyar kifejezést találni. A fogalomról annyit lényeges megjegyezni, hogy azt jelenti, hogy tudjuk, hogy hogyan kell valamit tenni, megvalósítani, előállítani. A keletkezett szellemi termékek egy része már a korábbi történelmi időszakokban közkinccsé vált. Ezalatt azt értjük, hogy ezek az információk bárki számára

elérhetőek. Ide tartoznak többek között a betűk, kották, ételreceptek, italreceptek, és sok olyan hétköznapi dolog, amelyet mindannyian használunk. Lényeges megjegyezni, hogy közkincsnek csak maga az ismeret nevezhető, ha ez például egy tárgy formájában is megjelenik, akkor az már tulajdonnak minősülhet, így például a betűk maguk közkinccsek, de nem minden esetben közkincs egy betűtípus, vagy egy betűkkel teleírt könyv. Ugyanez vonatkozik zeneművekre is, tehát a kottairás maga közkincs, de nem közkincs egy zenemű kinyomtatott kottája. A közkincs egyik oldalról folyamatosan bővül, másik oldalról kikerülnek belőle olyan elemek, amelyeket egyre ritkábban használunk. Ezt egyszerűen úgy szemléltethetjük, hogy valamilyen közkincs volt a kovával való tűzgyújtás módszere, a szappanfőzés, és a szappannal való mosás. Bár ezek az ismeretek lényegüket tekintve ma is a közkincs része, használatuk azonban igen visszaszorult. A közkincs lényeges jellemzője az is, hogy erre általában senki nem szerezhet kizárólagos jogot, tehát például szabadalmat sem. Így tehát a kovakövel való tűzgyújtásra szintén nem lehet szabadalmat szerezni.

A szellemi tulajdon formáit a 8.1. ábrán foglaltuk össze.



8.1. ábra. A szellemi tulajdon formái

Lényeges hangsúlyozni, hogy az egyes formák között gyakran és/vagy kapcsolat állhat fenn.

Jelen ismertetésünkben szellemi terméket a szellemi tulajdon szemszögéből ismerjük. Ennek megfelelően kétféle csoportját különböztetjük meg, ezeket monopóliumnak és közkincsnek nevezzük.

Monopóliumnak azt a szellemi tulajdonformát nevezzük, amelyre valamely természetes vagy jogi személynek joga vagy jogosultsága van [Idris, 2003].

Ennek első formája a *titok*. Valószínű, hogy a titok egyidős az emberiséggel, és ez is egyik fontos jellemzője, nevezetesen, hogy időben nem korlátozott ideig áll fenn. A titkok közé iparjogvédelmi szempontból eljárások, módszerek leírását, recepteket sorolunk. Ilyen receptek vonatkozhatnak ételek, italok elkészítésére, de titok tárgya lehet a fénylő ólomkristály előállítás, amelyet ezüstvegyületekkel érnek el, de ide soroljuk a Zsolnay-gyár eozin mázas színezési technikáját is. Titokként élt meg több évszázadot az Unicum receptje, de a különféle kólák receptúrája is elmúlt száz éves. A titkot nagyon gyakran nem csak egy személy birtokolja, az gyakran családok tulajdonában van, vagy egy-egy prosperáló vállalat alapját jelenti. A titok általában jelentős kereskedelmi értéket képvisel, egyfajta misztikum lengi körül az ilyen termékeket. Igaz, hogy a titok időben nem korlátozott védelmet jelent az információ eltulajdonítása ellen, a történelmi példák azonban azt mutatják, hogy hosszabb távon ez a megoldás sem eredményes, emlékezzünk rá, hogy az ókori Kínában halálbüntetés járt a selyem vagy a porcelán titkának továbbadásáért, mégis mindkettőt kicsempészték Európába.

Teljesen általános értelmű a monopóliummal védett szellemi alkotások között a „*know-how*”. Ezalatt mindazokat az ismereteket értjük, amelyek általában valaminek a létrehozására szolgálnak. További jellemzőjük, hogy nagyon gyakran nem írhatóak le egzakt módszerekkel, jelentős szerepet kap az ilyen ismeretek átadásában a tapasztalat és a létrehozás folyamatának megtapasztalása. Egyes vélemények szerint a technikai fejlődés további periódusában ez lesz a legáltalánosabb szellemi tulajdonvédelmi forma. A know-how jellegét tekintve nem kötődik az írásbeliséghez, azonban mégis fontos, hogy amennyire csak lehet, azt írásba foglaljuk. Jelentős gazdasági érdekek fűződnek ugyanis ahhoz, hogy a know-how ismerettartalma ne menjen át illetéktelen kezekbe, vagy ne enyésszen el („sírba szállt vele”)[Gazda, 1993].

A szellemi termékek tárgyak szempontjából igen fontos részét azok a formák jelentik, amelyek jogi oltalom alatt állnak. Ezen az ismereteknek két nagyobb és két kisebb csoportját különböztetjük meg.

A jogi oltalomban részesített formák közül az *iparjogvédelemben* részesített szellemi „patensek”, alkotások jelentik a legkifinomultabb és leghatékonyabb formát. Az oltalom fejlődése során ezek kialakulása már a Velencei Köztársaság idejében elkezdődött. Ezek szabadalmak voltak, amelyek oltalma önmagában is igen sokat fejlődött. Ugyancsak jelentős, hogy egyre újabb oltalmi formák jöttek létre, és ez a folyamat ma is tart (hangos védjegy, ízék és illatok oltalma). Az egyes oltalmi formákról külön és részletesen is szólnunk.

A *szerzői jogi oltalomban* részesített művek kezdetben irodalmi és zenei alkotásokat jelentettek. A korszerű szerző jogi oltalom természetesen már kiterjed ké-

pek, épületek, üzemelrendezés, fényképek és videóanyagok oltalmára is. A fent említett két nagy tulajdonforma mellett megemlítünk még két kisebb oltalmi formát is. A *félvezető topográfia* oltalma a legalább egy aktív elemet tartalmazó félvezető eszköz (diszkrét és integrált eszköz) rajzolatának (lay-out) oltalmára szolgál. Mint tudjuk, az iparjogvédelem általában nem teszi lehetővé rajzolatok külön oltalmát, itt azonban félvezető eszközök esetében megteremtődik az oltalom lehetősége. Lényeges hangsúlyozni, hogy csak a félvezető chip rajzolata áll oltalom alatt, nem oltalmazható például a nyomtatott huzalozású lapok rajzolata. Oltalmazható tehát az áramkörű funkciót megvalósító chip rajzolata, de az ezeket összekötő nyomtatott huzalozású áramkör rajzolata nem állhat oltalom alatt. Önmagában a nyomtatott huzalozású áramköri rajzolatnak és a félvezető chippek előállítására szolgáló technológiának természetesen van oltalmi lehetősége. Ilyen oltalmi formát elsősorban a nanoelektronika terén alkalmazhatunk.

A *szomszédos jogok* intézménye a szerzői jogi oltalomhoz csatlakozik. A szomszédos jogok alanya az a természetes vagy jogi személy, amely a művek létrehozását, megvalósítását, előadását segíti. A 8.1. ábrán feltüntettük, hogy lényegében valamennyi szellemi tulajdonforma tartalma előbb-utóbb közkinccsé válik. Ez alól talán a fenti megszorításokkal a titok jelenthet kivételt, ezért ezt nem köti össze közvetlen vonal a közkinccsel.

Kétszer is áthúztuk azt a pályát, amely a közkinccsből a monopólium felé vezet. Ezzel ismételten azt kívánjuk hangsúlyozni, hogy az egyszer már közkinccsé vált szellemi tulajdonra általában senki sem szerezhethet monopóliumot. Ez a szemlélet hasonlít arra az esetre, amikor valaki telkének egy részét átengedi például út céljára a köznek, azt később nem kaphatja vissza. Iparjogvédelmi oltalom esetében bizonyos, jogilag igen szigorúan szabályozott körülmények között – elsődlegesen az, aki szellemi tulajdonát a közkinccsnek egyszer már átengedte, vagy az átkerült – ismét monopóliumot szerezhethet. (Szabadalmi oltalom újra érvénybe helyezése.)

A probléma felismerésétől a termékig tartó folyamatban a problémafelismerést követi először a probléma elvi megoldása, majd az így definiált feladat megoldására a gyakorlatban is alkalmazható eljárásokat kell találni. Az elvi problémafelvetés és a gyakorlati megoldás során folyamatosan hozhatunk döntést a szükséges iparjogvédelmi vagy egyéb szellemi tulajdonvédelmi megoldásokról. Eközben folyamatosan tekintettel kell lennünk a marketing szempontokra. A probléma gyakorlati megoldása után sort kerítünk a prototípus kivitelezésére. A termék jellegét tekintve ez lehet egy kis sorozatú gyártás is. Ezek tapasztalatainak ismeretében kerülhet sor a termék nagyobb sorozatú gyártására, a hasznosításra és az értékesítésre.

E lépésekben folyamatosan tekintettel kell lenni a költségek alakulására. A nemzetközi gyakorlatban elterjedt a költségarányok 1:10:100 szabálya. Ez a gyakorlati tapasztalatokon alapuló arány arra vonatkozik, hogy egy termék alapját jelentő alapkutatás költségét egységnyiinek tekintve a szükséges alkalmazott kutatás

költségigénye 10 egységre tehető. További 100 egységnyi költséget igényel a termék piacra vitele, amiben jelentős arányt képvisel a marketing költséghányad, de ide tartozik például az engedélyezés és a csomagolás is.

A fent vázolt feladat valamennyi fázisában szükséges megvizsgálni a szellemi tulajdonvédelem eszköztárát, és azt az összes körülmény figyelembe vételével alkalmazni. A termék életciklusa során tehát folyamatosan figyelni kell a szellemi tulajdonvédelem helyzetét, úgy is mint a terméket terhelő egyik költségelemet. Ezt annál inkább folyamatosan figyelemmel kell kísérni, mert az iparjogvédelmi oltalmi formák éves díjtételei az idő előrehaladtával általában növekednek. Ennek a joggyakorlatnak az az oka, hogy a jogalkotó egyrészt arra ösztönzi az innovációra képes állampolgárokat, hogy folyamatosan új, további iparjogvédelmi oltalomban részesíthető alkotásokat hozzanak létre, másrészt ha a szellemi tulajdon monopóliumát a feltaláló nem használja ki, akkor az adott műszaki megoldás mihamarabb menjen át a közkincsbe.

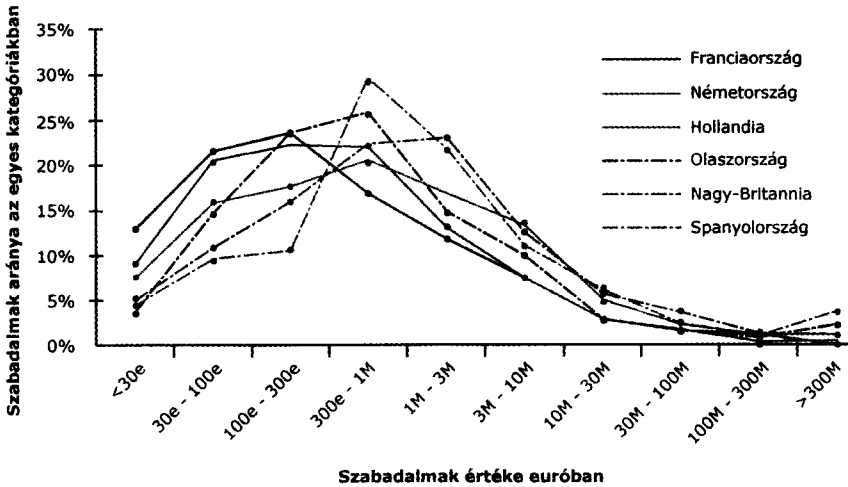
8.2. Szabadalmak

Egy 2005-ös amerikai felmérés szerint 3818 szabadalmat adtak ki, és további 1777 várt elbírálásra. A szabadalmak többsége nanoanyagokra vonatkozott, és várhatóan átfedéseket is tartalmaz. Külön megvizsgáltak 1084 szabadalmat, ezek 19485 igénypontot tartalmaztak, amelyek öt nanoanyagra: dendrimerekre, kvantum-pöttyökre, szén-nanocsövekre, fullerénekre és nanovezetékekre vonatkoztak. Az egyes igénypontok analízise azt mutatatta, hogy a szén nanocsövek nemcsak a nanoelektronikában, hanem az energiatárolásban, az egészségügyben és a kozmetikai iparban is széleskörű hasznosításra számítanak.

A szabadalmaknál természetesen felmerül azok értékelése. Az európai szabadalmak értékelését a 8.2. ábra mutatja.

A szabadalmaztatási trendek vizsgálata azt mutatja, hogy a mezőnyt az USA és a távol-keleti cégek vezetik. Európa elmaradásban van. A Nano Scientist Unit kimutatása szerint, 2004-ben az európai nanotechnológiai kutatási ráfordítások 2,4 milliárd, az USA-é 3,6 milliárd és Japáné 2,8 milliárd USD volt. Ezeknek a számoknak az összevetése azt mutatja, hogy Európában kevésbé jelennek meg az ismeretek szabadalomként, így feltehetően kevesebb lesz az ipari hasznosulás is.

A nanoenergetika terén a szabadalmaztatási kedv igen megnőtt, 2000-hez képest 2003-ra a beadott bejelentések száma megháromszorozódott. Ide tartoznak a termoelektronikus, a napenergia források, az elemek, az üzemanyag cellák is. Az elemzőnyt mutatja a 8.1. táblázat.



8.2. ábra. Az európai szabadalmak értékeinek eloszlása Európában¹

8.1. táblázat.
A 10 legnagyobb, a nanotechnológia energetika
területén működő cég szabadalmi

Sony Group	57
Samsung Electronics Co.	28
California Institute of Technology	23
Toyota	21
Hewlett-Packard	14
Honda	12
Chinese Academy of Sciences	12
NEC Group	11
Canon	11

A nanoelektronika terén azoknak az országoknak a sorát, ahol 2000 és 2005 között volt nanoelektronikai bejelentés, amerikai cégek vezetik. Az első 30 bejelentő birtokolja a szabadalmak 50%-át, és ezeknek a szabadalmaknak csak 8%-a származott Európából. A szabadalmaztatás súlypontja ma még diszkrét eszközökre esik,

¹ Forrás: Patent Information News 1/2006 pp. 1.

jól látható azonban, hogy egyre nagyobb figyelem fordul a nanostruktúrák és rendszerek molekuláris motorok és nanofluidika felé.

Az egészségügy és a kozmetikumok terén az USA szintén listavezető, őt követi Kína és Japán. Az európai országok – egykor híres kozmetikai iparuk ellenére – ebben a versenyben elmaradtak². A szabadalmak megoszlását a 8.2. táblázattal szemléltetjük.

A nanotechnológiai szabadalmak jelentős része különféle litográfias megoldásokra vonatkozik. A terület érdekessége, hogy az e területeken végzett fejlesztéseket Japánban egy konzorcium fogja össze, míg az európai fejlesztésekben önálló cégek vesznek részt³.

8.2. táblázat.
A nanokozmetikumok terén működő cégek szabadalmainak száma 2005-ben

L'Oréal	15
Elan Corp.	12
Japan Sciences and Technology Corp.	10
Boston Scientific	9
Chinese Academy of Sciences	9
Council of Scientific and Industrial Research of India	7
Nanosystem	7
U.S. Government	7

Egy másik megközelítésben a nanotechnológia piacát a megjelent tudományos publikációk és a bejelentett szabadalmak alapján együttesen becsülik meg. Ez a megközelítés azonban összemosza a nanotechnológiát és a nanotudományt.

8.3. Védjegyek

Mint ismeretes védjegyek oltalmat egyaránt lehet szerezni termékekre, szolgáltatásokra, és intézményekre. Feltehetően valamennyi területen meg fog jelenni a nano- előtag, utalva a termék újszerűségére is.

² www.marksc clerk.com

³ SI2004/6/34

8.4. Know-how

Mint a fentiekben utaltunk rá, a know-how igen nagy jelentőségű a nanotechnológia területén. Ez egyrészt testet ölt a terület újszerűségében és sokszínűségében is. Az ismeret átadásnak ez a formája azért is jelentős, mert a terület kiforratlan. Az egyes know-how birtokosok licenciát, vagyis használati engedélyt adhatnak ismereteik hasznosításában. Ezt nevezzük licenciának vagyis használati engedélynek. A védjegy licenciát kivéve a licencia tartalmilag engedélyezhet gyártást, forgalombahozatalt mind belföldön, mind külföldön. A licencia lehet kizárólagos és nem kizárólagos. A nanotechnológia területén igen fontos szerep jut a biológia terén létrehozott ismereteknek, azaz a bio-nanotechnológiának. Sok esetben ezek az ismeretek különféle spin-off cégek alapításával kerülnek át az akadémia világából a gyakorlatba.

A know-how különböző formákban kerülhet át egyik tulajdonostól a másikhoz. Ennek formája lehet a különböző bemutatók, gyár- és laboratóriumlátogatások. A szakirodalom ezt a módszert „show-how”-nak nevezi [Gazda, 1993].

8.5. Összefoglalás

A nanotechnológia jellegével összefüggésben szabadalmi tevékenység erőteljes fel-futása várható. Szabadalmak megjelennek mint olyan eszközök, amelyek mérik egy-egy ország vagy szakterület fejlettségét. Ez az analízis kiterjedhet a fejlődés ütemének jellemzésére is.

8.6. Irodalomjegyzék a 8. fejezethez

- | | |
|-----------------|---|
| [Gazda, 1993] | Gazda I.: A technológiatranszfer. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, 1993. |
| [Idris, 2003] | Idris, K.: Intellectual property-a power tool for economic growth. WIPO Publication No CD 888, ISBN 92 805 1164-8 |
| [Stadler, 2005] | Stadler J.: A nyelvhasználati szabályok a közösségi és az európai iparjogvédelmi oltalmi rendszerekben. In: Fehér könyv a szellemi tulajdon védelméről. Szerk.: Szabó Á. és mtsai. Magyar Szabadalmi Hivatal, 2005. |

9. Nanotechnológia és szabványosítás

A szabványosítás azóta vált a jog intézményévé, amióta szervezett – ma már nemzetközi – szabványosítási tevékenység folyik. Természetesen szabványosító tevékenységet a különböző fejlettségű társadalmakban ezt megelőzően is végeztek. A szabványosítás lényegét az egyes műszaki megoldási módok egységesítésében látjuk, a szabványosítási tevékenység az emberi gazdaság történetében időben rendkívül messzire nyúlik vissza [Szelényi, 1971].

9.1. A szabványokról általában

Az ipari termelés gazdaságossá tétele, termelékenység fokozása és az egyes termékek, részegységek minél szélesebb körben felhasználhatósága érdekében szükségessé vált a termékekre vonatkozó egységes műszaki követelmények megszabása. Később az egyes termékjellemzők mérése, minőségük megítélése további módszertani szabványok kidolgozását is szükségessé tette. A szabványosítási tevékenység folyamatosan kiterjedt a mezőgazdasági termékekre, és az egyes szolgáltatásokra is. Valamennyi szabványosítási tevékenység alapját képezi a fogalmak, szakkifejezések egységesítése. A szabványosítási törekvések a XVIII. sz. második felében kezdődtek meg. Ekkor indult meg a nagyipari termelés, amely kikövetelte, hogy cserélhető részegységeket állítsanak elő. Ugyancsak ekkor merült fel a bonyolultabb gépi berendezések alkotása során, hogy egymáshoz kapcsolódó termékek sokaságát egységes rendszerré hangolják össze. Angliában a XVIII és a XIX. sz. fordulóján Boulton és Watt Gépgyárban (Soho, Birmingham mellett) gyári szabványokat dolgoztak ki. Henry Madolay (1771–1831) gépelemek rendszeres választékát hozta létre és munkásai számára szabvány szerinti síkidomszereket készített. Sir Joseph Whitworth (1803–1887), aki a fegyver- és gépgyártást tökéletesítette, 1841-ben róla elnevezett, ma is használatos csavarmenetet rendszeresítette.

A gépek és részegységek nemzetközi kereskedelme szükségessé tette, hogy a különböző államokban kiadott szabványokat összehangolják. A szabványosítási tevékenység mellett természetesen fontos szerepe volt a mértékegységek nemzetkö-

zi egységesítésének is. Ebben döntő lépést jelentett, hogy a francia nemzetgyűlés 1793-ban elfogadta a métert mint hosszúságegységet.

A nemzetközi együttműködés fejlődése már 1906-ban elvezetett oda, hogy létrejött az elektrotechnika területén a szabványosítás első nemzetközi intézménye International Electrotechnical Commission (rövidítve: IEC). A szervezetnek máig a svájci Genf ad helyet. Tovább lépést jelentett e területen, hogy 1926-ban megalapították az egyes államok szabványosító szervezeteinek nemzetközi szövetségét. Ezt a második világháború után átszervezték, és ma ennek a szervezetnek a jogutódát International Organisation for Standardisation (rövidítése: ISO). Ennek a szervezetnek szintén Genf a székhelye. Ez a szervezet ad ki többek között a minőségügyre vonatkozó szabványokat is. Az egyes szabványok szabványsorozatban rendeződnek, így például a minőségügyet az ISO9000-es szabványsorozat határozza meg. A környezetvédelmi minőségügyi szabványokat az ISO14000-es sorozatban találhatjuk meg [Mojzes, 1994].

9.2. Nanotechnológia és szabványosítás

A nanotechnológiával kapcsolatos szabványosítási tevékenység, 2004-ben indult meg az USA-ban. A munka során öt nagy kérdéskör alakult ki, ezek¹:

- időzítés és sorrend,
- termék vagy folyamatszabványosítás,
- nemzetközi egyeztetés,
- az egyes műveletekre vonatkozó szabványok integrálása,
- átláthatóság és széleskörű részvétel a szabványosítási munkában.

Először a nanotechnológiával kapcsolatos szakkifejezéseket kezdték el szabványosítani. Ez segítette, hogy az akadémiai világ a magángazdaság, és a kormányzat közös kifejezéseket használjon. Itt elsősorban az akadémiai szektor részvétele volt fontos, hiszen ők korábban kevésbé vettek részt a szabványosítási tevékenységben. Ez a tevékenység azért is fontos volt, hogy harmonizálják a majdan megalkotandó további nanotechnológiai szabványokat a meglévőekkel. Egy olyan adatbázist állítottak fel, amely interneten elérhető².

A SEMI (SEMI – Semiconductor Equipment and Materials Institute) félvezető eszközök terén folytatott szabványosítási tevékenységét kiterjesztette MEMS-ek területére is. A 2006 februárjában elfogadott 14 új szabvány széles körű nemzetközi együttműködéssel készült.

¹ <http://www.nanowerk.com/newa/newsid=1658.php>

² Nanotech Law & Policy Report October 2004 Vol.1, Number1.

Az ipar és az akadémia együttműködésében olyan új szimulációs szabványt fejlesztettek ki, amely alkalmas a 65 nm-es és annál kisebb CMOS-tranzisztorok szimulációjára. A CMC (CMC – Compact Modell Censils), amely 31 félvezető gyártó és szoftverszállítót tömörít, elfogadta ezt a módszert. Ez a megállapodás sokat segít abban, hogy bizonyos műveleteket a gyártók kihelyezhessenek, csökkentve ezzel a költségeiket. A PSP modell lényegesen kevesebb paramétert igényel, és mégis pontosabb, mint versenytársai. Kezeli a különféle kvantummechanikai jelenségeket is, amelyek egyre fontosabbak lesznek a CMOS-eszközökben a nanoelektronika tartományában. Könnyen integrálható az EDA (EDA – Electronics Design Automation), és támogatja a SiMKit rendszer is³.

Az IEEE (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineering) dolgozta ki az első szén nanocsövek elektromos tulajdonságainak mérésére vonatkozó szabványt, ez a IEEE 1650™ -2005 jelű dokumentum⁴. Ebben leírják a szén nanocső vezetőképességének, Hall-állandójának mérését, vagyis mind a vezető, mind a félvezető tulajdonságú szén nanocső minősíthető e szabvány szerint.

9.3. Összefoglalás

A nanotechnológia épp sokszínűsége miatt nagyon nagy kihívást jelent az e területen szabványosítást végző szervezeteknek és szakembereknek. Élenjáró volt a miatt, a szabványosítási tevékenység azonban megkerülhetetlen [Roco, 2002].

9.4. Irodalomjegyzék a 9. fejezethez

- | | |
|------------------|--|
| [Mojzes, 1994] | Mojzes I.: Minőségügyi szabványok, IX. Elektronikus Műszer és Méréstechnikai Konferencia és Kiállítás a Minőségbiztosítás és a Mérésügy Jegyében c. konferencia kiadványa, 23–30.o. 1994. |
| [Roco, 2002] | M.C.Rocco: National Nanotechnology Initiative and a Global Perspective, Small Wonders, Exploring the Vast Potential of Nanoscience. National Science Foundation Symposium Washington, DC March 19, 2002. |
| [Szelényi, 1971] | Szelényi Z.: Szabványosítás a magyar jogrendszerben. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1971. |

³ <http://pspmodel.ee.psu.edu/downloads/PSPsummary.pdf>

⁴ http://standards.ieee.org/announcements/bkgnd_nanostdsinit.html

... három olyan elem,
amelyeken kívül nem érthető
meg konkrét valóságában az
emberi állapot: a kockázat, a
balsiker veszélye és a siker
reménye.

Lucien Goldmann (1913–1970)

10. Társadalmi hatások, kockázatok

A technológiák alkalmazása előtt igen gondosan meg kell vizsgálni azok társadalmi hatásait. A technológia műszaki jellemzői önmagában nem határozzák meg annak várható üzleti sikereit, igen lényeges, hogy azt a társadalom be is fogadja azt [Mojzes, 2004].

10.1. Bevezetés

Egy új technológia megalkotása során igen lényeges és gyakran a technológia megalkotásával összemérhető ráfordítást igénylő feladat, a technológia társadalmi hatásainak felmérése. A társadalmi hatások alatt értjük nemcsak a társadalom egyes tagjaira gyakorolt közvetlen hatást, hanem a társadalmi folyamatokra gyakorolt hatást is. Ez alól természetesen a nanotechnológia sem lehet kivétel. Az alábbiakban – a teljesség igénye nélkül – felsorolunk néhány olyan területet, ahol a nanotechnológia a belátható jövőben jelentős szerephez juthat:

- a korábbinál jobb hatékonyságú integrált áramkörök előállítása szén nanocsövekből,
- nanostrukturájú katalitikus anyagok előállítása, vegyi folyamatok nagyobb hatékonyságú irányítására, beleértve az autók kipufogógázainak tisztítását,
- könnyebb és nagyobb szilárdságú anyagok nagytömegű előállítása nagyobb hatékonyságú és fokozottabb biztonságú járművek előállítására,
- olyan gyógyszerek előállítása, amelyek programozott lebontásúak, amelyeknek célja a rákos sejtek elpusztítása és egyéb célzott hatások elérése,

- költséghatékony és megbízható szűrők előállítására a víz és a levegő tisztítására, beleértve a tengervíz sótalanítását is,
- a napenergia hatékony előállítása,
- tüzelőanyagcellák előállítása, elsősorban járművekben alkalmazható kivitelben,
- kompozit anyagok előállítása, speciális felhasználása, ahol a polimereket nano-részecskékkel erősítjük meg,
- tervezett lebontású tápanyagok és rovarölő szerek,
- új meghajtóegységek – elsősorban űrbeli – alkalmazása,
- nanoméretű érzékelők előállítása,
- nanobevonatok öntapadó, hőelnyelő, hővisszaverő tulajdonságokkal.

A fenti rövid felsorolásból is látható, hogy igen szerteágazó területről beszélhetünk.

Itt is igazolódik az a feltétel, hogy ellentétben a mikroelektronikával, ahol néhány típus-áramkört alkalmaztunk az élet nagyon sok területén, a nanotechnológia alkalmazása szintén sok területre terjed ki, de nem beszélhetünk elemi építőkövekről.

E szerteágazó terület igen sokrétű feladatokat definiált a társadalom különböző területei számára. Ez tehát azt jelenti, hogy a sokféle anyag és folyamat sokféle esetenként egymástól erősen eltérő kockázati tényezőt jelenthet. Nézzünk ezek közül néhányat:

- a nanotechnológia elvét az oktatás minden szintjére be kell vezetni,
- a nanotechnológiában tevékenykedők oktatásának ki kell terjednie az etikai aspektusokra is, megteremtve az alapot arra, hogy a technológiából a lehető legtöbb társadalmi előnyt megkaphassuk,
- a társadalomtudományok és a közgazdaságtudomány területén tevékenykedőknek is rendelkezniük kell alapismeretekkel a nanotechnológia területéről,
- lényeges a magán és az üzleti szféra összefogása segítő, a nanotechnológia eredményeinek alkalmazását.

A szemcsenagyság nemcsak a kémiai tulajdonságokat határozza meg, hanem például a színt is. Így az arany színe a szemcsenagyság függvényében vörös, kék vagy aranyszínű. Egyes szakemberek bizonyítottak vélik, hogy ez az ismeret – természetesen tapasztalati úton – már igen régen ismert, kerámiák festésére a X. századtól, a katedrálisok üvegablakainak színezésére a XII. század óta használják.

10.2. A nanotechnológia kockázatai

A nanotechnológia kockázatainak elemzésénél abból kell kiindulni, hogy ez a nanotechnológia az anyagok és részfolyamatok sokkal nagyobb halmazát kezeli,

mint például a mikroelektronikai technológia. Ezek közül néhányat példaként meg is neveznénk.

- A nanotechnológia által előállított termékek üzleti kockázatai.
- A szellemi tulajdonvédelem kockázatai, amelyek szintén az anyagokkal és technológiákkal függnek össze.
- Politikai kockázat, amely elsősorban abból ered, hogy az egyes országok és régiók szerepe átértékelődik.
- A miniatűr szenzorok megjelenése, mely veszélyt jelenthet a magánéletre és kockázatot bizonyos információk nyilvánosságra kerülésével.
- A nanorészecskék bekerülése a környezetbe eddig nem látott vegyi és biológiai kockázatot jelent.
- A nanorészecskék hatása az őket előállító és felhasználó személyekre.
- Az emberi tulajdonságok javításának kockázata.
- A nanogépek önreprodukciójának korlátozása.

A nanotechnológia kifejezés túl általános ahhoz, hogy részleteiben is leírja az egyes kockázati tényezőket, ezért egészen széles körből kell megválogatni azokat a folyamatokat, amelyek összességükben meghatározzák a nanotechnológia kockázatát.

További, a kockázatot befolyásoló tényező, hogy kezdetben a nanorészecskék feltehetően nem kerülnek közvetlen kapcsolatba a fogyasztókkal, mivel azok egy terméknek csak egy bizonyos részében lesznek jelen. Ez a jelenlét kezdetben beágyazott anyagként jelenik meg, és csak valamilyen váratlan esemény, például baleset hatására juthat ki a környezetbe.

A jelenleg ismert nanotechnológiai folyamatok sokban hasonlítanak a kémiai technológiai folyamatokra, így a kockázatelemzés során is ennek megfelelően kezelhetők.

10.3. A nanotechnológia pozitív hatása az emberre és környezetére

A kockázati tényező korrekt meghatározása céljából lényeges megemlíteni a nanotechnológia pozitív hozadékát is, ugyanis elősegíti például a tiszta ivóvízellátást, a hatékonyabb energiakonverziót és az energiatárolás megvalósítását. Az átlátható és az átlagember számára érthető előnyök és kockázatok analízise hozzásegíthet ahhoz, hogy a társadalom elfogadja ezt az új technológiát. Lényeges hangsúlyozni, hogy a kockázatot képesek vagyunk ellenőrzésünk alatt tartani.

A nanotechnológia előnyös oldalainak bemutatására különösen az egészségügyi alkalmazások látszanak előnyösnek. Ezek közül néhány példa:

- Már eddigi ismereteink is megalapozzák, hogy a nanotechnológia módszerei jól használhatóak gyógyszerek célba juttatására. Az objektumok mérete miatt több olyan membránon is áthaladnak a nanorészecskék, amelyek a nagyobb részecskék számára akadályt jelentettek. Az adagolás is sokkal pontosabbá, időben egyenletesebbé tehető.
- Az egychipes laboratóriumok olcsó, eldobható eszközökké válhatnak, segítségükkel javul a betegek, különösen a krónikus betegek kezelése.
- Új jelenségek felhasználásával több betegség gyógyítási folyamata javítható, például vas tartalmú részecskék váltakozó mágneses térrel lokális hőkeltésre használhatók.
- Baktériumok egészen kis mennyiségű kimutatására is alkalmazható a nanotechnológia: például egyetlen darab *Echeveria Coli* baktérium is kimutatható egy adag beefsteakben.

10.4. A nanotechnológia társadalmi hatásai

Egy új technológia megalkotása során igen lényeges és gyakran a technológia megalkotásával összemérhető ráfordítást igénylő feladat, a technológia társadalmi hatásainak felmérése. A társadalmi hatások alatt értjük nemcsak a társadalom egyes tagjaira gyakorolt közvetlen hatást, hanem a társadalmi folyamatokra gyakorolt hatást is. Ez alól természetesen a nanotechnológia sem lehet kivétel. Mindenképpen célszerű lenne elkerülni azt, hogy a társadalom a nanotechnológia ellen hangolódjék.

A kapcsoló áramkörökről, a gépekről és a molekulákból álló bioérzékelőkről szóló nagy víziók: a top-down technológia zsákutcai. Emiatt nem kell kétségbe esni, a döntés kereszteződésében két lehetőség kínálkozik. Ezen utak egyike, hogy a legtöbb reményt arra a fizikai elvre fekteti, hogy kihasználják az önszerveződést. Másik út, ami sokak számára járhatatlannak és lehetetlennek tűnik, az a „mechano-szintézis” támogatóinak kis csoportja.

Mindez tulajdonképpen a látomásnak egy jó részét a félelemre vezeti vissza, mely gátolja, hogy a nanotechnológia ebbe az irányba fejlődjék. Eric Dexler megalapította, hogy ámokfutó csoportosulások, destruktív erők következtében egy szabad ellenőrizhetetlen pályára kerülnek az atomok vagy molekulák. Rövid időn belül egy fontos ponton revidálta nézeteit. Maradt azonban más probléma is, még mindig megoldatlanul, mindez ideig a nanotechnikai szkeptikusok nem egy alkalommal felmerült kérdése, hogy milyen hosszú távú társadalmi változtatások tudják a nanotechnológia győzedelmes vonatát célba juttatni.

Neal Stephenson 1995-ben a Gyémánt kora című könyvében az amerikai sci-fi közösség véleményét írta meg. A nanotechnológia valóban olyan elképzelhetetlen terméket produkált, mely különleges pontosságot eredményezett. Ez a technikai

forradalom azonban nemcsak egyszerűen termék, vagy előállítási folyamat. Ez egy modellje a csoportosult rendnek.

A hálózat mint az Internet szimbóluma áttörést jelentett a síkfelszínnek hierarchikus szerkezetében. Stephenson úgy gondolta, hogy az atomok és molekulák kontrollja egy XIX. századi új viktoriánus osztályközösség szerveződéséhez hasonlítható, mely a mechanisztikus világképet a liberális világképnek megfelelően átalakította.

10.5. Mesterségesen előállított nanorészecskék

A természetben előforduló nanorészecskéken – például az agyagon – kívül mesterségesen is előállíthatóak nanorészecskék. Ezek formájukat tekintve lehetnek porok, szuszpenziók vagy egy mátrix struktúrában szétszórt részecskék. Ezek a részecskék természetesen a létrejöttüket követően nagyobb részecskékké állhatnak össze.

Általánosan tekintve szinte tetszőleges anyagból állíthatunk elő nanorészecskéket. Gyakorlatban azonban csak néhány anyag kerül alkalmazásra, ezeket az 10.1. táblázat foglalja össze.

10.1. táblázat. A nanotechnikában alkalmazott anyagok

Anyagtípus	Alkalmazási példa
Fémoxidok	
Szilícium-dioxid (SiO_2)	Adalék polimerekhez
Titán-dioxid (TiO_2)	UV-A-védelem
Alumínium-dioxid (Al_2O_3)	Napelemek
Vas-oxid (Fe_3O_4 , Fe_3O_3)	Gyógyászat
Cirkónium-dioxid (ZrO_2)	Adalék karcálló bevonatokhoz
Fullerének	
C_{60}	Mechanikai és kenési alkalmazások
Szén-nanocsövek	
Egyfalú szén nanocsövek	Kompozitok, nanoelektronika
Többfalú szén nanocsövek	Hideg emitter, kijelzők
	Akkumulátorok, tüzelőanyag

Vegyület-félvezetők	
CdTe	Elektronika és optika
GaAs	Fotonika
Szerves nanoanyagok	
	Gyógyszerek
Fémek	
Au	Katalízis
Ag	Optoelektronika, fertőtlenítés
Ni	ebek kezelése

A nanorészecskék felhasználása szempontjából a kísérletek azt mutatják, hogy összetételük mellett meghatározó szerepet játszik a méretnagyság, a morfológia és egy adott felület lefedettsége.

10.6. A nanorészecskék egészségügyi kockázata

Az egyre növekvő mértékű nanotechnológiai termékelőállítás maga után vonja, hogy egyre több nanotermék jelenik meg a környezetünkben. A fentieknek megfelelően ezek beépített részecskéként jelennek meg, így közvetlenül az emberi testbe kerülésük kevésbé valószínű. Az ún. szabad nanorészecskék különböző módon, belélegzéssel, az emésztőcsatornán és a bőrön keresztül is bejuthatnak a szervezetbe. Általában kevés kísérleti anyag áll rendelkezésünkre. Összességében megállapítható, hogy a nanorészecskék ha mérgezőek, akkor mérgezőbbek, mint a nagyobb méretű részecskék. Itt elsősorban a tüdőn keresztül a szervezetbe kerülő részecskék jelentenek nagy kockázati tényezőt. A bőrön keresztüli felszívódásukkal kapcsolatban elsősorban a titán-dioxiddal kapcsolatban vannak kísérleti tapasztalatok. Ezek azt mutatják, hogy elsősorban más kockázati tényezők együttes jelenléte jelenthet veszélyt, így például az ekcéma vagy az erős napsütés.

A szén nanorészecskékkal kapcsolatban valamivel több a tapasztalat. Ismertek a kísérleti evidenciák is, például fullerénnel kapcsolatban. Ezek elsősorban azért fontosak, mivel ebből az anyagból már ma is több tonnányi mennyiséget állítanak elő évente.

Az egészségügyi kockázatok között meg kell említeni azt is, hogy életünk során folyamatosan körülvesznek bennünket a nanorészecskék. Így például egy közönséges szobai levegő cm^3 -ként 10–50 000 nanorészecskét tartalmazhat, az utcai levegő nanorészecske-tartalma elérheti a 100 ezer db/cm^3 értéket.

A nanorészecskék szempontjából további lényeges kockázatot jelent, hogy nagy felületük miatt reakcióképességük, így például robbanásveszélyességük is lényegesen megnőhet. Ezek a veszélyek elsősorban akkor fognak megnövekedni, ha termelésük jelentős nagyságú lesz.

A kockázati tényezők elemzésében fontos szerepet fognak játszani az egészségbiztosítók.

A nanotechnológiában növekvő szerepet fognak játszani az immunológiai aspektusok. Így pl. a C_{60} és az élő szervezet kölcsönhatásának vizsgálata [Erlanger, 2004].

10.7. Nanotechnológia kockázati tényezői általában

A nanotechnológiáról úgy beszélünk mint egy következő lehetséges ipari forradalom lehetséges hajtóerejéről, akkor okulva a korábbi rossz tapasztalatokból, idejekorán kell foglalkoznunk a kockázati tényezőkkel is. Ezeknek a kockázati tényezőknek a meghatározását, elvégezhetjük úgy is, ha figyelembe vesszük a nanotechnológiával összevethető biotechnológiai iparágakat, tekintetbe véve, hogy a nanotechnológia növekedése lényegesen meghaladja a biotechnológiáét. Összehasonlításként megemlítjük, hogy csak a nanotechnológiai szerszámipar növekedési üteme az USA-ban 30% felett lesz.

A nanotechnológia fejlődési üteme a következő években három szakaszra osztható:

- A jelen állapotban a nanotechnológiai termékek elsősorban az autóiparban, gyógyszeriparban és az űrkutatási termékekben találhatók.
- 2009 körül áttörés következhet be a nanotechnológiai innovációban. Az infokommunikációs és elektronikai alkalmazások dominálni fognak, ezek közül is megemlítjük a mikroprocesszorokat és a memóriaáramköröket.
- 2010-től a nanotechnológia általánossá válik a termékekben, domináns szerepet az egészségügyi és gyógyászati alkalmazásokban fog játszani, ahol a különböző nanotulajdonságú gyógyszerek és orvosi eszközök igazi diadalútjának leszünk tanúi.

A nanotechnológia kockázati tényezőit vizsgálva el kell különítenünk a nanotechnológiának mint folyamatnak kockázati tényezőit a nanotechnológiai elemeket tartalmazó termékek kockázati tényezőitől is. A nanotechnológiai kockázat kezelésakor igen nagy nehézséget jelent, hogy a nanotechnológia sokkal szerteágazóbb terület, mint volt például a mikroelektronika. Nanotechnológiai alkalmazások sok esetben szerves és szervetlen anyagrendszerek közös használatával jár, ami további kockázati tényezőket rejt magában. Az egészségügyi epidemiológiai vizsgálatok már korábban is kiterjedtek olyan finom és ultrafinom részecskék és az élő szervezet kölcsönhatására, amelyek elsősorban a légzőrendszeren keresztül juthatnak be

az emberi szervezetbe. Már a kezdeti nanotechnológiával kapcsolatos kutatások is megmutatták, hogy a nanotechnológiai termékek a legkülönbözőbb utakon juthatnak az emberi szervezetbe és károsíthatják a szöveteket. A nanotechnológiai elemek kis méreteik miatt nemcsak tulajdonságaikban különböznek az ugyanolyan összetételű többi anyagtól, hanem az emberi testre vonatkozó kölcsönhatásokban is. Ezért tehát lényeges leszögeznünk, hogy a tömbi anyagok kockázatelemzésével szerzett eredmények nem alkalmazhatóak a nanoméretű elemek kölcsönhatásának leírására. Ez az állítás a másik irányban is igaz.

A nanotechnológia elterjedésével számolni kell azzal is, hogy egyre növekszik azok köre, akik nanotechnológiai környezetben egyre hosszabb időt töltenek el. A nanotechnológiai termékek elterjedésével viszont egyre nő azoknak a száma, akik mind hosszabb életszakaszuk során lesznek felhasználói vagy alkalmazói a nanotermékeknek. A kockázatelemzésnek természetesen nemcsak műszaki, hanem társadalmi, beleértve az egészségbiztosítási aspektusait is meg kell vizsgálni. A nanotechnológia jelen állapotában támaszkodhatunk arra is, hogy az 1930-as évek-től vannak gyártási tapasztalataink például az ezüst nanorészecskékkel a fotóanyagok gyártása során.

A technológia fejlődését ilyen szempontból három szakaszra bonthatjuk:

1. az egyes részecskék méreteinek egyre pontosabb ellenőrzése,
2. a nanorészecskék jellemzőinek egyre pontosabb meghatározása,
3. új és egyre mélyebb ismeretek megszerzése arról, hogy a nanostruktúra és az egyes tulajdonságok hogyan függnek össze, illetve ezeket hogyan tudjuk befolyásolni.

A nanoanyagok tulajdonságai ugyanis azon alapszanak, hogy a nanoanyagok fajlagos térfogata sokkal nagyobb, mint egy ugyanolyan tömegű anyag fajlagos térfogata tömbi formában. Ez az anyagokat kémiai reakcióképesebbé teheti, egyes esetekben olyan anyagok, amelyek nem mutatnak vegyületi hajlandóságot tömbi méretekben, viszont reakcióképességet mutathatnak nanoméretekben.

Általában elmondhatjuk, hogy a nanoanyagok kockázata megítélésénél nem lehet kiindulni a makrorészecskékkel lefolytatott vizsgálatok eredményeiből, a nanorészecskéket más anyagnak kell tekinteni.

A nanotechnológia mérettartományában a szemcsékben már az is lényeges, hogy az őket alkotó atomok milyen arányban helyezkednek el a szemcse felszínén, és mely részük van „elzárva” a külvilágtól, azaz például egy felületi reakcióban nem vesz részt. Ezt az arányt az alábbiakban bemutatjuk, hogy milyen az atomok megoszlása a felület és a térfogat között a különféle méretű részecskék esetében:

30 nm-es	részecske esetében atomjainak	5%-a van a felületen
10 nm-es	részecske esetében atomjainak	20%-a van a felületen
3 nm-es	részecske esetében atomjainak	50%-a van a felületen

Második tényezőként lényeges megemlíteni, hogy az anyagok 50 nanométer mérettartománya alatt a klasszikus fizika által leírt tulajdonságoktól és jelenségektől jelentősen eltérő sajátosságot mutathatnak. Az 50 nanométeres mérettartomány alatt a kvantummechanika és a kvantumjelenségek egyre meghatározóbbá válnak. Ezáltal a mérettartomány csökkentésével a tulajdonságokban jelentős változások következnek be. A tulajdonságok definiálását és befolyásolását megnehezíti, hogy ezek a kis részecskék gyakran nagyobb részecskékké állnak össze, és ekkor már egészen más jellegzetességet mutathatnak.

10.8. Összefoglalás

Ebben a fejezetben röviden áttekintettük a nanotechnológia társadalmi hatásait és kockázatát. A kockázat két forrásból eredhet. Az egyik a nanotechnológia mint technológiai folyamat, a másik kockázati tényező a nanotermékek alkalmazásához köthető. Ma még kevés közvetlen tapasztalat áll rendelkezésünkre. Nem eldöntött dolog, hogy egyes anyagokat fogyasztási cikként, vagy gyógyászati készítményként kell-e kezelni.

10.9. Irodalomjegyzék a 10. fejezethez

- [Erlanger, 2004] Erlanger, B. F.: A Role for Immunology in Nanotechnology. In: Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications. Ed. by: B. Karn et al. ACS Symposium Series 890, 2004.
- [Mojzes, 2004] Infokommunikációs technikák és az ember. Mojzes Imre (szerk.), Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004.

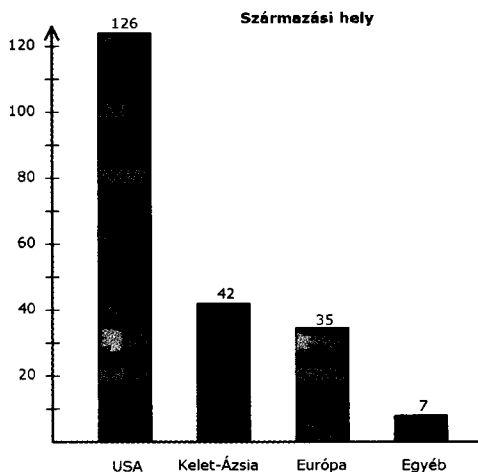
*A jövő közelebb van a
jelenhez, mint a múlt.
Søren Kierkegaard
(1813–1838)*

11. Kitekintés, merre tovább

11.1. Befektetések a nanotechnológiába

Egy becslés szerint 2015-ben az amerikai nanopiac egy tera (10^{12}) USD/év nagyságrendű lesz. Ez ma néhány milliárdos piac, ami azt is jelenti, hogy ilyen növekedést a félvezető ipar soha nem ért el. [Bishop, 2004]

Az egyes régiók között a termékek megoszlását szemlélteti a 11.1. ábra.



11.1. ábra. A nanotermekek megoszlása az USA, Kelet-Ázsia, Európa között.

11.2. A nanotechnológia és a nanoelektronika hosszútávú lehetőségei

Ezeket a lehetőségeket elsősorban a molekuláris nanotechnológia köré csoportosítják. A molekuláris nanotechnológia alapötlete az, hogy olyan robotokat hozunk létre, amelyek molekuláris szinten képesek létrehozni anyagokat úgy, hogy atomokat

vagy molekulákat csoportba rendeznek. Ez új anyagok létrehozásához vezethet, amely nem található meg a természetben, és nem hozható létre a kémia szokásos módszereivel. A modellezésnek, amely ezeknek az anyagoknak létrehozását és stabilitását segíti elő, szintén a molekuláris szinten kell mozognia.

Ezután következik a második nagy ötlet, amely abban foglalható össze, hogy ezek a molekuláris gépek elkezdik saját maguk kópiáját létrehozni, amely így képes lesz ismét a saját maga kópiáját létrehozni. Így ezek a kis gépek exponenciális növekedési ütemben szaporodnak. Elméletben a nagy, komplex struktúrákat ilyen atomi pontossággal megvalósított rendszerekből létrehozhatók. Elvben ezt még a gyémánt esetében is megtehetjük. Ha elfogadjuk hogy ilyen általános célú, programozható szerelőgépeket hozhatunk létre, akkor meg kell tudnunk mondanunk azt is, hogy mi az, amit létrehozhatunk majd. Így felépíteni például egy háromdimenziós gyémántstruktúrát viszonylag egyszerűnek tűnik. Létrehozni egy ételt, amely épp ellenkezőleg igen nagyszámú és különböző sejtekből áll, egy nagyon összetett rendszert, nagyon összetett gépet jelent. Maga Drexler soha nem tett ilyen javaslatot, de azok és a hozzájuk hasonlóak a médiában keletkeztek.

Ha feltételezzük, hogy ilyen molekuláris szintű szerelőgépek létrehozhatóak, és termelésük gazdaságilag kifizetődőbb, akkor nincs értelme azt állítanunk, hogy 10 vagy 20 éven belül ezek ne bírnának jelentős gazdasági haszonnal.

A nanotechnológia és a nanoelektronika hosszú távú lehetőségeinél becslésünk során nehézséget jelent, hogy nem sikerült elemi építőköveket definiálni. Voltak próbálkozások, hogy legyen ez egy elemi tükör, azonban ez bizonyult megfelelőnek. Így tehát inkább „kis dolgok törvényszerűségeiről beszélünk” [Walsh, 2005]. Az elemi cella hiánya a gyártástervezés szempontjából is nehézséget jelent, hiszen nem tudjuk olyan pontosan megtervezni a gyártmányokat, mint a CMOS technológiában tettük, helyettük inkább kisebb lépéscsoportokat tudunk definiálni.

A másik törvényszerűség, hogy minden felhasználáshoz ki kell dolgozni a megfelelő technológiát. Ezek magukba foglalhatnak alulról felfelé és felülről lefelé technológiai lépéseket. Több nagy gyár a MEMS-ek előállítására a gyártók eltérő technológiákat vezettek be, így tehát a technológia kiválasztása inkább az alkalmazás szempontjából történik, és a MEMS-ek és a nanoalapú gyárak nehezen fogják követni a félvezető rendelésre gyártó üzemek modelljét. Nincs tehát a mikro- és nanotechnológiában egy olyan gyártási modell, mint amit a félvezető iparban látunk, mind bipoláris, mind CMOS esetekben.

A harmadik törvényszerűség, hogy minden alkalmazáshoz a megfelelő folyamatot és a megfelelő tokozást kell választania. Ez tehát azt jelenti front-end és back-end gyártásban kevés a közös. Mégis az elemi cella hiánya nem engedheti meg, hogy ne keressen közös technológiai folyamatokat, ezek azonban elvezethetnek oda, hogy a MEMS-ek és NEMS-ek egészen különböző tokozási formában jelenjenek meg. A következő törvényszerűség, hogy minden alkalmazáshoz meg kell

találni a megfelelő folyamatot, a megfelelő tokozást és a megfelelő tesztelési módszert. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a félvezető technológiákhoz a szokásos modellhez meg kell találni a megfelelő alternatívát.

A mai analízis alapján úgy tűnik, hogy több mikro- és nanotechnológiai eljárás sokkal inkább követi a precíziós gépgyártási modellt, inkább, mint a félvezető technológiában megszokott modelleket. Mivel egy sor mikro- és nanotechnológiai a top-down gyártási módszereket használják és ASIC áramkörökhöz hasonló eszközöket állítanak elő, az ipar másik része a precíziós gépgyártási technológiát használja, így kompetencia szigeteket alakít ki, és megosztja a technológiai eszközöket.

A fenti általános törvényszerűségeken kívül az egyes országokban érdekes sajátosságokat figyelhetünk meg. Szinte mindenütt probléma, hogy az általában egyetemi kutatóhelyeken kifejlesztett eszközök 5–15 év alatt kerülnek át a termelésbe, és ennek a transzfernek a költsége 500 ezer és 5 millió USD között van. Ugyanakkor ma már ettől az iparágtól Németországban 700 ezer munkahely függ. Ők állítják elő a MEMS rendszerek 8,4%-át, jellemzően kis és közepes vállalkozások keretében. Az angol finanszírozási modell nagy hangsúlyt helyez a nano-biotechnológiára, erre fordítják a költségvetés 37%-át.

A Japán MEMS piac 2010-re várhatóan 10 milliárd dollárra fut fel, nagy hangsúlyt fognak kapni, az RF-MEMS technológiák, amelyeket a szórakoztató elektronikai termékekbe építenek be. A Kínai Népköztársaság 2020-ig tartó fejlesztési tervében a 20 kulcsfontosságú tervből egy a nanotechnológia.

A nanotechnológiailag történő befektetések figyelésére egy speciális indexet hoztak létre, amely 15, a tőzsdén levő és 8 fejlődésben levő cég adatait figyeli. A 15 cég a következő: Altair Nanotechnologies, ApNano, BASF, Biosante Pharmaceuticals, FEI Co., General Electric C., Headwaters, JMA Technologies, Lumera Corp., Nalco Holding Co., Plug Power, Spire Corp., Staratpharma Group és a Veeco Instruments. Érdekes, hogy ezek között nincs az a 10 legjelentősebbnek tartott amerikai biotechnológiai cég: Amgen, Genentech, Serono, Biogen Idec, UCB-Celltech, Genzyme, Gilead, MedImmune, Chiron és Millenium. Ez utóbbi biotechnikai cégeknél mintegy 200 termék van fejlesztés alatt, amelyeknek mintegy 10%-a már a fejlesztés, befejezés stádiumában van.

11.1. táblázat. Néhány adat a nanotudományi és nanotechnológiai befektetésekről
 Forrás: Európai Bizottság, 2004

Ország	Adatok
EU	A futó K+F jellegű projektek mintegy 1 milliárd eurót tesznek ki, amelynek kétharmadát a regionális és nemzeti programok teszik ki.
Japán	A források a 2001 évi 400 millió USD-ről 2003-ra 800 millió USD-re nőttek, további évi 20%-os növekedés várható.
USA	A 2003-ban elfogadott „A XXI. Századi Nanotechnológiai K+F Törvény” 2005 és 2008 között 3,7 milliárd USD forrást irányoz elő, amelyhez további haditechnikai források adódnak hozzá. (Ez 2003-ban 750 millió USD volt.)
UK	A 2003-ban elfogadott „Nanotechnológiai Stratégia” alapján 2003 és 2009 között évi 45 millió fontot fordít erre a célra.
Világ összes befektetés	A folyamatban lévő befektetések mintegy 5 milliárd eurót tesznek ki, amelyből mintegy 2 millió euró a magánbefektetés
Várható termelés	2011–2015 között 1000 milliárd USD (Forrás: NSF, USA, 2001)

11.3. Irodalomjegyzék a 11. fejezethez

[Bishop, 2004]

Bishop, J. (US NSF) személyes közlése 2004. 09. 22.

[Eloy, 2007]

Analysis: Top 30 MEMS Manufacturers. Yole Développement Co.
 2007

12. Nanotechnológiai értelmező szótár

Alacsony dimenziójú struktúrák [Low Dimension Structures]

Olyan, általában kvantummechanikai és kvatumelektronikai jelenséget mutató, leggyakrabban félvezető anyagú struktúrák, amelyek kvantumgödröt, kvantumszálat vagy -huzalt és kvantumpöttyöt tartalmaz.

Alulról felfelé építkezés [Bottom-up]

Olyan objektum előállítási módszer, ahol a nagyobb objektumokat kisebb objektumok sokaságából állítjuk elő. Előnye ennek az építkezési módnak az, hogy a kis építőelemeket összetartó kovalens kötés sokkal erősebb, mint a gyenge kölcsönhatás. Leginkább kémiai módszerekkel valósítják meg, ahol a struktúrákat molekulák összeépítéséből hozzák létre.

Assembler [összeszerelő]

Egy olyan általános eszköz, amely képes arra, hogy molekulák összeszerelését irányított kémiai reakcióval végezze. Ez az eszköz úgy programozható, hogy egyszerű molekulákból tetszőleges, kémiaileg irányított készülékeket vagy a nanotechnológia szóhasználatában „gépeket” állítson elő. A gépiparban a megfelelő analógia a számítógép-vezérelt műhely.

Atomerőmikroszkóp [AFM Atomic Force Microscope]

Olyan készülék, amely molekula szinten képes leképezni a felületet mechanikailag mozgatva az érzékelőt a felület kontúrja felett. A készülék egy igen hegyes tűből áll, amelyet egy érzékeny rugó végén alakítanak ki. Ha az eltérést állandó értéken tartjuk úgy, hogy le-fel mozgatjuk az érzékelőt, akkor – megfelelő feltételek mellett – a felület atomi felbontású térképét rajzolhatjuk ki. Gyakran pásztázó erőmikroszkópnak is nevezik.

CMOS – Complementary Metal-Oxid Semiconductor

Olyan eszközök, áramkörök, amelyek mind n-, mind p-csatornás eszközöket tartalmaznak. Elsősorban kisebb fogyasztása miatt előnyös áramköri technológia.

CVD – [Chemical Vapour Deposition] – Kémiai Gőzfázisú Leválasztás

Olyan rétegelőállítási eljárás, ahol az előállítandó rétegek anyagát, vagy anyagait először gőz/gáz halmazállapotba hozzuk, és ezeket egy semleges vivőgáz segítségével a hordozóra juttatják. A vivőgáz leggyakrabban nitrogén vagy hidrogén.

DRAM – Dynamic Random Access Memory

Dinamikus, véletlen hozzáférésű memória áramkör, azaz egy adat hozzáférésehez nem kell érinteni a többi. Másodpercenként nagyságrendileg ezerszer kell frissíteni. A tápfeszültség lekapcsolásakor elveszti adattartalmát.

DVD – Digital Video Disc

Nagy jelsűrűségű lemez, videofilmek rögzítésére is alkalmas.

Epitaxia

A görög epitapheum sírvers, sírfelirat, a sírt fedő kőlap szóból. Olyan különféle fázisból és módszerrel megvalósított egykristálynövesztési módszer, amelyben a felnövekvő egykristályos réteg folytatja a hordozó orientációját. Mivel a szokásos egykristályhúzási hőmérsékletnél lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten zajlik, a rétegek tulajdonsága kedvezőbb.

Exponenciális szerelés [Exponential Assembly]

Olyan gyártási eljárás, amely egy robotkarral indul. A felületen levő egyetlen robotkar létrehoz egy másik robotkart oly módon, hogy a részecskéket arról a felületről szedi fel, amelyen maga is kialakításra került. Az így létrejövő két robotkar egyenként további két-két robotkart hoz létre. Az így létrejövő folyamat tetszőleges számban megismételhető és elvezethet oda, hogy a hordozó mindkét oldalra, teljes egészében robotkarokkal burkolt lesz.

Futball-labda [C_{60} molecules vagy buckminsterfullerene]

olyan szénatomokból álló gömbszerű struktúra, amely 60 szénatom öt- és hatszögekben elrendezett összekapcsolásából áll. Formája a futball-labdára emlékeztet. 60-nál több szénatom összekapcsolásával másod- és harmadrendű testek is létrehozhatóak.

Fotovoltaikus anyag

Olyan szerves vagy szervetlen anyag, amely a fényt elektromos árammá alakítja át.

FPGA – Field Programmable Gate Array
Programozható memória áramkör.

Fullerének [Fullerens]

A fullerén a tiszta szén molekuláris formája, amelyet 1985-ben fedeztek fel. Ezek a struktúrák olyan szénatomokat tartalmaznak, amelyek póklábként kiágazó kötésekkel rendelkeznek. A leggyakrabban előálló formája a hatvan szénatomot tartalmazó gömbszerű struktúra. A több szénatomot tartalmazó struktúrákban a szénatomok száma 70 és 500 közé esik.

A közismert kiinduló méret a futball-labda. A másik végpont a nyolcvanas évek közepén felfedezett C_{60} anyag, amelyet egy körülbelül 1 nm átmérőjű gömbnek kell elképzelnünk, és amelyek 60 darab szénatomot tartalmaznak. Elrendezésük szintén a futball-labdára emlékeztet, azaz 20 hatszög és 12 ötszög mentén helyezkednek el. Ezt az anyagot gyakran fullerénnek vagy buckminsterfullerénnek is nevezik, adózva ezzel Richard Buckminster Fuller (1895–1983) amerikai mérnök, matematikus, költő és építész emlékének, aki megalkotta geodéziai kupolát – az egyetlen épületfajtát, ahol a szerkezeti anyagok szilárdsága nem korlátozza az épület méretét .

Gyémántszerű [Diamondoid]

Olyan struktúrák, amelyek szélesebb értelemben véve emlékeztetnek a gyémánt struktúrájára. A struktúra sűrű háromdimenziós kovalens kötésekkel áll, ahol az első és a második atomsort három vagy több valenciakötés kapcsolja össze. A gyakorlatban használt legtöbb gyémántszerű szerkezet leggyakrabban sok tetraéderes szénatomot tartalmaz. Azok az anyagok, amelyek nagy szilárdsággal rendelkeznek, amely 100–200-szor meghaladhatja a titánét, ugyanakkor sokkal könnyebbek. Olyan űr és földi eszközöknél használják ezeket az anyagokat, ahol a súly és a szilárdság meghatározó.

Konvergáló szerelés [Konvergent Assembly]

Olyan technológiai eljárás, melynek során méteres nagyságrendű tárgyakat állítunk elő olyan alkotórészekből, amelyeknek mérete nanométer nagyságrendű. Az eljárás lényege, hogy a kisebb alkatrészeket nagyobb alkatrészekké szereljük össze, ezekből mint kisebb alkatrészekből ismét nagyobb alkatrészeket hozunk létre, és így hidaljuk át a molekuláris méretek és a makroszkopikus mérettartományok közötti mérettartományt.

Kvantumpöttyök [Kvantumdots]

Olyan nanométer méretű félvezető kristály vagy elektrosztatikusan összegyűjtött elektron, amely képes egy elektront vagy néhány elektront magához vonzani. A kvantumpöttyökben az elektronok olyan diszkrét energiaszinteken helyezkednek el, mintha egy atomban lennének. A kvantumpöttyöket gyakran „mesterséges atomként” írják le.

LCD – Liquid Crystal Display

Folyadékkristályos kijelző, képernyő méretben is használatos. Kontrasztja elmarad a többi kijelzőtől, de tápfeszültsége kedvező, főleg a hordozható eszközökben elterjedt. Más technológiákkal is kombinálják.

LED – Light Emitting Diode

Általában gallium-foszfidból kialakított p-n átmenetet tartalmazó eszköz, amely adalékolásától függően más-más látható vagy infravörös fénnel világít. Gyakran mátrix elrendezésben is használják. A jövőben világításra használható fényforrásként is szóba jöhet.

Litográfia

A görög lithosz – kő és a grafosz – írás, rajzolás szóból képzett fogalom, tkp. Kőnyomat, szélesebb értelemben ábraátvitel. A félvezető technológiában fény, elektronsugár és röntgensugár segítségével, ill. ezek kombinációjával végzik.

Mechanokémia [Mechano Cemistry]

Olyan kémiai eljárás, melynek során mechanikailag közvetlenül behatást gyakorolunk a reagáló molekulákra. Így például a kémiai kötések létrejöttére vagy felbomlására.

Mechanoszintézis [Mechanosynthesis]

Olyan molekuláris szintű eszközök, amelyek kémiaiilag specifikus végekkel (hegyekkel) rendelkeznek, amely lehetővé teszi a munkadarab alakítását, megváltoztatását.

MEMS – Micro-Electro-Mechanical System

Félvezető technológia segítségével megvalósított, általában háromdimenziós eszköz, amely valamilyen mozgást realizál. Vezérlése gyakran elektrosztatikusan történik.

Molekuláris nanotechnológia [Molecular Nanotechnology MNT]

Olyan eljárás, amelyik során mind a termék, mind a melléktermék előállítását molekulánként ellenőrizzük. A gyártás általában olcsó eljárásokon alapul.

Moore törvénye

A Gordon Moore által 1965-ben javasolt törvény, amely kimondja, hogy egy integrált áramkörben található tranzistorok száma minden évben megduplázódik, 1975-ben felülvizsgálta törvényét és a duplázódásra két évet számított. A legtöbb szakember becslése jelenleg 18 hónap. Ez a tendencia korlátlanul nem folytatható, ma ennek a törvény-szerűségnek az érvényességi idejét 10–15 évre teszik.

Mozgékonyosság

A töltéshordozó reakciója a gerjesztő elektromos térre. Minél nagyobb az értéke, annál nagyobb frekvenciás, tehát gyorsabb eszköz készíthető az adott félvezető anyagból. A lyukak és az elektronok mozgékonyasága egy adott anyagban általában eltérő.

Nano-elektromechanikai rendszerek [Nano Electomechanical Systems MEMS]

A nanoméretű elektromos/mechanikus rendszerek vagy eszközök megnevezésére használt gyűjtőnév. Az eszközökben legalább egy jellemző méret a 100 nanométeres tartomány alá esik.

Nanoelektronika [Nano Electronics]

Az elektronikának az a szakterülete, ahol az eszközöknek legalább egy jellemző mérete 100 nanométer alá esik. Az eszközök mind molekuláris elektronikai módszerekkel, mind a ma használatos félvezető technológiai eljárásokkal előállíthatóak.

Nanonyomtatás [Nano-imprinting]

Ez a koncepció szintjén rendkívül egyszerű eljárás, gyakran lágy litográfiának is nevezik. Az eljárás nanotartományban valósítja meg, a szokásos sablon szerinti nyomtatást. Két formája létezik: az egyik, ahol az alakzat kialakítására nyomóformát használnak, a másik, amely hasonlít a hagyományos nyomtatáshoz, itt az ábra átvitelére „tintát” használnak. A gyakorlatban általában más technológiai lépéssel így például marással együtt alkalmazzák.

Nanocső [Nanotube]

A nanocső olyan egydimenziós fullerén, ahol az atomok pentagonális és/vagy hexagonális elrendezésben helyezkednek el. Az így létrejövő síkot feltekerve kapjuk a nanocsövet, amelyet 1991-ben Sumio Iijima fedezett fel. A gyakorlatban a cső előállítására más módszereket alkalmaznak, attól függően, hogy a síkot hogyan alakítjuk csővé (ezt a királis vektor írja le); ezek lehetnek vezetők vagy félvezetők.

Nanométer [nm]

A méter egy milliárdod része a megnevezés a görög törpe („nanos”) szóból származik.

Nedves nanotechnológia [Wet nanotechnology]

Elsősorban olyan biológiai rendszerek vizsgálatát jelenti, amelyek vizet is tartalmaznak, ill. ebben oldottak. Ilyenek lehetnek a különféle genetikai anyagok, membránok, és más sejttes felépítésű rendszerek. Ennek a nanotechnológiai rendszernek a létezését és hatékonyságát jól mutatják az élő rendszerek, amelyeknek kialakulását, működését és evolúcióját nanométer tartományú struktúrák határozzák meg.

Önszerveződés [Self-assembly]

Olyan kémiai jelenség – amelyet gyakran Braun-féle szerveződésnek is neveznek –, amely a molekulák véletlenszerű mozgásából, és egymáshoz való kötődésükből alakul ki.

Pásztázó alagút mikroszkóp [Scanning Tunneling Mikroskope statement]

Olyan eszköz, amely vezető felületek képét atomi pontossággal képezi le. Használható technológiai eszközként is, ekkor mozgathatunk vele például molekulákat a hordozó felszínén.

Permalloy

Nagy permeabilitású nikkell vas ötvözet, általában 80% nikkell tartalommal.

RAM – Random Access Memory

Véletlen hozzáférésű memória áramkör.

SWCN vagy SWNT – Single-Walled Carbon Nanotube

Egyfalú szén nanocső, alapvető eszköz a nanoelektronikában.

Száraz nanotechnológia [Dry Nanotechnology]

Olyan anyagok, amelyeket felületfizikai és kémiai módszerekkel állítanak elő és elsősorban szénből (fullerének és nanocsövek), szilícium és más szerves anyagokból állnak. A nedves technológiáktól eltérően a száraz technológia lehetővé teszi fémek és félvezetők felhasználását. A vezető sávban levő aktív elektronok lehetővé teszik, hogy ezek működhessenek nedves környezetben is, de ugyan-ezek az elektronok lehetővé tesznek olyan működést is, amely száraz környezetben történik és ígéretes elektromos, mágneses és optikai tulajdonságai vannak. A száraz eljárások fejlesztésének másik hajtóereje az, hogy olyan struktúrákat állítsanak elő, amelyek hasonlóan önszerveződést mutatnak, mint a nedves technológiával előállított megfelelőjük.

13. Irodalomjegyzék

Ebben a fejezetben csak a legalapvetőbb könyvekre hívjuk fel az Olvasó figyelmét. Az irodalmi hivatkozások egy részét az előző fejezetben lábjegyzetként adtuk meg. A lábjegyzetben használt rövidítések feloldása az alábbiak szerint értelmezendő:

- | | |
|-------|---|
| NANO | MicroNano – The newsletter of tools and products in micro and Nanotechnology, Advantage Business Media, USA |
| Mst | International newsletter on micro-nano integration
Kiadó: VDI/VDE – Innovation + Technik GmbH, Berlin |
| III-V | III-Vs Review – The Advanced Semiconductor Magazine, Kiadó: Elsevier ISSN 0961-1290 |
| Si | Semiconductor International, Kiadó: Reed Business Information, ISSN 0163-3767 |
-
- | | |
|--------------------|---|
| [Benedek, 2000] | Benedek A.; Milani, P., Ralchenko, V.G.: Nanostructured Carbon for Advanced Applications. NATO Science Series II. Mathematics, Physics and Chemistry, vol. 24. Dordrecht, Kluwer, 2000. |
| [Bhusham, 2004] | Bhusham, B.: Nanotechnology Laboratory for Information Storage and MEMS/NEMS. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. |
| [Bhushan, 1999] | Bhushan, B.: Handbook of Micro/Nano Tribology. Second Ed. CRC Press, Boca Raton, 1999. |
| [Bhushan, 2004] | Bhushan, B.(Ed): Handbook of nanotechnology. Berlin etc. Springer Verlag, 2004. |
| [Brockman, 2003] | Brockman, J.: A következő 50 év, A tudomány a XXI. század első felében. Vince Kiadó, 2003. |
| [Busnaina, 2007] | Busnaina A.: Nanomanufacturing Handbook. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. |
| [Chung, 2007] | Chung Y.: Introduction to Materials Science and Engineering. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. |
| [Gad-el-Hak, 2007] | Gad-el-Hak, M.: MEMS Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. |
| [Gad-el-Hak, 2007] | Gad-el-Hak, M.: MEMS: Design and Fabrication. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. |

- [Gad-el-Hak, 2007] Gad-el-Hak, M.: MEMS: Instruction and Fundamentals.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Gogotsi, 2007] Gogotsi Y.: Carbon Nanomaterials.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Gogotsi, 2007] Gogotsi Y.: Nanomaterials Handbook.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Gogotsi, 2007] Gogotsi Y.: Nanotubes and Nanofibers.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Jamroz, 2007] Jamroz W.R.: Applied Macrophotonics.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Knopf, 2007] Knopf G.K.: Smart Biosensor Technology.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Lyshevski, 2007] Lyshevski S.E.: Nano- and Micro-Electromechanical Systems:
Fundamentals of Nano- and Microengineering. Second Edition.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Lyshevski, 2007] Lyshevski S.E.: Nano and Molecular Electronics Handbook.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Maisch, 2007] Maisch N.H.: Biomedical Nanotechnology.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Nill, 2007] Nill K.: Glossary of Biotechnology and Nanotechnology Terms,
Fourth Edition.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Quirke, 2007] Quirke N.: Adsorption and Transport at the Nanoscale.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Rogers, 2007] Rogers B.: Nanotechnology: Understanding Small Systems.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Vo-Dinh, 2007] Vo-Dinh T.: Nanotechnology in Biology and Medicine: Methods,
Devices, and Applications.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [Yanuschkevich, 2007] Yanuschkevich, S.N.: Decision Diagram Techniques for Micro-
and Nanoelectronic Design Handbook.
CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
World Scientific, Hong Kong, 2007
- [Buchanan, 2002] Buchanan, M.: Small World - uncovering nature's hidden networks
Phoenix, 2002.
- [Cao, 2007] Cao, G., Brinkler, C., J. (Ed): Annual review of nano research.
World Scientific, Hong Kong, 2007.

- [Fendler, 1996] Fendler, J., H., Dékány, I.: Nanoparticles in Solids and Solutions. NATO ASI Series, 3. High Technology, vol.18. Dordrecht, Kluwer, 1996.
- [Grote, 2001] Grote, N., Venghaus H. (eds.): Fibre Optic Communication Devices. Springer Series in Photonics, 2001.
- [Jones, 2004] Jones, R. A.L.: Soft machines - nanotechnology and life. Oxford University Press, 2004.
- [Karn, 2004] Karn, B.,T., Masciangioli, W.Zhang, V. Colvin, P.Alivisatos (Ed.): Nanotechnology and the Environment Applications and Implications. American Chemical Society, Washington, DC, 2004.
- [Luryi, 2004] Luryi, S., Xu J., Zaslavsky A.: Future Trends in Microelectronics The Nano, the Giga, and the Ultra. John Wiley&Sons, Inc, 2004.
- [Mojzes, 1997] Mojzes, I., Kovács B.: Nanotechnology - a dedicated tool for the future. MIL-ORG NETI Budapest, 1997.
- [Mojzes, 2005] Mojzes I. (szerk.): Mikroelektronikai és technológia Műegyetemi Kiadó. 2005.
- [Shah, 1996] Shah, J: Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures. Springer Series in Solid-State Sciences, 1996.
- [Singh, 2003] Singh, J.: Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures. Cambridge University Press, 2003.

14. Tárgymutató

A

adalékolás 100, 103, 109, 111, 124, 126, 141, 143
adatbázis 170
adattároló 75, 89, 117, 123
adhézió 61
aerosol 38
AFM 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 89, 90, 92, 123, 132, 153, 187
agyag 153, 177
akkumulátor 13, 36, 118, 119, 133, 177
aktivációs energia 38
akusztikus fonon 99
alagúteffektus 80, 81
áldozati réteg 35
AlGaAs 38, 115
amorf 44, 51, 57, 58, 104, 117
amorf szén 44
anizotróp 64
anód 119
anodikus oxidáció 142
antibakteriális adalékanyag 142
antibakteriális bevonat 152
anyagtudomány 12, 15, 22, 43, 65
Arrhenius-kifejezés 38
Ash, E. A. 87, 92

Ashby-diagramm 122

aspect ratio 74

As_xO_y 54, 58, 59, 60

aszpirin 148

atomerő-mikroszkóp 69, 70, 71, 92

B

bakteriofág 38

baktériumellenes reagens 152

ballisztikus 48, 95, 96, 98, 116, 125

ballisztikus mágneses ellenállás 116

ballisztikus transzport 96, 98, 125

bázisállomás 29

Bell Laboratórium 20

benzol 19, 125

bevonat 12, 13, 40, 63, 64, 87, 89, 140, 142, 144, 151, 152, 174

Binnig, Gerd 70

biztonságtechnikai kutatás 155

BMG 122

bór-nitrid 144

Boser-oszcillátor 30

Bragg-reflektor 37

briliáns alak 121

Brinell 62

buckminsterfullerén 44, 46, 189

buckypaper 128

C

C₅₄₀ 44
C₆₀ 44, 120, 177, 179, 188, 189
C₇₀ 44
CCD 75
CdS 39, 115, 117
cellulóz membrán 151
chip 18, 22, 34, 36, 37, 41, 109, 111, 126
cikk-cakk 47, 48
cink-oxid 39, 129, 155
cirkónium 75, 111, 177
CNTFET 103
Compact Modell Censils 171
confinement layer 38
contact mód 73, 74
Coulomb-akadály 48
CVD 49, 63, 64, 109, 121, 122, 126, 130, 132, 144, 188

CS

csíkszélesség 132
csomagolás 145, 164
csontképződés 151

D

DARPA 27
deformáció 61, 62, 74, 142
dendrimer 141, 148, 150, 164
diagnózis 148, 150
dializátor 151
dielektrikumok relatív diektromos
 állandója 109
diffrakciós limit 65, 87, 92
dinamikus mód 78
diszkrét eszköz 165
diszruptív technológiák 27

dízelmotor 38, 39
DNS 20, 24, 74, 145, 148, 151
DPN 85
Drexler, K. Eric 20

E

egészségügy 28, 39, 118, 140, 152, 164, 166, 175, 178, 179
egykristály 22, 40, 50, 57, 64, 104, 116, 121, 122, 124, 129, 188
elágazó nanocső 49
Electronics Design Automation 171
elektroforetikus kijelző 112
elektroforézis 34
elektrokémiai tulajdonság 49
elektromágneses sugárzás 12, 69
elektron-elektron kölcsönhatás 47
elektronikus eszköz 12, 30, 45, 48, 49, 95, 100, 125
elektronikus szövet 143
Elektronlitográfia 112
elektronsugaras 73, 86, 122, 126
élettartam 110, 139, 144, 151
ellipszometria 132
energiakonverzió 175
energiatárolás 118, 119, 144, 164, 175
entrópia 23
enzim 153
e-papír 13, 123
epidemiológia 179
epilepszia 152
epoxi 131
értéknövelés 139
érzékelő 13, 27, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 77, 118, 124, 127, 129, 130, 133, 142, 143, 150, 151, 152, 174, 176, 187
érzékenység 124, 127
evolúció 12, 192

excimer lézer 132

F

fajlagos kontaktellenállás 51

fáradás 61

fáziszajú 30

feldolgozóipar 28

felület 30, 31, 33, 35, 36, 37, 40, 48, 49,
50, 52, 53

felületi plazmonok 65

felületi reakció 180

felületmódosítás 141

fénydiffrakció 147

fénytörés 121

fényvédő krém 155

Fermi-szint 45, 90

festék 13, 142, 144, 147, 151

fluorsav 72, 86

fókuszált ionnyaláb 72

folyadékadagoló 35

folyadéktoábbító rendszer 131

fonontranszport 100

fotolitográfia 111, 153

foton 13, 37, 113, 114, 115, 147, 178

fotonikai anyag 41, 147

fotonikus kristály 147

fotovoltaiikus konverzió 144

fraktálmintázató 53

fraktál-szerű 60

fullerén 19, 44, 46, 110, 120, 145, 154,
164, 177, 178, 189, 192, 193

G

Ga₂O₃ 50, 54, 55, 56, 57, 60

GaAs 37, 38, 52, 53, 54, 58, 60, 67, 115,
178

GaN 100, 115, 130

GMR 133

grafén sík 43, 45, 49

grafit 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 63, 98,
99, 118, 121

gyémánt 43, 44, 48, 63, 98, 109, 120,
121, 122, 144, 151, 184

gyémántréteg 121, 144

gyémántszerű 189

gyertyaláng 39

gyógyszer 13, 150, 152, 173, 176, 178,
179

gyógyszergyár 149

gyorsulásmérő 36

gyulladás-késleltető 142

gyűrű 46, 49, 125, 126, 129

gyűrűs oszcillátor 126

H

hafnium 111

Hall-állandó 171

hangolható kondenzátor 34

hangolható lézerek 37

hatóanyag 148, 149, 150, 151

helikális nanocsövek 49

hepatitisz 152

heteroátmenet 104

hibahely 25, 43, 50, 103

hidrofób 142, 144

hidrogénmegkötő képesség 133

hidrolízis 40

HIV-vírus 150

hőkeltés 176

hővezetési tényező 120

hullámcsomag 52

I

IBM 19, 20, 31, 70, 87, 123

IEC 170

IEEE 115, 171

Iijima, Sumio 20, 192

implantátum 148, 149, 151

indium-oxid 129

InGaAs 38, 115

intelligens ruházat 143

International Organisation for
Standardisation 170

internet 11, 123, 170, 177

in-vivo diagnosztika 149, 150

iparjogvédelem 162

ISO9000 170

izzólámpa 114

J

jármű 28, 31, 32, 33, 133, 173, 174

Joule-hő 96

K

K+F 11, 40, 186

kantilever 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 84,
89, 128, 150, 151

kapuelektroda 108, 111, 126

karcolás 63, 64

karcolási ellenállás 61

karosszék 47, 48

katalitikus anyag 173

katalizátor 50, 55, 60, 152, 153, 154

katalízis 13, 36, 153, 154, 178

Kelvin szondás mikroszkóp 90

keménység 43, 61, 62, 63, 120

kenőanyag 13, 122, 144

kijelző 13, 37, 112, 117, 123, 133, 147,
177, 190

kipufogó gáz 38

királis 47, 48

kitin 148

kiürítés 101, 102

know-how 160, 162, 167

kockázat 17, 147, 173, 174, 175, 178,
179, 181

kockázatelemzés 175, 180

kolloid 39, 40, 41, 64

kompozit 13, 122, 128, 141, 142, 154,
177

kompozit anyag 12, 174

konduktancia kvantum 96

konduktivitás 98, 103

kontaktpotenciál 90

kovalens kötés 127, 187, 189

kozmetikai ipar 154, 155, 164, 166

környezeti intelligencia 33

környezetszennyezés 38

környezetvédelem 28, 146, 152

kötési módja 46

közegészségügy 38

közeltéri optikai pásztázó mikroszkóp 87

közkins 161, 163, 164

krisztallográfia 15

különbefeszültség 101, 102

kvantumfizika 11, 46, 100

kvantumjelenség 181

kvantumkorall 85

kvantummechanika 51, 77, 80, 93, 125,
134, 171, 181, 187kvantumpötty 12, 45, 112, 116, 122, 164,
187, 190

kvarc kristály 30

L

Lab-on-Chip 34
laminálás 100
lantán 112
lantán-oxid 112
lapos kijelző 117
Lennard-Jones potenciál 78
letörési feszültség 102
lézersugárzás 37, 150
licencia 167
LIGA 34, 41
linearitás 29, 104, 127
liposzomák 148
lítium 74, 118, 119
lítium-karbonát 129
litográfia 12, 86, 110, 111, 131, 143, 190
logikai kapu 104, 107
lonsdaleite 44
Lüttinger-folyadék 47

M

Madolay, Henry 169
mágneses erő mikroszkóp 70
mágneses induktancia 47
mágneses tér 29, 51, 145, 150, 152, 176
magneto-optikai adatrögzítés 51
makrokemény 62
marás 22, 31, 112, 113, 132, 142, 191
marketing 149, 163
mátrix struktúra 177
Maxwell-egyenlet 65
mechanikai deformáció 62
mechanikai stabilitás 126
megbízhatóság 19, 30, 32, 116, 152
mély reaktív ionmarás 31
membrán 33, 36, 37, 148, 151, 176, 192

memória 17, 25, 30, 115, 179, 188, 189, 192
MEMS 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 117, 152, 170, 184, 185, 190, 191
méretnagyság 178
mérőcsúcs 62
meteorit 44
mezoporózus 132, 152
MFM 89
mikrocsap 35
mikrofon 36, 37
mikrokeménység 62
mikromegmunkálás 35, 70
mikroorganizmusok 130
mikrorendszerek 27
mikroszkóp 19, 20, 53, 54, 69, 70, 71, 79, 80, 83, 84, 87, 88, 91, 92, 96, 123, 126, 132, 148, 187, 192
mobil telefonía 116, 117
molekuláris elektronikai módszer 191
molekuláris kontrasztanyag 150
molekuláris méret 123, 189
monoklin 55
monopólium 159, 161, 162, 163, 164
monoréteg 23, 62, 131
Monte-Carlo szimuláció 48
Moore, Gordon 191
morfológia 53, 178
motor 11, 23, 28, 32, 33, 38, 39, 131, 166
mozgékonyosság 115, 116, 117, 121, 125, 132, 143, 191
multiréteg 51, 152
műszál 141

N

Nano Törzsasztal 14
nanobiológia 28
nanobiotechnológia 22

nanobőr 128
 nanocement 140
 nanocső 20, 24, 44, 45, 46, 47, 48, 49,
 50, 52, 58, 59, 60, 73, 74, 84, 95, 96,
 97, 98, 103, 112, 113, 114, 119, 122,
 124, 126, 127, 128, 130, 140, 171, 192
 nanocső-beton keverék 140
 nanoelektronika 20, 22, 25, 27, 65, 95,
 104, 112, 115, 116, 117, 122, 134,
 148, 165, 171, 177, 183, 184, 191
 nanoélelmiszer 145
 nanoelmozdulás 28
 nanoenergetika 164
 nanoerő 28
 nanoezüst 153
 nanojelenség 43
 nanokatalizátor 153, 154
 nanokatód 112
 nanoklaszter 153
 nanomágneses anyag 144
 nanomechanika 20, 61
 nanoméretű ezüst ion 140
 nano-mikroelektronikai struktúra 123
 nanomultiréteg 38
 nanonikkel 153
 nanopalládium 153
 nanoradiológia 28
 nanorészecske 54, 55, 178
 nanostruktúra 180
 nanoszelén kapszula 152
 nanotechnológiai szabvány 170
 nanotermikus 28
 nanotudomány 15, 43, 83, 92, 166, 186
 nanovezeték 50, 51, 52, 54, 59, 84, 95,
 100, 102, 103, 164
 napelem 143, 145, 177
 napenergia 13, 144, 145, 164, 174
 napvédő krém 155
 NEC 20, 165

négytűs elrendezés 51
 nehézfém 40, 130
 Nicholls, G. 87
 nitrogen-site oxygen 100
 Nobel-díj 17, 19, 20, 70
 non-contact mód 73
 nondisszipatív tulajdonság 98
 NSOM 88, 92
 nyomásérzékelő 31, 32
 nyomóforma 79

O

off-chip antenna 109
 oktatás 13, 139, 147, 174
 ólomakkumulátor 118
 optikai vékonyréteg 147
 órajel 18, 30, 109, 110
 oszcillátor 21, 28, 30, 126

Ö

önillesztő 112
 önreprodukció 22, 175
 önszerveződés 23, 24, 25, 49, 84, 129,
 131, 176, 192, 193
 öntapadó 174
 ötvözet 13, 83, 103, 192

P

pacemaker 152
 Parkinson-kór 152
 pásztázó alagútmikroszkóp 19, 20, 69,
 70, 80, 92
 pásztázó elektronmikroszkóp 53, 54, 69, 72
 pásztázószondás mikroszkóp 70, 92
 peptidek 38
 Permalloy 192
 piezoelektromos 74, 75, 82, 123, 129

pigment 112, 147, 148
PIN dióda 28
pit 79
plazma 114, 121, 142
plazmonoszilláció 65
PMMA 34, 86, 114, 127
p-n átmenet 104, 113, 125, 190
Pohl, D. W. 93
polimer 19, 49, 53, 109, 114, 122, 124, 127, 130, 139, 141, 142, 149, 152, 153, 174, 177
polimer nanorészecske 149
polimer-protein konjugátum 149
poliszilícium 31, 33, 36, 108, 111, 112, 113
por 39, 142
porlasztás 39
porózus 50, 110, 116
porózus struktúra 50
prekurzorok 39
probe 70, 82, 90, 96
protein 34, 142, 148, 150, 151, 153
PZT 75

Q

QFN 31

R

rádiórendszerek 28
ráfordítás 17, 23, 164, 173, 176
rajzolat 126, 127
rákos sejt 150, 173
Raman-spektroszkópia 128
relaxációs folyamat 61
reustol 33
réz 53, 56, 57, 85, 109, 110, 120
rezgőkvarc 30

reziszt 34, 86, 128, 129, 131, 152
rezonanciagörbe 65
rezonáns tunel eszköz 104
rhodamin 151
RIE 34
ring oszcillátor 21
robotika 128
Rockwell 62
Rohrer, Heinrich 19, 70
röntgen 53, 150, 190
röntgenkészülék 45

S

Schrödinger-egyenlet 80, 81
Semiconductor Equipment and Materials Institute 170
show-how 167
Si-Ge 51
SiLk 110
SnO₂ 114, 144
spektroszkóp 34, 53, 71, 87, 91, 92, 132
spektroszkópikus módszer 129
spin-off cég 167
SRAM 111, 126
start-up vállalkozás 149
Stephenson, Neal 176
SU-8 típusú reziszt 131
Synge, E. H. 93

SZ

szabadalom 27, 164
szabadenergia 23
szabvány 30, 31, 33, 62, 169, 170, 171
szalag 129
szálerősítésű polimer 139
szállítóeszköz 148, 149

számítógép 11, 12, 15, 30, 36, 52, 70,
76, 78, 89, 117, 123, 152, 187
szelektivitás 153
szemcse 174, 180
szemcsenagyság 122, 174
szén 12, 19, 122, 124, 125, 126, 127,
128, 130, 132, 133, 140, 144, 164,
178, 189
szénszármazék 98
szénszemcse 96, 97
szerszám 15, 22, 84, 144
szerves protein 142
szerzői jogvédelem 159
szigetelés 13, 29
szilícium 18, 20, 30, 34, 36, 37, 50, 64,
104, 109, 112, 113, 116, 117, 121,
122, 124, 125, 126, 130, 132, 152, 193
szilícium nyomásérzékelő 31
szilícium praezodim 111
szilícium-nitrid 72, 90
szimuláció 15, 171
színezőanyag 144
színszórás 121
szintézis 15, 20, 40, 52, 59, 60, 176, 190
színváltozás 12
szol 40
szol-gél bevonat 40
szórás 48, 103, 151
szövet 151
szuszpenzió 177
szűrők 28, 174

T

távíró egyenlet 51
terhességi teszt 150
terilén 143
termikus vezetőképesség 98, 99
termoterápia 150

tervezési szabály 18, 30, 132
tiltottsáv 45, 48, 51, 104, 121, 124, 126,
147, 154
tinta 35, 132
tirisztor 104
titán-dioxid 39, 112, 177, 178
titok 103, 162, 163
top-down technológia 176
törés 61
transzmissziós elektronmikroszkóp 53,
69, 83, 91, 96
transzverzális hullámmódus 96
tranzverzális 114
tribológia 61, 64
tudományos publikáció 166
tüzelőanyagcella 120

U

ultrahang 150
ultraibolya sugárzás 131, 142
Ultramikrokemény 62
ultraszűrő 150

Ú

újdonságrontó 160

Ü

ütközési detektor 32
üveg 33, 34, 36, 40, 52, 109, 110, 123,
126
üvegesedési hőmérséklet 127
üzemanyagellátás 32

Ű

űrkutató 37, 179

V

van der Waals erő 73
vegyület-félvezető 47, 50, 51, 52, 59, 100,
115, 116, 178
vékonyréteg 21, 35, 40, 51, 61, 62, 116,
117, 126, 143, 152
vékonyréteg tranzisztor 117, 143
vérnyomásmérő 152
vezetés 20, 48, 95, 99, 100, 101, 109,
120, 125, 130
Vickers 62
világháló 160
világító dióda 114, 143
vírus 38, 140, 148, 150
víztaszító képesség 12
VLS 50, 55, 59, 60, 100, 103, 115
VLS növesztési mechanizmus 55
vörösvértest 148

W

Whitworth, Joseph 169
winchester 89, 123, 134

Y

Y-csatlakozó 114
Young, Russell D. 70
Young-modulus 61, 62, 120, 128

Contents

1. Introduction	11
2. How it began?	15
2.1. Evolving microelectronics	15
2.2. Bottom-up architecture	22
2.3. Top-down architecture	23
2.4. Self-assembly	23
2.5. Summary	25
2.6. References for Section 2.	26
3. From microscale to nanoscale	27
3.1. On the borders of microworld and nanoworld	27
3.1.1. Micro-electromechanical systems	28
3.1.2. Micro-electrooptical systems	36
3.1.3. Nano-electromechanical systems	36
3.1.4. Nano-electrooptical systems	37
3.2. Aerosols	38
3.3. Colloid systems	39
3.4. Summary	40
3.5. References for Section 3.	41
4. Aspects of material science	43
4.1. Carbon as an essential material of nanotechnology	43
4.2. Nanotubes	46
4.3. Nanowires	50
4.4. Multilayers as special nanostructures	51

4.5. Nanostructure formation based on compound semiconductors	52
4.5.1. Synthesis of semiconductor nanowires	52
4.5.2. Resulting nanowires	54
4.5.3. Ga ₂ O ₃ nanowires	54
4.5.4. Properties of compound semiconductor nanowires	59
4.6. Nanomechanical properties of solids and thin layers	61
4.7. Surface plasmons	65
4.8. Summary	65
4.9. References for Section 4.	66
5. Measurements and manipulation in the nanoscale world	69
5.1. The scanning probe microscopy	70
5.2. History of SPMs	70
5.3. Big family of SPMs'	71
5.4. The atomic force microscope	71
5.4.1. Architecture, principles of operation	71
5.4.1.1. Cantilever and AFM tip	72
5.4.1.2. Piezoelectric positioning	74
5.4.1.3. Position sensing	75
5.4.1.4. Electronics, image processing	76
5.4.1.5. Vibration isolation	76
5.4.2. Modes of imaging	77
5.4.2.1. Static mode	77
5.4.2.2. Dynamic modes	78
5.4.3. Fields of application (AFM)	79
5.4.3.1. Data storage	79
5.4.3.2. Semiconductor devices and electronics	79
5.5. The scanning tunneling microscope	80
5.5.1. Architecture, principles of operation	80
5.5.1.1. The quantummechanical tunneling	80
5.5.1.2. The STM tip	83
5.5.2. Fields of application (STM)	83
5.5.2.1. Atomic level manipulation	83
5.5.2.2. Nanolithography	86

5.6. Other SPM tools	87
5.6.1. Near-field scanning optical microscope	87
5.6.2. Observation of magnetic structures	89
5.6.3. Determining of composition: Kelvin Force Probe Microscopy	90
5.7. Manipulation of nanoscale objects	91
5.8. Summary	92
5.9. References for Section 5.	93
6. Nanoelectronics	95
6.1. Electrical conducting and transport in nanosystems	95
6.1.1. Electric conductance and transport in nanotubes	95
6.1.2. Thermal conductance and phonon transport	98
6.1.2.1. Thermal conductance in nanotubes	98
6.1.2.2. Phonons in nanosystems	99
6.1.3. Electric conductance and transport mechanisms in nanowires	100
6.1.4. Modification of electrical properties of nanowires	103
6.2. Building blocks	103
6.3. Base logical gates using nanoelectronics	104
6.4. Small MOS structures	108
6.5. Nanodisplays	112
6.6. Nanophotonics	113
6.7. Nanoelectronics based on compound semiconductors	115
6.8. Spintronics	116
6.9. Nanotechnology and mobile communication	116
6.10. Energy storage with nanotechnology	118
6.11. Diamond nanostructures	120
6.12. Nano-based information storage and processing	122
6.13. Carbon nanotubes in the electronics	124
6.14. Nanosensors	127
6.15. Nanofabrication techniques	130
6.15.1. Self-assembly	131
6.15.2. Lithography in a wider sense	131
6.15.3. DIP-PEN nanolithography	132

6.16. Market of carbon nanotubes	132
6.17. Summary	134
6.18. References for Section 6.	134
7. Applications	139
7.1. Industrial applications	139
7.1.1. Nanotechnology in the building industry and building engineering	139
7.1.2. Applications in textiles	141
7.1.2.1. Forming of polymer surfaces in developing new textile materials	141
7.1.2.2. Existing nanotextiles	141
7.1.3. Coatings and lubricants	144
7.1.4. Nanotechnology and solar energy	144
7.1.5. Nanofoods	145
7.2. Biological applications	145
7.2.1. Nanotechnology in environment protection	146
7.2.2. About the colors of nature	147
7.3. Medical tools and materials with nanotechnology	148
7.3.1. Transport of drugs	149
7.3.2. New therapies and agents	150
7.3.3. In vivo diagnostics	150
7.3.4. In vitro diagnostics	150
7.3.5. Medical implants and biomaterials	151
7.4. The catalysis	153
7.5. Cosmetics	154
7.6. Summary	156
7.7. References for Section 7.	156
8. Nanotechnology and Intellectual Properties	159
8.1. Monopoly of intellectual property	159
8.2. Patents	164
8.3. Trademarks	166
8.4. Know-how	167

8.5. Summary	167
8.6. References for Section 8.	167
9. Nanotechnology and standardisation	169
9.1. About the standards in general	169
9.2. Nanotechnology and standardisation	170
9.3. Summary	171
9.4. References for Section 9.	171
10. Effects on society and risks	173
10.1. Introduction	173
10.2. Risks of nanotechnology	174
10.3. Positive effects of nanotechnology on humans and environment	175
10.4. Social effects of nanotechnology	176
10.5. Artificial nanoparticles	177
10.6. Medical risks of nanoparticles	178
10.7. Risk factors of nanotechnology in general	179
10.8. Summary	181
10.9. References for Section 10.	181
11. Outlook on Future	183
11.1. Investments in nanotechnology	183
11.2. Long-term perspectives of nanotechnology and nanoelectronics	183
11.3. References for Section 11.	186
12. Nanotech dictionary	187
13. References	195
14. Index	199
15. Contents	209

AZ ELEMÉK PERIÓDUSOS RENDSZERE

1.00794 1 2 99.985 0.015 H 1 Hidrogén 13.598 0.084 -252.9	2 4.002602 3 4 10 ⁴ = 100 He 2 Hélium 24.587 0.17 -268.9
6.941 3 4 7.5 92.5 Li 3 Lítium 5.392 0.55 180.5	9.012182 9 100 Be 4 Berilium 9.322 1.85 1278
22.989768 11 12 23 100 Na 11 Nátrium 5.139 0.97 97.8	24.3050 12 13 24 100 Mg 12 Magnezium 7.646 1.74 648.8
39.0983 19 20 39 93.3 K 19 Kálium 4.341 0.86 63.5	40.078 20 21 40 96.9 Ca 20 Kalcium 6.113 1.54 839
85.4678 37 38 72.2 27.8 Rb 37 Rubidium 4.177 1.53 38.9	87.62 38 39 86 79.9 Sr 38 Stroncium 5.695 2.68 769
132.90543 55 56 133 28.4 Cs 55 Cézium 3.894 1.90 28.4	137.327 56 57 136 7.9 Ba 56 Bárium 5.212 3.65 725
223.0197 87 Fr 87 Francium 4.0 27	226.0254 88 Ra 88 Rádium 5.279 5.50 700
55.847 26 54 56 5.8 91.7 Fe 26 Vas 7.870 7.87 1535	58.93320 27 58 100 Co 27 Kobalt 7.86 8.89 1495
58.69 28 58 68 68.3 26.1 Ni 28 Nikkel 7.635 8.91 1453	63.546 29 63 65 69.2 30.8 Cu 29 Réz 7.726 8.92 1083.4
65.39 30 64 66 68.6 27.9 Zn 30 Cink 9.394 7.14 419.6	69.723 31 69 71 70 39.9 Ga 31 Gallium 5.999 5.91 29.8
72.61 32 70 72 74 36.5 Ge 32 Germánium 7.899 5.32 37.4	74.92159 33 75 100 As 33 Arzén 9.81 5.72 61.5
78.96 34 78 80 82 35.8 Se 34 Szelén 9.752 4.19 221	79.904 35 79 81 80 49.3 Br 35 Bróm 11.814 5.14 58.8
83.80 36 82 84 86 17.5 Kr 36 Kripton 13.999 5.48 -153.3	85.46 37 85 87 88 17.5 Rb 37 Rubidium 4.177 1.53 38.9
87.62 38 86 79.9 Sr 38 Stroncium 5.695 2.68 769	88.90585 39 89 100 Y 39 Ittrium 6.38 4.47 152.3
91.224 40 90 92 94 17.4 Zr 40 Cirkónium 6.84 6.51 185.2	92.90638 41 93 100 Nb 41 Nióbium 6.88 8.58 246.6
95.94 42 95 96 98 24.1 Mo 42 Molibdén 7.099 10.28 261.7	98.9063 43 99 100 Tc 43 Technécium 7.28 11.49 112.2
101.07 44 101 102 104 18.7 Ru 44 Ruténium 7.37 12.45 231.0	102.90550 45 103 105 108 100 Rh 45 Ródium 7.46 12.41 196.6
106.42 46 105 106 108 26.5 Pd 46 Palládium 8.34 12.02 155.4	107.8682 47 107 109 112 48.2 Ag 47 Ezüst 7.576 10.49 961.9
112.411 48 111 112 114 28.7 Cd 48 Kadmium 8.993 8.64 320.9	114.82 49 113 115 128 42.7 In 49 Indium 5.786 7.31 156.6
118.710 50 116 118 120 32.6 Sn 50 Ólom 7.344 7.29 232.0	121.75 51 121 123 127 42.7 Sb 51 Antimon 8.641 6.69 630.7
127.60 52 126 128 130 33.8 Te 52 Tellúr 9.009 6.25 449.5	126.90447 53 127 100 I 53 Jód 10.451 4.94 126.9
131.29 54 129 131 132 26.9 Xe 54 Xenon 12.130 5.49 -107.1	132.90543 55 133 100 Cs 55 Cézium 3.894 1.90 28.4
137.327 56 136 7.9 Ba 56 Bárium 5.212 3.65 725	138.9055 57 138 140 142 11.1 La 57 Lantán 5.577 6.16 920
140.115 58 138 140 142 11.1 Ce 58 Cérium 5.47 6.77 908	140.90765 59 141 21 22 100 Pr 59 Praezodimium 5.42 6.49 1010
144.24 60 142 144 146 17.2 Nd 60 Neodimium 5.49 7.00 1010	146.9151 61 147 152 154 22.7 Pm 61 Prométium 5.55 7.22 1080
150.36 62 147 152 154 22.7 Sm 62 Szamárium 5.63 7.54 1072	151.965 63 151 153 159 47.8 Eu 63 Eurórium 5.67 5.25 822
157.25 64 156 158 160 21.9 Gd 64 Gadolínium 6.14 7.89 1311	158.92534 65 159 160 164 28.2 Tb 65 Terbium 5.85 8.25 1360
162.50 66 162 163 164 25.5 Dy 66 Diszprózium 5.93 8.56 1409	164.93032 67 165 166 168 26.8 Ho 67 Holmium 6.02 8.78 1470
167.26 68 166 167 168 33.6 Er 68 Erbium 6.10 9.05 1522	168.93421 69 169 170 174 26.8 Tm 69 Tulium 6.18 9.32 1545
173.04 70 172 173 174 21.9 Yb 70 Itterbium 6.254 6.97 1625	174.967 71 175 176 178 2.6 Lu 71 Lutécium 5.426 9.84 1656
227.0278 89 227 100 Ac 89 Aktínium 6.9 10.67 1050	232.0381 90 232 100 Th 90 Tórium 6.95 11.72 1750
231.0359 91 231 100 Pa 91 Protaktínium 6.54 15.57 1550	238.0289 92 238 100 U 92 Urán 6.08 18.97 1132.3
237.0482 93 237 100 Np 93 Neptúnium 6.40 20.48 1600	244.0642 94 244 100 Pu 94 Plútónium 5.8 19.74 1641
243.0614 95 243 100 Am 95 Americium 6.0 13.67 994	247.0703 96 247 100 Cm 96 Kürm 5.8 13.51 1340
247.0703 97 247 100 Bk 97 Berkélium 5.8 13.25 986	251.0796 98 251 100 Cf 98 Kalifornium 5.8 15.1 900
252.0829 99 252 100 Es 99 Einsteinium 5.8 15.1 900	257.0951 100 257 100 Fm 100 Fermium 5.8 15.1 900
258.0986 101 258 100 Md 101 Mendelévium 5.8 15.1 900	259.1009 102 259 100 No 102 Nobélium 5.8 15.1 900
260.1053 103 260 100 Lr 103 Laurencium 5.8 15.1 900	261.1053 104 261 100 Rf 104 Rutherfordium 5.8 15.1 900
262.1138 105 262 100 Db 105 Dubnium 5.8 15.1 900	263.1182 106 263 100 Sg 106 Seaborgium 5.8 15.1 900
263.1182 107 263 100 Bh 107 Bohrium 5.8 15.1 900	263.1182 108 263 100 Hs 108 Hassium 5.8 15.1 900
263.1182 109 263 100 Mt 109 Meitnerium 5.8 15.1 900	263.1182 110 263 100 Ds 110 Darmstadtium 5.8 15.1 900
263.1182 111 263 100 Rg 111 Roentgenium 5.8 15.1 900	263.1182 112 263 100 Uub 112 Ununbium 5.8 15.1 900
263.1182 113 263 100 Uut 113 Ununtrium 5.8 15.1 900	263.1182 114 263 100 Uuq 114 Ununquadium 5.8 15.1 900
263.1182 115 263 100 Uup 115 Ununpentium 5.8 15.1 900	263.1182 116 263 100 Uuh 116 Ununhexium 5.8 15.1 900
263.1182 117 263 100 Uus 117 Ununseptium 5.8 15.1 900	263.1182 118 263 100 Uuo 118 Ununoctium 5.8 15.1 900
263.1182 119 263 100 Uue 119 Ununennium 5.8 15.1 900	263.1182 120 263 100 Uub 120 Unbium 5.8 15.1 900

138.9055 57 138 139 0.1 99.9 La 57 Lantán 5.577 6.16 920	140.115 58 138 140 142 11.1 Ce 58 Cérium 5.47 6.77 908	140.90765 59 141 21 22 100 Pr 59 Praezodimium 5.42 6.49 1010	144.24 60 142 144 146 17.2 Nd 60 Neodimium 5.49 7.00 1010	146.9151 61 147 152 154 22.7 Pm 61 Prométium 5.55 7.22 1080	150.36 62 147 152 154 22.7 Sm 62 Szamárium 5.63 7.54 1072	151.965 63 151 153 159 47.8 Eu 63 Eurórium 5.67 5.25 822	157.25 64 156 158 160 21.9 Gd 64 Gadolínium 6.14 7.89 1311	158.92534 65 159 160 164 28.2 Tb 65 Terbium 5.85 8.25 1360	162.50 66 162 163 164 25.5 Dy 66 Diszprózium 5.93 8.56 1409	164.93032 67 165 166 168 26.8 Ho 67 Holmium 6.02 8.78 1470	167.26 68 166 167 168 33.6 Er 68 Erbium 6.10 9.05 1522	168.93421 69 169 170 174 26.8 Tm 69 Tulium 6.18 9.32 1545	173.04 70 172 173 174 21.9 Yb 70 Itterbium 6.254 6.97 1625	174.967 71 175 176 178 2.6 Lu 71 Lutécium 5.426 9.84 1656
227.0278 89 227 100 Ac 89 Aktínium 6.9 10.67 1050	232.0381 90 232 100 Th 90 Tórium 6.95 11.72 1750	231.0359 91 231 100 Pa 91 Protaktínium 6.54 15.57 1550	238.0289 92 238 100 U 92 Urán 6.08 18.97 1132.3	237.0482 93 237 100 Np 93 Neptúnium 6.40 20.48 1600	244.0642 94 244 100 Pu 94 Plútónium 5.8 19.74 1641	243.0614 95 243 100 Am 95 Americium 6.0 13.67 994	247.0703 96 247 100 Cm 96 Kürm 5.8 13.51 1340	247.0703 97 247 100 Bk 97 Berkélium 5.8 13.25 986	251.0796 98 251 100 Cf 98 Kalifornium 5.8 15.1 900	252.0829 99 252 100 Es 99 Einsteinium 5.8 15.1 900	257.0951 100 257 100 Fm 100 Fermium 5.8 15.1 900	258.0986 101 258 100 Md 101 Mendelévium 5.8 15.1 900	259.1009 102 259 100 No 102 Nobélium 5.8 15.1 900	260.1053 103 260 100 Lr 103 Laurencium 5.8 15.1 900

Az 1999/2000 év fordulóján volt a dátumváltás és az emberiség ebben az évben termelte története során a legtöbb rizst, 409,2 millió tonnát. A jelenleg gyártott legbonyolultabb integrált áramkörben körülbelül annyi elemi, integrált tranzisztor van, mint ahány lakosa van Kínának. Hogy kapcsolódik e két kérdéskör egymáshoz? Ennek is kulcsa a nanotechnológia. Ha ugyanis megbecsüljük, hogy mennyi lenne annyi rizsszemnek a tömege, mint ahány tranzisztor van egy ilyen integrált áramkörben, akkor annak a tömege bizony 26 tonna lenne, azaz a világ rizstermelése 1.573.846 darab ilyen bonyolultságú IC-ben lévő tranzisztornyira számú rizsszemnek felelne meg. Azaz az emberiség ma már több integrált tranzisztort termel, mint rizsszemet.

Könyvünk megkísérelti átfogni ennek a szerteágazó területnek a technológiai vonzatait.

A kezdetek felvázolása után áttekintjük az alulról felfelé és a felülről lefelé történő építkezés alapjait. Beszélünk önszerveződésről. Felvázoljuk a mikrovilágból a nanovilágba történő átmenetet, beszélünk aeroszolokról, kolloid rendszerekről. Az anyagtudományi aspektusokat felvázoló fejezetben a hangsúly a szén nanoelemekeken van. A mérés és a nanoobjektumok manipulálása ismertetése során hangsúlyt helyeztünk arra, hogy bemutassuk a mérési technológia sokszínűségét, az objektumok előállítás és mérési folyamatainak integrációját.

A nanoelektronikát szélesebb értelmében mutatjuk meg, mind a mikroelektronika, mind a kvantumjelenségek oldaláról közelítve. Az alkalmazásoknál inkább a sokféleség és a terület perspektíváit szemléltetjük. A szellemi tulajdonvédelem és a szabványosítás egy technológia elterjedésének kezdeti állapotát mutatja be. Mivel nézetünk szerint egy technológia társadalmi hatásai döntőek, bemutatjuk a nanotechnológia és a nanotermékek kockázatait is. A kötet egy rövid kitekintéssel zárul.

Könyvünket elsősorban műszaki és természettudományos egyetemisták, PhD-hallgatóknak szánjuk. Példáink elsősorban az ő alapismereteikre épülnek, megmutatva emellett a szerves és az élő világ hangsúlyozottan fontos alkalmazásai közül néhányat.

s2457

ISBN 978 963 420 918 8



9 789634 209188

www.kiado.bme.hu