

Nanoelektronika

Mojzes Imre

A széles értelemben vett nanoelektronikai áramkörök alapvetően ma még a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenésével jönnek létre, alapvetően CMOS-típusúak és szilíciumalapúak, a dielektrikumot illetően széleskörű keresés folyik, hogy a SiO_2 3,9-es dielektromos állandójánál kisebb értékkel rendelkező anyagot találjanak, amely illeszkedik a fémzéshez is, ahol a fémzés terén is le kell cserélni a jól bevált alumínium fémzést, ezt rézzel, illetve rézalapú ötvözetekkel helyettesítik, azaz az epitaxiális szilícium alapanyagként megmaradni látszik, de lényeges a szűkebb értelemben vett kvantumhatásokon alapuló, és leggyakrabban a nanoelektronika másik nyersanyagaként számon tartott nanocső, ebből lényegében mindenki az egyfalú szén nanocsövet részesíti előnyben, amelynek felhasználásával az elemi áramkör-készlet megvalósítható.

1. Témakör

A nanoelektronika fogalmát széles körűen értelmezzük, azaz beleértjük a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenése révén létrejövő, méretük folytán már a nanovilágba tartozó tervezési szabály szerint elkészített integrált áramköröket (IC) és a valódi, kvantumjelenségeken alapuló, áramköri struktúrákat is. Ez utóbbiak azért tekinthetők struktúráknak, mert lényegében csak az optoelektronika terén beszélhetünk kereskedelmi forgalomban is lévő félvezető eszközökről.

2. Jelenlegi helyzet

A mikroelektronikai termékfejlesztésben ezért elsősorban konstrukciós megoldásokkal és az egyes elemek mérete csökkentésével történt a fejlesztés, amelyre világosan és egyértelműen utal Moore törvénye. Ez a törvény, amely 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 analóg és/vagy nagyteljesítményű eszközök – nem figyelhetők meg.

A memória-áramkörök jellemzésére, nemzetközileg elfogadott módszer Gordon Moore törvénye¹, aminek alapján számolták ki a 1. táblázatban lévő eredményeket.

Mint látható a fejlődés kb. 2016-ig prognosztizálható, elsősorban a DRAM áramkörök terén a törvényt is meghaladó mértékű fejlődéssel számol és a chipenkénti tranzisztorok száma eléri a 10^{11} -en darabot.

A mikroelektronikai alkalmazásban igen fontos szerephez jutnak a mikroelektronika és a nanoelektronika területén lévő mikro-elektromechanikai rendszerek és a mikro-optoelektronikai rendszerek. Ezek az eszközök ma elsősorban szilíciumból kerülnek kialakításra, felhasználva és továbbfejlesztve a hagyományos szilíciumtechnológia módszereit. A fejlődésben igen jelentős szerep jut azonban új tulajdonságok, vegyület-félvezető anyagok alkalmazásának is. Ezek közül jellegzetes anyagokat és azok tulajdonságát mutatja a 2. táblázat. Mint látható a táblázatból, ezek az anyagok a szilícium sáv szélességét és mozgékonyágát messze meghaladó előnyös tulajdonságokkal rendelkeznek. Az anyagválasztás lényeges szerephez jut a CMOS áramkörökben alkalmazott dielektrikum anyaga is.

A **CMOS-technológia** kétségtelen a legsikeresebb mikroelektronikai technológiává érett. Ez jelenti a „technika állását”, amit a nanoelektronikának meg kell tudni haladnia.

¹ Vö. Korlátlan sáv szélesség és számítási teljesítmény elemzés.

Lényeges változáson fog átmenni a chipek konstrukciója is. A korábban kétdimenziós jellegű és alapvetően a felület mentén szervezett chipek 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 tervezési szabályok korábban a 0,5 mikronról 0,35-re, majd 0,25-re, majd 0,18 mikronra csökkentek. Elterjedőben van a 0,13 mikron tervezési szabállyal megalkotott áramkörök tervezése is. A nanotechnológiát jelentő 100 nanométeres határt a 60 nanométeres, illetve 45 nanométeres áramkörök megalkotása jelenti. Ezek az áramkörök 10^5 ... 10^6 kapuáramkört tartalmaznak. A chip mérete jellemzően 10x10 mm, a szeletátmérő jellemzően 300 mm. Speciális technológiai nehézséget jelent, hogy ezek az áramkörök 200-800 kivezetéssel rendelkeznek.

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 színeképeit használják megvilágításra, ami a fénysugár energiájának csökkenésével jár, tehát a megvilágítási idő növekszik.

Év	Egység	1993	1995	1999	2001	2003	2005	2008	2011	2014	2016
Jellemző méret	Micron/nm	0,50	0,35	180	130	100	80	70	50	34	22
Órajel	MHz/GHz	200	300	750	1,68	2,31	5,17	6,74	11,5	19,3	28,7
Logikai tranzisztorok	Millió/cm ²	2	4	6,6	13	24	44	109	269	664	
Mikroprocesszor	millió tranzisztor/chip	5,2	12	23,8	47,6	95,2	190	539	1523	4308	
DRAM méret	Mbit/Gbit	16	64	256	512	1	2	6	16	48	
SRAM méret	Mbit/Gbit	1	4	16	64	256					
Tápfeszültség	V _{dd}	5	3,3	2,5	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4

1. táblázat: A mikro- és nanoelektronika fejlődése

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/cmK	1,5	0,5	0,7	4,5	>1,5
Relatív dielektromos. Állandó		11,8	12,8	12,5	10,0	9,0

2. táblázat: Különböző félvezető anyagok tulajdonságai²

2.1 Technológia

A nanotechnológia 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. Ennek oka – többek között –, hogy a nanoméretű struktúrákban már nem keletkezhetnek akármilyen fononhullámok, ahogy tetszőleges energiájú illetve koherens

² Forrás: IEEE Spectrum vol.39, No 5, p.31. May 2002.

hullámhosszú elektronok sem. Amikor már olyan kis méretekig megyünk le, hogy a minimális fononenergia túllépi a termikus energiát, akkor már a kvantumfizika törvényei lépnek életbe. Ezek alapján arra lehet következtetni, hogy a fonontranszport is kvantált lehet, ahogyan az elektrontranszport.

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

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 funkcionizására számos módszert leírtak, és az a gyanúnk, hogy még többet titokban tartanak.

Az első jelentések a szén nanocső tér vezérlésű tranzisztorokról (Carbon Nanotube Field Effect Transistor, **CNTFET**) 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. Ezeknek a CNTFET-eknek a karakterisztikája hasonló a p-típusú MOSFET-ekéhez.

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

Az anyagválasztás lényeges szerephez jut CMOS áramkörökben alkalmazott dielektrikum anyaga is. A 3. táblázat a dielektrikumok relatív dielektromos állandójának 1 MHz-en mért értékét szemlélteti.

Anyag	Relatív dielektromos. 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 OSG,	2,5
SiOF	3,5
Szénnel adalékolt oxid (CDO)	3,0
Spin-on polimer	2,6

3. táblázat: Dielektrikumok relatív dielektromos állandója 1 MHz-en

Bár az anyagok jelentős részénél a dielektromos állandó értéke nagyobb, mint a szilícium-dioxid 3,9-es értéke, más előnyös tulajdonságok (például könnyű megmunkálhatóság) mégis jelentős alkalmazástechnikai előnnyel kecsegtetnek.

A kisméretű eszközöket tartalmazó integrált áramkörökben lényeges változáson megy át a chip konstrukciója is. A korábban kétdimenziós jellegű és alapvetően a felület mentén szervezett chip háromdimenziósak lesznek, amelyet például két chip egymás felé fordításával és összeerősítésével érnek el. A konstrukció során jelenleg a hővezetés mellett a chip felületén terjedő órajelek sebessége jelent gátló tényezőt. A chip méretnövekedésével

ugyanis az órajeleket egyre távolibb pontjukra kell elvezetni. Ezt a nehézséget – többek között – úgy is át lehet hidalni, hogy az órajelet a chip felületére a felette elhelyezett antennáról sugárzással juttatjuk a megfelelő helyre. E megoldás esetén az ún. off-chip antenna sugárzását a szilíciumchip felületén kialakított bot antennák veszik és juttatják el a vezérlendő áramkör részlethez. 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.

A kisméretű MOS-eszközök méretét két folyamat határozza meg: az egyik a nagy meghajtó áram, ami az eszközök optimálásához szükséges és a kis szivárgási áram, ami a disszipációt csökkenti. A konfliktus középpontjában a kapuelektroda dielektrikumuk 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 tranzisztor egyéb paramétereit, 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.

A nanoelektronika egyik leggyorsabban fejlődő területe a kijelzőkhöz, és az abban lévő meghajtó áramkörökhöz csatlakozik. Új kijelző technológia kifejlesztésében is betörték a nanoanyagok. Az elektroforetikus kijelzőben a képet töltött titán-dioxid pigmentek hozzák létre, amelyek 1 mikrométerű gömböcskékben helyezkednek el. A gömböket elektromos térerőben mozgatják. E konstrukció nagy előnye, hogy szitanyomással állítható elő, így tehát előállításuk olcsó.

Ezek a kijelzők várhatóan így ideig még nem lesznek versenytársai az **OLED**-eszközöknek (Organic Light Emitting Diode). Ezek piaci részesedése ugyanis elsősorban a mobiltelefonok és az MP3 lejátszók miatt, igen jelentős növekedést mutat.

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

A vegyület-félvezető anyagok tulajdonságai meghatározóak a létrehozható eszközök szempontjából (2. táblázat).

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 rendelkezett, de az árversenyben elbukott.

A III-V kvantumanyagokkal le lehet csökkenteni az elemszámot, de, még ha huszadrészére csökkenne is az elemszám, az árban egyelőre akkor is versenyképtelen lenne.

A vegyület-félvezető alapú eszközök versenytársai a szerves alapú eszközök is, ugyanis a jelenleg ismeretes szerves anyagok nem jelentenek közvetlen alternatívát a szilíciumalapú integrált eszközöknek. Alkalmazásuk elsősorban az olcsó eszközök terén várható. A szerves eszközök előállítása lényegesen olcsóbb és gyorsabb, mivel a szilíciumon integrált eszközök előállítása bonyolult, mert egykristályokat, több hetet, valamint egymás után következő, nagyszámú technológiai lépés megvalósítását követeli. A szerves anyagokból előállított vékonyréteg tranzisztorokban a mozgékonyság értéke általában nem haladja meg az egy cm^2/Volt szekundum értéket. A belőlük felépített eszközök megbízhatósága ma már eléri az ipari megbízhatóság határát.

A korszerű lézerekben is fontos szerepe van és marad a vegyület-félvezetőknél. Elvben mind a kvantumpöttyök, mind a nanoporozus-szilícium potenciálisan alkalmas arra, hogy hangolható lézereket készítsünk belőlük, ami nagy előnyük a hagyományos lézertanyaggal, így a szilárdtest lézerekkel szemben is.

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 spin kvantált, a két állapot között változik az iránya.³

Az a jelenség, amelyet ballisztikus mágneses ellenállásnak nevezünk a bemutatott kísérleti eredmények szerint egy négyzetinch felületen terabit nagyságrendű információtárolást 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.

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

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 működőképességüket.

Különösen a távközlési alkalmazások szempontjából fontos szerephez fogunk jutni Si/SiGe-p-MOSFET eszközök technológiájuk során igen lényeges, hogy meggátoljuk a SiGe vegyület-félvezető anyagból a Ge kidiffundálását. A szilárd oxid alapú tüzelőanyag cella (Solid Oxid Fuel Cell, **SOFC**) 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.

Mesterséges gyémánt rudakat (Agregated Diamond Nanorod, **ADNR**) hoztak létre C₆₀ fullerén molekulákat GPa-os nyomáson kezelve 2500 K fokon. Az így előállított mesterséges gyémánt kevésbé összenyomható, mint a természetes. Ez által gyémánt indenter előállítására kiválóan alkalmas, és meg tudja karcolni a IIa-típusú természetes gyémántot. Az anyag nagyszerűen alkalmazható lesz fémek és kerámiák megmunkálására.

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

- minden más anyagnál nagyobb szilárdság,
- kémiailag 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 ultraibolyáig átlátszó.

A nanogyémánt és a BMG kompozitok (Bulk Metallic Glas, **BMG**) a legnagyobb növekedési ütemet mutató nanoanyagok közé tartoznak. Előállításukra CVD technológiát használnak.

Mivel – mind fentebb említettük – a gyémánt súrlódási együtthatója kisebb, mint 0,1, ennek köszönhetően kenőanyagmentes fogaskerekek és megmunkáló eszközök állíthatók elő belőle. Gyémánt nanostruktúrák kialakíthatók azokon a közel egykristályos gyémánthordozókon, amelyek már egy inchnél nagyobb átmérőben is rendelkezésünkre állnak.

A nanoelektronikai elveken alapuló memóriák egyre növekvő szeleteket hasíthatnak ki szilíciumalapú memóriák területéből. Ezek mind a hagyományos szén nanocsövek, mind polimeralapú memóriák lehetnek. Az összeköttetést a későbbiekben nanohuzalok

³ V.G. Kantser: *Materials and structures for semiconductor spintronics*. In: *Optoelectronics and Advanced Materials*. 8, No2, 2006. pp.425-438.

biztosíthatják és a tárolt információ mennyisége elérheti a 100Gbit/cm² értéket. A technológia eltolódhat az alulról történő megközelítés felé, amely új tranzisztoranyagokat és új logikai struktúrákat eredményezhet. Ezek helyettesíthetik a CMOS áramköröket. Az olyan térvezérlésű tranzisztorok, amelyek nanocső, vagy nanohuzal alapú csatornákból állnak valamint a kvantumpötty alapú egy elektromos tranzisztor, amely kapacitásként szerepelhet, része lehet egy hibrid nano-mikroelektronikai struktúrának. Ezeknek az eszközöknek piaci bevezetését 2013-ra becsülik.

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

Az optikai kapcsolóelemek iránti igényt elsősorban az internet iránti igény növekedése fokozza. 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 már ma is lehetővé teszi ezt, azonban az árak nem elfogadható.

Az elektronikus papír (e-papír) igen sokat ígérő termék, szélesebb kereskedelmi forgalomba kerülése az elkövetkezendő években várható. A jelenleg versengő plazmás és folyadékkristályos kijelzők versenyét majd a befutó harmadik, a nanotechnológia nyeri meg. Az információátvitel egyébként a ponttár 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. Igen széleskörűen foglalkoznak az **AFM** (Atomic Force Microscopy) elvei alapján működő adattárolók kutatásával és fejlesztésével.

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, 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 Gbit/cm² számot, ami egy nagyságrenddel nagyobb, mint a mai legfejlettebb mágneses adattárolóknál. Az írás-olvasás gyorsaságát a tű (vagy inkább egy sor közelálló tű) piezoelektromos aktuátorokkal való rövid távú, de gyors mozgása biztosítja. A „Milliped” névre keresztelt adattárolók mintapéldányai már a laboratóriumi kísérletek stádiumában is bizonyítják a hozzájuk fűzött remények megvalósíthatóságát. Az egyes tűk információátviteli 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 3mm élhosszúságú négyzetre átszámítva 0,5 Gbit-nek felel meg.⁴

A nanocsöveknek mindössze az egyharmada fémes vezetést mutató tulajdonságú nanocső, a fennmaradó többség félvezető tulajdonságú. Akkor viselkednek félvezetőként, ha a tiltott sáv szélesség elegendően nagy ahhoz, hogy az elektronok ne tudjanak átlépni rajta megfelelő energiámmennyiség közlése nélkül. A nanocsövek átmérőjének növekedésével egyre több elektron állapot megengedett. A tiltott sáv szélesség tehát, a 0-tól indulva elérheti szilícium tiltott sávjának szélességét. Ez így igen jó lehetőség arra, hogy előre meghatározott tulajdonságú nanocsövet állítsunk elő.

A szén nanocsövek tulajdonságai nemcsak a saját felépítésüktől függenek, hanem visszafordítható folyamatok indulhatnak el, már egészen kis mennyiségű gáz adalékolása esetén is. Így például a félvezető állapotot átfordíthatjuk vezető állapotba is. Ennek

⁴ <http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages> (2007.08.21.)

segítségével rendkívül érzékeny gáزدetektorok állíthatók elő. Ha ezekből a nanocsövekből tervezérlésű tranzisztorokat készítünk, akkor azok is használhatók érzékelőként.

2.2 Alkalmazás

A szén nanocsövek várható alkalmazásai között sok a különböző tranzisztor.

Nemrég készült el egy olyan tranzisztor, melynek a csatornáját 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 tápfeszültség mellett is tud működni, amire a félvezető technika még nincs is felkészülve.

A Nanomix vállalat és a Kaliforniai Egyetem kutatói kifejlesztettek egy, igen kicsiny CO₂ koncentrációk érzékelésére alkalmazható szén nanocső alapú szenzort. A készülék lelke egy FET, amelyben a source-drain csatorna félvezető egyrétegű szén nanocsőből áll. A nanocsövet poly(etilén imin) és keményítő polimerek keverékével funkcionalizálják, majd vegyileg modifikálják úgy, hogy a szenzor érzékenysége 500 ppm – 10% lesz a levegőben. Kicsiny mérete és fogyasztása miatt a berendezés alkalmas a vezeték nélküli érzékelésre az iparban és az orvostudományban.

Az eddig ismert *p*-típusú Si nanoszál mellett elkészült az *n*-típusú egykristály nanoszál is. Az ilyen *n*-típusú szálaból készült tervezérelt tranzisztorok jó paraméterekkel rendelkeznek, a hordozók mozgékonyasága megközelíti a planáris Si FET-re jellemző nagyságot. Így lehetőség nyílik új komplementer *p-n* eszközök előállítására is.

Kísérletek folynak grafén benzol-gyűrű szerkezetű szénrétegekkel, melynek méretei eléri a 10 mikrométert és vastagsága egy mono-atomtól 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, kétdimenziós ballisztikus elektron transport figyelhető meg benne. A réteg volt-ámpere jellemzője lineáris és 10⁸ A/cm² áramot is mértek benne.

3. Folyamatban lévő kutatások, fejlesztések

A folyamatban lévő fejlesztések jelentős részben változatlanul új anyagok előállítására koncentrálnak, amelyekből még mindig tranzisztor szemléletű eszközöket állítanak elő. Így az új anyagokból olyan tervezérlésű tranzisztorok hozhatók létre, amelyekben a vezető csatorna kétdimenziós elektron- vagy lyuk-gázoknak megfelelő állapotba kapcsolható át a kapu feszültségének irányításával. Az „on/off” ellenállás hányadosa ugyan elég kicsiny (300 K foknál kevesebb, mint 30), de elegendő a logikai elemek működéséhez. A paraméterek további javítását a *p-n* átmenetek és a pont-kontaktusok kialakításától várják a kutatók. A szén nanocsövek szilíciumszeletek felületén ígéretes anyag kombinációt jelentenek. Ugyancsak lényeges megemlíteni, hogy a szén nanocsövek hővezetése kb. hétszerese a gyémántnál mérhető 3.000W/Km értéknél. E két előnyös tulajdonság tehát a nagy áramsűrűség és a jó hővezetés feltehetően jelentősen hozzájárul ahhoz, hogy nagyteljesítményű processzorokat állítsunk elő.

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

Az első lehetséges alkalmazás feltehetően az integrált áramkörökben levő fémmezéseket összekötő hidakban (*via*) 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, adalékolhatók és új típusú kapcsoló elemek hozhatók létre így.

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

Kísérleteznek folyamatokkal, amelyekkel többféle sáv szélességű anyagok állíthatók elő. A szilícium sok esetben üveggel helyettesíthető. A szén nanocsövek alkalmazásával a planár mikroelektronika feltehetően kiterjeszhető lesz háromdimenziós rendszerek létrehozása felé.

A szén nanocsövek megjelennek integrált eszközökben is.

Ellenőrzött szén nanocsöves rajzolatot alakíthatunk ki szilícium felületén is.

A legtöbb nanotechnológiai módszerrel előállított struktúra alkalmas beágyazó áramkörrel kombinálva elvezethet bennünket a nanoérzékelőkhöz. 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 tehetlenség.

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

A szén nanocsőből készült érzékelők érzékenységét kémiai kezelésekkkel is módosíthatjuk. E folyamatok során a nanocsövek felületéhez kovalens kötéssel különféle molekulákat kapcsolhatunk. Ezeket funkcionális csoportoknak nevezzük, ami arra utal, hogy jelentősen módosítják a szén nanocsövek (például elektromos) tulajdonságait.

Az érzékelőelem kialakítására általában valamilyen speciális rajzolatot kell létrehozni. A rajzolatok kialakítását igyekeznek a mikroelektronikai technológiából jól ismert Si/SiO₂ felületen megvalósítani. 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 olyan polimer, amelyet a nyomtatás alatt az üvegesedési hőmérséklet fölé melegítünk. A leggyakrabban használt anyag az elektron-litográfiában a PMMA (Poli-Metil-Meta-Acrlat, **PMMA**, kereskedelmi nevén plexi).

Az alábbiakban néhány példán szemléltetjük a nanotechnológiával létrehozott érzékelők lehetőségeit és sokszínűségét. Az áttekintésnek nem lehet célja a teljesség, mivel igen gyorsan fejlődő, nagyon sokszínű területről van szó. A nanoelektronikában alapelemnek számít az egyelektronos tranzisztor. Ha egy egyelektronos tranzisztort 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 áthaladására. Az érzékelők egyik legfontosabb felhasználási területe a robotika. E területen szinte valamennyi érzékelőt és ezek kombinációját is használják. Ennek példája a nanobőr, 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 egyidejűleg.⁵

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 a TPa nagyságrendbe esik. Lehetőség van szén nanocsövekből nyúlásmérő érzékelők kialakítására.

⁵ Proc. Nat. Acad. Sciences (Japan) Aug.17, 2005

Az erős szerkezet, a nagy rugalmassági modulus és a piezorezisztív tulajdonság indokolja a lehetőségét, hogy egy hosszú, összefüggő szenzort készítsenek nagy szerkezetek nyúlásméréséhez a struktúrahiba-detektálás (Structural Health Monitoring, **SHM**) számára. Korábbi kutatások kétféle megközelítést vettek figyelembe a CNT-n alapuló nyúlásméréseknek, ez a két alkalmazás a Raman-spektroszkópia és a piezorezisztív „buckypaper” nyúlásérzékelő. A buckypaper egy olyan szén nanocsövekből előállított, szövetszerű anyag, melynek alkotóelemei, a nanocsövek kb. tízszer könnyebbek az acélnál, de 250-szer erősebbek nála, és a keménységük kétszer akkora, mint a gyémánté. Ezek mellett kiváló mechanikai tulajdonságok mellett még rendkívül jó elektromos és hő vezetőképességgel is rendelkeznek.⁶

A nanotechnológiai érzékelők – mint fentebb vázoltuk – kistömegűek és alkalmasak igen kis tömegű minták analizésére is. Az analizéshez használt anyagmennyiség szintén a liter nanotartományába esik. Ezek az analizések gyakran spektroszkópikus módszerek. A lézerspektroszkópiában kiemelt szerephez jutnak azok a módszerek, amelyek kis térfogatú minták analizéséből megbízható eredményeket szolgáltatnak.

A nanotechnológia segítségével hőérzékelőket is készíthetünk. A hőérzékelő elem maga az egyfalú nanocső, amelyet szilícium/szilícium-dioxid felületén alakítanak ki.

A nanoszenzorok igen perspektivikus területe azok az alkalmazások, amelyek az emberi testeken belül működnek és semmiféle vezeték nem igényelnek a külvilág felé. Ezek az érzékelők gyakran a kémiai és biológiai elvű érzékelők határán helyezkednek el.

4. A várható fejlődés

Nem készíthető megbízható előrejelzés tíz-tizenöt évre, így csak rövid scenáriók vázolhatók fel.

A méretcsökkenés a Moore-törvény szerint 2016-ig végbemegy, a szilícium utáni (részben nélküli) korszakot megelőzi a SiO₂ nélküli korszak.

Mindenképpen számítani kell új kvantummechanikai, alacsony dimenziójú rendszerekben új jelenségek felfedezésével. Ezek öt-tíz év alatt tömegesen elterjedhetnek, mint visszamenőleg látjuk a GMR jelenség tömeges számítástechnikai alkalmazása példáján.

Csak az élvonalbeli félvezető eszközökben megy végbe anyagváltás, a domináns mikroelektronikai anyag a szilícium marad.

A tranzisztor-szemléletű áramkörü konstrukcióról a hangsúly a funkcionális egységekre tevődik át. Ezek minden bizonnyal fognak szerves anyagokat tartalmazni; alapelem lehet a szilícium-fehérje párosítás.

⁶ Barry Ray: „Buckypaper”: stronger than steel, harder than diamonds. 2005. október 20 (<http://www.physorg.com/news7435.html>).



1. ábra: Várható fejlődés (2008-2018)

5. Befolyásoló tényezők

Jelenleg nem tudjuk meghatározni az összes hatóerőt. Ezek feltehetően meghaladják a mikroelektronika ilyen jellegű folyamatait, mivel itt hangsúlyozott szerephez jutnak a szerves anyagok is.

Az IKT más területein felmerülő technológiai fejlemények közül a sebesség növelése, az információátvitel iránti igény növekedése jelenti elsősorban a húzóerőt. Meghatározó szerepet játszik az anyagtudomány fejlődése. Feltehetően a legkülönfélébb struktúrák előállításáról a nanoeszközök fejlesztésére tevődik a hangsúly át, azaz hasonló lesz a fejlődés, mint a félvezető heteroszerkezetek esetében volt, ahol szintén az anyagok sokféleségéből választották ki azt a néhányat, amelyek az ipari alkalmazások döntő hányadát jelentik.

5.1 Technológia

A technológiai változások mind a szerves, mind a szervesetlen világban fontosak. Lényeges lesz a szervesetlen rendszerek önszerveződése, mert ennek ismeretében a mikroelektronikai ismeretek is hasznosulhatnak a nanoelektronikában (például SiO₂ önszerveződése).

A technológiai fejlődés elsősorban az egyelektronos tranzisztor és a nanocsövek területén lesz jelentős. Biztosnak látszik, hogy a CMOS eszközöket csak valamilyen hibrid megoldással válhatjuk ki. A nagyságrendileg 5 nm-es kapuhossz elérése feltehetőleg nem a Si-alapú eszközökkel történik majd, bár a szilícium szerepe megmarad. Önmagában az egyelektronos tranzisztor és a CMOS technológia komplementernek tekinthető, így nem válják ki egymást. Bejelentették az első nyomdaipari technológiával előállítható szén nanocsöves tranzisztor.⁷ Hatását nehéz túlbecsülni, elsősorban az eldobható elektronikus eszközök szempontjából lesz jelentősége, megsemmisülése során CO₂ keletkezik.

⁷ NEC sajtóközlemény, 2008. február 14.

5.2 Társadalom és gazdaság

Egy új technológia megalkotása során igen lényeges és gyakran a technológia megalkotásával összemérhető ráfordítást igénylő feladat a technológia gazdasági-társadalmi hatásainak felmérése. A társadalmi hatások alatt értjük nemcsak a társadalom egyes tagjaira gyakorolt közvetlen, 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 – és sok esetben a tárgyunkat jelentő nanoelektronika – 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 kipufogó gázainak tisztítását,
- könnyebb és nagyobb szilárdságú anyagok nagytömegű előállítása nagyobb hatékonyságú és fokozottabb biztonságú járművek előállítására,
- olyan gyógyszerek előállítása, amelyek programozott lebontásúak, céljuk a rákos sejtek elpusztítása és egyéb célzott hatások elérése,
- költséghatékony és megbízható szűrők előállítása a víz és a levegő tisztítására, beleértve a tengervíz sótalanítását is,
- a napenergia hatékony hasznosítása,
- tüzelőanyag-cellák előállítása, elsősorban járművekben alkalmazható kivitelben,
- kompozit anyagok előállítása, speciális felhasználása, ahol a polimereket nanorészecskékkel erősítjük meg,
- tervezett lebontású táp- és rovarölő anyagok,
- új meghajtó egységek (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.

*A társadalmi hatások közül a kockázat emelendő ki.*⁸ Ezek elemzésénél abból kell kiindulni, hogy 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 függenek össze,
- politikai kockázat, amely elsősorban abból ered, hogy az egyes országok és régiók szerepe átértékelődik,
- a miniatűrök, szenzorok megjelenése 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.

⁸ Vö. Mojzes I.: *A nanotechnológia kockázati tényezői*. ELEKTRONet, XII. évf. 2. szám. 2008.

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.

A kockázatot befolyásoló további 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 történik, 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 kezelhetőek.

A kockázati tényező korrekt meghatározása céljából lényeges megemlíteni a pozitív hozadékokat is. Ezek hozzásegíthetnek ugyanis például a tiszta ivóvízellátás, hatékonyabb energiakonverzió és energiátárolás megvalósításához. Az átlátható és az átlagember számára érthető előnyök és kockázatok elemzése könnyebbé teszi, hogy a társadalom elfogadja ezt az új technológiát. Fontos hangsúlyozni, hogy a kockázatot képesek vagyunk ellenőrzésünk alatt tartani.

6. Várható hatások

Ezeket a lehetőségeket elsősorban a *molekuláris nanotechnológia* köré csoportosítják. A molekuláris nanotechnológia alapötlete az, hogy olyan robotokat hozunk létre, amelyek atomok vagy molekulák csoportba rendezésével molekuláris szinten képesek létrehozni anyagokat. Ez új anyagokhoz vezethet, amelyek nem találhatók meg a természetben, és nem hozhatók 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 lépés, amely abban foglalható össze, hogy ezek a molekuláris gépek elkezdik saját maguk kópiáját létrehozni, és így az képes lesz ismét a saját maga kópiáját létrehozni, azaz ezek a kis gépek exponenciális növekedési ütemben szaporodnak. Elméletben a nagy komplex struktúrák előállíthatók ilyen atomi pontossággal megvalósított rendszerekből. Elvben még a gyémánt esetében is megtehetjük. Ha elfogadjuk hogy ilyen általános célú, programozható szerelőgépeket hozhatunk létre, akkor meg kell tudnunk mondanunk azt is, mi az, amit létrehozhatunk majd.

Ha feltételezzük, hogy ilyen molekuláris szintű szerelőgépek létrehozhatóak, és termelésük gazdaságilag kifizetődőbb, akkor nincs értelme azt állítanunk, hogy tíz vagy húsz éven belül ezek ne bírnának jelentős gazdasági haszonnal. Hogy e fejlődésen belül mi lesz a nanoelektronika szerepe a szabályozásban, a folyamat vezérlésében, ma nem látjuk. Jelenleg nem becsülhető meg az sem, hogy mennyi lesz az önszabályozás szerepe, mennyi lesz az érzékelésen alapuló szabályozott építkezés aránya.

A mikroelektronikában befejeződött a méretcsökkentés kora, amikor az elemi tranzisztor méretei csökkenésével javultak az integrált áramkörök (IC) műszaki-gazdasági paraméterei. Helyettük új problémák jöttek elő, amelyeket elsősorban a hőterhelés okoz. Erre is megoldást jelent a szén nanocsövek és a félvezető tulajdonságú, közel monolit szerkezetű, nanohuzalok alkalmazása az áramkörökben. Míg korábban az IC ipar fő húzóereje a PC és a híradástechnikai ipar voltak, ezek helyét a nanoelektronika fő húzóerejének tekintett rejtett számítógépek, az intelligens szenzorok, a hordozható eszközök és az orvosi eszközök jelentik. Bár ezek a követelmények is megkívánják a miniaturizálást és a tárolókapacitás növelését, a hangsúly azonban nem a számítási teljesítmények növelésén, hanem a rugalmasságon és az energiamutatók javulásán van. Felértékelődik az ember-gép és a gép-környezet kölcsönhatása. Az egyelektronos tranzisztortechnológia igen alacsony fogyasztás és nagy elemsűrűség esetén jelenthet megoldást, míg a CMOS a nagysebességű és nagyáramú alkalmazásoknál tartja meg vezető szerepét.

6.1 Technológia

Elsősorban az *információtárolás* lesz az a terület, ahol a mikroelektronika felől közelítő nanoelektronikai eszközök kifejtik hatásukat. Szerephez jutnak benne a plazmonok, amelyek lehetővé teszik a hullámhossz századrésznél is kisebb felbontást.⁹

A technológiában dominál a tranzistor-központú szemlélet, igyekeznek a csíkszélességet csökkenteni. Ez jelenleg 300 nm átmérőjű szilíciumszeleten valósul meg. Kész a 450 nm átmérőjű szelet is, de bevezetésének gazdasági korlátai vannak.

6.2 Gazdaság

Ma még csak feltételezzük, hogy a nanoelektronikai termékek ugyanúgy áthatják a gazdaságot, mint tette azt a mikroelektronika.

Csak *egy szegmenst* vizsgálunk meg, ez maga az IKT. A nanoelektronika termékei először integrált áramkörként jelennek meg. Ezek FPGA és más típusú memóriák, melyeket feltehetően szórakoztató elektronikai termékek követnek (például egy chipes DVD).

Az érzékelők területén igen sok kezdeményezést, ötletet találunk a szakirodalomban.

Így nano mágneses részecskéket tartalmazó bárkódot készítettek. Permalloy nanorészecskéket tartalmaznak a vonalak. A másolásnál a mágneses tér megsérül, így hamisíthatatlan. A ballisztikus mágneses effektus (ballistic magnetoresistance effect, **BME**) az elektromos ellenállás megnövekedésével jár. Ez 100... 10000 %-ig terjed. A mágneses tér hatására a részecskék összeállnak, és jobban vezetnek. Ez is felhasználható igen gyenge mágneses terek érzékelésére. Mustárgáz mikrofűtő érzékelő 1 per millió érzékenységgel, fémoxiddal borított fűtőelemének ellenállása változik meg. Ezt egy neurális tanuló hálózathoz kapcsolják. Igen kis koncentrációk érzékelésére alkalmas.

Mások gyorsulásérzékelőt építenek a pacemaker mellé, azzal érzékelik a páciens fizikai aktivitását, s ehhez igazítják a szívverés számát.

Az információtárolásban a határfelületi effektusok meghatározó szerephez juthatnak, a transzportfolyamatok hullám-jellegűvé válnak, a kvantumhatárolás (quantum size confinement, **QSC**) jól megfigyelhetővé válik. Az ilyen rendszerekben mérhető gigantikus mágneses ellenállás-változás (Giant Magnetoresistance Effect, **GMR**) jelensége igen érzékeny mágneses szenzor megalkotását teszi lehetővé. A jelenség alkalmazható mágneses RAM memóriák létrehozására is. A korábbi 1 kbit-es ferritgyűrűs memóriaelemekkel szemben itt 100 Mbit-es chipek készülnek. Ezekben az elemekben a hozzáférési idő igen rövid, 10 nanosec-os nagyságrendű. A tárolók nem igényelnek az információ tárolására tápfeszültséget, nagyon jó a sugárzásállóságuk, ami tovább növeli alkalmazhatóságukat.

A milliped típusú memóriák jelentős információtárolási sűrűséget nyújtanak.

A mágneses lemezek kapacitása a Moore-törvényhez hasonló módon alakul. A DRAM memóriák gyors hozzáférést tesznek lehetővé, azonban a bitenkénti információtárolás drága.

Mivel a mágneses tárolási módszerek egyre nagyobb fajlagos sűrűséget és alacsonyabb költséget nyújtanak, a nanotechnológiai memóriafejlesztés elsősorban abban az irányban indult meg, hogy lehetővé váljon elegendő nagy kapacitás és a tárolt adatok megőrzése a RAM típusú memóriákban is. A cél itt az, hogy ezek a nanotechnológiai alapú memóriák alkalmazhatók legyenek személyi számítógépekben is.

A bennünket körülvevő eszközök egyre nagyobb mértékben személyre szabottak és hordozhatóak. E tulajdonságok megkövetelik, hogy az egyes készülékek önálló energiaforrással rendelkezzenek. Az energiatárolás másik jelentős kihívása az elektromos és/vagy vegyes üzemelésű személygépkocsi. Ez vezetett a nanotechnológia alkalmazásához e területen, amely a szén nanocsövek első tömeges alkalmazását jelenti. A szén nanocsövek ugyanis jelentősen nagyobb felületet jelentenek, mint a tömbgrafit, ezáltal növekszik a grafít

⁹ Kroó Norbert személyes közlése.

anód kapacitása. A töltés többek között ezért is korlátos, hiszen az ilyen jelentős mechanikai deformáció töréshez vezethet. Itt is jelentkezik a szén nanocsövek alkalmazásának előnye, mivel mechanikai tulajdonságaik lényegesen jobbak, mint a grafité, szakítószilárdságuk még az acélhuzalok vonatkozó értékét is hétszeresen meghaladja.

A híradástechnikai alkalmazások közül megemlítenők még a különféle hangolásra használható mozgó elemeket, bár ezek inkább az MEMS technológia területéhez tartoznak.

6.3 Társadalom

Az átlagember feltehetően először a nanoélelmiszerekkel¹⁰ és gyógyászati alkalmazásokkal találkozhat. Mindkét területen erős a költségérzékenység. Nagy a veszély, hogy ez elmossa a várható előnyöket.

Az önszerveződés – mint várhatóan kiemelkedően hatékony technológia – és a nanorobotok jelentősen növelhetik a munkanélküliséget.

7. Hazai helyzet

A hazai helyzet sajnálatos sajátossága, hogy a nanotechnológia terén nem létezik semmiféle központi program.¹¹ A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány miskolci kezdeményezése – bár hivatalosan bírja a kormány támogatását – fontos lépés, de nem tekinthető kormányzati programnak.

7.1 Jelenlegi helyzet

A nanotechnológiában Magyarországon elsősorban a gyógyszeripar területéről várhatunk tömeges alkalmazást. Mintegy negyven helyen folyik kutatás-fejlesztési tevékenység, illetve kismennyiségű gyártás (például a festékiparban).

Az egyetemi és az akadémiai szféra k+F tevékenysége ismereteink szerint még nem jutott el szabadalmaztatható megoldási szintig. Elsősorban a szerves területen folyik kutatás.

A nanoelektronikával két egyetemen (Debreceni Egyetem, PPKE) foglalkoznak.

7.2 Kutatások, fejlesztések és a várható fejlődés

A várható fejlődésben meghatározó lesz az EU 7. keretprogramjában történő pályázatok sikeressége. Ez ma még nem ítéhető meg. Fontos szerephez juthatna az OTKA pályázati rendszer is, azonban az ott jellemzően megítélt források nagysága csak egészen behatárolt kutatási tevékenységre ad lehetőséget.

7.3 Befolyásoló tényezők és hatások

A legjelentősebb hatást a tervezett központi intézkedések és az EU-s pályázati pénzek jelentik. Lényeges előrelépés lenne, ha sikerülne legalább informális koordinációt megvalósítani a mintegy harminc hazai kutatóhely tevékenysége között.

8. Összegzés

A terület feltétlenül alkalmas kutatási tevékenységre. A korábbi mikroelektronikai, rendszertechnikai, beágyazott rendszerekkel kapcsolatos kutatásokat kell itt is hasznosítani. Elsősorban a mérés- és szimulációfejlesztendő.

A nanoelektronika kutatási súlypontjai ma az új anyagok előállításán és a nanoeszközök alkalmazástechnikáján vannak. Még mindig újabb anyagokat tárnak fel, holott az

¹⁰ Az első hazai nanoélelmiszer minták elkészültek.

¹¹ Gyulai József előadása az MTA 2007. májusi ülésén.

alkalmazástechnikától várhatunk gazdasági eredményeket. Nem valószínű ugyanis, hogy a tömeges alkalmazások ne a szén és/vagy a jól bevált elemi és vegyület-félvezetők területéről kerüljenek ki.

A félvezető Si, Ge, In₂O₃, ZnO és SnO₂ nanohuzalokra már vannak megfelelő technikák, amelyek a kutatást ellátják a megfelelő struktúrákkal. Ezek az egydimenziós félvezető anyagok általában epitaxiásan nőnek a hordozó felületére. Alkalmazhatók MOS-tranzisztorok csatornájaként is, és lehetnek a háromdimenziós információtárolás eszközei is.

A hazai kutatások jelenleg átfogó stratégia nélkül, a pályázatok esetlegességei között, történnek. Szükség lenne egy intézményesült stratégiára.

Ennek a lehetséges stratégiának három elemét emelnénk ki:

1. A transzportfolyamatok (elektromos, fény, hő) mélyebb megértése, támaszkodva az alapkutatási eredményekre. Ezeket a folyamatokat a DC... THz-es tartományban kell vizsgálni.
2. Az önszerveződés lehetőségeinek mind teljesebb feltárása, hogy olcsóbbá tegyük a termékeket.
3. Kombinált rendszereket kell vizsgálni, nem a hagyományos mikroelektronikát kell helyettesíteni. Mindenképpen figyelembe veendőek a szerves anyagok.

Ajánlott irodalom

- Bhusham, B.: *Nanotechnology Laboratory for Information Storage and MEMS/NEMS*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- Busnaina, A.: *Nanomanufacturing Handbook*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- Gad-el-Hak, M.: *MEMS – Design and Fabrication*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- Jones, R. A. L.: *Soft Machines – Nanotechnology and Life*. Oxford University Press, 2005.
- Mamalis, A. G. – Vogtländer, L. O. G. – Markopoulos, A.: *Nanotechnology and nanostructured materials*. Trends in Carbon Nanotubes, Precision Engineering, vol. 28, pp. 16-30. 2004.
- Mojzes Imre (szerk.): *Mikroelektronika és technológia*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2005.
- Mojzes Imre – Molnár László Milán: *Nanotechnológia*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2007.
- Monoruzzaman, M. – Winey, K. I.: *Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes*. Macromolecules, 39, No 16, pp. 5194-5205. 2006.
- Rogers, B.: *Nanotechnology – Understanding Small Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- Simpkins, B. S. – Phersson, P. E. – Laracuate, A. R.: *Electrical Conduction in GaN Nanowires*. Applied Physics Letters, vol. 88, 072111, 2006. április 10.