

## 4. NANOELEKTRONIKA – LEHETŐSÉGEK, KORLÁTOK

Mojzes Imre

*A mikroelektronikai áramkörök tervezési méreteinek (szabályainak) csökkentésével, nanoelemek – elsősorban nanocsövek – kapcsolástechnikai alkalmazásával egyaránt létrehozhatunk olyan kapcsolási elrendezéseket, amelyek az alapvető logikai funkciókat megvalósítják.*

### **1. Megnevezés és rövid leírás**

Ma már elfogadott NANOTECHNOLÓGIÁRÓL és nanotudományról beszélni. A nanoelektronika még csak az utóbbi terület része, a vizsgált időszakban azonban a NANOTECHNOLÓGIA körére is kiterjed. Ennek a folyamatnak kiugróan fontos része a nano tartomány felső részébe eső méretű memóriaáramkörök kereskedelmi forgalomba kerülése.

A nanoelektronikai áramkörök ma még a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenésével jönnek létre. Alapvetően CMOS típusúak és szilícium alapúak. A dielektrikumot illetően széleskörű keresés folyik, hogy a SiO<sub>2</sub> 3,9-es dielektromos állandójánál kisebb értékkel rendelkező anyagot találjanak. A látókörbe kerültek szerves dielektrikumok és fluoridok is. A fémzés terén is le kell cserélni a jól bevált alumínium fémzést, ezt rézzel, ill. réz alapú ötvözetekkel helyettesítik. Egyelőre az epitaxiális szilícium alapanyagként megmaradni látszik, de lényeges lesz az amorf szilícium/germánium multiréteg. Megjegyezzük, hogy a szilícium-germánium félvezető tranzisztor alapanyagként is lényeges szerephez jut.

A nanoelektronika másik nyersanyaga a nanocső, ebből lényegében mindenki az egyfalú szén nanocsövet (SWCN) preferálja. Ennek felhasználásával az elemi áramkör készlet megvalósítható. Itt is a hagyományos áramköri kapcsolások új anyaggal történő megvalósításán van a hangsúly.

Lényeges, hogy az alábbiakban említett tendenciák ma még az egész nanotechnológiára jellemző, nem alakultak ki minden esetben a tárgyunkat jelentő nanoelektronika sajátosságai.

### **2. Jelenlegi helyzet**

A mikroelektronikai termékfejlesztésben ezért elsősorban konstrukciós megoldásokkal és az egyes elemek méretének 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 analóg és/vagy nagyteljesítményű eszközöknél – nem figyelhetők meg.

A memória áramkörök jellemzésére nemzetközileg elfogadott módszer Gordon Moore törvénye; ennek alapján számolták ki a 1. táblázatban feltüntetett eredményeket.

Mint látható, a fejlődés kb. 2016-ig prognosztizálható és elsősorban a DRAM áramkörök terén a törvényt is meghaladó mértékű fejlődéssel számol; valamint a chipenkénti tranzistorok 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, ezek az anyagok a szilícium sávzélességét és MOZGÉKONYSÁGÁT messze meghaladó előnyös tulajdonságokkal rendelkeznek. Az anyagválasztásban lényeges szerephez jut a CMOS áramkörökben alkalmazott dielektrikum anyaga is.

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

Lényeges változáson fog átmenni a chipék konstrukciója is. A korábban kétdimenziós jellegű és alapvetően a felület mentén szervezett chipék háromdimenziósak lesznek, amelyet pl. 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 méretének növekedésével ugyanis az órajeleket a chip egyre távolibb 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. 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 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 90 nanométeres ill. 70 nanométeres áramkörök megalkotása jelenti. Ezek az áramkörök  $10^5 \dots 10^6$  kapuáramkört tartalmaznak. A chip mérete jellemzően  $10 \times 10$  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 LITOGRAFIA döntően még mindig fotolitográfiát jelent, igaz, hogy egyre egzotikusabb anyagú világítótestek, egyre távolibb vonalas

színképeit 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 tranzistorok	Millió/cm <sup>2</sup>	2	4	6,6	13	24	44	109	269	664	
MIKROPROCESSZOR	Millió tranzistor/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 <sub>dd</sub>	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 <sup>2</sup> /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: Különféle félvezető anyagok tulajdonságai

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

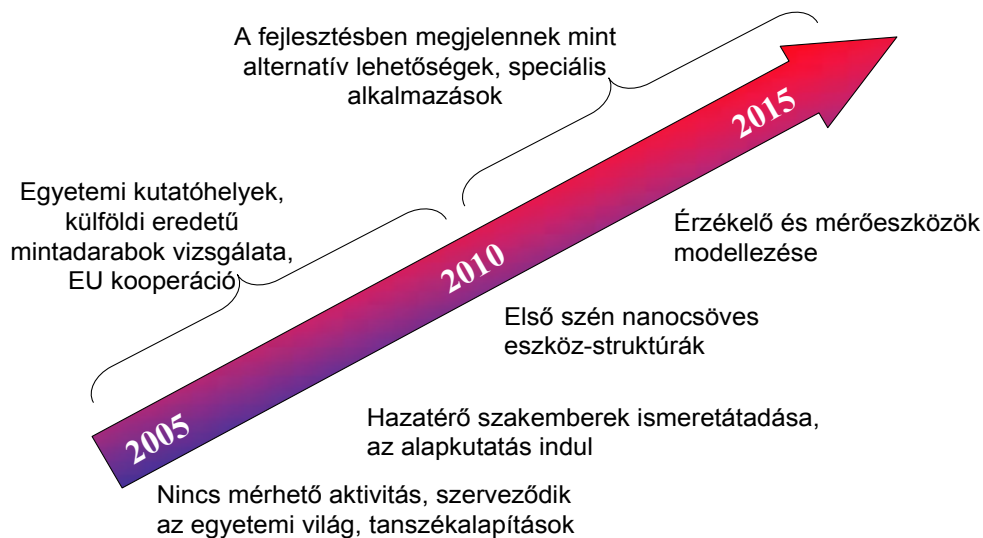
### 3. A várható fejlődés eredményének jellemzése

Míg az ezredforduló környékén az IC technológia fő hajtóereje a személyi számítógépek teljesítményének növekedése volt, ezt a hajtóerőt a beépített rendszerek és az intelligens eszközök jelentik majd. Lényeges lesz, hogy a számítási képességekhez mindig kommunikációs képességek is társulnak, így az IC-k egyre inkább „hibrid” jellegűek lesznek, integrálva az érzékelést, jelfeldolgozás funkcióit és a kommunikációt.

Ez feltehetően a Moore-törvényt is meghaladó (More Moore) ütemű fejlődést is igényel.

A lényeg azonban már nem a még nagyobb számítástechnikai teljesítményen, hanem a hatásfokon, és a rugalmasságon, az alkalmazás sokszínűségén lesz. Az eltemetett rendszerek, amelyben az eszköz és a felhasználó, valamint az eszköz és a környezet közötti kölcsönhatás felértékelődik, már olyan technológiákat igényel, amelyek túlmutatnak a CMOS technológián, nevezetesen RF, MEMS, érzékelők, kijelzők, teljesítmény eszközök. Ezek azonban sok esetben majd csak úgy hozhatóak létre, ha a fizikusok, vegyészek, biológusok, orvosok még szorosabb integrációban dolgoznak. Az integrálódás platformja azonban már a nanotudomány és nem csak a szorosan vett nanoelektronika szintjén valósul meg. A ma is létező biosZENZOROK és a neurons-on-chip eszközök mintegy előképei ennek a fejlődési modellnek, mivel a „hagyományos” szerves mikroelektronikai áramkörök felületén felületi kémiai eszközökkel hozzák létre a szigorú planár geometriájú szerves rendszer és a látszólagosan kaotikus felépítésű szerves neuron együttműködését. Ezen eszközök már más típusúak, így nem írhatóak le Moore törvényével (More than Moore).

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 olyan új anyagok létrehozásához vezethet, amelyek nem találhatók meg a természetben, és amelyek nem hozhatók létre a kémia szokásos módszereivel. A modellezésnek, amely ezeknek az anyagoknak létrehozását és stabilitását segíti elő szintén molekuláris szinten kell mozognia.



1. ábra: Várható fejlődés 2005-2015

Ezután következik a második nagy lépés, 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 struktúrák ilyen atomi pontossággal megvalósított rendszerekből létrehozhatók. Elvben ezt még a gyémánt esetében is megtehetjük. Ha elfogadjuk, hogy ilyen általános célú, programozható

szerezőgépeket hozhatunk létre, akkor meg kell tudnunk mondanunk azt is, hogy mi az, amit létrehozhatunk majd.

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. Hogy e fejlődésen belül mi lesz a nanoelektronika szerepe a szabályozásban, a folyamat vezérlésében, ma nem látjuk. Ma nem becsülhető meg, 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 IC-k műszaki-gazdasági paraméterei. Helyettük új problémák merültek fel, 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 már az ember-gép és a gép-környezet kölcsönhatásán lesz.

Az egyelektronos tranzisztor technológia az igen alacsony fogyasztás és a nagy elemsűrűség esetén jelenthet megoldást, míg a CMOS a nagysebességű és nagyáramú alkalmazásoknál tartja meg vezető szerepét.

#### **4. Szükséges technológiai előfeltételek**

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

A technológiai változások mind a szerves, mind a szervetlen világban fontosak. Lényeges lesz a szervetlen rendszerek önszerveződése, mert ennek ismeretében a mikroelektronikai ismeretek is hasznosulhatnak a nanoelektronikában (pl. SiO<sub>2</sub> önszerveződése).

A technológiai fejlődés elsősorban az egyelektronos tranzisztor és a nanocsövek területén lesz jelentős. Biztosnak látszik, hogy a CMOS eszközöket csak valamilyen hibrid megoldással válthatjuk ki. A nagyságrendileg 5 nm-es kapuhossz elérése feltehetőleg nem a Si-alapú eszközökkel történik majd, bár a Si szerepe megmarad. Önmagában az egyelektronos tranzisztor és a CMOS technológia komplementernek tekinthető, így egymást nem váltják ki.

## **5. Folyamatban lévő kutatások, fejlesztések**

A folyamatban lévő projektek még mindig szélesítik a nanoanyagok körét. Leginkább a szén alapú nanorendszereket vizsgálják. Ezek már termékként is megjelennek, a hosszúság a kereskedelmi termékekben 10 mikronig terjed. Szinte valamennyi EU projektben van NANOTECHNOLÓGIAI rész, nem egy esetben nanoelektronikai témájú pályázatokkal is lehet pályázni.

A terület része az ICT fejlesztésnek, ahol az EU a 2007-2013 évekre a K+F ráfordítások évi 80 %-os növekedésével számol. A „Nanotudomány és nanotechnológia: cselekvési terv Európa számára 2005-2009” c. dokumentum (Brüsszel 07/06/2005) termék szinten is definiálja a nanoelektronikát.

## **6. Az IKT más területeire való hatások bemutatása**

A nanoelektronika termékei először INTEGRÁLT ÁRAMKÖRKént jelennek meg. Ezek FPGA és más típusú memóriák lesznek. Ezeket feltehetően szórakoztató elektronikai termékek követik (egy chipes DVD).

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

Így nano mágneses részecskéket tartalmazó vonalkódot készítettek. PERMALLOY nanorészecskéket tartalmaznak a vonalak. A másolásnál a mágneses tér megsérül, így hamisíthatatlan. Ballisztikus mágneses effektus (ballistic magnetoresistance effect) 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, ezzel 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) 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 chippek készülnek. Ezekben az elemekben a hozzáférési idő igen rövid, 10 nanosec-os nagyságrendű. A tárolók nem igényelnek az információ tárolására tápfeszültséget, igen 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 igen gyors hozzáférést tesznek lehetővé, azonban a bitenkénti információ tárolás 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 alkalmazhatóak 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 energiátárolás másik jelentős kihívása az elektromos és/vagy vegyes üzemelésű személygépjármű. 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 tömbi grafit, ezáltal növekszik a grafit anód kapacitása. A töltés többek között ezért is korlátos, 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.

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

## **7. Társadalmi-gazdasági hatások elemzése**

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 – és sok esetben a tárgyunkat jelentő nanoelektronika – a belátható jövőben jelentős szerephez juthat:

- a korábbinál jobb hatékonyságú INTEGRÁLT ÁRAMKÖRÖK előállítása szén nano csövekből,
- 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, amelyeknek célja 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 előállítása,
- tüzelőanyag cellák előállítása, elsősorban járművekben alkalmazható kivitelben,
- kompozit anyagok előállítása, speciális felhasználása, ahol a polimereket nano részecskékkel erősítjük meg,
- tervezett lebontású táp- és rovarölő anyagok,
- új meghajtóegységek elsősorban űrbeli alkalmazása,

- nanoméretű érzékelők előállítása,
- nano bevonatok, így öntapadó, hőelnyelő, hővisszaverő tulajdonságokkal, illetve ezekkel egyidejűleg.

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.

## **8. Magyar vonatkozások**

A nanotechnológiában Magyarországon elsősorban a gyógyszeripar területéről várhatunk tömeges alkalmazást. Mintegy 40 helyen folyik K+F tevékenység, illetve kismennyiségű gyártás (pl. festékipar).

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

A nanoelektronika három területen jelenhet meg eredményként hazánkban. Az egyik a KKV-kben folytatott IC tervezés területe. Itt tervezési, szimulációs eredmények várhatóak.

Megemlíthető továbbá a MEMS kutatás. Itt elsősorban spin-off cég megjelenése hozhat új eredményeket. A várható termék érzékelő.

Két egyetemen, a Debreceni Egyetemen és a Pázmány Péter Katolikus Egyetemen kezdődött nanoelektronikai kutatás, és a nano eszközök alkalmazása.

Valószínű, hogy az előállított nanostruktúrák elektromos és optikai minőségéből állnak elő az első elemi eszközök. Ezek elsősorban érzékelő és/vagy egyéb analóg területeken történő alkalmazást valószerűsítene. Anyaguk a szén nanocső és a vegyület-félvezető alapon létrehozott nanoszerkezet és ezek áramköri viselkedése.

## **9. Következtetések**

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

A nanoelektronika kutatási súlypontjai ma az új anyagok előállításán és a nanoeszközök alkalmazástechnikáján vannak.

A félvezető Si, Ge,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO és  $\text{SnO}_2$  nanohuzalokra már vannak megfelelő technikák, amelyek a kutatást ellátják a megfelelő struktúrákkal. Ezek az egydimenziós félvezető anyagok általában epitaxiásan nőnek a hordozó felületére. Alkalmazhatóak MOS tranzisztorok csatornájaként is. Lehetnek a háromdimenziós információátvitel eszközei is.

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