

ÚTBAN A NANOELEKTRONIKA FELÉ

Mojzes Imre

a műszaki tud. doktora,
egyetemi tanár, BMGE
mojzes@ett.bme.hu

Farkas Zoltán Bertalan

főiskolai tanársegéd,
Budapesti Műszaki Főiskola
zbfarkas@yahoo.com

Bevezetés

A nanoelektronika az elektronikának az a területe, ahol az eszközöknek legalább egy jellemző mérete 100 nanométer alá esik. Ez a jellemző méret lehet a tervezési szabály (design rule) mérete is. Az eszközök mind molekuláris elektronikai módszerekkel, mind a ma használatos félvezető technológiai eljárásokkal előállíthatóak (Bushan, 2004).

A nano előtag azt jelenti, hogy az utána következő mértékegység egymilliárdod része (10⁹-ed része). Szemléltessük ezt az alábbi példával. Jó közelítéssel feltehetjük, hogy az indiai szubkontinens lakossága egymilliárd fő. Ha ezek az emberek lazán kezét fognának, és képzeletben felsorakoznának az Egyenlítő körül, amelynek hossza 40 750,704 km, akkor ez az emberson huszonnégyszer érné körül a Földet. Elfogadott terminológia szerint az a nanotechnológia, ahol az előállított objektum méretében legalább egy dimenzió 100 nm alatt van. Ez tehát azt jelenti, hogy ebből az emberfolyamból egy képzeletbeli nano jelzővel mindössze 100 (!) főt illethetnénk.

Vigyük tovább a hasonlatot. A félvezető anyagok rácsállandója a 0,5 nm-es tartományba esik (Si 0,543 nm, GaAs 0,565 nm). Ez tehát nem tesz ki egy embert sem. Ha elfogadjuk, hogy a jellemző atomi méret 0,2 nm, ez

sem tesz ki egy embert. Ma a szén nanocső jellemző hossza, amit technológiailag elő tudunk állítani, az ezer embernek megfelelő hosszúság nagyságrendjébe esik.

Az elfogadott nézet szerint a nanoelektronika fejlődését a mikroelektronikából származtatjuk, mivel az egy kihagyhatatlan szakmai kultúra (Mojzes, 2005). A mikroelektronikából való származtatás kétségtelenül az előrejelzés (forecasting) vonalat jelenti, és ennek pontosítására törekszik. Itt természetesen figyelemmel kell arra is lenni, hogy egy ismert összefüggés, ha lehetséges, segíti annak megvalósulását (Roberts, 2005).

A mikroelektronika terén sok tekintetben ez a fajta előrejelzés a gyakorlatban jól használható elemzést ad a technológia fejlődésére. Erre példa a *Moore-törvény*, amely negyven éve jól leírja, hogy a feldolgozási kapacitás másfél évenként legalább a kétszeresére nő; a *Gilder-törvény*, ami a kommunikációs rendszerek sávszélessége évenkénti megháromszorozódásáról beszél; és a *Ruettgers-törvény*, amely a memóriachipek kapacitásának évenkénti duplázódását írja le (Dömölki, 2005). Itt ezért nem kell olyan alternatívákat, scenáriókat figyelembe venni, amelyek azzal számolnának, hogy jellegükben eltérő folyamatok alakulhatnak ki. A tranzistorok nem lesznek nagyobbak, a sávszélesség nem fog csökkenni.

Bőven kell viszont számítani új jelenségek, eszközök felbukkanására. Ezek lényegében technológia-térképek. Erre lehet példa az optikai távközlés, ami akkor a kiforrott tápvonalas, illetve a szintén újnak számító Harms–Go-beau-szalaggal kelt versenyre. Az elektronikus eszközök fejlődését leggyakrabban a memória-áramkörök fejlődésével jellemzik. Ennek oka az, hogy ezek a legkönnyebben összehasonlíthatóak, jellegük miatt leginkább szabványosítottak. Az élvonal 2004 óta egyértelműen a nanoelektronika területén húzódik. Ez a CMOS technológia sikere, ami valószínűsíti, hogy a jövő nanoelektronikájában is kiemelt szerephez jut ez a technológia, még akkor is, ha ez nem lesz kizárólag Si-alapú. *A nanoelektronika előretörését azonban nem úgy kell elképzelni, hogy a mikroelektronika nanoelektronika lesz, mivel a mikroelektronika mérettartományában gyártott eszközök is változatlanul fontos szerepet játszanak a készüléképítésben.*

Visszatekintve a mikroelektronika fejlődésére megállapíthatjuk, hogy abban mind a kis innovációk, mind a radikális innovációk szerephez jutottak; arányuk becslésére azonban mi sem vállalkozunk. Ezért a jövőkutatásnak az előrelátás metodológiáját is célszerű alkalmaznia (foresight).

Előre nem látható változás volt a tárgyunk szempontjából meghatározó jelentőségű véletlen, amely az egy- és többfalú szén nanocsövek felfedezéséhez vezetett. Ez például az szigetelőre növesztett Si-eszközökhöz képest az erősítési tényezőben már a kísérleti példányokon is nagyságrendnyi javulást hozott.

Különleges anyagok alkalmazása a nanoelektronikában

A nanoméretű elektronikus eszközökben kezdetben a jellemző struktúra a nano CMOS lesz. A különböző tervezési szabályok szerinti

eszközöket legalább 300 mm átmérőjű szilíciumszeleteken valósítják meg. Az alábbiakban – a teljesség igénye nélkül – *megvizsgálunk néhány anyagcsoportot, amelyet perspektivikusnak tartunk.*

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-, praeodium-, cirkónium- és hafniumvegyületeket.

A mikroelektronika alapvetően szerves anyagokból építkezett (Mojzes – Kovács, 1997). A nanoelektronikában sokkal nagyobb szerephez jut a *szerves anyagok alkalmazása* a következő generációjú eszközökben (Dömölki, 2005). Önálló területként megjelenik a *plasztronika*. A jelenleg ismert szerves anyagok azonban nem jelentenek közvetlen alternatívát a szilíciumalapú integrált eszközöknek. Mivel a szilícium integrált eszközök előállítására egykristályokat, heteket és nagyszámú, egymás után következő, gyakran magas hőmérsékletű technológiai lépés megvalósítását követeli, a szerves eszközök előállítása lényegesen olcsóbb és gyorsabb.

A vegyület-félvezető anyagok közül előtör az *SiGe félvezető*. Ez perspektivikus a nagyteljesítményű eszközök szempontjából, amelyek elsősorban a távközlésben, azon belül a mobil kézikészülékek terén kerülnek alkalmazásra, mivel az áramfelvétel csak fele a más anyagokból kivitelezett eszközökénél.

A *gyémánt nanostruktúrák* egyike az igen perspektivikus rendszereknek. A mesterséges előállítási technológia további előnye, hogy az eljárás jól reprodukálható élek kialakítását teszi lehetővé.

Régi elképzelés, hogy *műanyagok felületére szilíciumot* növezzünk. A technológiai ne-

hézséget az okozza, hogy az a hőmérséklet, amelyeken a szilíciumot növesztik, megolvasztja a hordozóként használt műanyagokat.

A *szilíciumhordozón kialakított különlegesen nagy vezetőképességű szén nanocsövek* igen lényegesek a szén nanoelektronikai eszközök szempontjából. Az elektromos ellenállás lényegében független a cső hosszától, mert a ballisztikus transzport nem engedelmeskedik az Ohm-törvénynek. A vezetés kvantummechanikai elven történik. Párhuzamosan kapcsolt szén nanocsövekkel olyan áramsűrűségeket hozhatunk létre, amelyek elérhetik a 10^{10} A/cm²-es értéket. Ugyancsak lényeges megemlíteni, hogy a szén nanocsövek hővezetése kb. hétszerese a gyémántnál mérhető 3000 W/Km értéknek. A szén nanocsövekből a hagyományos anyagú integrált áramkörökhez hűtőtönköt is készíthetünk.

A szén nanocsövek használatára eddig alkalmazott technológiai módszerek azonban nehezen egyeztethetőek össze a félvezető technológia lépéseivel. Fontos, hogy igen rövid idő alatt a lehető legalacsonyabb hőmérséklet mellett történjen a növesztés. Az első lehetséges alkalmazás feltehetően az integrált áramkörökben levő *fémzéseket összekötő viakban* fog történni. Itt a nanocsövek harmadik igen előnyös tulajdonsága – a nagy mechanikai stabilitás – is szerephez jut. A szén nanocsövek további előnyös tulajdonsága, hogy félvezetők lehetnek, adalékolhatóak. Átmérőjüket változtatva a félvezető tiltott sáv szélességét tudjuk befolyásolni. A szokásosan egy elektronvoltos tiltott sáv szélességnek egy nanométer átmérőjű nanocső felel meg.

Kísérletek folynak folyamatokkal, ahol többféle sáv szélességű anyagok állíthatók elő. Szén nanocsövek alkalmazásával a planár mikroelektronika feltehetően kiterjeszhető lesz *háromdimenziós rendszerek* létrehozása felé.

A *széles tiltott sávú félvezető anyagok* szerepe igen felértékelődik. Elsősorban a magas üzemi hőmérsékletűeket fogják használni.

A félvezető fényforrások fejlődése, amit elsősorban a világító diódák igen kiterjedt alkalmazása segít, lehetővé teszi, hogy ezeket a világító eszközöket nagyobb hatásfokú III–V alapú *hetero-étitaxiás eszközökkel* váltsuk ki. Ilyen hetero-átmenetek segítségével a színháromszög mindhárom színét, bár eltérő hatásfokkal, de megvalósíthatjuk. Ilyen módon elektronikusan vezérelhető színű világító eszközökhöz juthatunk. A másik lehetőség a fénykeltésre, hogy *elektro-lumineszcens, amorf szerves félvezetőket* viszünk fel tetszőleges nagyságú felületre.

A *textilalapú* mikroelektronika mind nagyobb teret hódít a szerves anyagú nanoelektronikán belül is. A távközlési alkalmazások mellett (minden ruhadarabunk rendelkezik SIM-kártyával) igen lényeges lehet a szenzorokkal ellátott ruhadarab, amely méri fiziológias értékeinket, és továbbítja azt.

Mind a szerves, mind a szerves anyagokon belül egyre nagyobb szerephez jut az *önszerveződés*.

A nanoelektronika jövőbeli eszköztáráról

Az eszközök terén ma még a nano diszkrét eszközök dominálnak, hasonlóan a mikroelektronikához, az irány itt is az integrálódás. Ennek nincs alternatívája. Az integrálódás itt más területek, így a mechanika integrálását is jelenti. Ennek példája a *nanolitográfia domborítással (DIP-PEN nanolitográfia)*.

A működési módok között a *spintronika* meghatározóvá válik, itt a mágnességet az elektronok spinje irányozza meg. Megjelennek a spintronika elvein megépített eszközök, amely integrálódni fognak. Új eszköztípusként megjelennek az *egyelektronos érzé-*

kelők és mérőeszközök. A kvantumszámítástechnika alkalmazásai elsősorban a kriptográfiában, a szimulációban és a modellezésben lesznek jellemzőek.

A bennünket körülvevő eszközök egyre nagyobb mértékben személyre szabottak és hordozhatóak lesznek, az egyes készülékek pedig önálló energiaforrással rendelkeznek. Ez vezetett a nanotechnológia alkalmazásához e területen, ami a szén nanocsövek első tömeges alkalmazását jelenti.

Az energiaellátás a jövőben is kulcskérdés marad. Megoldódik, hogy a nanoelektronikai eszközök a környezetből nyerjék a működésükhöz szükséges energiát. Itt elsősorban a vibráció, a hangnyomás, a termoelektromos konverzió és a napenergia jöhet szóba.

Kommunikációs szempontból a rövid távú kommunikációra kell koncentrálni. 1 bit átvitelére kb. 10–30 mJ energiára van szükségünk, ami nem csökken Moore törvényével.

A mágneses technológiák továbbra is fontos szereplők maradnak, kiegészülnek nanaórszecskekkel, esetenként függőleges elrendezésben.

Méltó versenytársai lesznek a molekuláris és nanocsöves memóriák. Ezek lehetővé teszik molekuláris méretű hengerek alkalmazását információátárolásra. Kapacitásuk a közeli években eléri azt a színvonalat, hogy flash memóriákban alkalmazhatjuk azokat. Ezek a memóriák a tápfeszültség megszüntetése után is megtartják információtartalmukat.

Az optikai kapcsolóelemek iránti igényt elsősorban az internet iránti igény növekedése fokozza. Ennek során szükségessé válik a hullámhossz alatti méretű sorozatban gyártható optikai komponensek létrehozása.

A kijelzők terén főleg a szórakoztató elektronikában használható, falra akasztható lapos képcső megalkotása a cél. Ebben is új távlatokat nyithat a szén nanocsövek alkalmazása. A kijelzőkben és a nyomtatókban elterjednek a függőleges üregű lézerek. Ezek ma még elsősorban csak adatátviteli feladatok elvégzésére használatosak, mivel a sugarak tulajdonságai nem elég jók.

Kulcsszavak: nanocsövek, SiGe, CMOS technológia, gyémánt

IRODALOM

- Bushan, Bharat (ed.) (2004): *Handbook of Nanotechnology*. Springer Verlag, Berlin etc.
Dömölki Bálint (szerk.) (2005): *Információs társadalom technológiai távlatai*. NHIT, Budapest
Mojzes Imre – Kovács Balázs (1997): *Nanotechnology*

– a Dedicated Tool for the Future. MIL-ORG–NETI, Budapest

Mojzes Imre (szerk.) (2005): *Mikroelektronika és technológia*. Műszaki, Budapest

Roberts, Royston M. (2005): *Serendipity. Véletlen felfedezések a tudományban*. Akadémiai, Budapest