

amit megérteni kívánunk, az a szilárd testek felépítése, tulajdonsága. Nemcsak összegyűjteni kell az ismereteket, hanem a rendezésre, a szabályszerűségeket, törvények megállapítására is szükség van, mivel az adathalmaz kezelése nem elegendő: az adatok között tájékozódni is kell, hiszen csak így lehet hatékonyan bevonni a tudományág ismeretanyagát a gyakorlatba. Az erdőben annak ellenére könnyen eltévedünk, hogy minden fa más és más. Az út megtalálásához többet kell tudni: nemcsak a fákat kell egyenként ismerni, hanem rendezni kell a fejünkben az erdő átfogó képét, ki kell alakítani egy elvet, hogy e szerint az elv szerint tájékozódjunk.

Amint említettem, a szilárdtestfizika a szilárd anyagokkal foglalkozik. Egy tudomány mindig fejlődik, új területeket hódít meg. A folyadék talán még csodálatosabb, mint a szilárd anyag, nincsen benne kristályos rend, sokban hasonlít, sokban eltér a szilárd anyagtól. Rendkívüli állapot, amely csak nagyon korlátozott hőmérséklet-intervallumban jelenik meg. Ha az anyag szublimál, meg sem jelenik. A szilárdtestfizika kiterjesztette határait erre a halmazállapotra is, és ezért talán helyesebb lenne egy új név, ami ezt a nagyobb területet jellemzi. Ez a név a „kondenzáltanyag-fizika”, amely magyarul egy kissé nehézkesnek tűnik, de az angol *condensed matter physics* bevett fogalom.

Egyes szerzők az anyagtudomány (*materials science*) fogalmát részesítik előnyben. Ez annyiban több, hogy egyéb interdiszciplináris területeket is bevon a tudományba, például a kémiát. Az anyag tulajdonságainak vizsgálatában a kémia döntő jelentőségű, kihagyni nem is lehet, amit az is mutat, hogy sok tudós (pl. Debye, Slater) mind a fizikában, mind a kémiában nagyot alkotott.

Remélem, hogy e kis írásból kitűnt: az anyagok tudománya szerteágazó, sokrétű ismeretanyagot tartalmazó fejlődési ága a fizikának, amely mind az alap kutatásban, mind az alkalmazott kutatásban, mind elméleti, mind kísérleti vonatkozásban érdekes, de messziről sem lezárt; végtelen lehetőség áll előttünk. Szeretnénk olyan anyagokat előállítani, amelyek gazdaságosan és sokoldalúan használhatók. A használhatóságot egyre újabb követelmények szabják meg egyre újabb lehetőségeket és korlátozásokat adva, gondoljunk csak az intelligens<sup>4</sup> vagy a környezetbarát anyagokra.

<sup>4</sup> Lásd Varga Zsolt, Szilágyi András, Filipcsei Genovéva, Zrínyi Miklós: Az intelligens anyag. A XXI. század új kihívása. Természet Világa, 2004. szeptember-október.

PAP LÁSZLÓ

# A XX. század elektronikája és a fejlődés irányai

A XX. századot a fizika századánaként könyvelni el a tudománytörténet. A múlt század első felében fedezték fel – többek között – a radioaktív sugárzást, a foton létezését, ekkor jött létre a speciális és általános relativitáselmélet, az atomok felépítésére vonatkozó elmélet, az elemi részecskék fizikája, a kvantumelmélet és ekkor hajtották végre az első maghasadási kísérletet is. Emellett a század közepén indult meg az elektronikai és információtechnológiai rendszerek máig tartó forradalmi fejlődése is. A történet valamikor a múlt század ötvenes éveiben, a tranzisztor felfedezésével kezdődött, amikor megszületett az az eszköz, ami ennek a technológiai forradalomnak az alapja lett, és ami máig meghatározza a modern elektronika fejlődését.

Az írás célja az, hogy áttekintést adjon az elektronika fejlődésének legfontosabb mérföldköveiről, felmérje e fejlődés ma látható korlátait, és kicsit bepillantson a várható jövőbe is.

## Az elektronika „őskora”

J. J. Thomson 1897-ben fedezte fel az elektront. A technikatörténet ezt az időpontot tekinti az elektronikai fejlődés kezdetének, annak ellenére, hogy F. Braun, jócskán megelőzve korát, már 1874-ben fém-ólom-szulfid diódával detektált rádiójeleket, létrehozva ezzel az első félvezető alapú elektronikai eszközt. Sőt az első katódsugárcsövet is 1897 előtt fejlesztették ki, és maga J. J. Thomson is ezt az ötletet használta fel alapvető felfedezése során. Mindezek ellenére csak az elektron felfedezését követően született meg az elektronika tudományterülete, s csak ezt követően indult el az elektroncsövek fejlődése és kezdtek el a különböző elektroncsöves eszközök, diódák, triódák, pentódák, katódsugárcsövek, klisztronok és haladó hullámú csövek ipari méretű gyártását. Az elektroncsövek a múlt század első felében az elekt-

ronikus berendezések kulcselemei voltak. Felhasználásukkal igen bonyolult berendezéseket, rádióadókat és -vevőket, autórádiókat, televíziókat, faxokat, számítógépeket, audio- és videomagnetofonokat gyártottak és forgalmaztak. Az elektroncsöves elektronika képes volt kielégíteni a kor igényeit az információtechnológia területén is. Mégis M. Kelly, a Bell Telefon Laboratórium későbbi elnöke, egy tanulmányában már előre jelezte, hogy a telefonközponokban alkalmazott relék alacsony sebessége, az elektroncsövek rövid élettartama és nagy energiaigénye korlátokat szab majd a további fejlődésnek. Ezért vágott bele a technikatörténet egyik legnagyobb hatású kalandjába: 1945 nyarán létrehozott egy kutatócsoportot a félvezetők tanulmányozására.

A tranzisztor felfedezése előtt két eszközzel lehetett logikai műveleteket végrehajtani, illetve jeleket erősíteni: relével és elektroncsövel. A relé egy elektromechanikus szerkezet, amelyben elektromágnes segítségével vezérelni lehet azt, hogy egy fix és egy rugóra szerelt fémérintkező között kontaktus jöjjön létre. Ily módon kis energiabefektetéssel nagy energiát lehet eljuttatni a felhasználás helyére. A relé a mechanikai működés miatt lassú eszköz. Kapcsolási sebessége a másodperc ezrelékének a tartományába esik.

Az elektroncső ennél sokkal gyorsabb. Működése a vákuumban – elektromos tér hatására – mozgó elektronokra épül. Az elektronokat egy magas hőmérsékletű katód állítja elő, és egy pozitív feszültségre kapcsolt anód gyűjti össze. Az elektronnyaláb intenzitását, vagyis az átfolyó áram mennyiségét a rácsra adott viszonylag kis feszültséggel lehet vezérelni. Az elektroncső jelek erősítésére és gyors logikai kapcsolásra is alkalmas, de igen nagy teljesítményt igényel és az átlagos élettartama meglehetősen rövid. Éppen ezért csak olyan berendezésben használható, amelyben kevés elektron-

csőre van szükség. Bár léteztek sok elektroncsövet alkalmazó számítógépek is, ezek megbízhatósága és számítási kapacitása azonban igen korlátozott volt.

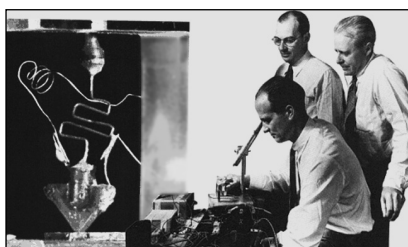
Mindebből következik, hogy a múlt század közepén a felhasználói igények változásokat kívántak. A komplexebb feladatok megoldásához új elektronikus eszközre volt szükség, és a félvezetők kínálták erre a legjobb megoldást. A félvezetőkben az elektronok rövidebb utat tesznek meg, mint az elektroncsövekben, nem igényelnek vákuumot, nincsen bennük mozgó alkatrész, ezért a félvezetők gyorsabbak, olcsóbbak és megbízhatóbbak. A tranzisztor felfedezése hozta meg hatvan évvel ezelőtt a megoldást.

### A tranzisztor születése

Az említett kutatócsoport 1946 januárjától a Bell Laboratóriumba került, és vezetését *W. Shockley* és *S. Morgan* vette át. A csoportot *W. Shockley* mellett, aki nagyszerű fizikusként elkötelezetten törekedett az elméleti eredmények gyakorlati alkalmazására, *J. Bardeen*, a kiemelkedő tehetségű elméleti fizikus és *W. Brattain*, a kiváló gyakorlati érzékkel rendelkező kísérleti fizikus alkotta, de velük dolgoztak a szakterület olyan kiemelkedően innovatív egyéniségei is, mint *G. Pearson*, *B. Moore* és *R. Gibney*. *W. Shockley*, *J. Bardeen* és *W. Brattain* 1956-ban a félvezetőkkel kapcsolatos kutatásukért és a tranzisztoeffektus felfedezéséért Nobel-díjjal tüntették ki. Érdekes megjegyezni, hogy *J. Bardeen* 1972-ben másodszor is elnyerte ezt a kitüntetést a szupravezetés területén elért eredményeiért és az úgynevezett BCS-elméletért. A három tudós arcképe és az első tranzisztor kinagyított képe az **1. ábrán** látható.

Az elméleti munka tehát 1946-ban indult, és első lépésben arra irányult, hogy a kutatók magyarázatot találjanak a gyakorlatból már ismert félvezető diódák működésére. Többféle anyagot használtak, réz-oxiddal, szelénrel, ólom-szulfiddal, germániummal és szilíciummal folytattak kísérleteket. Más kutatók a

**1. ábra. W. Shockley, J. Bardeen és W. Brattain, és az első tranzisztor kinagyított képe**

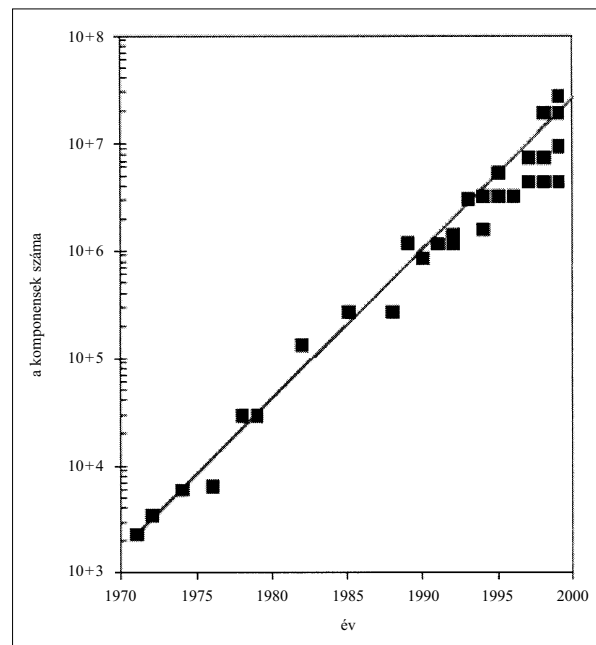


félvezetőkkel kapcsolatos elmélet egy részét már a második világháború időszakában kidolgozták. Ismerték a tiltott zóna fogalmát, azonosították a félvezetők két vezetési mechanizmusát, az elektronok és a lyukak (az elektronok hiányának) áramlását, sőt felismerték, hogy ezek az  $n$  (az anyagban elektrontöbblet biztosító) és  $p$  (az anyagban lyukak többletét biztosító) típusú szennyezésekhez kötődnek, de 1945-ben még igen sok részlet homály fedett, sok volt a nyitott elméleti és gyakorlati kérdés.

A kutatócsoport már a korai időszakban eldöntötte, hogy a stabil megoldást kínáló szilíciumot és germániumot vizsgálja. Rájöttek arra is, hogy tiszta egykristályok alkalmazása esetén várható valódi eredmények. A kutatás célja a félvezető alapú vezérelhető eszköz, a félvezető erősítő létrehozása volt. A kutatócsoport két fontos irányban indult el. Az egyik a térvezérlésű eszközök kutatása, a másik a rétegranzisztorok elméletének a kidolgozása volt.

A térvezérlésű tranzisztorok működésének az alapját először *J. Lilienfeld* fogalmazta meg még 1925-ben, miszerint a félvezető felszínére ható statikus elektromos tér, amit például egy kondenzátor fémlemeze állíthat elő, töltésmegosztást eredményez, és ezáltal változtatni tudja a félvezetőben lévő töltéssűrűséget, ami változtatja a félvezető vezetőképességét is. A statikus erőter változtatásával, tehát minimális energiabefektetéssel, módosítható a félvezető eszközön folyó áram nagysága, vagyis az eszköz az elektroncsőhöz hasonlóan képes működni. A témával korábban *W. Shockley* is foglalkozott, és kidolgozta azt az eszközstruktúrát is, ami a feladatot elvileg képes volt megoldani.

A másik kutatási irány 1947–1948 telén az úgynevezett rétegranzisztorok felfedezéséhez vezetett. A rétegranzisztor kialakítását megelőzően a kutatócsoport kidolgozta a  $p$ - $n$  átmenet, azaz a félvezető dióda működésének fizikai alapjait. Erre az ismeretre építve *W. Shockley* létrehozta az első  $p$ - $n$ - $p$  struktúrát, amelyben az egyik  $p$ - $n$  átmenetet nyitó, a másikat pedig záró irányban feszítette elő. A nyitó irányban előfeszített  $p$ - $n$  át-



**2. ábra. A Moore-„törvény” illusztrálása: az egy lapkán lévő komponensek száma az idő függvényében**

menetben, az  $n$  típusú rétegre negatív feszültséget kapcsolva, a  $p$  rétegből lyukak lépnek át az  $n$  típusú rétegbe, ahol diffúzió útján terjednek. Ha az  $n$  réteg elegendően vékony, akkor ezeknek az  $n$  rétegben kisebbségi töltéshordozóknak a többsége eljut a másik, záró irányban előfeszített  $p$ - $n$  átmenetig és ott, az elektromos tér hatására, belép a másik  $p$  típusú félvezető tömbbe.

Az ötvenes évek elejére tehát ismertté vált a tranzisztor, de a tömeges gyártáshoz még igen sok gyakorlati problémát kellett megoldani. Ezekben a korai években a kutatók már kidolgozták a tranzisztorok gyártásának szinte minden fontosabb fázisát, az epitaxiális növesztést, a fotolitográfia módszerét, a planáris technológia alapjait, a diffúziós technológiát, az ionimplantációt, az oxidmaszkolást és a tokozás technológiáit.

A kutatók egy másik igen fontos kérdéssel, az eszközök megbízhatóságával is foglalkoztak. Nyilvánvaló ugyanis, hogy egy készülék, amelyben sok olyan eszköz van, ami bármikor tönkremehet, csak igen kis megbízhatósággal tud működni, és a hiba esélye az alkalmazott sérülékeny eszközök számának a növelésével jelentősen nő. Kezdetben az elektroncsövekkel felépített számítógépek állandó karbantartást és szervizt igényeltek. Bár az első időszakban problémák voltak a tranzisztor megbízhatóságával is, a kutatók tudták, hogy a tranzisztorok működésében nincsenek olyan elvi hibaforrások, amelyek az elektron-

csövekben fellelhetők. Ezért a tranzisztoros áramkörök még nagy komplexitás esetén is képesek hosszú időn át megbízhatóan működni. Ez a faktor a mai elektronikai berendezések működésének kulcseleme.

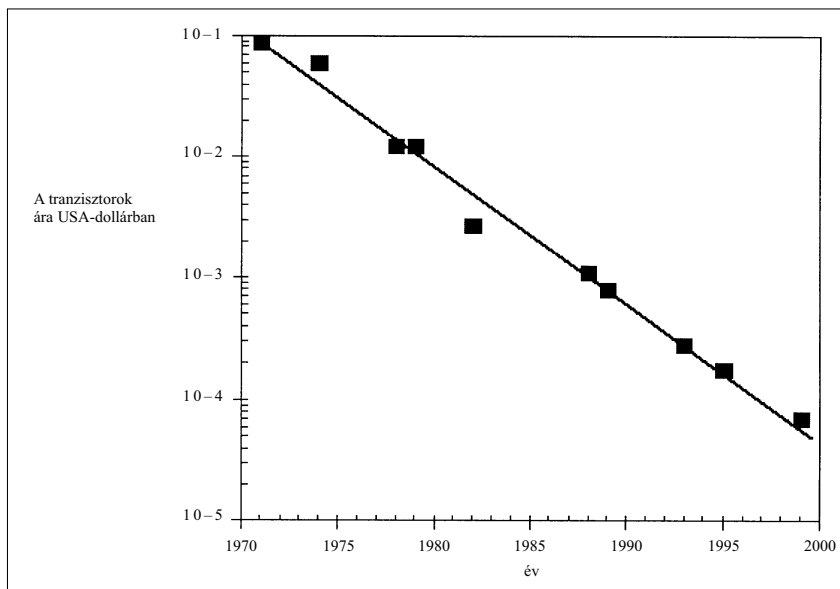
Voltak tehát kezdeti nehézségek, és az első áramköri megoldások még követték az elektroncsöves rendszerek filozófiáját, de *R. Wallace* már az ötvenes években felvetette azt a gondolatot, hogy a tranzisztor nemcsak azért előnyös, mert kisméretű, gyors és kis teljesítményt igényel, hanem azért is, mert belőle kis térfogatban igen sokat lehet elhelyezni, ami a bonyolult logikai áramkörökben feltétlenül szükséges. Ez volt az első gondolat, ami később az integrált áramkörök kifejlesztéséhez vezetett, de ez már egy újabb fejezete az elektronika fejlődésének.

### Az integrált áramkörök megjelenése

A technikatörténet szerint először *J. S. Kilby* demonstrálta 1958-ban azt, hogy egyetlen félvezető lapkán létre lehet hozni tranzisztort, diódát, kapacitást és ellenállást is. Ettől kezdve az integrált áramköri technológia rohamosan fejlődni kezdett, kialakult a mikroelektronikai ipar. Az emberiség a kőkor, a bronzkor és a vaskor után belépett a szilíciumkorba. Más megfogalmazásban: az ipari forradalom után elérkeztünk az információs forradalomhoz, megkezdődött az információs társadalom kialakulása.

A fejlődés soha nem látott lendülettel folyt, egyre több félvezető elem került az integrált áramkörökbe, egyre bonyolultabb áramköri és rendszertechnikai funkciókat lehetett egyetlen integrált eszközzel megvalósítani.

A növekedés ütemével kapcsolatban *G. E. Moore* már 1965-ben lefektetett egy „törvényt”, ami azóta is leírja a félvezető-technológiák fejlődését. Moore felrajzolta az egy integrált áramköri lapkára elhelyezett félvezető komponensek számát az idő függvényében (lásd a **2. ábrát**), és megállapította, hogy ez a szám 18 hónaponként megduplázódik. Hasonló sebességgel csökkent az egy komponensre eső költségek nagysága is (**3. ábra**). A „törvényben” leírt növekedési sebesség a kezdetektől fogva napjainkig, tehát közel ötven éve érvényes. A mikroelektronika mai dilemmáit röviden úgy szokták megfogalmazni, vajon meddig tart a Moore-törvény által kijelölt fejlődési trend, vajon mik a szilícium félvezető alapú rendszerek fejlődésének a korlátai, meddig lehet a komponensek méretét csökkenteni, van-e esély újabb ötletek alapján a további töretlen növe-



3. ábra. Az egy komponensre eső költségek az idő függvényében

kedésre? A válaszok igen változatosak, hiszen a szilíciumtechnológia Moore-törvény szerinti fejlődésének a végét még néhány évvel ezelőtt is 2005-re jóslták, de a fejlődés mindmáig folytatódott.

### Az integrált áramkörök fejlődésének néhány mérföldköve

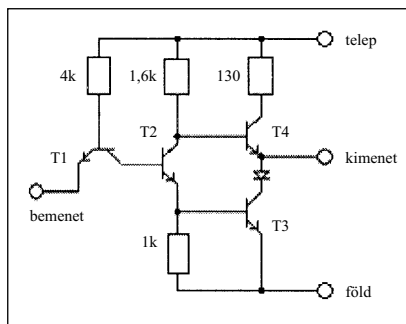
Az integrált áramkörök már a kezdetekben is két csoportba voltak sorolhatók: digitális és analóg áramkörökről beszélhetünk. A kezdeti integrált áramkörök az n-p-n típusú bipoláris tranzisztorokra épültek, mivel egyetlen technológiával ezeket lehetett a legegyszerűbben elhelyezni a szilíciumlapkán.

A digitális áramkörök területén már a korai fejlesztések során arra törekedtek, hogy lehetőleg sokféle összetett logikai funkciót valósítsanak meg azonos „családhoz” tartozó és egymáshoz illeszkedő áramköri elemekkel. Ennek a koncepciónak az első sikeres változata az úgyne-

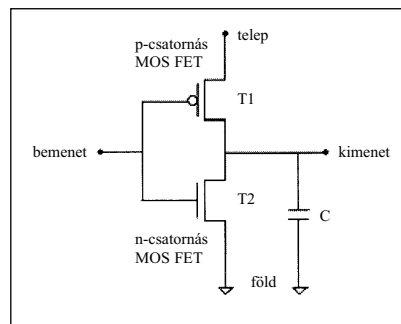
vezett TTL (tranzisztor-tranzisztor logika) logikai család volt, melyet az RTL (ellenállás-tranzisztor logika) és a DTL (dióda-tranzisztor logika) nevű családok kevésbé ígéretes kísérletei után fejlesztettek ki. A viszonylag összetett, négy bipoláris n-p-n tranzisztorból, négy-öt ellenállásból és egy diódából felépített alapinverter (logikai tagadást megvalósító elem, lásd a **4. ábrát**) és a hozzá hasonló szerkezetű egyéb TTL-kapuk és -elemek a digitális logikai rendszerek alapvető építőelemeivé váltak. Hátrányuk volt a bonyolult szerkezet és a viszonylag nagy teljesítményigény, ami korlátozta az egy félvezető lapkán megvalósítható logikai rendszerek komplexitását. Mindezek ellenére a digitális számítógépek kezdeti korszakában a TTL logikai elemek bonyolultságának növekedése határozta meg a fejlődés ütemét.

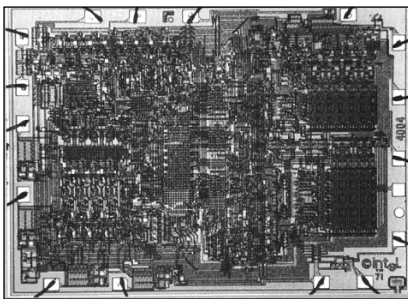
A logikai rendszerek fejlődése terén a CMOS- (komplementer fém-oxid félvezető) eszközök megjelenése jelentette az

4. ábra. A TTL-inverter felépítése



5. ábra. A CMOS-inverter felépítése





6. ábra. Az Intel-gyártmányú 4004-es mikroprocesszorcsip felépítése

igazi áttörést. Ebben a logikai családban az elemi invertert egy n-csatornás és egy p-csatornás tervezérlésű tranzisztorral lehet megvalósítani (lásd a 5. ábrát), és ezzel az eszközzel egyetlen félvezető lapkán minden logikai funkció létrehozható.

A CMOS-technológia fő előnye az, hogy az elemi logikai kapuáramköröknek nincsen statikus áramfelvételük, azaz teljesítményt csak akkor vesznek fel a telepből, ha logikai állapotaik változnak. Ez azt jelenti, hogy az ilyen áramkörök teljesítményfelvétele a működési sebességgel arányosan nő. A CMOS-technológia robbanásszerűen növelte az integrált áramkörök elemsűrűségét. Megjelentek a mikroprocesszorok és a személyi számítógépek, megindult az a folyamat, amely mára elvezetett ahhoz, hogy egyetlen félvezető lapkán egész berendezéseket lehet megvalósítani. A változás ütemét a mikroprocesszorok fejlődésével szokták illusztrálni. 1970 környékén az első Intel-gyártmányú 4004 jelű mikroprocesszor kevesebb mint 1000 elemből állt (lásd az 6. ábrát). 1980-ban a híres 8086-os processzorban már közel 10 ezer elemet használtak, 1986-ban a személyi számítógépek akkori alapeleme, a 80386-os processzor pedig már több mint 100 ezer elemet tartalmazott. A kilencvenes évek közepére a Pentium processzorok elérték az egymillió határt, 2000-ben a Pentium IV processzor elemeinek a száma meghaladta a 10 milliót, és ma már a 100 milliót, sőt az egymilliárdos integrálási szint eléréséről beszélnek.

Fontos megemlíteni, hogy MOS-technológia jelentősen támogatta a számítógépes memóriák fejlesztését is. A dinamikus, írható-olvasható memóriákban (DRAM) a bináris információt félvezető kapacitások tárolják, és a kapacitások kisülése miatt a bennük tárolt információt periodikusan fel kell frissíteni. A DRAM-ok kapacitása 1970 után érte el az 1000 bitet, 1980-ban a 100 ezer bitet, 1986-ban az egymillió bitet, a kilencvenes évek közepén a 20 millió

bitet, 2000-ben a 100 millió bitet, ma pedig a több százmilliárd bites memóriák kifejlesztéséről beszélhetünk.

Az analóg integrált áramkörök fejlődése a hetvenes években volt talán a legdinamikusabb. Ekkor születtek meg azok az alapelemek, például az áramtűkör, a tranzisztoros differenciálerősítő, amelyek forradalmasították az analóg tranzisztoros áramkörtechnikát, kihasználva az integrált áramköri technika előnyeit, azt, hogy egyetlen félvezető lapkán azonos félvezető elemeket lehet megvalósítani, és hogy ezek az elemek a működés során közel azonos hőmérsékletűek maradnak. Az új áramkörtechnika sok igen fontos analóg áramkör kifejlesztését támogatta, ezek közül talán a műveleti erősítők, a teljesítményfokozatok, a tápegységek, az analóg szorzó áramkörök, a modulátorok, a demodulátorok és az analóg-digitális, digitális-analóg konverterek említhetők.

Az analóg integrált áramkörök fontossága az elmúlt évtizedekben jelentősen csökkent. Szerepüket mindinkább átvették a digitális jelfeldolgozó processzorok (DSP), amelyek a legtöbb analóg művelet végrehajtására alkalmasak oly módon, hogy a mintavételezett és digitalizált (számokká alakított) analóg jeleket szoftverrel dolgozzák fel.

A hagyományos analóg elektronikai eszközök ma két területen fejlődnek dinamikusan. Az egyik az analóg és digitális rendszerek közötti átmenetet biztosító analóg-digitális és digitális-analóg átalakítók területe, ahol a legfontosabb cél a sebesség növelése és a felbontás javítása. A másik terület a nagy frekvenciás technika és az optoelektronika (optikai jelek kezelése és feldolgozása), ahol a digitális jelfeldolgozás módszerei – a meglévő sebességkorlátok miatt – nem alkalmazhatók. Szakértők azt jósolják, hogy az elkövetkező évtizedekben az analóg áramkörtechnika tovább fejlődik, elsősorban a SoC- (rendszer a csipen) koncepció mentén, ahol egész elektronikus rendszereket valósítanak meg egyetlen integrált áramkörben. Ígéretes irány az analóg és digitális rendszerek határán működő celluláris és neurális áramkörök alkalmazása is.

#### A méretcsökkentés globális hatása a MOS-technológiákra, a szilíciumtechnológia határai

Az integrált áramkörök méretcsökkentése leginkább a tervezérlésű MOS- (fém oxid félvezető) eszközök segítségével illusztrálható. A 7. ábrán egy n-csatornás MOS-tranzisztor geometriai felépítése látható felülnézetből. A tranzisztor, amint azt már említettük, a közepén látható elektródára (gate) adott feszültség-

gel vezérelhető. Ez a feszültség olyan elektromos teret hoz létre, amely szabályozni tudja a két nagy áramú elektróda, a source és a drain között, a gate elektróda alatt elhelyezkedő csatorna vezetőképességét. A vezető csatorna hosszúsága  $L$ , szélessége pedig  $W$ . A tranzisztor árama arányos a  $W/L$  viszonytal, ami első közelítésben azt jelenti, hogy azonos  $W/L$  méretek esetén, változatlan anyag szerkezettel azonos eszközöket lehet gyártani, azaz a méretek korlátlanul csökkenthetők. A valóságos helyzet azonban nem ilyen egyszerű.

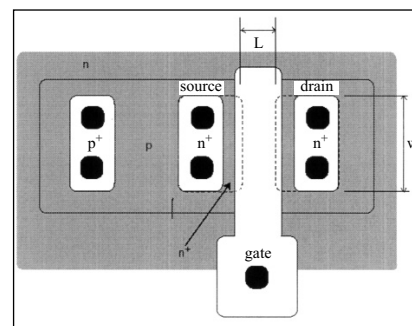
A méretcsökkentéssel kapcsolatos alapszabályok a következők:

Ha a vezető csatorna hosszát  $L$  értékről egy  $c$  skálázási faktoral  $L/c$  értékre csökkentjük, akkor a csatorna szélességét is hasonló módon  $W$ -ről  $W/c$  értékre kell változtatni. Ahhoz, hogy jó karakterisztikájú tranzisztorokat kapjunk, ezzel együtt arányosan csökkenteni kell a vezérlő elektróda és a csatorna között lévő szigetelő- (szilícium-dioxid) réteg  $d_{x0}$  vastagságát is,  $d_{x0}/c$  értékre.

– Ezzel változik az elemi kapu késleltetési ideje  $T_k$ -ről  $T_k/c^2$ -re, ami a működési sebesség növekedését jelenti. A sebesség növekedésével az alkalmazott komplementer MOS logikai kapuk maximális teljesítményfelvétele is nő, ezeknek ugyanis egy kapacitást kell periodusonként áttöltetniük, ami miatt a megnövekedett maximális működési frekvencián az eredeti kapunkénti átlagos  $P_k$  teljesítmény  $cP_k$  értékre változik.

– Mivel az elemi tranzisztorok területe a lineáris méretek csökkentésével  $c^2$ -tel arányosan csökken, a félvezető lapkán a tranzisztorok sűrűsége  $c^2$ -tel arányosan nő. Sajnos, ez azt eredményezné, hogy további változtatások nélkül a félvezető lapkán mérhető diszzipált teljesítménysűrűség, vagyis az egységnyi felületre jutó teljesítmény  $c^3$  arányban nőne. Ez lehetetlenné tenné az áramkörök bonyolultságának a növelését, ugyanis a tranzisztorok maximális

7. ábra. Egy n-csatornás MOS-tranzisztor geometriája felülnézetben



működési hőmérséklete korlátozott, és a lapka intenzív hűtése kis méreteknél igen nehezen oldható meg. A méreteken kívül ezért más is kell változtatni.

– Ha az említett változtatásokon túl a telepfeszültséget az eredeti  $U_i$ -ről  $U_f/c$ -re csökkentjük (és ezenkívül ugyanígy csökkentjük a tranzisztorokra jellemző úgynevezett elzáródási feszültséget is), akkor az elemi kapu késleltetési ideje  $T_k/c^2$ -ről  $T_k/c$ -re változik, ami azt jelenti, hogy a kapu és a teljes áramkör maximális működési sebessége csak  $c$ -vel arányosan nő. Ugyanakkor a telepfeszültség csökkenése miatt elérhetjük, hogy az egy kapu által átlagosan diszzipált teljesítmény  $P_k$ -ről  $P_k/c^2$ -re csökkenjen. Ebből pedig az adódik, hogy a félvezető lapkán mérhető disszipált teljesítménysűrűség, vagyis az egységnyi felületre jutó teljesítmény változatlan marad.

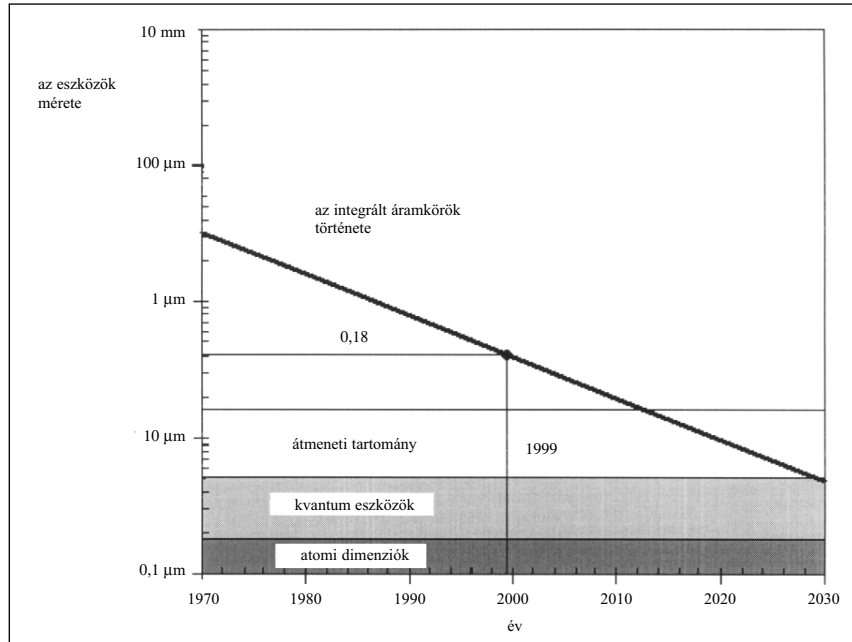
Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az integrált áramkörök elemsűrűségének növelése úgy érhető el, hogy csökkentjük a tranzisztorok méretét és az áramkörök működéséhez szükséges telepfeszültséget. Ennek hatására nő az áramkörök komplexitása és működési sebessége, viszont változatlan marad a félvezető lapka egységnyi felületén keletkező hőmennyiség. Ez a trend van a háttérben a korábban ismertetett Moore-törvénynek, és ez jellemzi az elmúlt évtizedek mikroelektronikai fejlesztéseit is. A **8. ábrán** megadtuk az integrált áramköri komponensek elemi méreteinek csökkenését az idő függvényében.

A **8. ábrából** látszik, hogy a szilícium alapú technológia még nem érte el az elvi korlátait, de az évtized végére belép az úgynevezett átmeneti tartományba, amitől kezdve a hagyományos szilícium alapú technológiák mellett elkerülhetetlen az új eszközök megjelenése a gyakorlatban.

Nézzük meg ezután, mi is határozza meg a szilícium alapú technológia korlátait? A korlátok egy része a fizika olyan alaptörvényeire vezethető vissza, mint a termodinamika, a statisztikus mechanika, a Maxwell-egyenletek és a kvantummechanika. Természetesen ezek a fizikai elvek a gyakorlati korlátok meghatározásánál csak áttételesen használhatók.

Foglalkozunk először az elektromos energia és teljesítmény kérdésével. Az első ilyen elvi korlát *C. E. Shannon* információelméleti megfontolásából származik, miszerint egy bit információ átviteléhez  $T$  abszolút hőmérsékletű környezetben legalább  $kT \log 2$  mennyiségű energiára van szükség, ahol  $k$  a Boltzmann-állandó:  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

Ez az eredmény felhasználható az integrált áramkörök egyéb elvi fizikai korlátainak a meghatározására is. *W. Hei-*



**8. ábra.** Az integrált áramköri komponensek elemi méreteinek a csökkenése az idő függvényében

*senberg* határozatlansági relációja kimondja, hogy az elemi részecske impulzusa és helyzete bizonytalanságának a szorzata, valamint az idő és az energia bizonytalanságának a szorzata alulról korlátozott, azaz

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar \text{ és } \Delta E \Delta t \geq \hbar, \text{ ahol } \hbar = h / 4\pi$$

és  $h$  a Planck-állandó ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ).

Ebből az egy bithez tartozó minimális energia  $kT \log 2$ , és az elektron tömege,  $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$  felhasználásával  $T = 300 \text{ K}$  hőmérsékleten megadható:

$$a_{\min} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m_e kT \log 2}} = 1,5 \text{ nm},$$

– a minimális kapcsolási idő

$$t_{\min} = \frac{\hbar}{kT \log 2} = 0,04 \text{ ps},$$

– a maximális elemsűrűség,

$$n_{\max} = \frac{1}{a_{\min}^2} = 4,7 \times 10^{13} \text{ eszköz/cm}^2,$$

– és a maximális teljesítménysűrűség

$$P = \frac{n_{\max} kT \log 2}{t_{\min}} = 3,7 \times 10^6 \text{ W/cm}^2.$$

A fejlődési trendek változatlanságának a feltételezésével a tervek szerint 2016-ban e paraméterekre az alábbi értékek adódnak:

$$a_{\min} = 186 \text{ nm}, t_{\min} = 0,15 \text{ ps}, n_{\max} = 2,9 \times 10^9$$

eszköz/cm<sup>2</sup>,  $P = 93 \text{ W/cm}^2$  tehát vannak még tartalékok a szilícium alapú technológiában.

Egy elektronikus rendszerben az információt jelek hordozzák, ezért a leírt energiakorlátot például egy  $U$  feszültségre feltöltött  $C$  kapacitásba tárolt  $CU^2/2$  energiára is lehet vonatkoztatni. *C. Stein* kimutatta, hogy ha ez az energia nagyobb, mint  $165 \times kT$ , akkor az elemi információs bit visszanyerésekor keletkező hibaarány kisebb, mint  $10^{-19}$ . Természetesen a valódi rendszerek ezen energiakorlátnál lényegesen nagyobb energiát használnak, mivel egy bitnyi információ feldolgozása általában több elemi lépést igényel. Egy elemi lépés végrehajtásához az elektronikus eszközökben elektronokat kell mozgatni. Az elektronok mozgásához energiára van szükség, mert át kell lépni az anyagokra jellemző feszültségküszöböt, ami általában a  $kT/q = 26 \text{ mV}$  ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , az elektron töltése) feszültségátár több-szöröse, így egyetlen elektron mozgatása is a  $kT$  energiaszint többszörösét igényli.

Ezenkívül tudjuk, hogy egy bit információ tárolásához és átviteléhez a telepfeszültségnek megfelelő feszültségtartományban igen sok elektront kell mozgatni (CMOS-rendszerekben egy kapacitást kell áttölteni telepfeszültségtől nullára és vissza), ami az elemi  $kT$  energiaszintnél nagyságrendekkel nagyobb eredő energia felhasználásával jár.

Más szempontok alapján a nagy frekvenciás működéshez az szükséges, hogy az áramköri impedanciák megközelítsék a szabad tér  $Z_0$  hullámimpedanciáját,

amiből következik, hogy az elemi logikai kapuk működéséhez legalább

$$P = U^2 / Z_0 = (kT/q)^2 / (4\pi \times 10^{-7} c) \cong 2 \mu W$$

teljesítmény szükséges, ahol  $c$  a fény vákuumbeli sebessége.

A félvezető lapkán mérhető teljesítménysűrűség a miniaturizálás során – mint láttuk – változatlan maradhat, de vannak olyan hatások is, amelyek miatt ez teljesen nem tartható be. Például a ki-vezetések meghajtásához szükséges teljesítmény az elemi eszközök méretének csökkentésével nem redukálható.

Tény tehát, hogy a félvezető eszközökben a működéshez energiára van szükség, és mai tudásunk szerint ennek az energia-szükségletnek van elvi alsó határa.

A miniaturizálásnak vannak más korlátai is. Az elsők ezek közül az eszközök méretének csökkentésével kapcsolatosak. Az elemi félvezető eszközök méretének csökkentésével megnő a kvantumfizikából jól ismert alagútáram hatása, csökken a szigetelő elektródák átütési feszültsége, ezt a hatást tovább növeli a kiürített réteg vastagságának csökkenése. A méretek csökkenésével nő a rétegek ohmos ellenállása. Ezek a hatások lényegesen befolyásolhatják az elemi eszközök karakterisztikáit.

Általánosan elfogadott elv, hogy a hagyományos szilícium alapú technológián belül egyetlen atommal nem lehet tranzisztort készíteni. Kérdés, hogy egyáltalán egy tranzisztorhoz hány atomra van szükség? A kérdésre adott válasz előtt tegyünk egy egyszerű megfontolást. A szennyezett félvezető egy köbmikronnyi térfogatában –  $10^{16}/\text{cm}^3$  szennyezés-sűrűség esetén –  $10^4$  szennyező atom van, ami a térben véletlenszerűen oszlik el. Ha a méretek csökkenése miatt csökken az egy eszközre jutó szennyező atomok átlagos száma, akkor a szennyező atomok véletlen eloszlása miatt megnő az egyes eszközök elektromos paraméterei közötti különbség. Ha például egy  $d$  élű kockában átlagosan  $Nd^3$  szennyező atom van, akkor ennek a számnak a szórása a  $(Nd^3)^2$  tartományba esik, azaz minél kisebb a  $d$  értéke, annál nagyobb lesz az egy eszközre jutó szennyező atomok számának a relatív szórása, vagyis annál nagyobb lesz az egyes egyedi tranzisztorok közötti különbség. Kimondható tehát, hogy a tranzisztor térfogatát jelképező kockában lévő szennyező atomok számának,  $m = Nd^3$ -nek jóval nagyobbak kell lennie egynél.

A méretek csökkentésével nőhet az úgynevezett „puha” (soft-) hibák valószínűsége. Ezek a hibák az eszközben nem okoznak maradandó károsodást, de megzavarják az információ áramlását. A „puha” hibákat elsősorban a radioaktív és a kozmikus sugárzás okozza, ami töl-

téshordozó párokat gerjeszt a félvezető eszközök belső rétegeiben. Ha az eszköz mérete kicsi, akkor az ilyen gerjesztett töltéshordozó párok a működést jelentősen befolyásolhatják. Ez a fizikai hatás leginkább a memóriákat érinti. A DRAM-okban ugyanis az információs biteket kapacitások tárolják, és egy kritikus  $Q_{crit}$  töltésmennyiség elegendő ahhoz, hogy a memóriacella tartalma megváltozzon. Ez a töltésmennyiség viszont a méretek változtatásával csökken, és összemérhetővé válik a sugárzások által gerjesztett értékkel.

Korlátok vannak a félvezető eszközökön belül alkalmazott huzalozásokkal kapcsolatban is. Az elemek számának növelése a huzalozást egyre bonyolultabbá teszi. A miniaturizálás során az összekötő huzalok méretét is csökkenteni kell. Ennek hatására nő az összeköttetések ellenállása, de ugyanakkor csökken a huzalok kapacitása, ezért a késleltetésük változatlan marad. Ez elmentmondásban van azzal a trenddel, hogy a méretek csökkentése növeli a teljes rendszer működési sebességét. Sőt a félvezető lapkák méretének növekedésével egyre hosszabb összeköttetéseket kell kialakítani, ami az előbbi kedvezőtlen hatást tovább erősíti. Elmondható, hogy a modern integrált áramkörök méreteit a szükséges huzalozás területigénye határozza meg, és a huzalozás hibáitól függ a gyártási folyamat kihozatala is.

További problémákat okoz a félvezető lapka jeleinek kicsatolása, a külső érintkezők meghajtása. Ha az integrált áramkörök belső elemeinek a mérete csökken, akkor azok egyre kisebb terhelést (kapacitást, ellenállást) képesek jellel el látni. A külső csatlakozásokhoz éppen ezért egyre összetettebb áramkörökre van szükség.

A ma látható trendek alapján kimondhatjuk, hogy a szilícium alapú technológiák Moore-törvény szerinti fejlődése egyszerű biztosan véget ér, de addig tovább folytatódik a szilícium alapú félvezetők miniaturizálása. Emellett azonban sorra bontakoznak ki az új irányok, a szakirodalom új fizikai elveken alapuló elektronikai eszközökről számol be, a kutatók százezrei foglalkoznak minden ígéretes kutatási területtel. A következő fejezet ezekről a lehetőségekről ad rövid áttekintést.

### A fejlődés jövőbeli irányai

A jövő elektronikája több különböző irányban fejlődhet tovább. Ezek között várhatóan fontos szerepe lesz a szilícium alapú elektronikai rendszereknek. Új paradigmák várhatók a szilícium alapú

technológia területén is. A trendek arra utalnak, hogy tovább folytatódik a félvezető eszközök miniaturizálása a több milliárd eszközt tartalmazó és a több gigabit/s sebességű integrált áramkörök felé. Ezek a chipek egyszerre lesznek képesek rádiófrekvenciás és analóg áramköri feladatokat, valamint számítástechnikai műveleteket végrehajtani. Az ilyen eszközök gyártásához új, igen megbízható technológiai eljárásokat kell kidolgozni. Ígéretesnek tűnnek azok a kezdeményezések, amelyek az integrált áramköri elemek összeköttetéseinak a káros hatásait kívánják csökkenteni, például az összeköttetések ellenállásának és kapacitásának a csökkentésével. Ennek a feladatnak a megoldására már ma is többféle technológiai lehetőség kínálkozik, például a gázszigetelésű összeköttetések, vagy az alacsony elektron-hőmérsékletű és nagy sűrűségű plazma alkalmazása. Várhatóan fontos szerepe lesz a nagy dielektromos állandójú, ultravékony gate szigetelő rétegeknek, a fém gate-elektrodáknak, a szilíciumszigetelő elrendezésnek, az ultra keskeny csatornájú MOS-eszközöknek és a kettős gate-tel kialakított tranzisztoroknak. Ezek segítségével a közeljövőben elérhetőnek látszik a 2 nm-es szigetelővastagság, a 10 nm-es csatornaszélesség és a 20 nm-es csatornahossz.

A hagyományos szilícium alapú technológiák mellett elindult az úgynevezett nanoelektronika fejlődése. Ez a tudományterület több igen jelentős részterületet ölel fel. Ezek közül csak azokat említjük, amelyek a most érintett téma szempontjából érdeklődésre tarthatnak számot.

A nanoelektronikai félvezető eszközökre egészében véve az a jellemző, hogy működésük igen kis számú elektron mozgására épül. Az elektronok száma tipikusan 1 és 1000 közé esik, az eszközök mérete pedig 1–100 nm-ig terjed. Az eszközöknek két nagy csoportját különböztethetjük meg: a kvantumeffektust alkalmazó és a molekuláris elektromos eszközöket.

A legfontosabb kvantumeffektuson alapuló szilárdtest eszközök az alábbiak:

- kvantumforrások és rezonáns tunneleszközök (két szabadsági fokú rendszerek);
- nanovezetők és nanocsövek (egy szabadsági fokú rendszerek);
- kvantumbitek (nulla szabadsági fokú rendszerek).

A nanostruktúrájú félvezetők szerkezete, formája és mérete sokféle nanoelektronikai eszköz létrehozását teszi lehetővé. Lehet belőlük negatív ellenállású rezonáns tunneldiódás térvezérlésű tranzisztoros logikai eszközök

ket, statikus írható-olvasható memóriákat, egy elektronnal működő tranzisztort, terabites memóriákat, lézert és kvantumszámítógépet készíteni. Segítségükkel a korszerű fotonika és optoelektronika (a fény feldolgozásával foglalkozó tudományterület) új eszközei, fényforrások, fényvezetők és optikai detektorok valósíthatók meg. A jövő félvezető nanoeszközei minden valószínűség szerint az elektromos töltés és az elektronok spinjének a vezérlésével működnek majd. Az elektronok spinjét használják már ma is a kemény lemezes tárolók mágneses olvasófejei és a mágneses memóriák. Kibontakozóban van egy új tudományterület, a spintronika, amely a jövő azon eszközeivel foglalkozik, amelyek működése az elektronok spinjére épül. Ma a kvantumszámítógépek legígéretesebb változatát is úgy képzeljük el, hogy benne a kvantumbiteket egyetlen elektron spinjének a két lehetséges állapota hordozza. Összességében igen nehéz a nanoelektronikai eszközök területén jóslásokba bocsátkozni, de az elméleti és kísérleti munka megindult.

Az elektronikai alkalmazások szempontjából igen jelentősek a szén alapú nanocsövek. Ezek a speciális anyagok a szénatomok méhsejtrácsozatú hengeres elrendezései, melyek egy vagy több koncentrikus rétegből állnak. A szén nanocsöveket a jövő nanoelektronikája egyik fontos építőelemének tartják, mivel a töltéseket egydimenziósan képesek szállítani, a disszipációjuk alacsony, bennük a szénatomok minden vegyértéke kötött, így az eszközök mechanikusan és elektromosan igen stabilak, az áramsűrűségük elérheti a  $10^9$  A/cm<sup>2</sup> értéket. A belőlük kialakított tervezérlésű eszközökben nem kell szilícium-dioxid szigetelőréteget alkalmazni, így mód van más, nagyobb dielektromos tényezőjű anyagok használatára is. A szén nanocsövek alapvető méreteit kémiai úton lehet beállítani, belőlük félvezetők és fémek tulajdonságú elemek is létrehozhatók, azaz tranzisztorok és összeköttetések is kialakíthatók. A szén nanocsövek tehát kiemelkedő elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek, nagy a vezetőképességük és nagy a stabilitásuk, ezért kiválóan alkalmasak az integrált áramkörökön belüli összeköttetések megvalósítására. Emellett, mint félvezető eszközök, versenyképesek a mai szilícium alapú eszközökkel, de a tömeges alkalmazáshoz hatékony és termelékeny technológia kifejlesztésére van még szükség.

A nanotechnológia méretcsökkentése elérte a molekulák nagyságát, eljutottunk a molekuláris elektronikáig, amely az egyedi molekulákat használja fel elektronikai feladatok megoldására. A

gondolatot először *A. Aviram* és *M. A. Ratner* vetette fel 1974-ben, és azóta folynak ígéretes kutatások a szakterületen. A kémiai módszerek, a dolgok természetéből következően, a nanométer tartományában hajtanak végre műveleteket, molekulákkal és molekulacsoportokkal foglalkoznak. A kémiai eljárások lehetővé teszik a molekulák szintézisét, így lehetőség van olyan molekulák előállítására is, amelyek speciális elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek. A molekuláris elektronika a molekulacsoportok és egyedi molekulák elektromos tulajdonságait, illetve állapotát használja az információ kezelésére és tárolására. A molekulák vezérlésére sokféle mechanizmus ad lehetőséget, például az elektromos tér, a fény, elektromechanikai és elektrokémiai hatások. Ezek segítségével molekuláris méretekben lehet megvalósítani a hagyományos félvezető elemek funkcióit. Mára már sikerült az egyedi molekulák feszültség-áram karakterisztikáját kimérni, de a gyártástechnológia kialakításához még igen sok elvi és gyakorlati problémát kell megoldani. Ilyenek az egyedi molekulák közötti stabil összeköttetések kialakítása, a fém-molekula átmenet tulajdonságainak megismerése és a molekulák térbeli elrendezése. Mindezek ellenére a molekuláris eszközök jelentősége a jövőben biztosan megnő.

A nanotechnológia kapcsolatot teremt a hagyományos elektronika és a biotechnológia között is. Mostanában nanobiotechnológiáról is szoktak beszélni, ahol elsősorban az igen kis méretű fizikai és biológiai eszközök kezeléséről és előállításáról van szó. A tudományterület lefedi a biomolekulák manipulációját, a bioszelektív felületek mikroanalízisét, a molekuláris szűrést, az egyedi sejtek leválasztását, az erre épülő diagnosztikai és terápiás módszereket és általában az orvosi technológiát. Sokan úgy vélik, hogy a XXI. század a biotechnika százada lesz. Biztosak lehetünk azonban abban, hogy a molekuláris elektronika a jövő biotechnikájában kulcsfontosságú szerepet játszik majd.

A nanotechnológia érdekes irányzata a nanomechanika, ami a nanoméretű mechanikai és elektromechanikai rendszerekkel foglalkozik. Kísérletek bizonyítják, hogy nanoméretű mechanikai rendszereket, mozgó elemeket, sőt motorokat is létre lehet hozni a nanotechnológia eszközeivel. Az ilyen eszközöknek várhatóan a kémiai, fizikai és biológiai érzékelők területén lesz komoly szerepe, de elképzelhetők más alkalmazások is, mint a nanorobotok és általában a nanoméretű manipulátorok és mechanikus beavatkozási eszközök.

A jövő elektronikai fejlődését áttekintve mindenképpen említést kell tenni azokról a kutatásokról, amelyek az optikai eszközökkel megvalósított logikai rendszerekkel foglalkoznak. Egy újfajta fény, a plazmon forradalmian új lehetőséget nyit a nanotechnológiában, amely a tiltott sáv koncepciójának az elektronikához hasonló alkalmazásán és a felületi plazmonok felhasználásán alapul. A fény sebessége igen nagy, ezért remélhető, hogy két évtizeden belül olyan, a kvantummechanika elvein működő számítógépet építhetünk, ahol a fénynek is szerepe lehet, és amelynek a műveleti sebessége minden eddigi korlátot túlhalad.

### Összefoglalás

Az elmúlt évszázadban az emberiség belépett az információs társadalom korszakába. Csökkentek az emberek, a nemzetek, a földrészek közötti kommunikációs távolságok. A globális informatikai hálózatok megváltoztatták az emberek mindennapi szokásait, átalakították az állam és a polgárok kapcsolatát. Ez a drámai változás a mikroelektronikai technológia, az elektronikai rendszerek és a számítástechnikai szoftverek fejlődésének köszönhető. A számítástechnikai rendszerek és hálózatok, a mobil kommunikációs rendszerek, az úrtávoközlés és a globális helymeghatározás eszközei drámai sebességgel fejlődtek. Kutatók és mérnökök milliói dolgoztak és dolgoznak az újabb elektronikai rendszerek fejlesztésén. És a növekedés nem állt meg. Napról napra újabb, nagyobb bonyolultságú elektronikus eszközök és berendezések születnek. A hagyományos szilícium alapú technológiák töretlen fejlődése mellett új irányzatok születtek és születnek, amelyek garanciát jelentenek arra, hogy az elektronika a XXI. század első felében is meghatározó eleme lesz az emberiség technikai kultúrájának.

### IRODALOM

1. Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete, Gondolat Kiadó, Budapest, 1981, p. 491
2. Barrie Gilbert: Introduction to the Transistor – A New Semiconductor Amplifier, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 8, August 1999, pp. 1385–1388
3. 50th Anniversary of the Transistor, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 1, January 1998, pp. 1–304
4. Quantum Devices and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 4, April 1999, pp. 535–696
5. The Limits of Semiconductor Technology, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 3, March 2001, pp. 223–418
6. Nanoelectronics and Nanoscale Processing, Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 11, November 2003, pp. 1747–1985
7. Silicon Germanium Advanced Technology, Modeling and Design, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 9, September 2005, pp. 1519–1684
8. Gyulai József: Az emberiség útja a nanovilág felé, Mindentudás Egyeteme, Budapest, 2003. november 3.
9. Kroó Norbert: A fény fizikája, Mindentudás Egyeteme, Budapest, 2005. június 6.