

dás, más és más a módszer a konszolidált európai szintén, más a kevésbé szerencsés csillagzatok alatt, más az európaiól eltérő hagyományú nagy kultúrákban. Ezekből egyébként fontos tanulság, hogy az indiaiak, kínaiak és japánok úgy tudták a legmagasabb fokon magukévá tenni az európai kultúra eredményeit, hogy a magukét azokkal egyesítve képesek őrizni.

De más a módszer igénye egy országon belül is, a különböző szociológiai, kulturális környezetekben, más

volt Neumannék gazdag polgári (nem a mai értelemben, sőt annak ellentmondva!) házában, más a zsellérek és proletárok milliós leszármazottaiban, más az úgazdagok talmi magukmutogatásában, és más a *homeless*ek empátiával értendő világában.

Erről és minderről szól a ma valós feladata, ez már nem egy ember véleményétől és tapasztalatától függ, hanem igazi nemzeti, európai közösségi, emberiséget átfogó lecke. Maga a fűszisz!

## A FIZIKA ÉS A MŰSZAKI FEJLŐDÉS

Gyulai József

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

### Bevezető aggodalmak

Amikor a megtisztelő felkérést és a cikk tervezett címét megkaptam, a feladatot szinte megoldhatatlannak tartottam. Hogy miért? A műszaki haladás „alapanyagát” ugyanis mindaz a tudás, jelenségértelmezés, felfedett törvényszerűségek tára képezi, amelyeket az alaptudományok, így most kiemelten a fizika, valamint más tudományok, például a kémia vázol fel, vagy a fizika mérnöki tudományként önállósodott részei, mint például a mechanika, az aero-, illetve hidrodinamika, műszaki termodinamika, elektromosság tanra le. A feladat megoldására tehát csak egy „Simonyi Károly-i kvalitás” vállalkozhatnék.

Érthető, ha más irányt veszek. Például megmagyarázom, hogy nem tollbotlás volt, hogy a szigorúan vett alaptudományoknál „vázolás”-t írtam. Az alap kutatásban a megértéshez vezető út tévedésmentessége, egyértelműsége érdekében ugyanis a probléma egyszerűsítésének, lemezletlenítésének útját kell választani. Emiatt, ha a modell-szerűvé redukált problémát megoldották, a kutatók többnyire lezártak is érzik az ügyet (mai prioritásokra gondolva: aligha hoz már magas impact faktort vagy jelentős számban további hivatkozásokat...) – ritka és kivételes tehát, hogy alapkutatói szakmai iskolák felbővítsék az értelmezéseket arra a komplexitásra, részletességre, amely a gyakorlati alkalmazások megvalósításához viszont nélkülözhetetlen. A célzott alap kutatás, a *targeted research* teszi meg az első lépéseket ebben az irányban és viszi közel az iparhoz, hívja fel annak a figyelmét, hogy valami „használható” született. Ez a „munkamegosztás” alap- és alkalmazott kutatók, valamint a horogra került fejlesztők között: ez az ideális modell. A fordított a sorrend, amikor az értelmezés csak késve követi az alkalmazást, sajnos az is gyakori, de ott kibuknak a gondok – mondjuk – a környezeti, egészségi hatások környékén... Szeretném hinni, hogy a csúcstechnológia éppen ebben az értelemben talpára állítja a világot: értelmezésben az a csúcstechnológia, ami szimulációval is követhető, előre lejátszható, és tökéletesen kézben tartott folyamatokkal alkot.

A műszaki tudományok tehát az alaptudományok által felfedezett és leírt törvényeket úgy kezelik, alkalmazzák, mint „szerszámokat”, amelyekkel valami olyan alkotást le-

het létrehozni, ami eddig nem létezett. Emiatt azután szinte a teljes civilizációs világ nem egyéb, mint a (matematizált) fizika, kémia stb. műszaki alkotássá formálódásának példája, azaz a most megírandó cikknek valamennyi emberi termék, alkotás természetes tárgya lehetne.

Érthető tehát az elbátortalanodásom. Végül a konfliktusból azzal bújtam ki, hogy feltettem magamnak a kérdést: melyik az a fizikaalapú felfedezés (lehetőleg a Nobel-díjjal is jutalmazottak, vagy akár a szabadalommal védettek közül), amelyik közvetlenül, vagy a háttérben, de leginkább hozzájárult a 20. század arculatának kialakításához, illetve melyik vált kiemelten a mai életformánkat meghatározó tényezővé. Döntse el a tisztelt Olvasó, mekkora sikerrel tettem...

Elgondolkodhat az ember, hogy a legtöbb felfedezés valahol a természettől ellesett gondolatra, analógiára alapozódott. Alig van olyan, amelynek nincs, vagy amelynek a felfedezés idején nem lehetett természeti ötletadója. Sokan a kereket, a forgómozgást tartják ilyennek, bár arra a pusztai szél által hajtott kórok azért adhattak ötletet. A másik, szerintem a legjobb példa, az indukált optikai emisszió, illetve az arra alapozott lézer. Erre ugyanis legfeljebb logikai, netán formális általánosítás alapján gondolhatott *Einstein*.

Kezdtém tehát gondolatban sorra venni a 20. században tárgyasult felfedezéseket. Kiderült, hogy a komplex rendszerek önmaguktól is hátrább kerültek az ítéletemben. Például az óriási jelentőségű gépkocsi előre engedte a sorrendben magát az Otto-motort...

Itt, szívem szerint, cezúrát alkalmaznék, vagy a cikk végén egy „Megfejtések” részt iktatnék be – fejére állított betűkkel – megvárva a tisztelt Olvasó következtetéseit. Hiszen itt lehet véleményeltérés. Remélem azonban, hogy a cikket végigolvasva, meggyőző lesz mindaz, amire gondoltam.

Ne tekintsen aposztatának a tisztelt Olvasó, hogy a nagyszerű fizikai elveket, úgymint a relativitáselméletet vagy a kvantumfizikát, vagy a reméltem egységes térelméletet nem hoztam ki nyertesnek. Noha nyilvánvaló, hogy ezek a szellem legnagyobb fizika tárgyú alkotásai, amelyek beleszóltak már a század alakításába is, és abban én is hiszek, hogy a jelentőségük a 21.-ben ki fog teljesedni

(amelyre igyekszem példát is hozni), de eddig csak korlátozottan kaptak alapvető, életátformáló szerepet. A következő, műszakivá vált ötletként az előzőekben már a kiemelt fontosságú lézerek jutnak az ember eszébe, amelyek az életünket jelentősen és széles körben átformáló alkalmazásokhoz vezettek és – várhatóan – fognak továbbiakhoz vezetni.

## A megoldás

Van azonban egy eszköz, felfedezés, találmány, alkotás (minek is nevezzem?), amely nélkül sem a nagy elméleteknek, sem más ötletnek az íve nem alakulhatott volna olyaná, mint ami az ezredforduló világában élénk táru. Beleértve a kvantumkémia praktikus értéké válását is. Ami nélkül a lézerek sem fejlődhetek volna a mai gyakorlat szintjére, sőt az egyik, egyre fontosabbá váló fajtájuk, a félvezető lézer meg sem született volna.

Lassan közeledik – feltételezem – a tisztelt Olvasó a rákérdezéshez. Azt kell mondanom, hogy egy alapvető találmányt, eszközt várok válaszul, nem általánosan azt, hogy „Számítástechnika” vagy „Elektronika”, amelyről lesz önállóan is szó e célszámban...

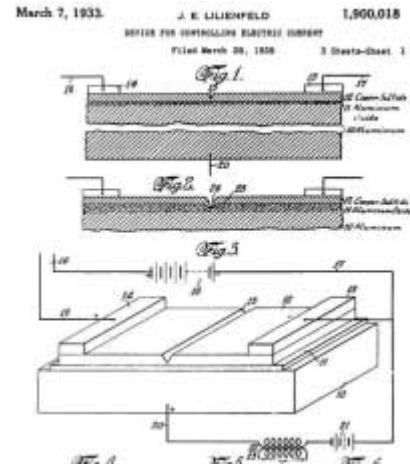
A magyar szomorú valóságban az általam várt válasz a számítástechnika Hamupipókéje, a félvezető eszköz, a dióda, de főleg a tranzisztor. Magyarul azért nevezem Hamupipókének, mert nálunk az oktatás–kutatás–ipar rendszerében ez a zseniális felfedezés elkerülte a köztudattá válásnak másutt természetes formáit. A középiskolába éppen csak hogy beverekedte magát – szinte akkorra, amikor a gyerekeink fizikát se nagyon tanulnak. A felsőoktatásból meg mára szinte kikopott...

A kései siratómhoz kérem a tisztelt Olvasó empátiáját.

Elismerem, hogy a tranzisztor nem *deus ex machina* robbant be a műszaki életbe, nem is annyira originális, mint a lézer vagy a maser. A tranzisztor őse ugyanis egy erős versenyző, a vezérelhető rádiócső. Ez vezetett el a gondolathoz, már a húszas években, hogy meg lehet-e mindazt, vagy hasonlót, amit ez a zseniális vákuumeszköz produkál, szilárd testekben is valósítani. A gondolat első szabadalma 1924-ből való: egy orosz kutató, *Lossow* jelentett be szabadalmat Németországban *Kristalle als Verstärker* címen. Az első, kifejezetten tranzisztor-analóg USA-szabadalom 1925–26-ból, *J.E. Lilienfeld*től<sup>1</sup> származik. Ő még rézszulfid vékonyrétegekkel működő eszközt, de már rádióvevő kapcsolási rajzát is tartalmazó bejelentést tett, amelyet 1928-ig két további szabadalma követett [1] (1. ábra).

*H.F. Mataré* 1944-ben szabadalmaztatta a tűs tranziszort Németországban, amely eredmény eltűnt a világkavarodásban. *H. Welker* azonban 1945-ben bejelentett egy német szabadalmat a térvezérelt tranzisztorra, kidolgozva annak egyenleteit is. Ők ketten, közösen jelentettek be szabadalmat 1954-ben – 1948-as franciaországi elsőbbségi igényvel [2].

<sup>1</sup> A Monarchiában honfitársunk Lembergben született 1882-ben, iskoláit már Németországban végezte, 1926-ban emigrált az USA-ba, és ott is halt meg 1963-ban.

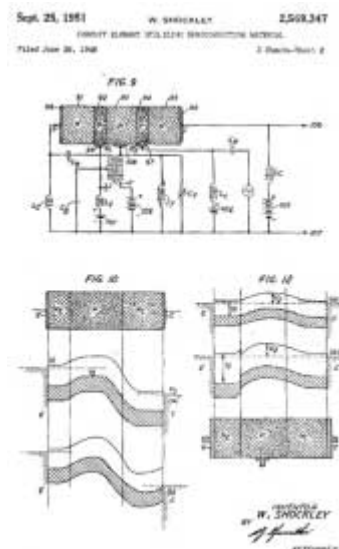


1. ábra. J.E. Lilienfeld szabadalma: Device for controlling electric current, US Patent 1,900,018, amely, akkor, rézszulfid félvezetővel működött

A tranzisztor gondolatnak tehát mindkét változata a „levegőben lógott”: mind az unipoláris, amelyet ma MOS-nak nevezünk, mind a bipoláris eszköz. Érthető, hogy az USA történelmi értékű laboratóriumában, a Bell Telephone Laboratoriesban (legyünk jóhiszeműek, a háborús nyertesek eufóriáját is megértve), mindentől függetlenül kezdtek a kérdéssel foglalkozni – bár *A. Glaser*nek 1932-ben megadott, 130102. számú osztrák szabadalmáról, amely két szembefordított kristálydiódával, amelyet egy vezérlőelektróda választ el, és így működik erősítőként – igazán tudhattak volna...

A Nobel-díjassá vált Bell-trió, *J. Bardeen*, *W.H. Brattain* és *W. Shockley* története is szokatlan. Nem csak abban, hogy két egymás utáni bejelentést tettek 1948-ban. Először Bardeen és Brattain a vezérelt, lényegében tűs eszközre, majd Shockley, a főnökük az ötvözött npn-tranzisztorra (2. ábra). Tudjuk, hogy ez utóbbi indította el a hódítást.

A trió, az akkori személyes ítéletemben (a párhuzamokról persze akkoriban nem volt tudomásom) azzal érte el a Nobel-díj normáit, hogy rájött a külső térrel vezérelt germánium-tranzisztor kudarcának okára is. Fizika 2. ábra. *W. Shockley* szabadalma az ötvözött tranzisztorra. A potenciál-eloszlás teljesen kidolgozott modelljével



volt az a javából, amikor rájöttek, hogy a levegőből pára-komponensek (hidroxilgyökök, ionok) adszorbeálódnak a germánium felületére, és mint dipólusok, a geometriai közelségük miatt teljesen leárnyékolják a mikrométer vastag távtartóval alkalmazott külső teret. Azaz, annak hatása elhanyagolhatóvá vált az úgynevezett tértöltési rétegben, ahol a vezérelt vezetési jelenségek zajla(ná)nak. Ezzel megalkották a „felületi állapotok” elméletét is. A rétegt tranzisztort (*junction*) azonban nemcsak megvalósították, de például Shockley első könyvében olyan részletes elméletet is közöl, amely ma is alapmű.

A rétegt tranzisztort nemcsak megindította az elektroncsövek kiszorulását, de emellett ébren tartotta a tudományt, az érdeklődést a külső térrel vezérelt eszköz megvalósítására is. Amíg *Bruce Deal* vezetésével, *Andy Grove* és mások kongeniális munkájával, az Intellé váló Fairchild kutatógárda megoldotta az oxidnövesztés technológiai higiénéjét, és esély lett az unipoláris tranzisztornak (MOS: *Metal-Oxide-Semiconductor* tranzisztort) a megvalósítására, valamint a hatvanas években.

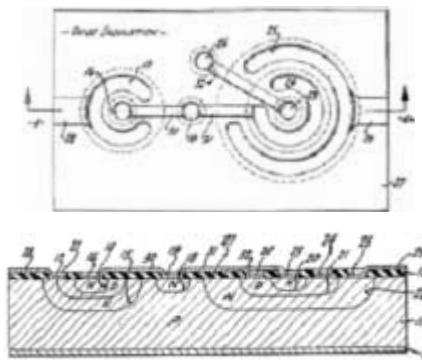
Ehhez azonban a szilícium „győzelmére” is szükség volt. A szilícium ugyanis istenáldotta anyag: a) kiváló kristály növeszthető belőle, ma akár 450 mm átmérőben, b) a saját termikus oxidja kiváló dielektrikum a MOS kapuelektrodájának távtartására. Ugyanez az oxid c) alkalmas arra is, hogy megakadályozza a nemkívánatos anyagok atomjainak bejutását a kristályba („maszkoló anyag”), de – a HF specifikus marószere lévén – a kristály felületén kialakított oxidábrák „ablakaiban” igenis bejuttathatók az adalékok, azaz a kívánatos atomok. Egy átok azonban sújtja: a sáv szerkezetének a sajátosságai miatt nem lehet hagyományosan világító diódát (LED), pláne lézert készíteni belőle. A vajt fülűek indirekt félvezetőnek nevezik ezeket.

### A mai varázslat, az integrált áramkör

A következő lépést az integrált áramkör ötlete adta (*J.S. Kilby*, 1959, és *R.N. Noyce*, 1961, [3] csak az előbbi érte meg a Nobel-díjat, 2000-ben). A 3-4. ábrán mutatjuk be a kezdeteket.

A következő meghatározó ötlet inkább üzleti, semmint fizikai volt. *G. Moore*-tól ered (ejtsd „mór”), aki szintén a „Fairchildből Intelt alapító” csapat tagja, annak kereske-

3. ábra. *J.S. Kilby* integrált áramköre



4. ábra. Az iparivá vált változat, *R.N. Noyce*

delmi igazgatója volt a hetvenes évek elején. Tőle kért a fiatal cég üzleti tervet. Moore megvizsgálta az első néhány év termelését, és észrevette, hogy az Intel képes volt minden évben kétszer annyi tranzisztort kialakítani egy-egy chipen, mint az azt megelőző évben. Arra következtetett, hogy ez a fejlődés még egy ideig, akár a hetvenes évek végéig tartható lesz. Nem gondolhatott arra, hogy a szakma generikus jellegét vette észre. Az üzleti verseny, az informatikai alkalmazások elvárásai ugyanis ilyen tempójú fejlődésre készítették a mikroelektronikát, amely fejlődés – noha a kettes faktor mára 1,8-re mérséklődött – évtizedes trenddé változott, és amely minden jel szerint még vagy tíz évig tartható. Jómagam olyan „nagyra” tartom a „Moore-törvényt”, hogy remélem, ha már végleg lezárul a mai logikájú, mai szervezésű integrált áramkörök korszaka, és valami más elv veszi át a helyét, lesznek mérnökök, akik elkészítik az akkori, nagyságrendekkel komplexebb eszközöknek a helyettesítési kapcsolását. Azaz, hogy hány billió-trillió tranzisztorkapuvall lehetne azt, az akár biológiai funkciót megvalósítani, amikor is – szorítok – kiderülhetne az, hogy a törvény tényleg generikus...

Hol kezdődött mindez az én emlékeimben? Természetesen a Caltech-es tartózkodásokkal teli életem évtizedében, ahol sikerült – *J.W. Mayer* csoportjában – egy felvetett kételyem nyomán és egymást váltó munkatársaimmal, elsősorban a tragikus sorsot élő *Csepregi László*val, valamint amerikai kollégákkal, elsősorban az NSF pénzügyi támogatásával egy az ipar által mindmáig általánosan használt implantációs eljárást, valójában egy szilárdtestfizikai „trükköt” felfedeznünk, amely nem jelentéktelen mértékben járult hozzá a Moore-jósolta fejlődéshez. A KFKI-ban is megkaptuk a támogatást, az eszközöket, hogy mindezt laborszinten itthon is megvalósítsuk.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> A KFKI-ba kerülésemtől, 1970-ben már itt találtam *Csepregi Lászlót*, míg az első, általam felvett fiatal *Keresztes Péter* volt, majd *Révész Péter*, *Hegedűs András*, *Kótai Endre* következett, illetve *Erős Magda* technikus említendő együtt azokkal, akiket az Egyesült Izzó előrelátása delegált: *Mobácsi Tibor*, *Schiller Róbertné*, *Gyimesi Jenő*. A később – még a KFKI-s időkben – *Lobner Tivadár*, *Drozdy Győző*, *Fried Miklós*, *Vályi Géza* lett tagja a csapatnak. Velük – és az implantációt működtető és sajátfejlesztésű implantert is építő *Pásztor Endre* részlegével – sok műszaki „elsőséget” valósítottunk meg. A témához annak kezdetekor csatlakozott fizikusokkal, *Keszthelyi Lajossal*, *Mezei Gáborral*, *Demeter Istvánnal*, *Varga Lajossal*, *Bagyinka Csabával*, *Manuaba Ashramával*, *Szőkefalvi-Nagy Zoltánnal*, majd *Pászti Ferenc* és *Szilágyi Edit* révén – és a gyorsítót üzemeltető *Kostka Pállal*, *Klopfer Ervinnel* és csapatukkal pedig az ionsugaras analitikában tettük le a névjegyünket.

A miniatürizálási trendről egy kedves hazai emlékem maradt. Valamikor a hetvenes évek közepén érkezett haza az USA-ból *Zámori Zoltán*, KFKI-s barátom, egy ZX-80-as miniszámítógéppel, amelyet egy szemináriumon bemutatott. Ott fogalmazott úgy, talán az egyik első Semiconon szerzett tapasztalatai alapján, hogy amikor egyetlen bit információ kezelésének költsége egy ezred dollárcent alá süllyed, attól fogva minden aritmetikai műveletet érdemes digitálisan végezni. Nos, ez mára valahol a piko–femto-szinten van, és nincs megállás. Mára ugyanis már az iparág „brute force” dominanciája is érvényesül – hátráltatva akár izgalmas, például az analóg megoldások újbóli terjedését.

De beszéljünk a miniatürizálásról. A közhit – nem csekély joggal – a miniatürizálás fő hasznának a kis méretben azonos vagy nagyobb számítási kapacitást, vagy a kisebb fogyasztást, vagy a hordozhatóságot tartja. Van azonban egy ennél talán még fontosabb elem. Ez a méretcsökkenéssel együtt járóan, a megbízhatóság növekedése. A tranzisztorok öregedése, meghibásodása egyértelműen szilárdtestfizikai kérdés: a helyi melegek, nagy elektromos télerősségek képesek nemkívánatos – ma „nanofizikainak” mondanók – anyagtranszportot létrehozni. Ez vezet a katasztrofális meghibásodásokhoz. Egy jól méretezett chip belsejében azonban ilyenek csak a legkisebb valószínűséggel lépnek fel. Azaz, ha a chipbe maximális intelligenciát zsúfolunk, hogy az önállóan lássa el a feladatokat, és csak ritkán kérdezzen tőlünk, tévedésre hajlamos emberektől bármit, a megbízhatóság jelentősen megnövekszik.

A Moore-törvény „professzionizálását” az úgynevezett Roadmap-tanulmányok, teljes mai névvel: *International Technology Roadmap of Semiconductors* (<http://public.itrs.net>) valósították meg. A nyolcvanas években bízott meg először az USA félvezető ipara egy szakértő csoportot, hogy készítsen tanulmányt a szakma fejlődése fenntartásának követelményeiről. Ezek a nemzeti tanulmányok bővültek mára nemzetközivé. Négyévenként újra elemzik, kétévenként kiigazítják a tanulmányt. Sorra veszik valamennyi feladatot, azaz a tízegeynéhány kritikus műveletet, valamint a simulációt, a rendszerré szervezést érintő követelményeket, azoknak az előrelátható szakmai igényeit. A Természet – ritka eset – nagyon segíti a szakmát azzal, hogy érvényes a skálázási elv: ha egy tranzisztor bizonyos méretekkel működőképes, annak minden méretét arányosan lecsökkentve, ugyanolyan paraméterű tranzisztort kapunk. Itt kell megemlíteni, hogy mindez elsősorban a mára befutott, úgynevezett komplementer MOS, a CMOS technológiára<sup>3</sup> vonatkozik.

Egy-két mennyiség azonban nem skálázik, például a Joule-hő... ennek hatása van/lesz a végleteknél kritikus... A Roadmap-tanulmány – szellemesen – színekódolja a problémákat: fehér alapon szerepelnek azok, amelyek ma már ipari fejlesztés szintjén lényegében megol-

<sup>3</sup> A CMOS, egy invertert alkotó komplementer tranzisztorpár egy p- és egy n-csatornás elemből áll, azaz ezeknek a tértöltési rétegében, a „csatornában” az egyiknél lyukak, a másiknál elektronok közvetítik az áramot. Ennek az a fő előnye, hogy csak tranzienst áramok folynak és a logikai „0”, illetve az „1” állapot tartása nem emészt energiát.

1. táblázat

**Egymást követő (1999 és 2003) ITRS-ek összehasonlítása.  
A számok mutatják, hogy a fejlődés konzervatívva minősítette az előreléjzést.**

év	1999	2003	1999	2003
	félmodul (nm)		effektív oxidvastagság (nm)	
2001	150	130	1,6	1,4
2005	100	80	1–1,5	1,0
2007	80	65*	1	0,8
2010	55	45	0,8	0,6
2016	–	22	0,5	0,4

\* A dőlt betűk a „red brick wall”-ra utalnak. Vö. az oxidvastagságot a szilícium rácsállandójával, amely 0,5 nm!

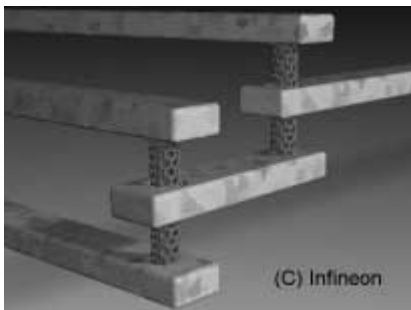
dottak, zöld kóddal azok, amely követelmények teljesítése még komoly KF-munkát igényel. Vörös alapon szerepelnek a „red brick wall”-ként aposztrofált kérdések, amelyekre „No known solution” a jelző. Ez az olvasmányrész aranybánya az érdeklődő kutatóknak, akár az akadémiai szférában is (1. táblázat)...

## A fizika csodái az integrált áramkörökben

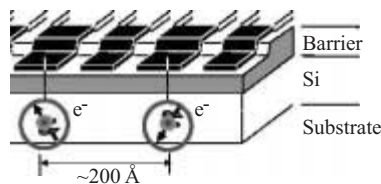
Az eléggé közismert, hogy a fizikai nagyberendezések, gyorsítók vagy az űrkutatás is óriási műszaki fejlesztéseket kényszerít ki, de számomra az integrált áramkörök jelentik a csúcshizikát. Ezt néhány példával kívánom megvilágítani. Az egyik maga a szilícium alapanyag. A Moore-törvény egyik sajátja, hogy megszabja a gazdaságosságot is: a tehát a mintegy tizenötféle fizikai-kémiai műveletnek<sup>4</sup> vagy kétszázlépéses (!) egymásutánját úgy kell megszervezni, hogy a gyártósor átbocsátóképessége 1 szelet/perc legyen – függetlenül az egyre növekvő komplexitástól. Ez megköveteli az egyre nagyobb átmérőjű szeletek alkalmazását. Ma 300 mm (!) a standarddáváló, 450 mm a remélt. Ekkora, emberderék méretben kell tehát „diszlokációmentes” kristályt előállítani (számszerűen: egy-két diszlokáció tűrhető el a szűken 10 cm<sup>2</sup> chipfelületen)...

Hadd idézzek két számot, mielőtt a kritikus kapuelektroda kialakítására térnék rá: a Si-kristály rácsállandója 0,5 nm, továbbá az anyagok dielektromos letörése valahol 10<sup>10</sup> V/m télerősség körül következik be. Mindez azt jelenti, hogy a mára 300 mm átmérőjű, tehát közel egytized m<sup>2</sup> szeletfelületen hihetetlenül egyenletes vastagságban kell a szigetelőréteget létrehozni. A viszonylag „passzívált” szilíciumfelületen (ami azt jelenti, hogy a szabad

<sup>4</sup> A rétegépítő műveletekre példa a fizikai, illetve kémiai rétegleválasztás, ionimplantáció (amely az IC-iparban vált nélkülözhetetlenné: egy mai Intel processzorchip 23-szor jár az ionimplanterben – ebből három kritikus esetben alkalmazták az említett Caltech–KFKI trükköt...), a rétegtávoltító műveletekre a kémiai marások mellett az egyébként szelektív és anizotróp plazmás marások a példa. Az egyes rétegek rajzolatait a rézkarctechnikából eredeztethető *litográfias eljárások* jelentik... A litográfia és az implantáció a két legtöbbször előforduló művelet, de talán a kapuelektrod dielektrikumának előállítása a legkritikusabb.



5. ábra. Az Infineon cég (Drezda), W. Höbner, fantomképe a szén nanocsöves áramkőről



6. ábra. D. Jamieson (Melbourne) sémája a CMOS-kompatibilis spintronikai eszközről (Kane-komputer)

kötések miatt az elektronok páronként „súlyzókat” – *dumbbell* – alakítanak) fel kell tépni a kötéseket, és szabályosan ma két Si-O-Si-O, holnap már talán csak egy réteget kell létrehozni. Tehát a szükséges – nem több és nem kevesebb – oxigénatomnak a teljes szeletfelületen egy időben rendelkezésre kell állnia. Azaz a redukált atomszférát úgy kell kialakítani, hogy a maradékgázok parciális nyomása a pikobarok tartományában legyen, és az oxigénatomok szabad úthossza elég nagy legyen ahhoz, hogy biztosítsa az egyenletes transzportot. Utalhatnék itt arra, hogy milyen szimulációs programok képesek a reaktortervezést átlendíteni a véletlen próbálkozások (*trial and error*) stratégiáján. Még egy nem kevésbé kemény követelmény, hogy a dielektrikum ellenálljon a letörési feszültséget szinte megközelítő üzemi feszültségnek. A lehetőleg nagy feszültség azért követelmény, hogy a  $kT$ -től minél messzebb legyünk. Emellett, mivel a Si és az oxid határfelületén keletkezett hibák, atomi lépcsők mind „lógó kötéseket” (*dangling bond*) okoznak, amelyek elektronsapdáként viselkednek, a lépcsőhibák számára is korlát adódik: legfeljebb minden *ezredik* atom helyén tűrhető el egyetlen egyatomos lépcső.

Az ionimplantáció feladata sem sokkal egyszerűbb. Gondoljuk meg, hogy egy tranzisztor kapuelektrodája néhány tíz nm, amelybe egy-két bóratomot kell bejuttatni, hogy azok a töltésükkel beállítsák az üzemi feszültséget. A statisztika mindennél ellene dolgozik. Vagy, a Si kristályos jellege csatornázza a bórionokat, és reprodukálhatatlan mélységekbe jutnak. Mindmáig az 1975-beli Caltech–KFKI trükk segít leginkább, amikor is Si-ionokkal amorfizáljuk a felszín, és az adalékionokat ebbe a rétegbe implantáljuk, amelyet egy alacsony hőmérsékleten végzett epitaxiás visszánövesztéssel hozunk rendbe. Ezzel is gondok vannak, persze, valahol a 45 nm-es „csomópont”<sup>5</sup> táján, amikor egy-két (nem mindegy, hogy egy vagy kettő!) bóratom kell az üzemi feszültség beállításához, de jobb ötletéről még nem tudunk: az Intel most induló processzorgyártásában is még 23 ionimplantációs lépés szerepel.

Hasonlóan kitérhetnék az ábraméretetek követelményeinek kielégítésére, amelynél évtizedek óta jósolják, hogy a fotolitográfia nem lesz képes ennek eleget tenni. Nos, a félvezetőipar szorítása az optikát is csodákra kény-

szérette: hol van már a tanult szabály, hogy a hullámhossz közelébe eső méreteket nem lehet hibátlanul leképezni? Mert ma valahol az egyharmad lambdánál látszik gond, azaz a még a 193 nm-es excimer vonal is jó a 90 nm-es csomópontnál. A 157 nm-es vonal használata is lehetséges (65 nm csomópont) és csak ezt követően látszik az áttérés szükségessége a röntgen-, elektron-, vagy ionlitográfiára...

Hogy mi lesz 2015 táján, amikor már nem lehet hagyományos szerkezetű, kisebb tranzisztorokat előállítani – nincs ugyanis elég atom hozzá, hogy klasszicizálódjék a rendszer? A kvantumfizika ad már ma is ötletet a kvantumszámítógépek változataira, azaz belép az emberiség e nagy szellemi alkotása a műszaki világunkat direktben alakító erők közé – és az abból kiépült műszaki tudomány új szerepet kap. És ezek fognak megmérkőzni... a közgazdaságtannal. Mert ez lesz a döntő. Személyes jóslatom szerint csak olyan változatok lehetnek „nyerők”, amelyek a mai CMOS-technológia alapjaira épülnek. Egyébként a mai, gazdaságilag erős IC- és a ráépülő elektronikai ipar aláásná a haladást. Tudok két változatról, amelynek látok esélyét, mert mindkettő csak egyetlen, hozzáadandó technológiai lépést igényel. Az egyik a vertikálisan, *in situ* növesztett, félvezető tulajdonságú szén nanocsövekre épül (5. ábra), a másik a spintronika CMOS-kompatibilis változata, ahol <sup>28</sup>Si epitaxiás rétegbe implantálnak egy-egy, de a spinjeik tekintetében kölcsönható távolságban lévő foszforatomot (6. ábra).

Az igazi kvantumkomputer, ahol a szuperponált állapotoknak a parallel-processzorok tulajdonságait megvalósító rendszeréről van szó, csak ezután várható. Idő is kell ugyanis a gyártmánnyá válásig. Meghívtak 1986-ban (!) arra a diszkusszióra, amely a Cornell Submicron Facilityben elkészült, első 100 nm-es tranzisztorok közel nulla kihozatalának javítását célozta. Nézze meg a tisztelt Olvasó a *táblázaton*: a 100 nm-es eszköz ma lett tömegtermék! Azaz a húszas évek közéjük már itt kell(ene) lennie a laborokban! És nem sok, gyökeresen más van itt. Én a *nanowire*, nanocsőre, illetve a spintronikára foga-dok, de hát könnyű egy öregembernek, úgymegússza a tetemrehívást...

## Kissé terjedelmes epilógus

Hogy azért szóljak más nagyszerű, a számítógépek által való paradigmaváltásoknak köszönhető eredményről is. Utcai Cato után szabadon egy, a római–pún kérdésnél nem kevésbé életbevágó „Egyébként...” kívánczik ide:

„*Ceterum censeo, artem omnium industrialium esse revisitandam.*”

<sup>5</sup> A csomópont (*node*) egy-egy, a tranzisztor félméretével jelzett miniaturizációs generációra vonatkozik, amelynél jelentős technológiaváltások is megszokottak.



## A mai anyagkutatás frontvonalai – anyagcsaládok és iparágak szerint

	infotechnológia	energetika	közlekedés	gépipar, építőipar	agro-, biotechnológia	gyógyászat
félvezetők	Si, SiGe, A, B <sub>5</sub> , szén nanocső	teljesítményelektronika, SiC		napelemek	organikus félvezetők	aktív implantok
szerkezeti kerámiák	átlátszó kerámiák	turbinák, csapágyak	motorok (1–2 l-es)	motorok, szerszám, kemény bevonatok, gépek		protézisek
funkcionális kerámiák	szenzorok, szupravezetők	tűzelőanyag-cella, magas hőmérsékletű szenzorok, akkumulátorok, szupravezetők?		<i>szenzor, nanomegmunkálás</i>	<i>szenzorok, beavatkozók</i>	idegstimulátorok
optikai, fotonikai anyagok	<i>hullámvezető, chip, „photonic bandgap”</i>	kisfogyasztású elektronika, LED, lézer (GaN), kisülésselámpa <i>a világítás forradalma</i>		monitorok	távírányítás	<i>mesterséges érzékszervek</i>
polimerek	low, high k, CD, memóriák, szigetelők	napelemek, szigetelők	járműipari igények szerint	hőálló és terhelhető polimerek (300– 500 km önhordóképeség!), „smart” aktív anyagok		biokompatibilis, terhelhető, „smart” aktív anyagok
	<i>a világítás forradalma: OLED, PLED</i>					membránok, önszerveződés
fémkutatás	tiszta fémek, Cu, Au, W, Ta stb.), szupravezetés	könnyű fémötvözetek, kompozitok, „smart” aktív anyagok, acélok, fémhabok			korrózióálló ötvözetek	kompozitok, protéziselemek, „smart” aktív anyagok
nanoszerkezetű anyagok	<i>mágneses anyagok egyel. tranz., kvantumkomputer</i>	turbinák	<i>fullerénszerűek, CN, BN, gyémánt</i>		genom	protézisek, biokompatibilis fullerénszerűek, gyémánt
			teherbíró és korrózióálló szerkezeti anyagok, bevonatok			
többfunkciós mikromegmunkálás, MEMS + nano	<i>adaptív optika</i>	<i>őnoptimalizáló anyagok</i>	intelligens távolságtartók, fékek, ütközők, biztonság minden formában	intelligens szersz., intelligens házak	intelligens gépek, GPS-vezérlésű	intelligens implantok, „smart” aktív anyagok bekapcsolásával, mesterséges érzékszervek
	metaanyagok (negatív permeabilitás?); <i>a szenzorok és beavatkozók (sensors and actuators) „forradalma”</i>					

Buckminster Fuller<sup>6</sup> már 1969-ben értekezett a Földről, mint „Spaceship Earth”. Az *Operating Manual for Spaceship Earth* című munkájában azt írta, hogy „One outstandingly important fact regarding Spaceship Earth, and that is that no instruction book came with it...” Gondolkodjék el a tisztelt Olvasó erről a „spaceship”-ről, mit is jelent? A bolygónk termikus egyensúlyban lebeg a napsugarak fürdőjében – némi örökölt radioaktív bomlásterheléssel. Ez az egyensúly, évmilliárd óta – viszonylag kis fluktuációkkal – fennáll. Ennél mélyebb értelműen aligha lehet megfogalmazni a homo sapiens egyelőre egyetlen szállásterületének credóját és a kapcsolódó feladatokat. Módom volt személyesen megismerni a Római Klub egyik alapítóját, Albert Rose professzort, aki – még a hetvenes években – mesélte, analizálták ezt a ma még kékesszürke, azaz eszerint abszorbeáló és emissziójú „űrhajót” a Kirchhoff-féle sugárzási törvény alapján (üvegházhatás nélkül). Kimutatták, ha az emberiség – bármilyen, akár környezetk-

mélő fúziós folyamatokkal – felszabadítja a Napból érkező energiának mindössze öt tizedrét, már az egy fok átlaghőmérséklet-emelkedést okoz! Én hiszek ennek a számításnak, legalábbis nagyságrendi érvényében, amit az üvegházhatás csak tovább ront. A fejlett országok, a területükre vonatkoztatva, már jó ideje itt tartanak. Hozzájuk nőnek fel teljes joggal a fejlődő országok. Tehát nem elég olyan energiaforrásokban gondolkodni, amelyek alig bontják meg a termikus egyensúlyt (azaz a napenergiát *real time* hasznosítók, mint a növényi élet, de legalábbis megújulók), hanem el kell érni – erre mintegy száz év tartalékidőt becsülök –, hogy ugyanazt a terméket, emberi funkciót jelentősen csökkentett energiával hozzuk létre. Azaz, a fejlett emberiség legfőbb missziója, hogy „újralátogassa” valamennyi technológiáját, hogy energia- és anyagtakarékosabb változatokat dolgozzon ki, főleg pedig zárt termelési-fogyasztási ciklusokat hozzon létre – nem az üveg-visszaváltás szintjén. Nos, ez szabja meg a következő évtizedek műszaki kutatásainak fő irányát, és kell – bármilyen áttételesen – szolgálnia a fizikának, kémianak, biológianak – benne a nanotudományoknak.

<sup>6</sup> A szén gömbszerű formációját erről az építész Fullerről nevezték el „buckyball”-nak, vagy a „fullerén”-nek.

Tisztaban vagyok azzal, hogy a fejlett világ számára a mi száznegyven évig való életünk nagyobb pénzmozgósító erő, de a tízmilliárd ember víziója nekem más lözönget, súlypontot sugall – igaz, lehet, hogy a kutatási tematika ugyanaz, vagy ahhoz közeli.

Ennek két egyszerű, bár inkább lélegzethez jutásnak tekintendő eredményről kell szólnom. Az 1980-as évek elején zárult sikerrel az az EUREKA-program, amely – kétszázmillió akkori ECU-ból – megépített egy „egyliteres gépkocsit”, azaz, amely 100 km/h sebességgel haladva, 100 km-en 1 l üzemanyagot fogyaszt. Az már társadalmi kérdés, hogy – mondjuk – a 2–3 l-es mikor válik szériakocsivá. Az ebben a projektben is szerepet kapott magas hőmérsékletet elviselő fémkerámiaik mást is lehetővé tettek: a 60%-nál jobb termikus hatásfokú gázturbinák, azaz a Carnot-hatásfokot jobban megközelítő ciklusú hőerőgépek kifejlesztését. Ezek biztosan adnak lélegzetvételnél is időt, hogy milyen legyen, illetve lehet a közlekedés, ha már tízmilliárdan leszünk... Ezek a találmányok az energiaigény-görbének a telítődésbe hajlását is szolgálják.

Itt kell megemlíteni a szakterületen kibontakozó két „forradalmat”: az érzékelők-beavatkozók forradalma az egyik, a világításé a másik.

Kezdjük a világítással. Nem igényel bizonyítást, hogy az emberiség pazarlóan világít. Sok ötlet ismeretes, de a fehéren világító diódából (LED) – mivel csak a láthatóan sugároz – 5 W elegendő egy gépkocsi reflektorába. Vagy az organikus félvezető LED (OLED) a következő csoda, amely sugárzó falfestékként is használható? Vagy a szinte hihetetlen, ismét csak az optika csodája, amely az izzólámpát különleges, wolframrudakból álló háromdimenziós fotonikus kristállyal<sup>7</sup> venné körül, és a hőszugárzás jelentős részét fényre konvertálva, jelentős hatásfokemlést érne el [4] – megmentve ezzel az izzólámpát?

Mit is értünk az érzékelők-beavatkozók szimbiózisán? Az érzékelők – mint aktív, funkcionális elemek, anyagok – hivatottak kielégíteni a számítástechnika és az adatforgalom adatéhségét, azaz megadni annak a joysticknak, vagy a

<sup>7</sup> A fotonikus kristályok (*photonic crystal*, vagy *photonic bandgap* anyagok) olyan háromdimenziós szabályosan lyukacsos/„átlátszó” (?) szerkezetek, amelyeken – a bennük létrejövő interferencia révén – bizonyos hullámhosszak nem képesek áthaladni. Az élővilágban az irizáló, gyöngyházfényű állatok színét rendszerint ez a hatás okozza.

## FIZIKA AZ ORVOSLÁSBAN

### Közös kezdetek

Physica–physicus–medicina: a gyökerek azonosak. Crômagnoni örökségünk a környezet megismerésének kényeszerű kívánsága – a fennmaradásért, „túlélésért”. Az *Oxford Dictionary*-ban a modern *physics*, *physical science* a termé-

virtuális valóságon túli értelmét: a tízmilliárd emberrel megrakott Föld életesélyét. Ma már az egész környezetünk kiokosítása a kutatási cél. A mindent mérni, szabályozni ma perspektivikus formájának *Ambience intelligence* nevet adtak. Ez arról szól, hogy minden tele van szórva intelligens, a gépeinkkel kommunikálni képes mérő-jelző, akár csak porszemnyi autonóm eszközökkel, amelyek egyike-másika (kon)föderatív módon be is avatkozik a világunk irányításába – az élő szervezet modellje szerint.

Szívesen leközlöm időnként azt a táblázatot, amely iparáganként és anyagcsaládonként mutatja be az élvonalbeli anyagkutatásokat (*2. táblázat*) – bemutatva, hogy vannak, lesznek eszközeink mindezen terv megvalósítására. Itt lenne az ideje, hogy rákerüljenek a táblázatra az anyagcsaládok sorai közé az élő vagy biomimetic anyagok...

Igaz, az a világ aligha lesz könnyen élhető, de legalább a humánus esély megmarad a homo sapiensnek. Köztudott, hogy 2050-re a fejlődő országok fajlagos energiafogyasztása eléri a mai OECD-szintet. Az *IEEE Spectrum* 2004. októberi száma írja a kínai fejlődésről, hogy ott ma is a szén a főszereplő... Jaj! Valami olyasmit kell, még komplexebbül megismételni, mint a korábbi olajváltások idején, illetve után. Valami fényt jelent az alagút végén, hogy a DOE szerint 1 dollár GDP megtermeléséhez szükséges energia az USA-ban évi 6%-kal csökken. Tehát megindultunk. A század végéig talán még van lehetőségünk...

És ha Magyarország ott akar lenni az élbolyban, akkor az ír modellnek csak a második felét szabad, kell lemásolnunk... Az első tizenöt évet, a gazdasági romlásához vezetőt, az EU-pénzeket elpocsékolót, semmiképp.

A régi viccel: „ДумаЙ, Сержа!”...

### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom mind *Dr. Wolfgang Höhnlein*nek (Infineon), mind *Prof. Dave N. Jamieson*nak, tagtársamnak a Böhmsche Physical Society-ben (Melbourne-i Egyetem, Centre for Quantum Computer, Ausztrália), hogy készségesen hozzájárultak eredményeiknek felhasználásához.

### Hivatkozások

1. J.E. LILIENFELD – US Patent No. 1,745,175; 1,877,140; 1,900,018.
2. H. WELKER – Deutsches Patentamt, No. 980084.; *H.F. Mataré*val együtt *H. Welker* 1954-ben, de 1948-as franciaországi elsőbbségi igénnyel, az USA-ban is bejelentette a tús tranzisztort, illetve az azzal konstruálható erősítőt, US Patent No. 2,673,948.
3. J.S. KILBY – US Patent No.; R.N. NOYCE – US Patent 2,981,877
4. J.G. FLEMING, S.Y. LIN, I. EL-KADY, R. BISWAS, K.M. HO – *Nature*, 417 (2002) 52

### Köteles György

„Fodor József” Országos Közegészségügyi Központ  
Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézete

szet erőinek és jelenségeinek megismerésével foglalkozik, amelyek nem élők. De a *physician* mint régi elnevezés az orvost jelenti a *physicist*tel, a fizikussal szemben.

Az ókori és középkori tudományoknak nem volt szorosan a mai értelemben vett jelentésük. Az akkori „grammatika” felölelte a stilisztikát és az irodalomtudományt, a „dia-