

Anyagtudomány és anyagmérnökség – ennek néhány egyedi vonása a kelet-közép-európai térség (KKE) országaiban

Materials Science and Engineering – Some Aspects in Central and Eastern European (CEE) Countries

Gyulai József

MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, MFA, Budapest, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikus Eszközök Tanszék, Budapest, Magyarország
gyulai.jozsef@energia.mta.hu

Összefoglalás

Ez a bevezető tanulmány összehasonlítja a tudománynak és a mérnökségnek a szerző szerinti lényegét, és bemutatja, hogy miként alakult ki a modern interdiszciplináris anyagtudomány, anyagmérnökség, angol nevén a Materials Science and Engineering (MS&E). Szó lesz arról, hogy e tudomány alapján kifejlődött mikroelektronika milyen, korábban ismeretlen követelményeket támasztott az MS&E elé, ami tudományos paradigmaváltást okozott. A mikroelektronika ugyanis az informatika „anyagtudományává” válva teljesen átalakította a földi életet. Ezt bemutatandó, egy táblázatot közlünk, amely megkísérli összefoglalni, hogy az anyagok családjai milyen mai kutatásokkal befolyásolják, kritikus hatással is, a különféle iparágak fejlődését. Szót ejtünk arról, hogy a KKE-országok milyen tudástökével indultak a politikai változások idején, milyen jövőt lát egy idős kutató, és mit szeretne a régió jövőjeként kibontakozva látni a fiatalok ambiciózus munkássága révén.

Kulcsszavak: *anyagtudomány, mérnökség, mikroelektronika, interdiszciplináris anyagtudomány.*

Abstract

This introductory paper summarizes the characteristics of how “Science” and “Engineering” differ from each other, forming the interdisciplinary topic of Materials Science and Engineering (MS&E). It will be shown how microelectronics has developed from modern materials science, causing a change in paradigm, and how microelectronics has become the “mother” science of informatics, changing life on Earth. To prove the importance of materials, a table is shown summarizing how modern MS&E forms the basis of practically all industries. The situation and development state of MS&E in CEE countries - despite different levels of industrialization – have some characteristics in common, and the way to development might also have techniques in common.

We will also mention the knowledge base that CEE countries possessed during the period of political change, and the likely future that an elderly scientist foresees for the region with the help of young ambitious scientists.

Keywords: *material science, engineering, microelectronics, interdisciplinary material science.*

Bevezető gondolatok

Ezeket a gondolatokat fiatal mérnököknek szánjuk, hogy erősítsük a szakmai elhivatottságukat. Mielőtt az anyagtudományról értekezni, rövi-

den arról szólunk, hogy a 21. század milyen nagy terhet, felelősséget helyez a fiatal vállakra. Arról ugyanis, hogy a Föld lakhatóságának fenntartása a mérnöki tevékenység sikerén áll vagy bukik. Biztos megoldásnak tűnik egy, a hivatalos EU-nyel-

ven „körkörös gazdaságnak”¹ nevezett létforma, mely az egyébként sem szerencsés hivatalos angol megnevezésnek, a „Circular economy”-nak szerintünk ügyetlen túlkörfordítása. Ennek lényege, hogy minden termelési-fogyasztási folyamatot zárt anyagciklusokba kell szervezni, minimalizált energiafogyasztással. Ez, lényegében, a hulladékmentes gazdálkodást vetíti elénk (azaz minden hulladék valahol nyersanyag is; bonyolultabban, mint pl. a mezőgazdaság korai időszakában).

Ennek akár technikai, pláne logisztikai nehézségei óriásiak, de más, bizonyosan működő megoldás nem vált ismertté. Mindennek ellenére ennek egy következménye világos: a mai tudománynak, mérnöki munkának nem lehet fontosabb feladata, célja, mint kutatni, kikutatni, hogy élhet-e, és ha igen, hogyan, kilenc-tízmilliárd ember úgy a Földön, hogy nem rombolja le, nem zavarja meg végzetesen az élőlények billiónyi szálán összefüggő létformáját. A tudomány nyilván csak a humanista megoldásokat keresheti, javasolhatja. Ehhez meg kell érteni a Föld mint „napmotor”² működésének lényegét, e tény vitális fontosságát. Ez az az üzenet, amelyet a fiatal mérnökök elé életcéllul kell örökítenünk.

És mit értünk mérnöki tevékenységen? Mit értünk tudományon, illetve mit értünk mérnökségen?

A történelmileg zseniálisként megőrzött tudások, de a főhivatású kutatókként dolgozók is, ha kísérleteket terveznek, vagy egy természeti jelenség értelmezésén gondolkodnak, óhatatlanul kénytelenek a jelenséget „lemezteleníteni”, megszabadítani a másodlagos befolyásoló hatásoktól annak érdekében, hogy a magyarázattal a kor matematikai, elméleti tudásának keretein belül tudjanak maradni. Így is gyakori, hogy például egy végtelen matematikai sor formájában megta-

lált megoldásnak csak egy-két tagját tartják meg, ezekből alakítanak közelítő megoldásokat. A felfedező vagy alapkutatásnak ez a gondja nemcsak a megoldás pontosságát korlátozza, de az eredmény alkalmazhatóságának is korlátot szab: nem könnyen képzelhetünk el gyenge közelítések esetén megbízható, mondjuk olyan termék elkészülését, amelyre az életünket is rábízhatjuk.

Az azonban igaz, hogy a társadalom nem várja el, hogy a felfedező lássa eredményének az alkalmazott jövőjét. Aligha valószínű, hogy amikor Arkhimédész „Heureka!” („Megtaláltam!”) kiáltással, tunikáját a fürdőben feledve kirohant az agorára, arra is gondolt, hogy a hajóépítés alaptörvényét éppen most fedezte fel. Bár ő éppenséggel mérnöki zseni is volt... Ha a felfedező kutató mégis megszólal felfedezésének gyakorlati értékéről, azt valószínűleg elfogultan teszi. A társadalom fékezett elvárását az is bizonyítja, hogy a tudomány költségei a legtöbb ország költségvetési rendszerében – a mieinkben is, sőt a korábbi KKE-sorsközös időszakunkban is így volt! – a kultúra és nem az ipar fejezet része! A magyarázatot világosabbá teszi a kutatás-fejlesztés-gyártás, a K+F+I finanszírozásának az 1:10:100-as szabálya: ha a kutatás pénzigénye egy egység, a fejlesztés 10, a gyártásba vitel 100 – és itt még a piac szabályozó szerepéről nem beszéltünk –, mindez magyarázza a megvalósítás nélkül maradt ötletek légijót is...

De közeledjünk a szűkebben vett tárgyunkhoz. Induljunk ki abból, hogy a társadalom elfogadta egy új jelenség magyarázatát, egy sikeres kísérlet eredményét, azt természeti törvénnyé emelte. Ez utóbbinál tehát azt fogadta el, hogy az a laboratóriumban, kísérleti egerekben működik. Ekkor kell a felfedezővel konzensziális kutatómérnöknek észrevennie a továbbfejlesztés lehetőségét, és felismerni, hogy – az eltelt idő ebben is segít – az eredmény az élet, a társadalom mely területén esélyes termékként való megjelenésre is.

De a kutatómérnök nagy fába vágja a fejszéjét: meg kell keresnie a korábban kényszerből elhanyagolt hatásokat, és az elméleti, főleg informatikai fejlődésre alapozva, visszaépíteni azokat az értelmezés leírásába. Ebben a folyamatban a mérnök az alapkutató által felfedezett törvényeket olyan szerszámokként használja, amelyekkel kialakíthat egy megcélzott szerkezetet, terméket, és az értelmezést is eljuttatja új, azaz akár a mai határokig, amit rendszerszintű szimuláció, netán mesterséges intelligencia meglétével jellemeznénk. Ezzel érve el, hogy megbízhatóan reprodukálható termék álljon elő...

¹ A körkörös gazdaság az egyébként sem szerencsés EU-hivatalos megnevezésnek, a Circular economy-nak rossz túlkörfordítása. Mi, a szerző csapata, e kifejezés megjelenése előtt évtizedekkel zárt gazdaságnak neveztük a fogalmat, amelynek lényege, hogy minden termelési-fogyasztási folyamatot zárt ciklusokba kell kapcsolni (ahogy ezt egyik diákom, munkatársam, Drodzy Győző, ma egy telefontársaság egyik vezéralakja, évtizedekkel ezelőtt, teázás közben megfogalmazta. Elterjesztenünk, sajnos, nem sikerült...).

² A napmotor (solar engine) azt fedi, hogy az űrben lebegő Föld életét jó 90%-ban a Napból érkező és a földfelszínre életre keltő, majd az űrbe mindenféle hullámhosszon visszavisszavetett energia egyenlő volta jelenti – ez a hőmérsékleti egyensúly. A Föld csodája, hogy ez az egyensúly évszázmilliók óta a jég olvadáspontja körül oscillál. A Római Klub munkásságából ismert, ha az emberiség az érkező napenergiának töredékét, 5/10 000-ét, bármilyen tiszta módon, de többletként felszabadítja, a földi átlaghőmérséklet 1 °C-kal megemelkedik. Ma már a 2 °C reményét tüzi a világ célul, ami... Ki tudja?

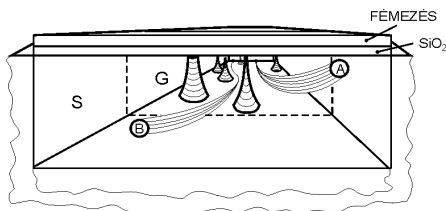
Eközben a *szerszám* meghatározás még ki-egészül, igaz, többnyire már egy ipari fejlesztői kollektíva munkájaként: *gyártástechnológiai* előírássá válik azáltal, hogy definiálja a *törvényből-lett-szerszámok* kézben tartandó paramétereit – hőmérséklet, időtartam, nyomás, gázkörnyezet, csiszolás stb. –, amelyek keretet szabnak a szerszámok célzott és megbízható működésének, és a minőségellenőrzésnek is alávetethetők.

Anyagtudomány és -mérnökség (Materials Science and Engineering, MS&E) – általában

A modern, 20–21. századi MS&E az *informatika* leánya. Ezzel nem akarjuk azt mondani, hogy a korábbi, az emberiség fennmaradását, netán például harcait segítő eszköz, a damaszkuszi pengének vagy Agricola 1556-os *Dē rē metallica* [1] könyvében leírt tudásnak az értékét lebecsül-
nénk. De az informatika belépése e sokszázados tudásiparba is paradigmaváltást okozott. Ma a *metallurgia* atomi szinten kézben tartott szerkezetek létrehozásának tudását is megköveteli, ami már nem működik az apáról fiúra szálló, de nagy korabeli értéket jelentő tudásátadással. A fentebb említett másodlagos hatásoknak a tudásba, annak törvényeibe való visszaépítéséhez kell az automa-
tika, a robotika, a vezérlésekhez, minőségellenör-
zéshez pedig a célzott informatika.

A szerző tehát szeretné, ha a T. Olvasó elfogad-
ná, hogy a mikroelektronikai technológia ennek a váltásnak a szülőanyja. További meggyőződésül
szólunk néhány, korábban sosem hallott minősé-
gi követelményről, ami kihatott valamennyi ipar-
ágra.

Az **1. ábra** (egy régi rajzomon) azt szemlélte-
ti, hogy egy tranzisztorban, annak ún. *tértöltési*
rétegében repülhetnek át az áramot jelentő A és B
töltéshordozók az S forrásból (*source*) a hátul
lévő D nyelőbe (*drain*), miközben a G vezérlő, *ka-
puelektród* (*gate*, az ábrán elszigetelt *Fémezésként*
jelenik meg) polaritása nyitja-zárja az útjukat. Az
A részecske ütközésmentesen (*ballisztikusan*) re-
pül át, míg a B útja során – a működési feszültség



1. ábra. Töltéshordozók útja egy tranzisztor rétegeiben

beállításához szükséges, tudatosan bevitt atomi
töltések alkotta – potenciálfalakba ütközve ener-
giát veszít, mintha barlangi cseppkövek között re-
pülne. Az ütközések energiája sajnos hővé alakul,
ami az egyre bonyolultabb áramkörök fő gondja.

Gordon E. Moore, a Fairchild cég munkatársa
vette észre és publikálta a hatvanas években [2],
hogy a chipgyártás technológiája exponenciáli-
san fejlődik, ami az egyetlen áramkörön kialakí-
tott tranzisztorok számát illeti, az évente duplá-
zódik. Moore persze óvatos volt a törvény időbeli
határait illetően: az 1970-es évek végéig hitte,
merte ezt jóslani. Arra senki sem gondolt, hogy a
duplázódás, ami mára ugyan *másfélszereződéssé*
szelődött, csak napjainkban jut el a tranzisztorok
mértécsökkenése miatt a fizikai határokig. De
ha feladjuk a Moore-törvény 2D-korlátját, és el-
fogadjuk, hogy az áramköri szerkezet kiléphet a
harmadik dimenzióba, még évtized is lehet előt-
te. Főleg azért, mert a törvény inkább gazdasági,
semmint műszaki: a piacnak, a ma már a teljes
ipart átszövő, „informatikaként” globális igényt
kielégítő piacnak az igényét közvetíti a lassan *na-
noelektronikává* váló mikroelektronika felé: hogy
mit kell elérnie ennek az iparnak a versenyben
maradás érdekében, elkerülendő a fejlődés kor-
látjává válás. A természet azonban segítségünkre
sietett az ún. *Dennard-skálázás* érvényességével:
ha egy megvalósított tranzisztor minden méretét
arányosan lecsökkentjük, az így gyártottnak a tu-
lajdonságai azonosak maradnak – kivéve a Joule-hő
képződését. Így jutott le az ipar a 12 nm-es, netán
8 nm-es technológiáig, azaz ekkora lehet a legki-
sebb méretű szerkezeti elem!

Az eszközzel, áramkörrel kapcsolatos szerkezeti követelmények

Az anyagtudománnyal foglalkozó olvasónak né-
hány lélegzetelállító követelmény felvázolásával
szeretném bemutatni, mit jelent mindez ma, ami-
kor egy tranzisztor már kisebb, mint egy vírus.

Hibamentes kristály. A szilícium az az elem, amely
méretrekorder a hibamentes kristálynövesztés te-
rületén. Ma már akár 450 mm-es átmérőjű, tonna
súlyú, kristálytani értelemben orientált oszlopok
növeszthetők az ún. Czochralski-technikával,
amelyekből mintegy 700 μm vastagságú, kristály-
tanilag orientált lemezeket fűrészelnék.³ Ezeket

³ A vastagságot a gyártás közbeni törés elkerülése indokol-
ja; a Si-szelet ui. – a felszíni 1-2 μm -es rétegtől eltekintve,
amelyben az elektronikai folyamatok zajlanak – csak „sze-
kezeti anyag”, sőt olyan más anyaggal is helyettesíthető,
amelyen a Si-egykristály megnöveszthető. Abban, hogy a
hetvenes évek végén a szilíciumkristály-ipar átállt az ún.

csiszolva, polírozva, kémiaileg megtisztítva, megfelelően csomagolva áll elő a ma külön iparágat jelentő szilíciumipar, a „szelet”. A diszlokációk eltűrt száma: 10 cm^{-2} -enként egyetlen hiba!

SiO₂ és megfelelő dielektromos állandójú rétegek növesztése. A lefelé skálázás egyre vékonyabb szigetelőrétegeket követel a vezérlő elektróda és a tértöltési réteg között, amelynek olyan tökéletesnek kell lennie, hogy a néhány nm-es réteg sérülésmentesen és tartósan elviselje a ráadott néhány volt feszültséget, ami a nm-skálán akár tíz megavolt/cm terhelést, azaz a spontán kisülésközelítő térerősséget is jelenti. Követelmény, hogy ez a dielektrikum az egyetlen beleültetett elektródtól évtizedig tudja tárolni. Emellett ezt az oxidot úgy kell növesztetni, hogy egy 300 vagy 450 nm-es szelet minden pontján, hibahatáron belül azonos vastagságú, tökéletességű legyen. A szerkezeti követelményt úgy is fogalmazhatjuk, hogy a Si-oxid határon legfeljebb minden 10 000. atomnál keletkezhet akár csak egyetlen egyatomos lépcső. A lépcső helyén ugyanis telítetlen kémiai kötés keletkezik, ami „csapdába” ejtheti a repülő töltéshordozókat!

Fotolitográfia. Fényelhajlási jelenségek miatt 10 nm-es alakzatok leképezéséhez mintegy 100 nm-es hullámhosszú sugárzás kell. A képalkotáshoz itt már csak nagyméretű tükrök jöhetnek számításba.

Mindezt közel 100%-os kihozatal mellett kell elérni.

Szeretnők hinni, hogy sikerült a T. Olvasót meggyőznünk az informatika „anyaiparának” különleges és más iparágak számára is példát nyújtó teljesítményéről. Pláne ha hozzávesszük, hogy a nanoelektronikába átnőtt ipar számára az elektron is „nagy” és más, bináris számolásra alkalmas fizikai objektumokat keres. Kísérleti állapotban van a spintronika, ahol a spinek forgatása felel meg az elektronáram nyitásának, zárásának. Feltehető, hogy egy évtized múlva már gyökeresen más módon fog az informatika számolni. De már a mai állapot is képes volt a teljes ipari termelést felforgatni, a bioipart is beleértve. Először a szabályozások szoftverbázisa épül be más iparokba, ezt az automatizáció informatikája, gépi megoldásai követik, végül a mai csúcs a robotizációs fázis vagy netán a mesterséges intelligencia elérése.

(100) orientációjú kristály tömeges növesztésére, két eredmény volt döntő: egyik, hogy azon a felületen jobb minőségű oxid növekszik, másrészt az, hogy az implantáció esetében is kritikus az alakristály orientációja. Ezt a Mayer-Gyulai-csapat, Caltech-KFKI, NSF csereprogram fedezte fel (H. Müller, W. K. Chu, J. Gyulai, J. W. Mayer, T. W. Sigmon, T. R. Cass: Crystal orientation dependence of residual disorder in As implanted Si. Appl. Phys. Lett. 26, 292 [1975].)

Az anyagtudomány, -mérnökség: az MS&E formái

Két alaptípusú megoldásról beszélhetünk: a lebontó és az építkező technológiáról. Könnyű belátni, hogy az építkező képes anyag- és energiatakarékosabb lenni. A nanotechnológiánál követelmény is az építkező eljárás követése. Ennek legszebb, de a sebessége miatt ipari termelésre alkalmatlan megoldása a növényi élet [3]. Gyakran idézik a nanotechnológia megálmodásaként R. Feynmannak egy korai előadását [4].

Az MS&E bevonulása az iparba

Az anyagtudomány mint horizontális tudomány talán a legáltalánosabb tudomány, hiszen gyakorlatilag minden tudomány használ vagy kapcsolódik valamilyen, gyakran speciális „anyaghoz”.

Az 1. táblázat iparáganként és anyagcsaládonként összegzi a mai frontvonalakat.

Következtetések a KKE-beli fiatal diákoknak, mérnököknek

A politikai változások pillanatában a KKE-országok iparának szerkezete „különleges” volt. Egy szövetségi rendszer tagjaiként a fontosabb iparuk a hidegháború katonai igényeit szolgálta, némileg követve az egyes országok történelmi sajátosságait. A nehézipar (vas, acél, olaj) volt a súlypont.

Ennek megfelelően témánkban a szovjet-orosz Matyerialovegyenyie (материаловедение), illetve az NDK megörökölte német Werkstoffwissenschaft fejlődött, amely az idős kohász egyáltalán nem lebecsülendő tudására emlékeztetett.

A modern MS&E fejlődése a KKE-országokban csak a politikai felszabadulást követően indulhatott el, amihez az embargós kötöttségek lazulása, részbeni oldódása is kellett.⁴ Ez azzal is súlyos teherrel vált, hogy akár a világszínvonalat közelítő korábbi eredmények sem voltak például szabadelmoltiszták. Ennek rendbe hozása sok energiát, tökeimportot, gyárbezárást stb. követelő, sokhibás

⁴ Jómagam a Cornell Egyetem MS&E karán (Ithaca, NY) töltött éveimben, 1982–86 között ismertem fel országainknak ezt a súlyos korlátját: ott találkoztam először ui. az anyagtudományos problémák számítógépes kezelésével, sőt a technológiai szimulációkkal. Hazajőve, MS&E kart szerettem volna a BME-n szervezni, de még nem értek meg a körülmények. A történelmi lemaradást az is tanúsította, hogy az informatika, kibernetika „imperialista áltudomány”-ként szerepelt pl. a *Filozófiai lexikon* utolsó kiadásában is. A hazai zsenialitásra azonban jellemző, hogy a budapesti Vaskutban a néhai Fuchs Erik csapata, Gergely Márton, már a nyolcvanas években készítette egy technológiai szimulációt az ausztenit-martenzit átalakulásra!

döntéssel tarkított évtizedeket eredményezett. Mivel a varsói szerződéses időkben nem verseny határozta meg a minőségi termelést, számomra világos volt, hogy a felszabadult rendszerünkben minden ipari fejlesztést, legalábbis a versenyzásosság terén, előlről kell kezdeni. Noha a féllegális fejlesztésekben kiváló mérnökeink teljesítményére akár büszkének is kellene lennünk,⁵ de itt álltunk egy olyan mérnökgenerációval, amely legfeljebb elméletileg ismerte a valódi iparfejlesztést, és – a menedzserekkel együtt – át kellett képeznie magát az új követelményekhez. De: Magyarországon, és gondolom, a többi KKE-országban is, egy nagyszabású tudásprivatizáció lehetősége jött létre mind a nagyvállalatok, mind a kis- és középvállalatok, KKV-k körében. Hol jobban, hol rosszabbul, de nagy lehetőséggé lett ott, ahol a korábbi tudás versenynyerővé is konvertálható lett [5]. Voltak tehát, akik sikerrel vitték saját kisvállalatukba a latens tudást, de közepes vagy nagyiparrá fejlődésük máig is csak kivételes. Megadva a megbecsülést, támogatást az ilyen újtó KKV-knek, országaink valódi érdeke azonban a nagyvállalatok jelenléte, új felfejlődése. Ennek legkézenfekvőbb, de nagy kockázatot jelentő változata a nemzetközi vállalatok idecsábítása. A kockázat abban áll, ha ezeket a KKV-ket nem a tudásukért veszik meg, kiemelt áron, hanem csak piacszerzés, a gyengécske versenytárs eltávolítása céljából. Ha azonban legalább egy színvonalas leányvállalat kialakul itt ebből, lehetőségünk nyílik a kitörésre. Erre alább visszatérünk.

A *fiataljaink számára* izgalmas, de nagyon nehéz tanulsága van mindennek. Egy alkalmazkodási folyamat indult el. Nehezen szoktunk hozzá az önállósághoz, ahhoz, hogy pályázni kell, hogy kapcsolatokat kell építeni. Magyarországról már a nyolcvanas években is sokan utazhattak, és akiket rendszeresen visszahívtak, azok azzal büszkélkedhettek, hogy jó kapcsolatépítők. Mert a tudományos együttműködés *bizalmi kérdés*. Csak véletlen lehet, ha a kapcsolat úgy alakul ki, hogy a weben partnerkeresés közben ráakad az ember. Az első EU-s évtizedben még volt a nyugati part-

nernek finánciális haszna is, ha bevett „keletit”. Később már csak a valódi értéket keresték. A mieinknek ki kellett magukat képezniük, hogy *értéken* vigyék be magukat a kapcsolatokba. Ez nagyon nehéz feladat. Gyakran esünk például abba a súlyos hibába is, hogy lázadozunk, mert a multinacionális cég nem hoz hozzánk csúcscsúcsadatokat. Ezt meg kell értenünk: egy nagyvállalatnak elemei érdeke, hogy a csúcstípusokat az anyacég falain belül tartva dolgozza ki. Más, hosszú távon országépítő stratégiát tanácsolunk e cikkben is. Kiváló embereink odakerülése révén ugyanis elérhető, hogy egyre nagyobb bizalmat építsenek maguk, a „mieink” számára ezen cégek leányvállalatainál. Ha sikeresek leszünk, eljuthatunk odáig, hogy ilyen hazánkfiak akkora tudásra tehetnek szert (mert a már iparrá is vált korszerű tudást ezek a cégek birtokolják), hogy ezek a „*sikereseink*” önállósodva például beszállító cégeket alapíthatnak – persze lehet, hogy csak egy-két évtized múltán. Hogy az anyacéget teljesen lekonkuráló Fairchild-Intel történet – amelynek személyes tanúja lehettem – nálunk is megvalósuljon, az talán túl merész álom. Olyan álom, amire az EU-ban sem tudok példát.

Ehhez azonban valódi versenyben képzett, kiváló, pontos önismerettel, önértékeléssel és nagy-nagy ambícióval rendelkező fiatalokra van szükség, akik haza is tudják hozni a megszerzett tudást, majd képesek *visszavinni a határon túlra* is. Hogy ez programmá érhesen, ahhoz az itthoni környezetnek is alaposan át kell alakulnia. Az újdonság, a versenyképes tudás, a „tudós” befogadása, támogatása terén mutatott hozzáállásnak kell átalakulnia, de ami mentes minden kisebbségi komplexumként értékelhető momentumtól. Büszkéek vagyunk például Jedlik Ányos zsenialitására, arra, hogy elkápráztatta a diákjait a *villámdelejes forgonnyal*, de igazából csak a diákjait – mert a dinamót Werner Siemens nevéhez kapcsolja a világ, sajnos joggal. Egy 1993-as, ébresztő szándékú publicisztikai cikkemben írtam [6]: fontos, hogy Jedlik zsenijét a diákjaink elé példaként állítsuk, az újrászerveződő, az elzártágból kitörő, Európába és a világba integrálódó iparunknak azonban – írhattam volna KKE-ipart is – Siemensekre van, lenne szükség.

Ma, EU-polgároként, itt a széles, de kemény lehetőség. Vannak, vagyunk sokan, akik hosszú külföldi tartózkodást követően hazajöttünk. Vagyunk sokan, akiknek sikerült kivédeniük, hogy lehúzza őket a helyi konformizmus. Ez sosem volt könnyű, de szerénység dominálta önbizalommal, mértéktartással, az objektív siker birtokában, és

⁵ Pl. a budapesti KFKI-ban egy csapat a Digital Electronics Company, DEC, VAX komputereit másolta, és sorozatban exportálta olyan országokba, ahol a DEC-nek nem volt szabadalmi bejelentése, ami tehát nem volt jogsértő. Jogsértő azért lett, mert a megszerzett szoftvert is vele szállították. A tevékenység azonban 1989-ben, a DEC javaslatára, DEC Hungary néven közös vállalatát szerveződött. Egyébként az intézet kutatói is nagy hasznát látták ennek a tevékenységnek: évente néhány gépet a sikeres kutatóknak juttatott az intézet vezetése. A Tudományos Akadémiának befizetett járuléka – emlékeim szerint – a hazai kutatás teljes finanszírozásának 20%-át tette ki!

– ami még nagyon-nagyon fontos! – a külföldről is haza-, visszacsurgó elismerés *védernyője* mellett mindez elérhető. Miként az is elérhető, hogy eredményeinket el- vagy visszavigyük a határainkon túlra.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Agricola G.: *De re metallica*. Basel, 1556.
<http://www.gutenberg.org/files/38015/38015-h/38015-h.htm>
- [2] Moore G.: *Cramming more components onto integrated circuits*. Electronics, 38/8. (1965).
<http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2017/03/102770822-05-01-acc.pdf>
- [3] Drexler E. K.: *Engines of creation: The coming era of nanotechnology*. Anchor Books, New-York, 1986.
http://e-drexler.com/p/06/00/EOC_Cover.html
- [4] Feynman R. P.: *There's plenty of room at the bottom*. Előadás, American Physical Society, Caltech, Pasadena, 1959. december 29.
Átírata: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> (letöltve: 2018. május 15.)
- [5] Gyulai J.: *Materials science and its importance in middle and central Europe*. In: Physics and industrial development. Bridging the gap. (Chandrasekhar S. (szerk.)), Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 1995. 227–232.
- [6] Gyulai J.: *Jedlik vagy Siemens? Új Magyarország*, 3. (1993. június 26.).