

fizikai egyenletesség szempontjából több nagyságrenddel mást kíván, mint amit a korábbi követelmények támasztottak.”

A fentiek minden értékelésnél ékesszólóbban tanúsítják a javaslattevők bölcsességét, távolbalátását és a megfogalmazott szemlélet- és közelítésmód időtállóságát. Nem az intézet munkatársain és nem is a felvázolt területen dolgozó kutató-fejlesztő gárda lelkesedésén, felkészültségén és hozzáértésén múlt, hogy a Mikroelektronikai Vállalat 1986-os tüzese kapcsán az egész magyar félvezetőipar és mikroelektronikai kutatás-fejlesztést ért végzetes csapás következtében a koncepció nem tudott kiteljesedni az élet által igazolt vízió szerint. Hazánkban a félvezetők kutatása méltatlanul szorult háttérbe, például máig sem működik dedikált félvezető-fizika tanszék egyik tudományegyetemünkön sem.

Az 1998-as intézetegyesítés során az MTA Közgyűlése által az MTA MFA számára jóváhagyott közfeladatként ellátandó alaptevékenység jelentősen módosult:

– Alap- és alkalmazott kutatás végzése az anyagtudomány és a műszaki fizika területén előírt szerkezetű és funkciójú anyagok és eszközök létrehozása, alkalmazása, valamint a kapcsolódó eljárások tudományos alapjainak feltárása érdekében;

– Szakemberképzés, szaktanácsadás a magyar tudomány képviselői a művelt területeken.

A 150 fős MTA MFA 1,6 Mrd Ft éves működési költségének csupán 35%-át kapta központi támogatásként 2006-ban. Az MFA 95 kutatója a *nano-, opto-, bio-, és mikrotechnológiai területek átfedéséből kialakuló*, rengeteg izgalmas új kihívást jelentő, de nagy preparatív és analitikai infrastruktúra működtetését igénylő *multidiszciplináris kutatási területen* a további szükséges forrásokat hazai és nemzetközi pályázatokból, ipari szerződésekből biztosítja – egyre nehezebben.

Ötven év elmúltával jólesően állapíthatjuk meg, hogy a kiváló tudományos iskolák, az itt nevelkedett tudósgenerációk és kiterjedt nemzetközi szakmai kapcsolatrendszerük révén intézetünkben minden nehézség ellenére sikerült számos kiemelkedő tudományos eredményt elérni, melyek küldetésünk sajátosságánál fogva a hazai gazdaság versenyképességét is javították. Ezt kívánják munkatársaink néhány múltbeli és aktuális kutatási téma ismertetésével – egybe- közt az elektronspektroszkópia, mágnesség, ion-sugaras analitika, spektroellipszometria, illetve nano-strukturálás területén – szemléltetni.

Budapest, 2007. október

*Kádár György, Bársony István*

## EGYESÜLT ANYAGTUDOMÁNY

### Az izzólámpától a nanocsövekig

Gyulai József

KFKI Mikroelektronikai Kutató Intézet, MKI, (1991-ig),

KFKI Anyagtudományi Kutató Intézet, ATKI (1997-ig),

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet, MFA (1999-től)

A kilencvenes évek elején két intézet korábbi súlypontjait újra kellett gondolni, mert nemcsak az ATKI termékpalalettája irányult a keleti piac felé, de az MFKI<sup>1</sup> sok terméke is piacát veszítette. Világos volt az is, hogy két, a tudománypolitika szóhasználatában azonos, illetve hasonló profilú „anyagtudományi” intézetet az MTA aligha fog finanszírozni. Emellett mindkét intézet azon intézetcsoportozáshoz tartozott, amely vitálisan függött a zuhanórepülésben lévő külső, illetve ipari finanszírozástól.

Az MTA-ban ekkoriban lett megítélési prioritás a szcientometria. Ebből a szempontból mindkét intézményben csak korlátozottan voltak olyan szakmai iskolák, amelyek kiállták ezt a próbát: a vékonyréteg-felületfizika, valamint az elméleti (statisztikus) fizika az MFKI-ban és az ionimplantáció (benne az ellipszometria ilyen célú alkalmazásával), valamint a mágneses kutatások az ATKI-ban. A preparatív szakmák, a hozzájuk tartozó, rengeteg személyes intuícióval létrehozott és fenntartott, minősített légállapotú laborral, amelyek a

felszerelés évekkal való lemaradása, elöregedése miatt – ne szépítsük – általában csak „követő” kutatásra lehettek képesek, veszélybe kerültek. A hivatkozási, társszerzői szokások miatt még az élvonalbeli kísérleteket lehatóvó tevő mintákat előállító laborok is csak ritkán kaphatják meg a megérdemelt „kreditet”.

A két intézet múltja, kapcsolatai ugyan sok pozitív eseményt rejtettek, de ellentmondásosak is voltak.

### Újpest és Csillebérc – a korábbi kapcsolatok

*Gyulai József* saját személyében sokat köszönhetett az MFKI-s kollégáinak – már a szegedi életében. Később, a félvezető-tematikai „területkartell” KFKI-s áthágása megnehezítette számára a helyzetet – pláne, hogy kicsin múltott, hogy nem „KFKI-ba delegált MFKI-munkatársként”, hanem KFKI-sként indította meg itthon a félvezetős implantációs kutatásokat. Érthető, hogy folyamatosan igyekezett a helyzet életet tompítani.

Ennek megfelelően már az 1974-es esztendőben delegált az MFKI vendégkutatót a KFKI<sup>2</sup> Implantációs Célprogramjához, *Hermann László* személyében, aki

<sup>1</sup> Műszaki Fizikai Kutató Intézet

<sup>2</sup> Központi Fizikai Kutatóintézet



1. ábra. Nagyfelületű pn-átmenet n-, illetve p-típusú szeletek direkt kötésével való előállítás. (Az illesztés  $1,5^\circ$ -os, nem-szándékos rotációs hibája miatt, ahogy az várható is, minden 40. atomnál diszlokáció keletkezett; Pécz B., Gyulai J., Wiget R., Burte E.P.: Silicon direct wafer bonding, a TEM study. *Proc. EUREM-11*, Dublin, 1996, Vol. II. pp. 638–639.)

az implantált rétegek elektromos minősítésébe kapcsolódott be, segítette a mérés-technika helyi felépítésében is.

A munkából egy, sajnos „túlságosan is korai”, azaz akkor elsikkadt, a *Physica Status Solidi*-ban megjelent publikáció született, amelyet – mai definícióval – a *kombinatorikus anyagtudomány* egyik első megvalósulásának nevezhetünk. Az „anódos oxidációnak” ugyanis egy olyan változatát ismertük fel és valósítottuk meg 1974-ben, amelynél a szilíciumcsíkot egyenletes sebességgel mozgatva mérítettük be az anodizáló oldatba. Ekkor, a mozgatás révén, az oxidréteg ék alakban lineárisan vastagodva nőtt. Ezt az ékalakú oxidot eltávolítva, mindmáig rekordot jelentő kicsiny „menedékességű” „ferdeciszolat” állítható elő, ami a mai IC-méretekhez<sup>3</sup> kiválóan illeszkedik.

A későbbiekben sok közös cikk született a két intézet munkatársainak együttes munkája eredményeként – néhány példát kiragadunk. Az 1. ábra egy kiemelkedő mikroszkópos teljesítményt mutat be. Nagy teljesítményű diódák előállítását célozták akkoriban a p- és n-típusú szeletek direkt szeletkötéssel való „összeragasztására” végzett kísérleteink. Ez az egyik esetben a két szelet hőkezelésekor kis mértékben ( $1,5^\circ$ ) elfordult. Pécz Bélának sikerült a mintegy fél mm vastag diódaszerkezet közepén a félreorientálódás miatt periodikus fellépő diszlokációkat megtalálnia!

A Silicon-On-Insulator (SOI), amely a SOS-nek<sup>4</sup> a nyolcvanas években kutatót több variánsát jelentette – esetünkben a lézeres olvasztásos laterális epitaxiáról volt szó – szintén jelentős kooperációvá nőtte ki magát.

Hasonlóan, az MFKI III–V félvezető eszköz-kutatásai jól tudták hasznosítani a KFKI-ban kifejlesztett analitikai eljárásokat. Több közös publikáció született a GaAs-eszközök kontaktusainak kialakítására is, a vékony oxidrétegeknek úgynevezett rezonancia-RBS-szel<sup>5</sup> való kimutatására, valamint a gyorsan fejlődő KFKI-s ellipszometriai készség és tudás hamar megtalálta az MFKI kutatóit, mint együttműködő partnere-

<sup>3</sup> Integrated Circuit – integrált áramkör

<sup>4</sup> Silicon-On-Sapphire

<sup>5</sup> Rutherford Backscattering Spectrometry, az oxigénatomokon a 2,03 MeV energiájú alfa-részecskék rezonáns hatáskeresztmetszetet mutató szóródnak.

ket a III–V-típusú félvezető programjaik támogatásában: Fried M., Horváth Zs. E., Járosi E., Lohner T., Mezey G., egyfelől, Barna P. B., Farkas-Jahnke M., Pécz B., Radnóczy Gy., Somogyi M., Veresegyházy R., Tóth A. másfelől.

## Az „Eötvös” Űrtechnológiai Program

A két intézet hivatalosan is intenzív együttműködését ez a program jelentette.

Anekdotaszerűen: az, amikor az Interkozmosz javaslatokat kért a szovjet–magyar űrrepülés kapcsán végrehajtandó magyar kísérletekre, éppen akkor volt, amikor egy amerikai gimnazista diák a pók hálóépítési képességének a súlytalanság közepette való vizsgálatát javasolta. A KFKI félvezető kutatói ezt tekintették zsenialitási normának – nem is javasoltak űrkísérletet. 1979 őszén azonban az Interkozmosz szervezet kifogásolta, hogy hazánk nem tett javaslatot az űrkemencében végezhető technológiai kísérletre.

Szabó Ferenc akkori KFKI főigazgató Gyulai József küldte ki Moszkvába ennek a korrigálására, aki Fuchs Erik professzort találta ott, a „BEALUCA” programjavaslattal. Mikor a „SZPLAV” űrkemence műszaki paraméterei kiderültek, látszott, hogy a KFKI implantációs programjának szilíciumos témáihoz értelmesen illeszkedő kísérletet azzal aligha lehet végezni. Az alacsonyabb olvadáspontú III–V-vegyületek, azaz az MFKI súlyponti anyagai azonban lehetőséget kínáltak. Akkoriban telefonbeszélgetésre még nem lehetett gondolni, ezért Gyulai József helyben megfogalmazott három kísérletet, amelyben azonban kardinálisan az MFKI kutatóira, az ő „igen”-jükre kellett számítani. Nevet is adott a programnak, az „ötözés”-re is utalva, „Eötvös” Programnak nevezve.

A három kísérlet:

- Fluxszal való folyadékfázisú epitaxiás (LPE) GaAs-növesztés „felszigetelő” GaAs-re,
- GaSb mag nélküli kristályosítása (e két kísérlet akkor újdonság volt),
- kontrollképpen megismételni a NASA InSb növesztési űrkísérletét.

Nagy örömeire itthon Lendvay Ödön és munkatársai teljes mellszélességgel a javaslat mellé álltak, és gyors tempóban elindultak az előkészítő munkák, amelyekben a kristályok előkészítését az MFKI, az űrkapszulázás, biztonságtechnika, kapcsolattartás a KFKI feladata lett.

Érdekességként említjük, hogy a biztonságtechnikai kérdések, de az esetleges sikertelenség esetére a szovjet oldali felelősség elhárítása miatt is emlékeztetek Fuchs Erik és Gyulai József vitái az Interkozmosz munkatársaival, például a kemence hőmérsékletének kontrollja ügyében. Azt kérték, mi mondjuk meg, milyen hőmérsékletet állítson be Farkas Bertalan a kemence kontrollpaneljén. Szerintünk a mi feladatunk csak a kapszula belső hőmérsékleti mezőjének megtervezése volt – az, hogy milyen feliratú gombot kell megnyomni, az ő felelősségük. Nem adtak

ugyanis lehetőséget olyan földi kísérletekre, amellyel a kontrollpanelen beállított és a kapszulában létrejövő hőmérséklet kapcsolatára egyáltalán következtetni lehetett volna. Ez okozta végül, hogy a GaAs-kísérletnél „elszaladt” a hőmérséklet. A két másik növesztés azonban sikeres lett, amint fentebb írtuk, több cikket eredményezett az elkövetkező években – bár végig abban a tudatban kellett dolgoznunk, hogy folytatásra aligha lesz lehetőség (2. ábra).<sup>6</sup>

## A „végkifejlet”: az MFA létrejötté

Már a kilencvenes évek elején beszédtema volt az intézetek igazgatói között, hogy a hazai anyagtudományi, ebben a félvezető, optikai, fémkutatásoknak a súlya jelentősen megnőne, ha az MFKI és az ATKI közös telephelyen folytatná a tevékenységét. Abban is egyetértés volt, hogy a kilencvenes évek eleji tudománypolitikai helyzetben a KFKI Campus lenne a jobb telephely, de – és ebben sem lehetett a két igazgatónak egyet nem értenie – a költözésre az MFKI munkatársainak csak egy töredéke vállalkoznék, első sorban a lakáshelyzetük miatt. Emellett volt olyan pszichológiai gát is, hogy az MFKI, átgondoltabb tudománypolitikája eredményeképpen, több tudományos minősített munkatárssal rendelkezett, így a munkatársak tartottak attól, hogy egy új telephelyen valamiféle „alárendelődés” következne be. Ennek ellenére tárgyalt a két igazgató az MTA főtítkárával, érdeklődött a költözés anyagi fedezetének biztosításáról. A válasz azonban ekkor csak nemleges lehetett.

Pár évvel később viszont, az *intézetkonszolidáció* idején, 1997-ben, a kérdés élesen vetődött fel. Határozott szándékot láttunk az MTA Konszolidációs Bizottságában a Fóti úti telephely felszámolására, és mind az MFKI, mind az ATKI esetében a jó szakmai csoportoknak valamelyik KFKI-intézetbe történő beolvasztására, a többi részlegnek a felszámolására. Az indító átvilágításnál ugyanis az 1992–95-ös időszakot vették alapul, amikor az ATKI-beli változások – például a tudományos fokozatszerzés központba állítása – még éppen csak elkezdődhettek, illetve azok hatása még alig jelentkezhett a szcientometriai mutatók terén. Az alkalmazott kutatást célnak tekintő korábbi évek során ugyan született sok-sok publikálható, illetve disszertálásra alkalmas eredmény, de ezek beérlelését a határidős feladatok általában, és éppen a „legjobban húzók” esetében, megakadályozták.

A döntő érvelés, amely az önálló intézeti létért való lobbizást motiválta az volt, hogy az ATKI unikális tiszta laborját a két intézet „jó” részlegeit befogadni kész

<sup>6</sup> Ebben, szerencsére, tévedtünk: a két program közös konklúziója ugyanis az volt, hogy a szovjet űrhajók klímái  $10^{-3}$  g körüli rezgést okozva, zavarják a kristályosodást. Fuchs Erik ötlete volt, hogy mechanikai mozgás nélküli kemencét kellene építeni, a zónák hőmérsékletét computeres vezérléssel kell megoldani (ez 1982-ben már reális lehetőségnek látszott) és egy külső platformra kitenni. Innen indult el a máig sikeres hazai űrkemence-program (ma a Miskolci Egyetemen).



2. ábra. A kapszulanyitás az Eötvös-kísérletben: az acélkapszula, alatta a kissé kihűzött kvarcampulla, azután a fedél és a GaSb ampulla, végül a GaAs ampulla.

KFKI intézetek (SZFKI, RMKI) akkori vezetői – a labor fenntartásának költségességére hivatkozva – nem vállalták. Végül sikerült az MTA vezetését és mindkét felelős tudományos Osztályt (Műszaki, illetve Fizikai Tudományok Osztálya) meggyőzni egy komplex anyagtudományi intézet szerepének fontosságáról. Ezek után döntött a Konszolidációs Bizottság a KFKI telephelyen való egyesülésről. Pénzügyi-technikai okok miatt olyan döntést kellett azonban hoznia, amely szerint a KFKI-ATKI szűnik meg jogutód nélkül, és az MFKI jogfolytonosan, új telephelyen és névvel, *MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet*ként, folytassa a munkáját az ATKI munkatársaival vegyülve. Ezzel megkapta mindkét intézet az esélyt, hogy az értékeik szinergikusan átmentődjenek.

A két igazgató megegyezett, hogy – kinevezett igazgatóként – Gyulai József vállalja az egyesítés szakmailag is nehéz, de emberileg még nehezebb feladatát. Sőt, szerette volna a szinergizmust már a költözéskor érvényre juttatni, de a KFKI Campuson korábban kialakult helyzet (alkalmasan átalakítható épületek léte, bérlőkkel kötött szerződések, illetve pénzügyi korlátok) csak mértékkel tette lehetővé a szigorúan tematikus elhelyezést.

Az emberi, lelki gondot az okozta, hogy a megadott konszolidációs létszám mintegy százhusz fővel volt kevesebb a két intézet együttes létszámánál. Az egyesítés szinte lehetetlen, a katasztrófát súroló feladata miatt volt egyáltalán vállalható, mert bekövetkezett az az előre is látott gond, hogy az újpesti illetőségű technikai személyzet megréten a közlekedési nehézségektől és inkább a végkielégítést választja. A kutatók átköltöztetése 1997 végén – néhány fájdalmas döntéstől eltekintve – megoldható volt. Így, 1998 első munkanapján, egy intézeti gyűléssel megkezdődött a közös élet. A segéderők hiánya nehezen, de például nyugdíjas foglalkoztatásokkal, preferált felvételekkel lassan enyhült.

Az intézetek szinergikus megerősödésében volt még egy fontos faktor. Az ATKI-ban már korábban is jól szervezett szemináriumi élet folyt, hetenkénti, külső-belső előadókval, *Kádár György* szervezésében. Természetesen kínálkozott ennek az MFA-ra való átvitele, továbbéltetése. A rendszeres, szinte kimaradásmentes, tematikailag tudatosan vezérelt program eredményesen hozzájárult az egyesült intézetek összefonódásához.

Külön meg kell említeni *Somogyi Istvánnét* – egy

Külön meg kell említeni *Somogyi Istvánnét* – egy megszűnő KFKI-intézet, az MSZKI<sup>7</sup> korábbi gazdasági vezetőjét –, aki vállalkozott a gazdasági igazgatói szerepre, és aki le tudta vezényelni mind pénzügyileg, mind humánpolitikai ügyintézőként a rövid távon rendkívül hálátlan feladatot.

Az MFKI laborjai, témái közül néhány azonban felszámolódott, átalakult, például kisvállalattá. A legnagyobb költözési veszteség két MFKI-s témát érintett: a vegyületfelvevő kutatást, ugyanis az úgynevezett MOCVD-technika<sup>8</sup> áttelepítésének környezetvédelmi szempontjai a budai hegyekben teljesíthetetlennek bizonyultak (csak az LPE-technikát tudtuk áttelepíteni), valamint a magas olvadáspontú fémek kutatásának témáját. Ez utóbbi, korábban súlyponti és rendkívül sikeres

<sup>7</sup> KFKI Mérés- és Számítástechnikai Kutató Intézet

<sup>8</sup> MetalOrganic Chemical Vapor Deposition

<sup>9</sup> Hányódtunk, de nem merülünk el...

témánál az ipari érdeklődés lecsökkenése és a tudományos utánpótlás szinte teljes hiánya miatt kellett a laboratóriumok áttelepítésétől eltekinteni. De a leginkább értékesíthető eredményt, a környezetbarát volfrám-, illetve molibdén-visszanyerésnek a szabadalomértékű megoldását (*Vadasdi Károly*) egy, az MFA-val szoros együttműködésben álló kisvállalkozásban (Tungslab) sikerült túlélteni és sikerre is vinni.

A jelen összeállítás további fejezetei alapján a Tisztelt Olvasó eldöntheti, hogy a küzdelem megérte-e? Különösképpen ma, az új, az uniós Magyarország gazdasági nehézségeinek kulminálása idején éles a kérdés, amikor a következő ötven év elérését kell a mai vezetésnek a célkeresztbe állítania – a szakmának az emberiség összérdekében játszott szerepe fontosságának tudatában.

A tudásunk ma is eladható – és ezen írás idején látszik, hogy az ötven év beérett.

„Fluctuavimus, nec mergimur”<sup>9</sup>

## ELEKTRONTRANSZPORT-PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

### A LEED-től az EPES-ig

Gergely György, Gurbán Sándor,  
Sulyok Attila, Menyhárd Miklós

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Hazánkban a felületfizikai kutatások 1968-ban kezdődtek. 1967-ben *Szigeti György* akadémikus javaslatunkra jóváhagyta egy akkor korszerű, ultravákuumban ( $10^{-10}$  mbar) működő, fékező rácsozott analizátor (RFA) beszerzését, amit 1968-ban üzembe helyeztünk. A nemzetközi felületfizikai kutatások atomosan tiszta felületeken a 60-as években indultak. A legtöbbször alkalmazott kísérleti módszer a kisenergiájú elektron-diffrakció (LEED) volt. Az 1964-ben induló *Surface Science* folyóirat első számában az első oldal *Farnsworth* LEED-közleményével kezdődik.

1968-ban a felületfizikában forradalmi újdonság volt *L. Harris* cikke, az Auger-elektronspektroszkópia megjelenése. Ennek nemzetközi jele AES, *N. Taylortól* származik, aki a Varian cég LEED-berendezését továbbfejlesztve megvalósította, és kereskedelmi forgalomba bocsátotta az első Auger-spektrométert.

Az AES történetéről közlemény jelent meg a *Fizikai Szemlében* [1]. Rövidesen a Varian után a VG is elkészítette a kiegészítő elektronikai egységeket 4 rácsozott RFA-spektrométeréhez AES célra. Javaslatunkra *Szigeti György* akadémikus jóváhagyta VG-spektrométerünkhöz az AES elektronika beszerzését, az akkori devizahiány miatt azonban ez csak 1973-ban valósult meg [2]. Az RFA-spektrométerek mellett *Palmberg* (Physical Electronics) már 1969-ben kifejlesztette a hengeres tükör (CMA) spektrométert, nagymértékben javítva az Auger-spektrométer energiafeloldását és érzékenységét. A Riber OPC 103 CMA beszerzését az MFKI-ban 1977-

ben sikerült megvalósítani. Ehhez a Riber cég UHV-kamrarajzot is adott. A teljes mérőrendszert az MFKI-ban építettük fel, a Tungslab Kutatóval és a KFKI-val együttműködve. A spektrométer UHV-kamrát *Barla Endre* vezetésével *Zalaba Andor* és munkatársai építették meg, a KFKI elektronikát *Tóth Ferenc* fejlesztette ki számunkra. A KFKI NV-255 szinkron detektorát alkalmaztuk. MFKI-fejlesztés volt a spektrumok felvétele analóg üzemmódban [3].

A további fejlesztéssel a KFKI 1024 csatornás analizátorához az MMG SAM 85 kisszámítógépet csatlakoztattuk, így megvalósult a spektrumok automatikus gyűjtése és adatfeldolgozása. 1998-ban helyeztük üzembe a Staib DESA 100 típusú spektrométerét. Nem részletezzük a továbbiakban az alkalmazott mérőberendezéseket. Kutatásaink jelentős hányadát az MTA ATOMKI-val együttműködve végeztük, az ATOMKI által kifejlesztett ESA 31 félgömb (HSA) spektrométerrel, melynek kiváló az energiafeloldása, de igen kicsi és energiafüggő a detektálási szögterülete.

A felsorolt spektrométerekkel végeztük a felületek és vékonyrétegek kvantitatív AES-elemzéseit, az energiavesztési spektrometriát, valamint a közleményünkben ismertetett transzportparaméterek meghatározását, főként a rugalmas elektronszórás spektrometria (EPES) segítségével. A továbbiakban atomosan tiszta felületekről beszélünk. A közleményünkben LEED és AES-sel kapcsolatos fogalmak megtalálhatók két tanulmányunkban [4, 5].