



Az 1988-ban alapított Academia Europaea (AE) 2017-es éves konferenciáját szeptember elején Budapesten rendezte a Magyar Tudományos Akadémián. A konferenciához kapcsolódóan a Fizika és Műszaki Tudományok Szekciók közös szimpóziumán az AE tizenkét új tagja tartott székfoglaló előadást. A nyolc országból érkezett előadók között volt az AE négy új magyar tagja, *Bíró Tamás Sándor*, *Gránásy László*, *Gyulai József* és *Kamarás Katalin*. Felkértük őket, hogy a *Fizikai Szemle* számára írják meg eredetileg angolul tartott előadásuk magyar változatát. A négy cikkből kettőt előző számunk tartalmazott, kettőt a mostaniban közlünk.

IONSUGARAS TECHNIKÁKTÓL A NANOSZERKEZETEKIG

Gyulai József

MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
és BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikus Eszközök Tanszéke

Bevezető mentegetőzés

A jelen írást a *Szemle* főszerkesztőjének kérésére írtam, csatlakozva az Academia Europaea ideai kitüntetettjeinek hasonló cikkeihez. A felkérés az ottani „Introitus”-om magyar megírásáról szólt. A hazai közönség könnyen kiszámolhatja, hogy hány éves korban ért ez a nagy tisztesség, és rájöhethet, hogy a beszámoló inkább szakmai életrajz [1], azaz a kései beválasztás indoklása lehet, semmint friss eredményeim büszke bemutatása. A tisztesség is azé csapaté, amelyet szervezhettem és irányíthattam évtizedekig, bevezethettem a nemzetközi közösségbe, majd átadhattam hasonlóan sikeres utódaimnak. Nagy ajándék az Élettől, hogy az indító csapat, nyugdíjasokként rendszeresen találkozok ma is. Hallgatóimnak szoktam mondani, hogy a tudományos karrierhez három attribútum juttathat el: tehetség, szorgalom, szerencse. Bármelyik „kettős” már jelentős sikerre viheti az embert. Ha a tisztelt Olvasó, kedves Kollegina, Kolléga megtisztelt azzal, hogy elolvassa az alábbi írást, megfeytheti, hogy az én életemet melyik attribútum, vagy netán melyik „páros” dominálta. Vagy rejtőzik egy negyedik attribútum is?

Bevezetés

Amint *Gordon Moore* konstataulta és a világ „törvénynyé” emelte, a hatvanas évek végén elindult az áramkörök bonyolultságának exponenciális növekedése.



Gyulai József akadémikus, az MTA EK MFA nyugalmazott igazgatója, az MFA és a BME emeritus professzora. Az Academia Europaea tagja. Éveket töltött amerikai, francia, német és japán egyetemeken. Vezetőségi tagja volt az Európai Anyagtudományi Társaságnak, elnökhelyettese a Nemzetközi Fizikai Uniónak (IUPAP) és az Európai Fizikai Társaságnak (EPS). Elnöke, majd tiszteletbeli elnöke az Eötvös Társulatnak. Kitüntetései: Akadémiai Díj, Munka Érdemrend, Széchenyi- és Prima Díj, Eötvös Érem.

Ebben a felszálló fejlődési ágban – az akadémiai (egyetemi) kutatások szerencséjére – nyitott volt a terep a szilárdtest-fizikai és -kémiai elvek, preparatív eljárások, illetve gyártásba is vihető ötletek alkalmazására.

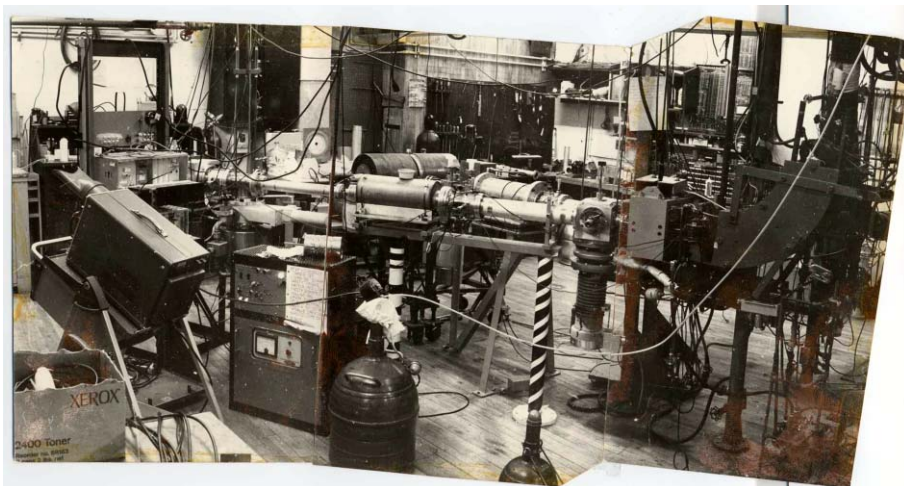
A következő fejlődési szakaszban, a nyolcvanas, kilencvenes évektől, a súlypont az ötletelésről áthelyeződött a már bevált eljárásoknak az iparban korábban ismeretlen precizitású alkalmazására, *atomi pontosságú* szerkezetek előállítására, mindez a technológiai higiéné korábban ismeretlen körülményeinek létrehozását is követelte – a tranzistor már kisebb, mint egy porszem. Azaz ez már inkább mérnöki fejlesztés volt és szűkebb terep maradt az intuitív „felfedezőből alkalmazott” kutatásnak. A Denard-skálázás – az arányos kicsinyítés azonos elemparamétereket (kivéve a Joule-hő fejlődését) eredményez –, mint fejlesztési elv azonban évtizedekre az emberiség segítségére jött. Most kezdi „túlkicsinyíteni” magát.

Emiatt talán ismét feltűnik a fizikai kutatás terepe, de már a kvantumfizika, az atomi mágnesség stb. szintjén, amelyekből kifejlődő technológiák a gyártási eljárásoktól megkövetelt megbízhatósági értékeket jó, ha egy-két évtized múlva képes lesznek teljesíteni.

Találkozásom az ionos technikákkal

Szegeden, *Budó Ágoston* munkatársaként a *Gombay Lajos* vezette félvezető csapatban dolgoztam. Budó professzor által ért a szerencse, hogy egy egyéves ösztöndíjat kapjak az Egyesült Államokba 1969-ben. Az, hogy ez „a legjobbkor, a legjobb helyen” léteztette számomra lehetővé, csak később derült ki. Akkor csak örvendeztem, hogy *Jim Mayer* professzor a California Institute of Technology (Caltech) Villamosmérnöki karának fiatal professzora „bevállalta” a keleti blokkból érkezett ismeretlen postdoc-nak. Ebben, mint később megtudtam, *Harold Brown*, a president, azaz az akkori rektor – később az USA védelmi minisztere – támogatta (1. ábra).

Mayert¹ csak irodalomból ismertem, mint a félvezetős rézszeckedetektorok és a 3-5-típusú félvezetők kutatóját (ez utóbbi témába tartozott a kandidátusi értekezésem), aki nem sokkal korábban került a Caltechre a Hughes Aircraft kutatóintézetéből – szóval, *va banque* írtam neki, befogadást kérve. A kapcsolat 1974-ben, már itthonról kapott igazán lendületet, mint talán a legelső, National Science Foundation által finanszírozott USA (Caltech) – magyar (KFKI) kutatócsere-egyezmény létrejöttével. A jó két évtizedes szoros



1. ábra. Caltech Kellogg laborja 1970-ben, ahol a „büszke” eredményeink születtek...

kapcsolat bele tudott szólni a világ fejlődésébe, mind az idelátogató amerikaiak, mind a munkatársaim tehetőségét is bevonó eredményes kinti munka révén.

De ne szaladjunk előre: az 1969-es odaérkezésemkor kezdett a Mayer-csoport az ionimplantáció iránt érdeklődni és a Caltech híres 3 MV-os Van de Graaff-gyorsítója mellett a Rutherford-visszaszórásos és channeling (RBS+C) analitikai technikát megvalósítani. Ott tartottak, hogy elkészültek az első Si-SiO₂, Si-Si₃N₄ vékonyrétegeken felvett regisztrátumok (2. ábra).

Az világos volt, hogy ezek a görbék tartalmazzák a kémiai összetételt, sőt: mélységi függésben is. Szerencsémre, Jim és O. Meier német vendégkutató nem jöttek rá, hogy miként kell ezt kvantitatívan kiolvasni, kiszámolni. En, akinek magfizikusi, gyorsítós ismereteire a nulla jelző is eufemizmus volt akkoriban, egyik délután leültem a spektrumok mellé, elképzelttem, mit csinál egy, a vizsgálandó anyagba belőtt He-ion, mivel ütközik, hogyan veszíti energiája egy-egy részét mire visszafelé kilép az anyagból és eléri a detektort – és rájöttem a számításmód lényegére. Ez lett a belépő-jegyem a Mayer-csapatba, sőt pár hónap múlva már meglett az első, sőt, elsőszersős cikkem [2] – ami Mayer hihetetlen tisztességét is mutatta.

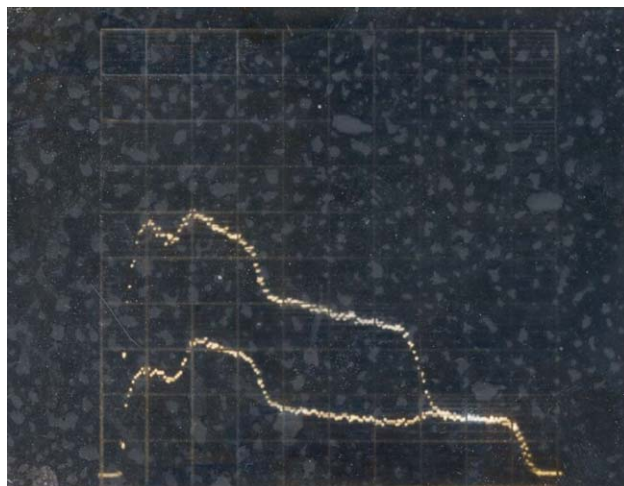
Mіндеz hogyan folytatódott akkor?

Val Rodriguez, a Fairchild Development akkori munkatársa,² korábbi Caltech PhD, 1969 őszén eljött az Alma matert meglátogatni. Jim engem bízott meg, hogy megismertessem Valt a témáinkkal. Hogy mit

tudunk az RBS+C-vel mérni és mit gondolunk az akkor ígéretesként újra felfedezett ionimplantációról, W. Shockley tizenhét évvel korábbi, azaz a védetségéből éppen kifutó találmányáról. Val – nagyszerű kutatóként – rögtön megértette az RBS lehetőségeit és attól kezdve sorban szállította nekem a mintasorozatokot érdekesnél érdekesebb témákkal. Így lett a családomtól távol töltött év végére tizenegy cikkem, ami megalapozta, hogy hazatérve elindíthassam a témát KFKI-ban – ma azt mondanók: mint egy „Lendület” programos.

Érdekesség, hogy azokban az években – mint egy személyes vitám is tanúsította 1970-ben – az Intel semmire sem tartotta az ionimplantációt, mert az általuk kitalált, az önállóságukat megalapozó megoldás-

2. ábra. Kristályos szilíciumon porlasztással előállított SiO₂ réteg – talán legelső – RBS+C spektruma, polaroid képen. Az abszcisszán a detektorba érkező He-ionok energiáját, az ordinátán az azzal az energiával beütköző, visszaszórt ionok számát ábrázoltuk, adott ionfluxus esetén. Az alsó görbe felvételéhez (111) irányban orientáltuk a becsapódó ionokat (csatornahatás), ami kiemeli az analizálandó vékonyréteg koordinátáit. A jobb szélén van a legkisebb energiát veszített, azaz felületi Si-atomok koncentrációját mutató beütések száma, balra haladunk az anyag belseje felé; a kis tömegű O-atomokon több energiát veszítenek a He-ionok, ezért az oxigénprofil rálát a Si-atomok görbéjére.



¹ 1970-ben még tényleg lehetett – igaz, jó, azaz teljesen *tájékozott* helyen – beleszólni a nagyvilág dolgaiba... Ehhez Jim Mayer (tudomány-szociológiai?) zsenije is kellett. Már több helyen leírtam, hogy Jim alig olvasott szakirodalmat, de fél életét a telefonon töltötte, „fontos” emberekkel beszélgetve. Meggyőződése volt, hogy aki az irodalomból veszi témáját, legalább fél évvel el van maradva... Ezért buzdítom fiataljainkat, hogy konferenciákra járjanak, de nem az előadások meghallgatása kedvéért, hanem azokért a sörözésekért, amit fontos emberekkel harcolnak ki.

² Mindez egy jó évvel volt azután, hogy az Intel önállósodott, kivált a Fairchild anyacégből – és a Fairchild még nem tudta, hogy félvezető-üzletága rövidesen padlóra kerül. Az én első Caltech-évemben még teljes gőzzel folytak a fejlesztések, például az MNOS technológiáé, a Gunn-diódáé stb.



3. ábra. A Kurcsatov Intézet tömegszeparátor típusú, azaz nagyáramú 40 kV-os gépe.

sal e nélkül is tudtak egymás mellett komplementer tranzisztorokat párrá kapcsolva gyártani. Nehéz volt, de lehetséges.³

Életem újra a családommal – már Budapesten

Már írtam arról, hogy itthon a KFKI-ba kaptam meghívást, aminek elfogadását Budó Ágoston korai és váratlan halála, valamint utódjának témaváltási ajánlata tette lehetővé. Ezzel elindult a csapatépítés a KFKI-ban, ami néhány nagyszerű fiatal felvételét (elsőként *Csepregi László, Keresztes Péter, Kótai Endre, Erős Magda*), valamint több KFKI-s csatlakozását jelentette (*Lohner Tivadar, Mezei Gábor*, időlegesen *Keszthelyi Lajos* csapata és mások). Vitálisan fontos lett az Egyesült Izzó vezetésének hozzájárulása több kitűnő mérnök (elsőként *Gyimesi Jenő, Mohácsi Tibor, Schiller Róbertné*, később *Vázsonyi Éva* és *Andrási Andorné*) delegálásával, átadásával – szomorú, de többen már eltávoztak közülük. Az itthoni felkészültségünket mutatja a Kurcsatov Intézettel kötött szerződés révén kapott (3. ábra), valamint saját erőből épített MOS eszközök céljára fejlesztett implanterünk (*Pásztor Endre*) képe (4. ábra).

Következzék végre annak összegzése, hogy melyek lettek azok az eredmények, amelyek a Gyulai-csapattal megerősített Mayer-csoport, illetve – talán mondhatjuk – a Mayer–Gyulai-csapat ért el. Mielőtt a tisztelt Olvasó rákérdez, be kell vallanom, hogy a legfontosabb eredmények a Caltech-beli tartózkodásaink idején keletkeztek, mert a Mayer-tanszéken, mint „karavánszeráj”-ban, naponta megfordultak a vezető ipari és akadémiai intézetek munkatársai, és nem csak a korszerű, de a világot itt-ott leelőző tudásunk is fenntartható volt. Itthon? Itt is sok, elismert

cikk született, főleg az RBS technikája terén, mind a magunk, mind az itt dolgozó amerikaiak részvételével, a nemzetközi közösség befogadott bennünket, de feladatunk főleg az áramkörök reprodukciója volt. Sajnos, még az egyszerűbb eredményeinket sem tudta az Egyesült Izzó átvenni, alkalmazni. A Mikroelektronikai Vállalat leégése okán később se tudtunk a hazai félvezetőipar sikerre vitelén bábáskodni. Átálltunk a szenzorikai kutatásokra, ami a KFKI-beli infrastruktúrával mindmáig sikerrel végezhető. A KFKI-nak a nyolcvanas években volt egy kitérője a buborékmemória felé (*Zimmer György* vezetésével), de az a világban lecsengő ötletnek bizonyult. Sok technika, például a fotolitográfias eredményeik azonban mindmáig szerepelnek az arzenálunkban.

A Moore-törvényre is kiható eredményeink

1974. nyári ott-tartózkodásomkor küszködtünk azzal, hogy bizonyos implantált minták hőkezeléssel jó kristállyá kristályosodtak vissza, mások meg ellenálltak. Kiderült, hogy a különbség az alapkristály orientációjában volt: az akkortájt standard (111) orientációjú min-

4. ábra. A saját fejlesztésű 150 kV-os, a bal oldalon lévő tiszta laborba „szolgáló”, precíz adalékolásra alkalmas implanter, SAFI.



³ Az Intel koncepcióváltását már itthon tudtam meg, amikor a nekem első Caltech PhD-sunkat, *Richard D. Pashley*-t az Intel 1975-ben alkalmazta. Dick rászolgált erre a flash memory későbbi feltalálásával, ami vice-CEO-vá tette. Ma egy processzor gyártásában több, mint húsz implantációs lépés van az Intelnél is.

ták nem, de az (100) orientációban növesztett, illetve vágott szilíciumba implantált adalékok kiválóan beépültek. Azaz az implantációs technika „kedveli” ezt az orientációjú alapanyagot. Ez időben összeesett azzal a párhuzamos tapasztalattal, hogy a SiO_2 is jobb minőségben nő az (100) felületen. E két eredmény együtt paradigmaváltást okozott a világ szilíciumkristály-iparában: standarddá vált az (100) orientációjú alapanyag. Az implantáció – általunk is generált – presztíznövekedésében ez lett az első lépés [3]. Elindult az eljárás a „fizikai játék”-ból „ipari technológiá”-vá válás felé.

De még kellett egy lépés... Ennek professzionális kidolgozására a korán elhunyt első postdoc-unk, Csepregi László Caltech-beli szorgalmára volt szükség.

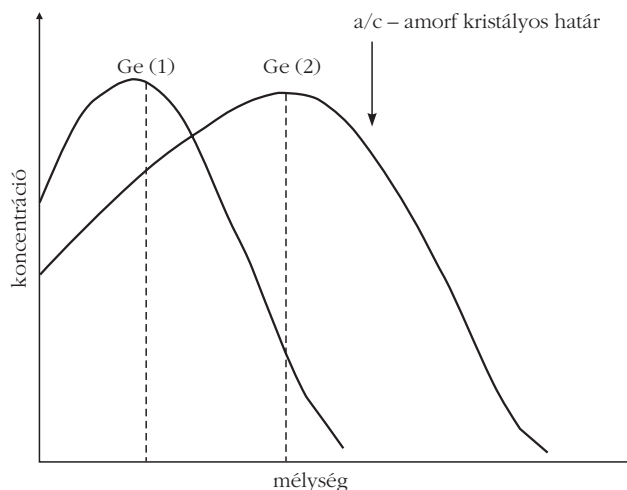
Az implantált ionok fékeződése az alapanyag atomjaival való kölcsönhatás révén jön létre, azaz az energiát a rács veszi fel, ionkaskádok keletkeznek. Ennek magfizikai elméletét a Bohr-iskola tagjai dolgozták ki – de amorf anyagra. A megállt ionok ilyen anyagban Gauss-eloszlást mutatnak. Igenám, de áramkörünket kristályos szilíciumban alakítjuk. Itt az atomi sorok csatornákat alkotva reprodukálhatatlan mélységbe kormányozhatják az ionokat, azaz a pn-átmenet helye indefinit (ahol a belőtt p-adalék koncentrációja eléri az alapanyag n-adalék koncentrációját). Ezt korábban úgy enyhítették, hogy 7° -kal elorientálták az alaplemezt – ekkor a rács az ion számára közelítőleg amorf. Ez azonban csak rész megoldásnak bizonyult. Itt lépett be csapatunk egy ötlettel [4], amely preamorfizáció (PreAmorphization Implant) néven vált ismertté: „saját”, azaz Si-ionokkal amorffá bombázzuk az alaplemez felszíni rétegét. Az adalékot ebbe az amorf rétegbe löjük. Ezt követően elegendő egy alacsonyabb hőfokú hőkezelés a rácshibák eltüntetésére és az adalék aktiválására (rácspontba juttatására). Ez a Moore-törvény későbbi méretkövetelményei miatt lett fontos: a diffúzió mára káros hatás, az a cél, hogy oda és annyi iont juttassunk, amennyit a feladat megkövetel.

Ezt trükköt alkalmaztuk a sugárzásálló áramkörök egyik első, sikeres változata, a zafíron növesztett szilíciumréteg kristályminőségének javítására. Ez az eljárás évtizedre standarddá vált az USA iparában (egy Hughes-munkatárs visszajelzése, 1984) [5].

A National Science Foundation által finanszírozott Caltech–KFKI együttműködés zárójelentése 32 közös cikket tartalmazott.

Európai kapcsolatok, Párizs és Erlangen

A nyolcvanas évek közepén – a KFKI-beli feladataim miatt – már nehézséget okoztak az amerikai tartózkodásaim, ezért örömmel fogadtam el a Physique des Solides CNRS (Université Paris VII) csoport magyar származású, Jim révén megismert vezetője, *Georges Amsel* hívását. Gyuri az ionsugaras analízis egyik világtekintélye volt. Két egymás utáni évben ott töltött hónapok visszakormányoztak az integrált áramköri világból az ionsugaras analízis művelői közé, főleg a néhány MeV energiájú ionokkal kelthető magátalaku-

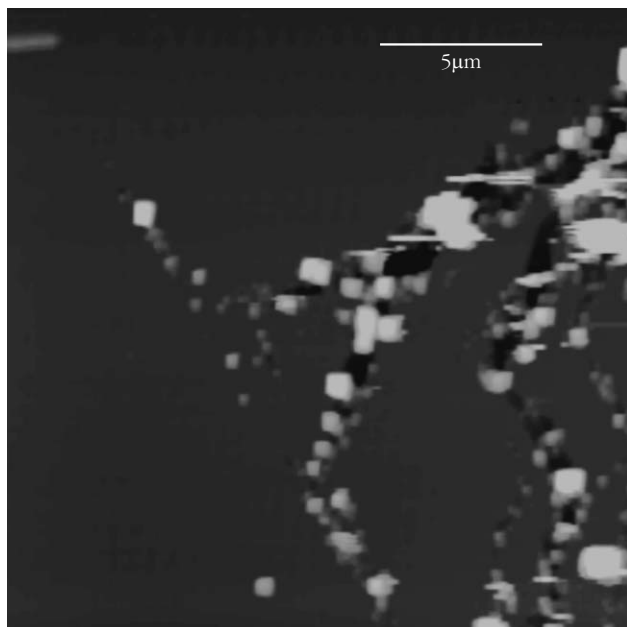


5. ábra. Kettős sajátionokkal való implantációval elérhető, hogy olyan területeket hozunk létre, ahol a vakanciadús réteget intersticiálisokban dús réteg fedi át – erősítve a hibamentes visszánövesztéleteit.

lások világába és – munkatársaim (elsősorban *Battistig Gábor*; *Vázsonyi Éva*, *Szilágyi Edit*, *Manuaba Ash-rama*) révén ismét évtizedes cserekapcsolattá bővültek. A csapat európai presztízsét munkálta tovább *Pászti Ferenc* barátom, aki zseniális technikai ötleteivel az Ibériai-félsziget országaiban vált az ionsugaras laboratóriumok egyik fő szervezőjévé – akkor, amikor ezek az országok lettek az EU strukturális alapjai fő kedvezményezettjei (a spanyol és a portugál tervek szakmai tanácsadói közé jómagam is bekerülhettem – ez volt az első EU-tapasztalatom).

1988-ban azonban az én vendégkutatói életem más irányt vett. *Heiner Ryszel* professzor – KFKI-beli első nyugati vendégeim egyike még a hetvenes évekből –, aki akkorra az erlangeni Friedrich-Alexander Egyetem Mérnökarán az Elektronikus Eszközök Tanszék vezetője és – perszonálunióban – az ott induló és erősödő „Integrierte Schaltungen” Fraunhofer-Intézet (IIS-B) vezetője lett, egy „open” meghívást ajánlott: ahogy azt a KFKI-s munkám engedi, vendégprofesszorként szinte korlátlan időt tölthetek náluk. Ez a meghívás dominálta következő két évtizedemet és a KFKI-s csapatom máig tartó kapcsolatait. A szakmai kapcsolatot mára a KFKI-ban Lohner Tivadar kezdeményezésére, majd *Fried Miklós* és *Petrik Péter* munkája nyomán felfejlődött optikai módszer, az ellipszometria alkalmazása teljes Si-szeletek felületi rétegeinek analízisére dominálja. Én abban a személyes szerencsében részesültem, hogy az évtizedek alatt hét erlangeni fiatal doktori munkájának érdemi témavezetője, pontosabban „Zweitgutachtere” lehettem, zömük ma fontos beosztásban dolgozik a német iparban.

Az implantációnál maradvá, erlangeni életemből egy eredményt említenék, amely *Christine Dehm* témájaként vezetett a doktori fokozatához. „Defect engineering” lett összefoglaló neve azon évtizedes programnak, amely az ionimplantáció megmaradt, illetve fellépő problémáit igyekezett megoldani, csökkenteni. A kifejezés azt jelenti, hogy ezen téma keretében a defektek rekombinációját úgy is javították, hogy tudatosan



6. ábra. Szilícium oldallapját 200 MeV energiájú Kr-ionokkal besugározva, a kaszkád vége, azaz az utolsó kiütött atomok láthatóvá válnak a valódi felületen. Ez az ábra felkerült az IBM honlapjára, mint az ionbehatolás szimulációjának, az SRIM-nek kísérletes bizonyítéka (J. F. Ziegler).

hoztak létre olyan defekteket az anyagban, amelyek a „kellemetlen” defektok fajtáival olyan reakcióba lépnek, amely (jobb) rekombinációhoz vezet. Kiderült ugyanis, hogy a preamorfizáció sem panácea: az implantáció által meglökött atomok ugyanis beljebb hatolnak. Emiatt a felszínhez közel vakanciajellegű, beljebb viszont intersticiális jellegű hibák dominálnak. Azaz a felület közelében hiányoznak atomok, beljebb meg feleslegben vannak. Az volt Christine Dehm (Siemens) témája, hogy két eltérő energiájú Si-ionokkal amorfizálva, ott is lehet többlet atomokat létrehozni, ahol az első implantáció révén vakanciák domináltak (a két szaggatott vonal közötti részben; 5. ábra) [6].

Itthon, a műegyetemi oktatás mellett Csillebérc maradt a „hazám”

Azok a témák, amelyekhez közöm volt vagy lett, szakmailag vagy „csak” szervezeten, először a KFKI szétválásakor váltak önálló intézetté. Később, az MFKI-val Csillebércen összeolvadva, gazdagodva, szélesedve lettünk sikeres intézet. Mára igazgató utódaim, *Bársony István*, majd *Pécz Béla* vezetésével az Energiatudományi Kutatóközpontban landoltunk Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetként (MFA). A mai eredményeket az Évkönyvekből lehet legjobban követni.

De egy témát, a nanotudományt már a választott cím, a „Nanoszerkezetek” miatt is befoglalok, mint az életemre kiható, fontos lépést. A kilencvenes években sikerült elnyernünk egy hazai pályázatot, amellyel extrém nagy energiájú ionokat, azaz besugárzást „vásárolhattunk” a dubnai Egyesült Atomkutató Intézetben (IYAI-JINR). Ezen a ponton *Havancsák Károly*

(ELTE), aki bejáratos volt Dubnába, lett a mediátorunk. Előbb szép kísérleteket végeztünk, mint például amikor a Si-kristály oldallapját sugározva be többszáz MeV-es Kr-ionokkal, a valódi felületen az ionkaszkád végső pillanatait tudtuk láthatóvá tenni atomerő mikroszkóppal (6. ábra) [7].

A következő azonban több, mint „szép” eredmény lett: teljesen új irányba kormányozta a – ma Biró-csapatként ismertté vált – csoportunk munkáját.

Az a szerencsés véletlen csatlakozott hozzánk, hogy jól orientált grafitot (Highly Oriented Graphite, HOPG) is választottunk ezen extrém gyors ionok hatásának tanulmányozására – a pásztázó szondás módszer ugyanis nagyon alkalmas ezen anyag vizsgálatára. Az történt, hogy a besugárzott minták felszínén, a kilépő kráterből kiindulva mikron méretű „szálakat” találtunk (7. ábra). 1993-at írtunk, ami a szén nanocsövek *Iijima* általi felfedezésének éve volt. Biró Lászlóban merült fel a gyanú, hogy mi is nanocsöveket állítottunk elő. A bizonyításhoz azonban meg kellett várunk az erlangeni pásztázó szonda üzembe állítását, amellyel kiderítettük, hogy a kráter atomjai valóban nanocsövekké kondenzálódtak. Az is kiderült, hogy Xe-ionok egyfalú („sűrű” kaszkád, gyors lehűlés, „quenches”), a Ne (kevésbé sűrű kaszkád) pedig többfalú nanocsövekké kondenzál [8].

Befejezés

Ha volt türelme, netán érdeklődése a tisztelt Olvasónak, Kolleginának, Kollégának végigolvasni ezt a beszámolót, megérti a bevezető mentegetőzésem mondatait. Bárhogy is alakult, nagyon köszönöm azt a

7. ábra. Orientált grafit (HOPG) besugárzása 210 MeV energiájú Ne-ionokkal. A kilökött szénatomok kráteréből kilépő „gőz” szén nanocsövekké kondenzálódik.

