

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikiai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXI. évfolyam

9. szám

2011. szeptember

A RUTHERFORD-VISSZASZÓRÁS ÉS »KARRIERJE« A MIKROELEKTRONIKÁBAN

Gyulai József

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Évtizedek óta kétvétenként rendezi meg az „ionsugaras” szakmai közösség az International Conference on Ion Beam Analysis (IBA), amely azon, főként anyagtudományos eredmények seregszemléje, ahol a vizsgálandó anyagot gyorsított ionokkal bombázzák és a kilépő reakció-termékeket gyűjtik be, vizsgálják, analizálják. E termékek lehetnek maguk a becsapódó, szóródott ionok, vagy velük azonos rezonancia-termékek, de lehetnek magreakciók révén keletkező másfajta részecskék, vagy akár a kiváltott optikai, röntgen-, illetve gamma-sugárzás fotonjai. E termékek vizsgálata alapján ugyanis következtetni lehet az eredeti anyag sok-sok tulajdonságára. Az utolsó IBA-konferenciát *Ernest Rutherford* személyének szentelte a közösség, munkásságának fő helyszínén, Cambridge-ben rendezve azt, mert nevezetes szórásformulája adja alapját az egyik legelterjedtebb és nevét is viselő módszernek, a *Rutherford-visszaszórásnak* (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS).

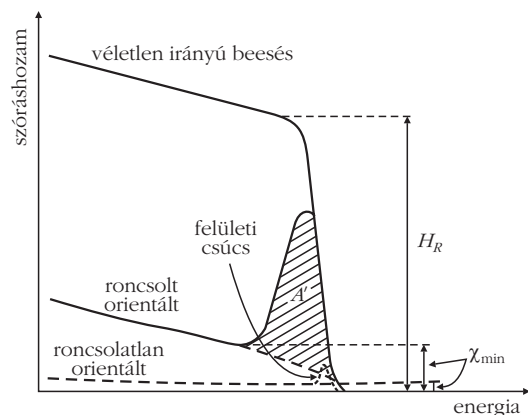
Az RBS-módszerről – bevezetésül

1. Az RBS – legegyszerűbb alakjában – egyfajta tömegspektrometria. Ha egy energikus, könnyű (m tömegű) ion, például alfa-rész, ${}^4\text{He}^+$, proton, ... beleüt-

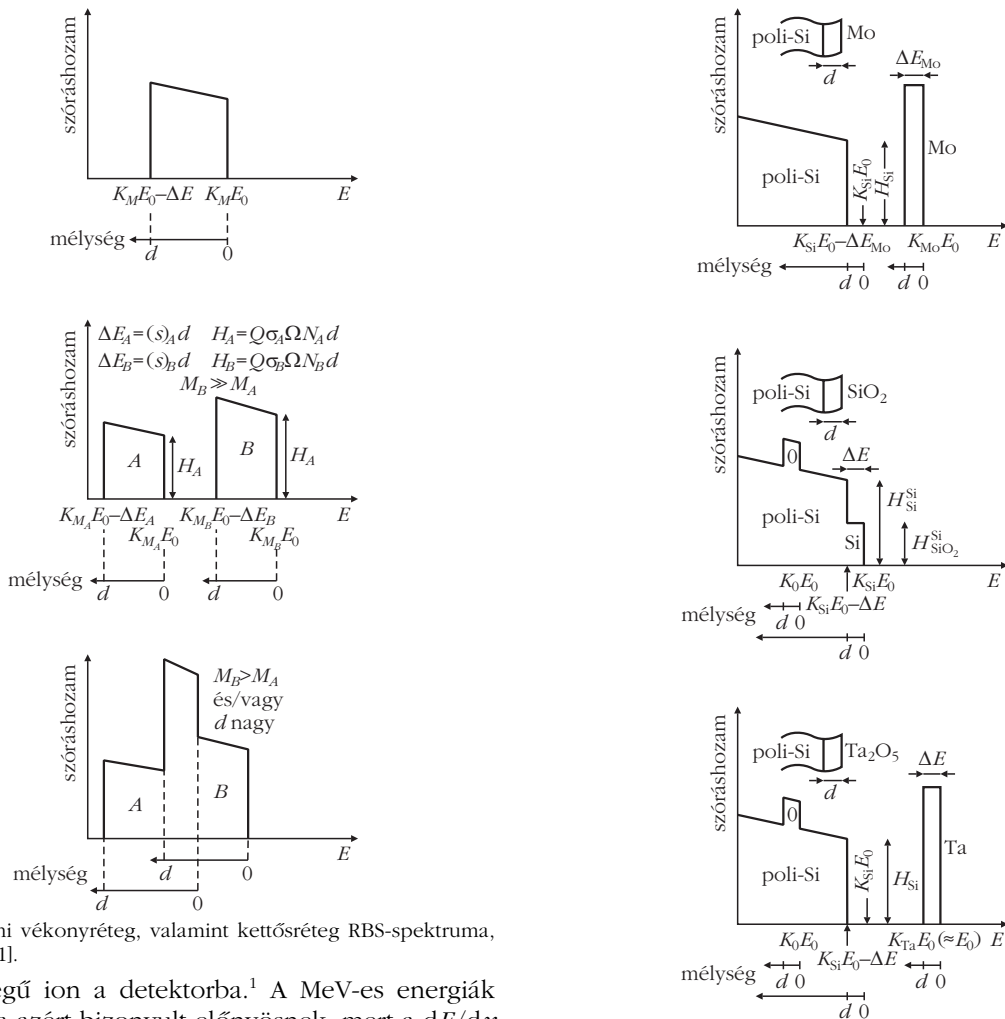
szik a vizsgálandó tárgy egyik felszínre, az ionnál nagyobb (M) tömegű atomjába, akkor a Rutherford-formula szerint szóródik. A centrálisan érkező részecskék azonban – amelyek a párhuzamos pályájú nyaláb mintegy egy ezrelékét teszik ki – nagy szögű, rugalmas szórást szenvednek, az energia és impulzus-tételt kielégítve mintegy „visszapattannak” a nehezebb atomokról (1. ábra). Ilyenkor az $M \gg m$ feltétel teljesülésekor az energiavesztés-formula rendkívül leegyszerűsödik [1]. A ${}^4\text{He}$ ionok, például aranyról körülbelül 95%-os, szilíciumról 56%-os, oxigénről 32%-os stb. energiával „pattannak” vissza.

2. *Mélységfüggő kémiai analízis.* Ha az atom, amelyen a szóródás bekövetkezik nem a felszínen, hanem az anyag mélységében van, az ion a behatolás folyamán – enyhe ütközésekkel – veszít energiájából, amely anyagfajtától is függő „fékezőerő” (dE/dx) révén mélységskálává alakítható. A szórásnál bekövetkezik az előző pont szerinti karakterisztikus energiavesztés, majd a kifelé úton fellépő további energiavesztéssel jut

1. ábra. Egy roncsolt, kristályos Si RBS-spektruma, sematikusan [1].



A *First Baron Rutherford of Nelson, New Zealand, and Cambridge*-et, mint minden idők egyik legnagyobb fizikusát több éve ünnepljük eredményes élete sokféle centenáriumának okán. A 2011. esztendő az atommodell felfedezése, a magfizika, mint tudomány létrejötté centenáriumaként aktuális. Erre emlékezve rendezett a Fizikai, valamint a Műszaki Tudományok Osztálya tudományos ülést az MTA Közgyűléséhez illeszkedően. Ebben szerepelt a fenti címmel tisztelgő előadás az alfarészecske-szórás anyagvizsgáló felhasználásának „karrierjéről” a mikroelektronikában. Ennek egy olvasható változata a jelen cikk.



2. ábra. Atomi vékonyréteg, valamint kettősréteg RBS-spektruma, sematikusan [1].

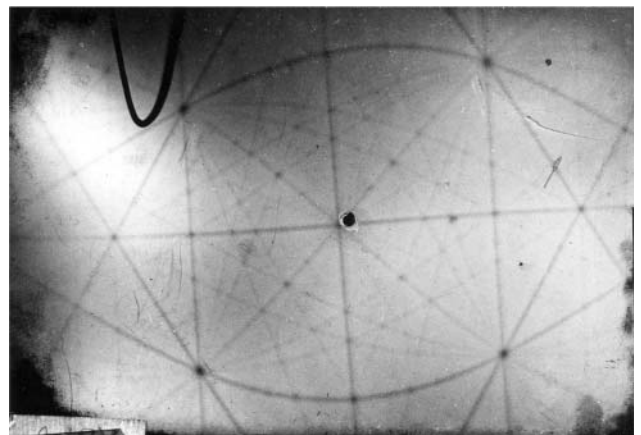
az m tömegű ion a detektorba.¹ A MeV-es energiák alkalmazása azért bizonyult előnyösnek, mert a dE/dx függvény valamennyi anyagra valahol ebben az energiatarományban lapos maximummal rendelkező függvény, azaz a fajlagos energiavesztés mind a behatolásnál, mind a kifelé haladásnál közel azonosnak választható. Így az energiaskála egyszerűen mélységskálává alakítható át (2. és 3. ábra).

3. A csatornabatas további lehetőségeket kínál. Ha a besugárzott anyag kristályos, annak atomjai, síkjai irányító hatást gyakorolnak a belépő részecskére, és – a fent említett – „enyhe ütközések” jellege megváltozik: a csatornák atomközi terében az ionok szinte akadálytalanul repülnek, kiszóródást csak az ionpálya orientációs pontatlanságai, vagy a hőrezgések miatt a csatornába „belógó” atomok fokozatos hatása okoz.² Ha tehát az ionokat, például résekkel század fok kúpszögű szétartással „kollimáljuk”, továbbá a mintát egy goniométerre

3. ábra. Polikristályos (azaz makroszkopikus csatornabatas nélküli) szilíciumra felvitt vékonyrétegek RBS-spektruma, sematikusan.

szereljük, megnyílik a lehetőség, hogy a szórásképből kristályszerkezeti információt is szerezzünk (4. ábra).

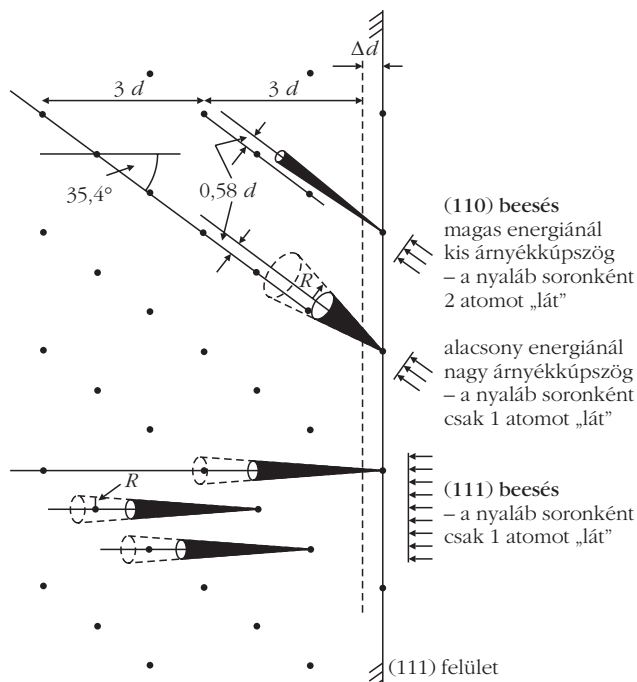
4. ábra. A „Blocking pattern” kirajzolja a kristályszerkezetet. A középső lyukon a képsíkra merőlegesen felénk haladó, ez esetben 1,5 MeV-es He-ionok beütköznek, majd visszaszóródnak a szemünk helyén lévő szilíciumkristályról. Az atomsorok, -síkok azonban bizonyos irányokban megakadályozzák az ionok távozását a kristályból, azaz „blokkolják” pályájukat, illetve a csatornába kormányozzák azokat – így, például egy polimer-lemezen létrejövő, marással előhívható károsodási ábra magán viseli a kristályszerkezet képét.³



¹ Hogy egy könnyebb atom van-e a felszínen, vagy egy nehezebb mélyebben, az a minta megdöntésével, azaz a geometriai út megnövelésével könnyen megállapítható.

² Az ionok sebessége nagyságrendekkel meghaladja a termikus rezgések során fellépő sebességeket, emiatt az ion „fagyottnak” látja a kristályrácsot, a „belógó” ionok csak a csatorna falának „egyenletlenségét” fokozzák, és ezzel növelik meg a kiszóródás valószínűségét.

³ I. V. Mitchell és J. Gyulai egykori „játéka” a Caltech Van de Graaff-ján... A fekete hurok véletlen: a szórókamrában lévő RBS-detektor vezetéke lógott be, ami persze szintén „blokkolta” az ionokat, bocsánat...



5. ábra. Az RBS és csatornahatás felhasználása a legfelső atomsorok vizsgálatára: a legfelső atomsor relaxációja, adszorbátumok kvantitatív meghatározása annak alapján, hogy az egyes atomok árnyékkúpja nem csak irányfüggő, hanem a szonda-ion energiájától is függ, csökkenő energiával nő a kúpszög, ezzel az ion számára láthatatlan térrész [2].

A történet, röviden

Térjünk azonban vissza a történethez, ami jóval korábban indult. Köztudott volt, hogy a „magfizikusok” már a harmincas években az RBS-t használták arra, hogy a céltárgyaik tisztaságát ellenőrizzék. Az első, a világ figyelmét is felkeltő RBS-vizsgálatot – tudtommal – *Anthony L. Turkevich* (1916–2002) javaslatára a Surveyor-5 (1967) fedélzetén végezték, a Hold talaja kémiai összetételének megismerésére – a Nyugalom Tengerénél leszállt űrhajó alatti talajrészén.

Az RBS-t is megvalósító eszköz egy leengedhető, 15 cm átmérőjű „fazék” volt, amelyben hat ^{242}Cm (curium) α -forrás szolgáltatta a gyors, maximum 5,8 MeV energiájú alfa-részecskéket. Az eszköznek két független detektáló rendszere volt: két detektor mérte a Rutherford-visszaszóródást (RBS), négy detektor az egyidejűleg fellépő magreakciók proton és α -részecske termékeit.

A detektorok elektromos impulzusait, amelyek a kémiai információt szállító részecskék számát és energieloszlását „rejtették”, egy sokcsatornás analízátor rendezte energiaspektrummá, azaz olyan grafikonná, amelynek abszcisszája a detektorok által észlelt részecskeenergia, ordinátája azok száma a besugárzás alatti időre, pontosabban az érkező iondózisra vonatkoztatva. Ez a készülék már az űrhajóban volt.

A teljes misszió 83 + 22 órányi adattömeget juttatott a Földre. Az adatok analízise arra utalt, hogy ott a Hold talaja bazalt, sok titánnal – hasonlít a Hudson folyó talajára a Palisades vidékén. A titántartalmat

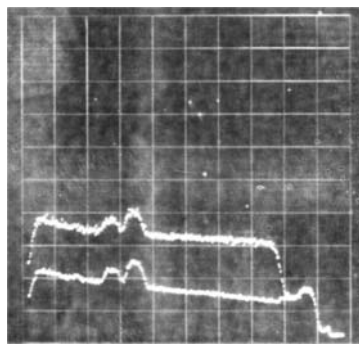
aggályosnak találták, de később, a hazahozott mintákon végzett mérések igazolták a mérés helyességét.

Turkevich sikere felvillanyozta a MeV-es, jó energiaszabotású gyorsítók körül dolgozó kutatókat, hogy a mérést ^{242}Cm helyett ionnyalábbal valósítsák meg. Sőt, rögtön adódott az az ötlet is, hogy a mintát goniméterre szereljék, amikor is a csatornahatást is be lehet kapcsolni kristályszerkezeti mérésre, sőt, a kristályatomok „árnyékkúpja”, annak energiafüggése további, különleges kristálytani méréseket tett lehetővé, mint például a felszíni atomok relaxációja, azaz a rácsállandó megváltozásának mérése az aszimmetrius kötőerők hatására [2] (5. ábra).

Az én pályám félvezető-kutatóként indult Szege-den, *Budó Ágoston* mellett és csak a szerencsém vagy az „őrangyalom” irányított 1969-ben a Caltech *Jim W. Mayer* professzor vezette, akkoriban szerveződő csapatához, ahol nem sokkal korábban születtek meg az első RBS-spektrumok, implantált szilíciumot vizsgálva, *S. T. Picraux*, Jim első doktoranduszának munkáját is dicsérve.⁴

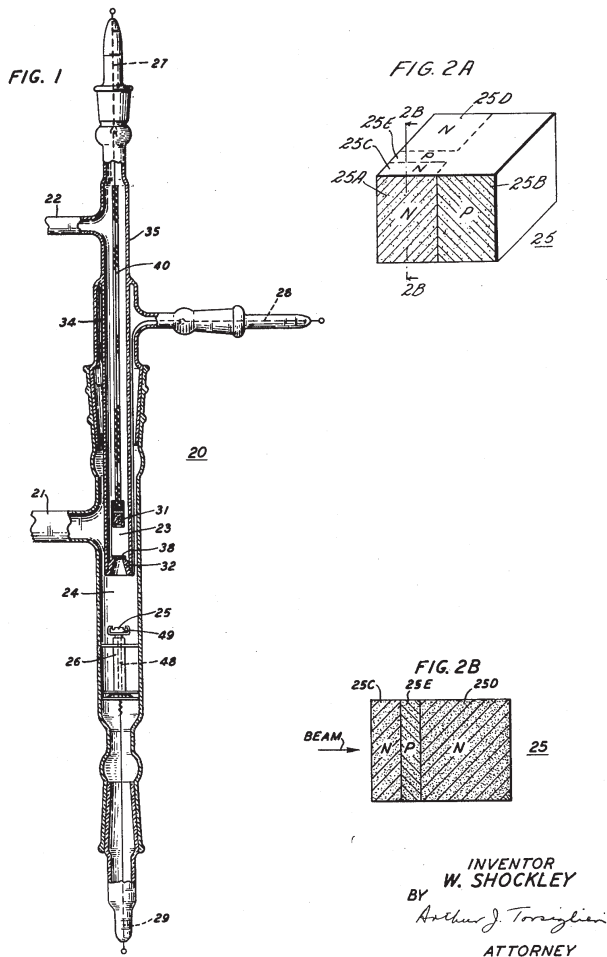
A téma érdekessége okán sok kiváló magfizikus és szilárdtestfizikához, a félvezető-fizikához, az embrionális mikroelektronikához is jól értő kutatócsapat kapcsolódott be az RBS finomításába, alkalmazásába a mikroelektronika „pre-Moore” korszakában.⁵ Rövidesen csatlakozott a KFKI-csapat is sok metodikai újítással.

⁴ Abban a szerencsés pillanatban érkeztem a Caltechre 1969 őszén, amikor Jim Mayer és egy német vendégkutató, *Otto Meyer* a szilíciumon kialakított oxid-, illetve nitridrétegeken rögzítették az első RBS+C (C: csatornahatás is bekapcsolva) spektrumokat, és a sztöchiometriát ellenőrizendő *mélységfüggő kémiai analízisre* szertették volna az RBS+C-t alkalmazni. Szerencsémre, nem jöttek rá, hogyan kell a spektrum csúcsaiból kiszámolni a mélységfüggő kémiai összetételt – azaz az $N_{\text{Si}}/N_{\text{O}}$, illetve az $N_{\text{Si}}/N_{\text{C}}$ atomi koncentrációarányt – a mélység függvényében. Én, a magfizikában járatlan, ültem neki és a bombázási jelenséget, mint atomi mozgóképet magam elé képzelve, rájöttem a kiszámítás módjára. Hamarosan elküldtük az első cikkünket.



A polaroid képen egy X-Si/Si₃N₄/SiO₂ multiréteg véletlen beesésű (felső), valamint csatornázott (alsó görbe) spektruma látható [3].

⁵ Ha csak néhány „versenyhársat” megemlítek a rástartoló RBS-iskolák közül, a tisztelt Olvasó megértheti, hogy mekkora verseny keletkezett nagyhirtelen: *J. A. Davies* (Chalk River), *W. M. Gibson*, *J. F. Poate* (Bell), *J. S. Williams* (Canberra), *I. Ruge*, *H. Ryssel* (München), *J. E. E. Baglin*, *K. N. Tu*, *W. K. Chu*, *J. F. Ziegler* (IBM), *E. Rimini* (Catania), *F. W. Saris* (FOM), *G. Carter* (Salford), *S. T. Picraux* (Sandia), *G. Amsel* (ELFT tiszteleti tag, Paris 7) és sokan mások, akik például a magfizika oldaláról érkeztek és főleg a metodikához szóltak hozzá...



INVENTOR
W. SHOCKLEY
BY
Arthur J. Tompkins
ATTORNEY

6. ábra. Shockley ábrája az ionimplantációs eljárás 1957-es találmányi bejelentéséből (US Pat. 2,787,564). Felismerte a pn-átmenetek létrehozásának lehetőségét ionok belövésével, sőt, a rácskárosodásnak hőkezeléssel való eltávolíthatóságát is fontos elemként említi.

Az ionimplantáció alapszabadalma és „technológiává” válása

Az implantációs eljárást is *Shockley* szabadalmaztatta, még 1957-ben. Az ő „implantere” még fiatal korom vákuumrendszereihez hasonlított, de a szabadalom lefedte a fő célt, a pn-átmenet létrehozását megfelelő adalékok bejuttatásával. Zsenialitásával arra is rájött, hogy az eljárás legfőbb gondja az lesz, hogy a becsapódó ionok energiáját disszipálni kell az anyagban, ami óhatatlanul a kristályrács roncsolását eredményezi. Megoldásként már ő is az utólagos hőkezelést javasolta (6. ábra).

Az emberiség nagy szerencséje, hogy a korábban egyeduralgató, diffúziós adalékolási eljárás⁶ hátrá-

⁶ Ennél az eljárásnál az adalékanyagot, vagy az azt tartalmazó, könnyen bomló vegyületet közvetlenül a szeletre viszik, vagy annak közelébe helyezik (ekkor más tartóanyagon). Mindezt megfelelően magas hőmérsékleten, pontosan választott ideig tartva, az adalékatomok bediffundálnak a félvezetőbe, létrehozva a kívánt koncentrációprofil.

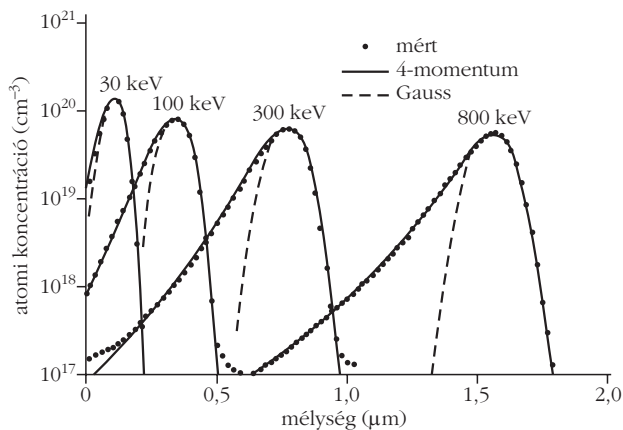
nyai az áramköri gyártásban csak a hetvenes években váltak kritikussá, amikor az eredeti szabadalom „kifutott” és az eljárás általánosan alkalmazhatóvá vált, de még jelentős kutatómunkát kellett kifejteni az implantáció előnyeinek bizonyítására. További nehézség volt azon pszichológiai gát legyőzése, hogy a részecskegyorsító, mint gyártóeszköz teljességgel idegen volt a félvezető áramkörök gyártási környezetében. Így a nagy kihívás abban rejlett, miként lehet az implantációt a fizikusi egzotikumából ipari eljárássá alakítani, fejleszteni. Ebben a munkában mi is bekapcsolódhattunk.

Emlékezetes maradt számomra, amikor az egyik legelső implantációs konferencián (Thousand Oaks, 1970) egy intees kollégával beszélgetve ő mélyen lekicsinyelte az implantációt, mondván: legfeljebb arra lesz jó, hogy amorfizálja két tranzisztor közötti területet az elemek elektromos szigeteltségének javítása érdekében. Az Intel véleménye nem volt meglepő: a nem sokkal korábbi, alapításkori titkuk a technológiai higiéné olyan mértékű biztosításában rejlett, amellyel el tudták kerülni a kemencék samottja „gyilkos” ionjainak beépülését a leendő tranzisztorba. Az ezt biztosító műszaki-gépészeti „trükk” tette számukra lehetővé, hogy elsőként hozzanak létre diffúziós eljárással komplementer tranzisztorpárokat, azaz invertáltakat. 1975-ben lehetett, amikor korábbi Caltech doktoranduszunk, *R. D. Pashley* megírta nekem, hogy az Intel alkalmazta – ez a hír jelezte a filozófia ottani megváltozását. Az implantációs adalékolás ugyanis sokkalta egyszerűbb utat jelent a cél eléréséhez. Dick egyébként a flash memória egyik feltalálója, milliárdos üzletággá fejlesztője, és az Intel egyik igazgatóhelyettese lett.

De az alapkérdés, a rácskárosodás megszüntetése évtizedes, a generációk szakmai életének hosszával mérhető kutatást indított, hogy a miniatürizálásból folyamatosan következő újabb igényeket ki lehessen elégíteni. Az első paradigmaváltás akkor lépett fel, amikor a diffúzióval biztosítható eloszlási bizonytalanságok kritikussá váltak. Az új paradigma az lett, hogy a gyártás közben fellépő diffúzió kerülendő, azaz az implantáció oda és annyi adalékot juttasson be, ahol és amennyire szükség van a funkcióhoz és a diffúziót okozó termikus terhelés, a „thermal budget” minél kisebb legyen.

Miért találkozott az RBS és az ionimplantáció?

A MeV-es energiájú hélium ionok behatolási mélysége (R_p) szilíciumba mintegy 6-8 μm ; az ionok R_p körül adják le energiájuk zömét, azaz ebben a mélységben roncsolják az anyagot, de ahol az „érdekes” rész van, ott szinte roncsolásmentesen átfutnak. A 7. ábrán a szilícium-technológia legfontosabb adalékanyaga, a bór mélységi eloszlását mutatjuk be [1], különböző gyorsítási energiákkal belöve. A 2 μm -ig ábrázolt abszcisszát kell a 6-8 μm körüli roncsolási csúcshoz hasonlítani. Már itt meg kell jegyezni, hogy az áram-



7. ábra. Implantált bóratomok mélységi eloszlása; valamennyi jóval sekélyebb, mint a He-ionok R_p behatolási mélysége, ahol azok roncsoló hatása érvényesül.

körök méretcsökkenése következtében az alkalmazott gyorsítási energiák mára az 1-2 keV környékére csökkentek! Ez erősítene az RBS alkalmazhatóságát, ha a tranzisztorok mérete nem csökkent volna mélyen a praktikus nyalábméret alá. Ezzel megsejthető, hogy a mikroelektronikai alkalmazásoknál – szemben a hetvenes, nyolcvanas évekkel – a kilencvenes évektől miert csökkent az RBS alkalmazhatósága.

A spektrum-olvasás ABC-je, az RBS+channelinggel mérhető mennyiségek⁷

A szórás folyamatot rögzítő spektrum egyetlen folyamatként hihetetlenül sok információt tartalmaz az anyagszerkezetről. Nem túlzás azt mondani, hogy az RBS, pláne az ionsugaras analitika rokon módszereivel kombinálva, biztosan az a fizikai módszer, amely a legtöbb információt rejti egyetlen regisztrátumban. A következő mennyiségek ugyanis mind kiolvashatók a detektorba ütköző, egy-egy ΔE energiaablakba eső visszaszórt ionok (a belőtt dózishoz viszonyított) számából:

- Energiavesztés – kinematikus, illetve fékeződések;
- Irányfüggés mérése;
- A csatornahatás kritikus szöge;
- Felületi csúcs – az első atomi rétegről való visszaszóródás;
- Direkt visszaszóródás az adszorbeált (más fajta) első atomsorról;
- Minimális hozam – a felületi csúcs mögötti jelmagasság a csatornahatás megnyilvánulása;
- Kiszóródás csatornából, „dechanneling”;
- Árnyékkúpok energiafüggésben;
- Kettős csatornázás (beeső és kilépő nyaláb is csatornázható);
- Anomális hozam, úgynevezett „flux peaking”, ha különleges rácshelyeken ülnek atomok, amelyekbe szűk szögtartományban az ionok bele tudnak ütközni.
- Végül, az RBS „autokalibrált”, azaz nem feltétlenül igényel kalibrációs standardot – szemben a leg-

több analitikai módszerrel – bár itt is lehet egyszerűbb egy standarddal való összehasonlítás.

Ezek a mennyiségek érzékenyek arra, hogy mi a „lövedék” és annak mekkora az energiája, ezért a mérés körülményei optimálissá tehető, amire természetesen törekedni kell.

- Megválasztandó a lövedékion fajtája. Főleg könnyű ionok jönnek számításba, de előnyös lehet a Heavy Ion Backscattering, HIBS, alkalmazása is;
- Ionenergia MeV körül optimális, de felületi, felület-közeli hatások mérésére a száz keV nagyságrendű energia előnyös: Medium Energy Ion Scattering, MEIS;
- Az ionenergia megválasztásánál kihasználhatók a Rutherford-hatáskeresztmetszetben egyes lövedék-céltárgyelem párok esetén bizonyos energiákon fellépő rezonanciák, amely energiákon a kérdéses elem különösen nagy érzékenységgel mutatható ki (például He-ionok hatáskeresztmetszete oxigénre 3 MeV táján, szénre 4 MeV táján mutat ilyen hatást);
- A szórás geometria, beesési, detektálási szög – a mélységfelbontás nő, ha a fékeződési energiavesztést meg növeljük, akár súroló irányú beesésig;
- Ion dózisz – ha számítani kell sugárzási károsodásra;
- A módszer egyik változata a „kilökéses” spektroszkópia, Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA, amikor a lövedéknél kisebb tömegű, az impulzusátadáskor az anyagot elhagyni képes sebességre felgyorsuló atomokat detektáljuk (például hidrogéntartalom, eloszlás mérése);
- A becsapódási nyalábméret mikro-, nanonyalábok méretéig csökkenthető;
- Kettős csatornázás megjavítja a rácshelyzet vizsgálatának pontosságát (befelé és kifelé is).

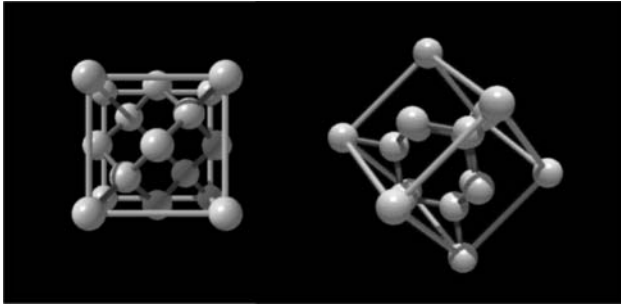
Az RBS különlegessége még az is, hogy léteznek olyan rokon módszerek, amelyek ugyanazt a gyorsítót, azonos szórókamrát igényelnek, amelybe több, megfelelő detektáló rendszer is beépíthető, sőt a detektálandó termékek akár levegőbe vagy héliumba is kihozhatók. Ezek a rokon módszerek a

- lövedékrészecskék által gerjesztett röntgen emisszió felhasználása, Particle Induced X-Ray Emission, PIXE,
- vagy a magreakciókból származó gamma-fotonok detektálása, Particle Induced Gamma Emission, PIGE,
- valamint a széles körben alkalmazott eljárás, amely a MeV-es részecskék által kiváltott magreakciók termékeit gyűjti a detektorba és azokból következtet vissza a tárgy összetételére, netán szerkezetére is, ez a Nuclear Reaction Analysis, NRA.

Az RBS-t is beleértve, amint említettük, ezen módszerek gyűjtőneve Ion Beam Analysis, IBA.

Egyéb segédeszközök alkalmazása is segítheti a konkrét feladat megoldását, például az kérdéses réteg feletti anyag előzetes eltávolítása valamilyen porlasztással, marással, hogy a fékeződés okozta kényszerű energiaelmosódást elkerüljük.

⁷ Lásd például [1] 93–196. o.



8. ábra. A Si (100) irányú vágása (balra), melyre jobb elektromos minőségű SiO₂ réteg implantálható, mint a korábban (111) irányban szeletelt anyagon (jobbira).

Az RBS és channeling együttes (RBS+C) mérése esetén talán nem túlzás azt mondani, hogy aligha van a fizikában még egy olyan eljárás, amelynél *egyetlen* mérésből ennyiféle adat olvasható ki – ha nem is csúcserzékenységgel:

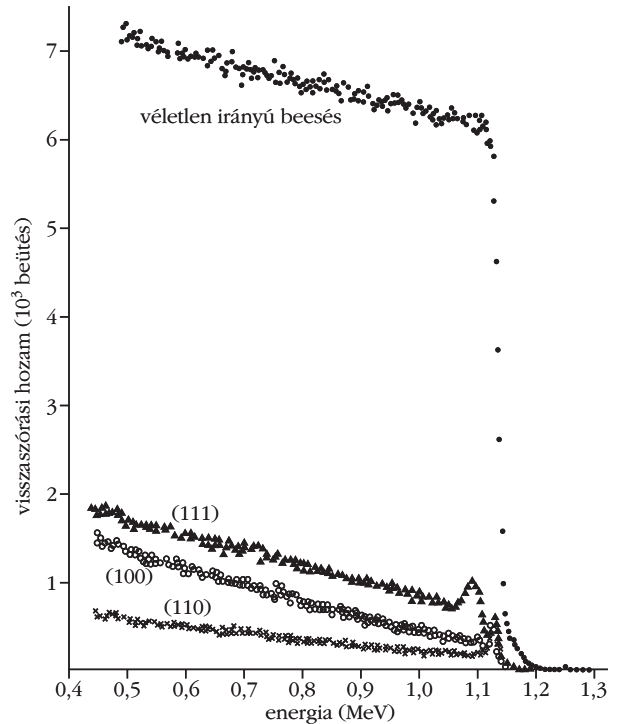
- kémiai összetétel, réteges szerkezeteknél is,
- információ a kristály minőségéről,
- szennyezések, adalékok rácsbeli elhelyezkedése, vándorlása,
- a felület minősége,
- felületi adszorpció, relaxáció kvantitatív meghatározása,
- bevonatok atomi szerkezete,
- rácsrezgések amplitúdója,

A kisebb méretű számítógépek kapacitásának növekedésével lehetővé vált szimulációs programokat írni, amelyek egzaktul kiszámolták és megjelenítették egy adott vizsgálati minta RBS, sőt csatornázott spektrumát, ez az eljárás használhatóságának óriási lökést adott. Az egyik elsőt a Mayer-csapat doktorandusza, *L. Doolittle* fejlesztette lépésről-lépésre, ez RUMP néven vált ismertté [4]. Egyidejűleg *Kótai Endre* (KFKI) is hozzákezdett egy szimulációs program kifejlesztéséhez ZX-Spectrum mikrogépen. Mái előtttem van Larry Doolittle arkifejezése, amikor a KFKI-ban megmutattuk neki a „konkurenciát”: őszintén elcsodálkozott, hogy alig tud kevesebbet, mint az övé. Kótai Endre ma ismert RBX programja [5] az egyik legfontosabb, kényelmes és praktikus. Hazai eredmény az azzal kompatibilis és együtt alkalmazandó program, a DEPTH-kód [6], amely pontossá tette a mélységi energiaelosódások számolását és együtt terjed az RBX-szel. Később munkatársaink kidolgoztak egy további programot, „kódot”, amely pórusos szerkezetek esetén is pontos eredményt ad [7].

Implantációs közösségünk RBS alkalmazásával elért alapvető eredményei

Eredményeket, amelyek jelentősége olyan lett, hogy nem szerénytelen az RBS mikroelektronikai, integrált áramkört „karrierjéről” beszélni...

A Caltech korábbi diákja, a Fairchild kutatólaborjában dolgozó *Val Rodriguez*, meglátogatta korábbi iskoláját 1969 októberében, éppen amikor az RBS ügyeiben előreléptünk. Val, zseniális ember lévén,



9. ábra. RBS- és csatornahatás-vizsgálat azonosan (200 keV energiájú, $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ -nyi ⁷⁵As⁺ ionnal) implantált és (1000 °C-on 30 percig N₂ atmoszférában) hőkezelt, különböző orientációval szeletelt Si egykristályokon. A legkevésbé „átlátszó”, azaz hibákkal terhelt az (111), az akkoriban széles körben használt alapanyag [8].

amikor megismerte a kísérleti lehetőségeinket, az RBS lehetőségeit, rögtön vagy hat-nyolc kísérletsorozatot említett, amelynek a Fairchild fejlesztők analitikai feladatok előtt álltak és metodikai gondjaik voltak. Szinte hetenként érkeztek a mintasorozatok, például az akkor újdonság MNOS (szilíciumnitrid réteggel működő) technológia fejlesztése, a Gunn-diódák kontaktusainak optimalizálása, a GaAs eszközök diffúziós gátjainak optimalizálása, a GaAs kémiai bomlása a technológia során stb. megoldására. Sorozatban készültek el azok a cikkek, amelyek demonstrálták az RBS hihetetlen sokoldalúságát és teljesítőképeségét a mikroelektronikai feladatok megoldásában – biztosítva ezzel a Caltech-csapat élen maradását.

Az amerikai Nemzeti Kutatási Alap (NSF) által létrehívott Caltech–KFKI csereprogram 1974-ben indult meg, egy kéthónapos utammal. Ez lett közvetlen szakmai életemnek – hatásában – a csúcspontja.

Az Intel eredménye ugyanis, hogy a MOS-tranzisztorban⁸ funkcionális elemként szereplő termikus SiO₂ réteg jobb elektromos minőségű az (100)-szilíciumon, mint a korábban általános (111) irányban szeletelt anyagon (8. ábra), ekkor kezdett fontossá válni.

A Mayer–Gyulai-csapat csatlakozó eredménye, hogy az implantációt követő visszanyerés is tökéletesebb az (100) irányban szeletelt kristályon. Nem vitatom, hogy az oxidminőség kérdése alapvetőbb, de a mi eredményünk – amelyet a Kellogg Laboratórium-

⁸ Metal-Oxide-Semiconductor tranzisztor mára vezető tranziszortípus.

ban egyik este *Helmut Müller* vendégkutató figyelmessége iniciált, aki észrevette a mintatartó dobozok feliratában a különbséget („Look, this is 111 and this one is 100!”) – és az ezt igazoló, saját mérésém alapján született eredmény (9. ábra) nem-jelentéktelen lépés volt az ionimplantáció „technológiává válásában”. Mindenesetre, a világ teljes szilícium-ipara ezeket az eseményeket követően állt át tömegében az (100) orientációjú kristály növesztésére.

Különösképpen igaz ez egy további eredmény fényében. Az első KFKI-s cserekutató *Csepregi László* lett. 1974-es hazajöveletemkor egyetértettünk Mayer professzorral, hogy a rövidesen kiérkező Laci itt és ezzel a témával folytatja. Így indulhatott el Laci a világhír felé.

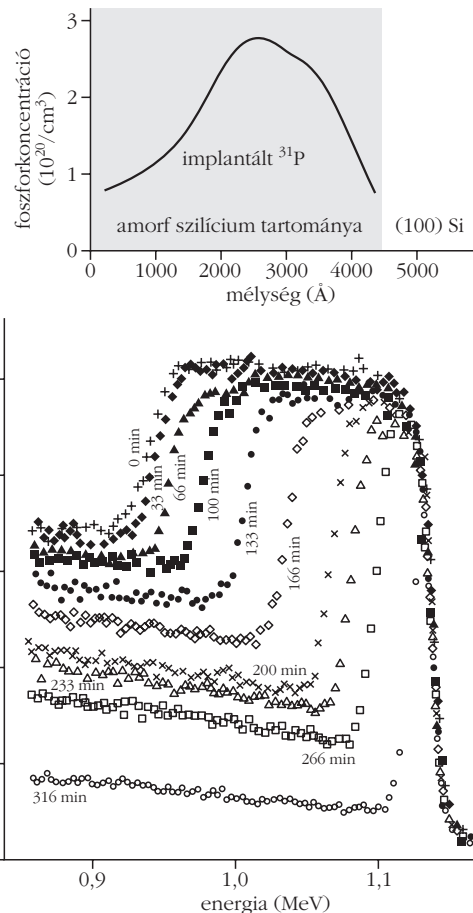
Mi volt ez a folytatás?

Az ionimplantáció inherens gondja volt, hogy a csatornahatás miatt az ionok (főleg a „könnyű” bór) mélyebre és statisztikáival kevésbé kiszámítható mélységekbe jutnak. A világ első gondolata az lett, hogy implantációkor a Si-lapkát kissé félre kell fordítani.⁹ A zavaró hatás ezzel ugyan csökken, de nem tűnik el. A visszánövés kísérletek azt is megmutatták, hogy a teljesen amorf Si könnyebben nő vissza, mint a „csupán” sok hibával terhelt. Az a gondolat kezdett érlelődni, hogy amorfá kell tenni a szilíciumot. *H. Ryssel* egy nagyon szellemes eljárást talált ki [9]. Az implantációkban a bórionokat leggyakrabban BF_3 gáz elektromos kisüléséből nyerik. Meglehető azonban, hogy a kilépő ionok jelentős része metastabil molekula-ion, sőt, a BF_2^+ formációból jóval több van a nyalámban, mint elemi B^+ -ból. Ryssel ötlete abban állt, hogy a becsapódáskor széteső molekula ionjai, eltérő tömegeik és a megfelelő R_p behatolási mélységek miatt, nagyjából azonos mélységben állnak meg. Azonban a fluor erőteljesebben roncsol, mint a bór, azaz a kristály hamar eléri az amorfizációt. Ekkor már az amorf anyagban áll meg, és a szokásos Gauss-eloszlást mutatja. Azokban az években a fluor jelenléte még nem látszott katasztrofálisnak.

A *Csepregi László* sikeres munkájával kifejlesztett és később nyerőnek bizonyult eljárásban, amelyet „pre-amorphization”-ként ismer a világ [10], az „ön-implantáció” volt az ötlet: bombázzuk amorfá a felszíni réteget az alapanyaggal azonos, azaz Si-ionokkal, majd ebbe az amorf rétegbe lőjük bele az adalékatomokat. Végül egy viszonylag alacsony hőmérsékletű hőkezeléssel, amikor is a nem-roncsolt alapkristály kristályosodási magként is szerepel, kristályosítsuk vissza az anyagot, benne az adalékkal, amely – az alacsony hőmérséklet miatt – alig diffundál, azaz ott marad, ahova belőttük (10. ábra).

Évtizedek óta ez a standard eljárás. Voltak gyárak, amelyek az egyszerűsége miatt a Ryssel-módszert alkalmazták, de két hátránya miatt ma egyre kevesebben

⁹ W. K. Chu 7°-ot javasolt, ez lett standard.



10. ábra. Si ionokkal amorfá bombázott Si kristályba lőtt foszfor eloszlása (felül), valamint a kristály visszánövése mindössze 475 °C-on (alul). A csatornázott RBS-spektrumok a kristály átlátszóságának, azaz tökéletességének visszaállítását mutatják [6].

teszik: 1) a belövés kezdeti szakaszában még kristályos a Si, amikor tehát még nem véd a csatornahatásból eredő profiltorzulás ellen, 2) de főleg, az áramköri elem méretcsökkenésével egyre nagyobb gondná vált a töltéshordozó csapdákat okozó fluor jelenléte.¹⁰

A visszánövés témája (amelyet Solid Phase Epitaxial Growth, SPEG néven rögzített a világ) évtizedekig uralta az integrált áramköri technológiák adalékolási kérdéseinek kutatását. Egy mai processzorban az Intel – ez szakmai elégtétel is a korábbiakban mondott anekdotához – huszonháromszor alkalmazza az implantációs adalékolást! A témáról, felkérésre, cikket írtunk, amelyben összefoglaltuk annak a versenynek az állomásait, amely nem elhanyagolható mértékben járult hozzá – és jelentős százalékban az RBS-t használva módszerül(!) – a mikroelektronika Moore-törvény szerinti fejlődéséhez. A cikk tiszteletadás is volt a tragikus sorsú, akkor már súlyosan beteg *Csepregi László* eredményes, a KFKI tekintélyét nagyban megnövelő munkásságának.

¹⁰ Mivel Ryssel professzor (első „nyugati” kutatóként) huzamosan vendégünk volt a KFKI-ban, már a hetvenes években tudtunk ötletéről. Ki is próbáltuk azt az ILU implanterrel, de a mi kísérleteink nem hozták a várható eredményt – feltehetőleg az implantáció áraműrűségére volt kritikus a fluor amorfizáló képessége. Így mi kitaláltunk a saját módszer, a preamorfizálás mellett.

Mit ismertek fel ezeken kívül az RBS-szel az IC-technológia számára?

A korábbiakban azokat az eredményeket ismertettem részletesebben, amelyekhez közünk volt. Igaz, az a kettő kiemelkedően fontossá vált a mikroelektronikában és az RBS teljes sikerét demonstrálta. De álljon itt egy lista, amely bizonyítja, hogy az eddigiekben megrajzolt kép még szerény is. Mert a következő, szintén fontos kérdések megoldásában is kardinális szerepe volt az RBS-nek:

- Ionimplantáció témában:
 - Behatolási mélység, eloszlás mérése – itt a kis érzékenység ugyan korlátot jelentett (a SIMS jobb, de nem önkalibrált),
 - Roncsolás, rácshiba eloszlás, *rácsbibák kvalitatív meghatározása*. Annak eldöntése, hogy fog-e kvantitatív képet látni a fáradtságos mintakészítést igénylő elektronmikroszkópia?
 - Visszakristályosodás, termikus (kemence, lézer, Rapid Thermal Processing).
 - *Diffúziós mechanizmus*, a rácspontokon „ugráló”, illetve rácsközi diffúzió megkülönböztetése.
 - A „defect engineering” megindítása.
 - Későbbi, de szép és hazai eredmény, amely a SiC félvezető kutatásában, a rezonanciák felhasználásával meg tudta különböztetni a Si, illetve C alrácshibaszervezetét.
- Vékonyréteg-leválasztás kémiaja:
 - A vékonyréteg reakcióknál keletkező fázisok, az első fázis kérdése.
 - *Szilicid-képződés* – a kontaktus kérdése (Mo_2Si , Ni_2Si , Co_2Si , ...).
 - Diffúziós gátak („barrier”) kérdéseinek megoldása (TiN , TaN , ...).
 - Diffúzió – *mozgó komponens* (oxid a Si-határon nő, a szilicidek változatosan), marker kísérletek ötlete.
- Az *ionsugaras keverés* „mixing”, mint új vékonyréteg-előállítás.
 - Vékonyréteg minősítés:
 - Implantáció és vékonyréteg-vizsgálat *RBS-kalibrált spektroszkópiai ellipszometriával*.
 - Egy kiút az igazi roncsolásmentesség felé is: spektroszkópiai ellipszometria hitelesítése RBS+C-vel (Lohner–Fried–Petrik-iskola).

Az RBS és a többiek

Természetesen a jubileumi és a személyes lelkesedés sem mondhatja velem, hogy a tegnapi-mai mikroelektronika *főleg* az RBS-nek köszönheti a sikereit. Az RBS a „nem mindent verő” érzékenysége miatt ugyanis sok esetben csak előmérés-ként alkalmas. Kombinálni kellett például a szerkezeti kérdéseket kvantitatív módon analizálni képes módszerekkel – elsősorban az elektronmikroszkópiával, a pásztázó (SEM) és a transzmissziós (TEM), de a profilokat érzékenyen kirajzoló szekundáris tömegspektrometriával (SIMS) is.

Emellett – mint a végső választ szolgáltatni képes eljárások – az eszközök elektromos tulajdonságainak részleteit vizsgáló módszerek (töltéshordozó élettartam, áram-feszültség, kapacitás-feszültség mérése stb.) a legfontosabbak.

Miért csökkent nemcsak az RBS-, hanem az ionsugaras analitika jelentősége a mikroelektronika későbbi, pláne a nanoelektronika szakaszában?

Elsősorban az eszközméretetek csökkenése, azaz a Moore-törvényként¹¹ ismert exponenciális fejlődés által támasztott igények miatt. Az implantáció során alkalmazott ionenergiák ma akár 1 keV alattiak, amelyhez ≈ 100 nm behatolás tartozik(!), a dózisek – néhány tíz-száz bóratom állítja be a kapuelektrod potenciálját. Emiatt a legtöbb gyorsító laboratóriumban már csak korlátozott relevanciát jelentő modellmintákkal lehet dolgozni. A terjedő módszer, a fókuszált mikronyaláb alkalmazása sem segít igazán, mert olyan helyi hőterhelést jelent, amely meghamisíthatja a mérés eredményét.

Van azért néhány sikeres ötlet *nanoelektronikai* alkalmazások terén:

- Háromdimenziós RBS-képet is lehet tomográftechnikával készíteni, ami kisebb sugarterheléssel is járhat (*M. Takai, Osaka*, és munkatársai, valamint *Pásztai Ferenc és Lohner Tivadar*);
- Speciális fókuszált ionnyaláb eszközt (Focused Ion Beam) fejlesztett ki ugyancsak a Takai-iskola – szintén több kutatónk bekapcsolódásával – 100 kV körüli ionenergiát használva, ami tehát közepes energiájú ionszórás, MEIS-ként terjed. Különleges detektorokat és elektronikát igényel, ha – mint a tervek szólnak – akár egyedi atomok jeleit akarják megtalálni...

Ez nem jelenti az RBS jelentőségének egyéb területeken való csökkenését. Az a lehetőség, hogy a metodika-kombinációk, azaz az RBS, ERDA, PIXE, NRA stb. egyetlen szórókamrában is megvalósíthatók, sok területen jelent nagy előnyt. Egyre több laboratóriumban valósul meg mikronyaláb elrendezés. Hazánkban is kettő működik (ATOMKI, RMKI). Ezek nélkülözhetetlené tették magukat például az archeológia, a muzeológia (levegőn végzett mérések), a környezetvédelmi analitika terén. Nagyobb ionenergiák új területeket nyitnak meg, főleg az NRA-alkalmazásokban, illetve a közepes energiák hozzáférhetővé tesznek szilárdtestfizikai-kémiai problémákat. Említettem, hogy vegyület-félvezetők, például SiC esetén a rezonanciák kihasználásával olyan adatokhoz lehet jutni, amelyre más módszerek esélyt sem adnak (SiC alrácshibáinak hibái [11]).

¹¹ Gordon Moore törvény – <http://public.itrs.net/>, International Technology Roadmap for Semiconductors, négyévenként korszerűsítik: mi kell ahhoz, hogy duplázódhasson az elemszám?

Enumeráció

Az írásból talán kiviláglott, hogy ez a téma beverekedett magát a KFKI sikertörténetei közé, amelyet Kótai Endre egyidejű előadása mutatott be és a cikke [12] foglal össze. Befejezésül álljon itt egy névsor, az akkori implantációs célfeladat RBS-sel is kapcsolatos csapatának neveivel, jobb híján ABC rendben – többüknek megköszönve, hogy átnézték írásom kéziratát és megjegyzéseikkel pontosították az emlékeimet:

Barna P., Battistig G., †Csepregi L., Demeter I., Fried M., Gyimesi J., Hegedűs A., Keresztes P., Keszthelyi L., N. Q. Khánh, Kótai E., Lohner T., †Manuaba A., Mezey G., Mohácsy T., Nagy T., †Pászti F., Petrik P., Polgár O., Révész P., Schiller Róbertné, Szilágyi E., Szőkefalvi-Nagy Z., Tunyogi Á., Varga L., Zolnai Zs., valamint sok doktorandusz, itthon, illetve nekem a Caltechen, Cornellén, Erlangeni FA-Egyetemen is...

A segéderők közül *Majthényi Lászlóné* volt mindig jelen az RBS-csapat segítségére, de *Erős Magda* és *Payer Károlyné* a technológián nélkülözhetetlen tapasztalattal segítettek. Meg kell említeni a KFKI, ma RMKI-s gyorsítót építő, üzemeltető csapat munkatársait, legalábbis a főbb és kiemelkedőt nyújtó tagjait: *Bürger G., Királybidi L., Klopfer E., Kostka P., Pásztor E., Riedl P., Roosz J., Seres Cs.*, akik a legjobb Simonyi-hagyomány szerint építették, tartották üzemben a gyorsítókat, implantereket. Köszönet érte.

Végül, tágítva a kört, Jim W. Mayer professzor barátsága tette lehetővé, hogy a mikroelektronika-közeli ionsugaras témákban évtizedeken át ott lehettünk az élbolyban, majd a kapcsolatok Heiner Ryssellel (FhG

Inst. Bauelementetechnologie, Erlangen) és a nyolcvanas évek közepétől *Georges Amsellel* (GPS d’C.N.R.S., Paris) erősítették a csapat nemzetközi elismertségét.

És mindezért köszönet a hálás utókortól, Sir Rutherford!

Irodalom

1. Gyulai J., Mezey G.: Felületek és vékonyrétegek vizsgálata MeV energiájú ionokkal. *A szilárdtestkutatás újabb eredményei*. 14. kötet, Szerk. Siklós T., Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985.
2. J. A. Davies, D. P. Jackson, J. B. Mitchell, P. R. Norton, R. L. Tapping: Measurement of surface relaxation by MeV ion backscattering and channeling. *Phys. Lett.* 54A (1975) 239.
3. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodriguez: Analysis of silicon nitride layers on silicon by backscattering and channeling effect measurements. *Appl. Phys. Lett.* 16 (1970) 232.
4. L. Doolittle: Algorithms for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra. *Nucl. Instrum. Methods B9* (1985) 344.
5. E. Kótai: Computer methods for analysis and simulation of RBS and ERDA spectra. *Nucl. Instr. Meth. B85* (1994) 588–596.
6. E. Szilágyi, F. Pászti: Theoretical calculation of the depth resolution of IBA methods. *Nucl. Instrum. Methods. B85* (1994) 616.
7. Z. Hajnal, E. Szilágyi, F. Pászti, G. Battistig: Channeling-like effects due to the macroscopic structure of porous silicon. *Nucl. Instr. and Meth. B118* (1996) 617.
8. 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)
9. H. Ryssel: DE 2835121 Patent, 1980.
10. L. Csepregi, E. F. Kennedy, T. J. Gallagher, J. W. Mayer, T. W. Sigmon: Reordering of amorphous layers of Si implanted with ³¹P, ⁷⁵As, and ¹¹B ions. *J. Appl. Phys.* 48 (1977) 4234.
11. E. Szilágyi, N. Q. Khánh, Z. E. Horváth, T. Lohner, G. Battistig, Z. Zolnai, E. Kótai, J. Gyulai: Ion bombardment induced damage on silicon carbide studied by ion beam analytical methods. *Mater. Sci. Forum* 353–356 (2001) 271–274.
12. Kótai E., Szilágyi E.: Magyar innovációk a Rutherford-visszaszórási technikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 301.