

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] foglalja 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. Khánb, Kótai E., Lohner T., †Manuaba A., Mezey G., Mohácsy T., Nagy T., †Pásztó 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, Cornell, Erlangen FA-Egyetemen is...

A segédek között *Majthényi Lászlóné* volt mindig jelen az RBS-csapat segítésére, de *Erős Magda* és *Paeyer Károlyné* a technológiánál 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.*, *Pásztó E.*, *Riedl P.*, *Roósz 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. Pásztó: Theoretical calculation of the depth resolution of IBA methods. *Nucl. Instrum. Methods.* B85 (1994) 616.
7. Z. Hajnal, E. Szilágyi, F. Pásztó, 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. Khánb, 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.

MAGYAR INNOVÁCIÓK A RUTHERFORD-VISSZASZÓRÁSI TECHNIKÁBAN

Kótai Endre, Szilágyi Edit

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet

Magyar kutatók igen korán, már a 60-as évek végén bekapcsolódtak a Rutherford-visszaszórási spektroszkópia (RBS)¹ alkalmazásába és fejlesztésébe. A fejlesztések legfőbb célja az volt, hogy minél pontosabb képet kapjunk a vizsgálandó minták összetételéről, eloszlásáról, továbbá az egykristályos anyagokban az elemek elhelyezkedéséről, rácsbéli helyzetükről és a kristályhibák eloszlásáról. Bemutatjuk, hogyan lehetett – ma már sok esetben triviálisnak tűnő ötletekkel – javítani az analízis érzékenységét, tömeg- és mélységfelbontását és ezen ötletek alkalmazásával kiváltani a méregdrága,

nagyfelbontású berendezéseket, detektorokat, amelyek beszerzésére abban az időben gondolni sem mertünk.

Legfontosabb hozzájárulásaink a módszer fejlesztéséhez a következők voltak időrendben:

1. Kémiai elemösszetétel meghatározása a mélység függvényében (1970) [1].

2. Oxigén-detektálás érzékenységének közel egy nagyságrenddel való növelése ¹⁶O(α,α)¹⁶O reakció alkalmazásával (1972, 1975) [2, 3].

3. Mélységfelbontás javítása sűrűlódó beesés alkalmazásával. Csatornahatással kombinált RBS mélységfelbontásának javítása sűrűlódó detektálás alkalmazásával (1978) [4].

4. Könnyű elemek analízise céljából az RBS kombinációja magreakciókon alapuló (NRA) módszerekkel (N és O, 1976).

Elhangzott az MTA Rutherford-emléknapján 2011. május 5-én.

¹ A visszaszórási módszerről részletesebben olvashatnak az előző cikkben (Gyulai József: *A Rutherford-visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában*).

5. Rétegtárolással kombinált módszer kifejlesztése.

6. Eljárás kidolgozása kváziorientált polikristályos minták vizsgálatára (1975).

7. Az analízáló ionoknál könnyebb elemek kimutatása (ERDA) (1981) [5]. Hidrogén és deutérium hatáskeresztmetszetének kimérése és a hatáskeresztmetszet energia- és szögfüggésére közelítő analitikus kifejezés meghatározása (1986, 1989) [6].

8. Transzmissziós Faraday-kalitka kifejlesztése (1990) [7].

9. Eljárás kidolgozása pórusos anyagok pórusszerkezetének meghatározására (1996) [8].

10. A mélységfelbontásra hatással levő fizikai folyamatok (többszörös szórás, energia elmosódás, Doppler-effektus stb.) pontos meghatározása és analitikai formulák kidolgozása (1995–2000) [9, 10].

11. A szén-detektálás érzékenységének javítása $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha)^{12}\text{C}$ reakció alkalmazásával (2001) [11].

Kezdetek

Az 1960-as évek végén megkezdődött a Rutherford-visszaszórás analitikai módszer széleskörű alkalmazása, elsősorban a félvezető-kutatásokban. Ebben az időben alakult meg az RBS-kutatások egyik iskolateremtő központja a Kaliforniai Egyetemen (Caltech). Ide került ki ösztöndíjasként *Gyulai József*, akinek egyik első feladata a szilíciumnitrid és szilíciumoxid minták analízise volt. Ekkor szembesült azzal a ténnyel, hogy habár a módszer régóta ismert volt, de nem készült olyan kiértékelő eljárás, amely segítségével a rétegek összetételét és annak mélységeloszlását ki lehetett volna számolni. Ő alkotta meg az első képletet és alkalmazta szilíciumnitrid mintákra (1. ábra) [1].

Közben idehaza 1971-ben befejeződött a KFKI 5 MeV-es Van de Graaff gyorsítójának első rekonstrukciója. Az újraindult gyorsítón *Keszthelyi Lajos* javaslatára megindultak a visszaszórás mérések. Mindjárt az első évben igen jelentős eredményt értek el. Sikertült az oxigén-kimutatás érzékenységét egy nagyságrenddel javítani.

Érzékenység növelése rezonanciaszórással

Az RBS-módszer egyik kezdeti problémája volt, hogy a könnyű elemek kimutathatósága nehézségekbe ütközött, ha a minta nehéz elemeket is tartalmazott tömbi eloszlásban. A rugalmasan szórt ion E energiája arányos az ion szórás előtti E_0 energiájával. Az arányosságot jellemző k faktort laboratóriumi rendszerben a következő képlet adja meg:

$$k = \frac{E}{E_0} = \left(\frac{m \cos \Theta \pm \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \Theta}}{M + m} \right)^2,$$

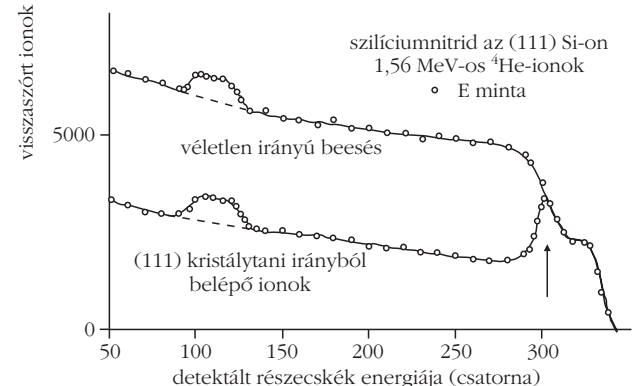
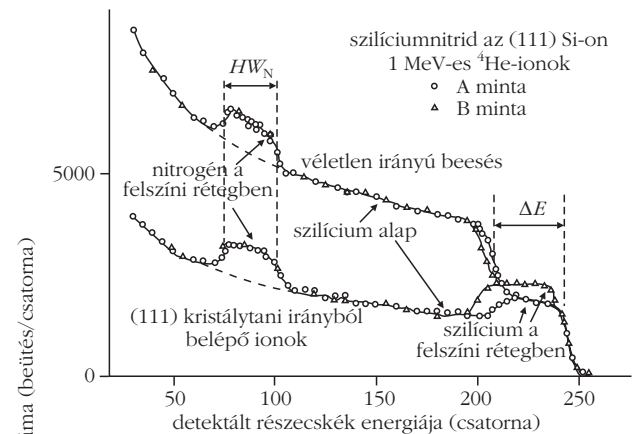
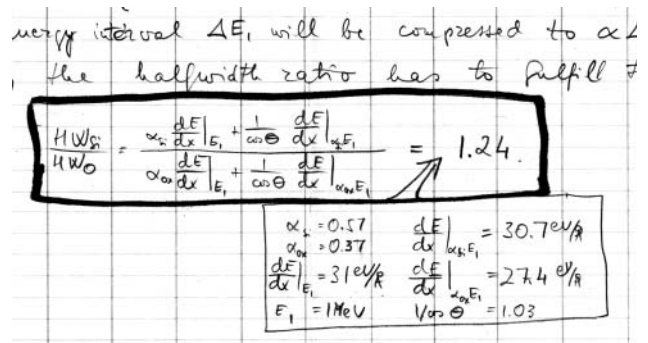
ahol m az ion, M a szóró atom tömege, Θ a szórási szög.

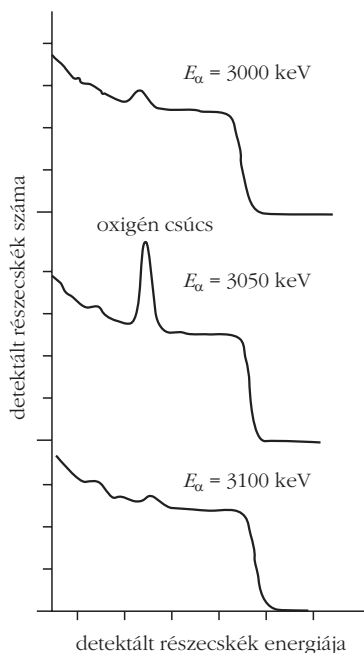
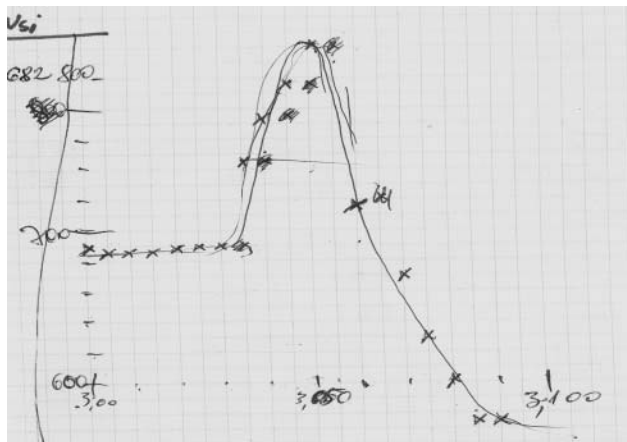
A rugalmasan szórt ion energiája annál nagyobb, minél nehezebb atomról szóródik. A nehezebb elemekről szóródó ionok így folytonos háttérrel adnak a könnyebb elemekről szóródott ionok esetében. A jel/háttér viszonyt tovább rontja, hogy a szóródás valószínűsége – amit a szórási hatáskeresztmetszet ír le – arányos az atomszám négyzetével. A Rutherford-hatáskeresztmetszet laboratóriumi rendszerben a következő:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2 E_0 \sin^2 \Theta} \right)^2 \frac{\left[\cos \Theta + \sqrt{1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta \right)^2} \right]^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta \right)^2}},$$

ahol Z_1 az ion, Z_2 a szóró atom rendszáma.

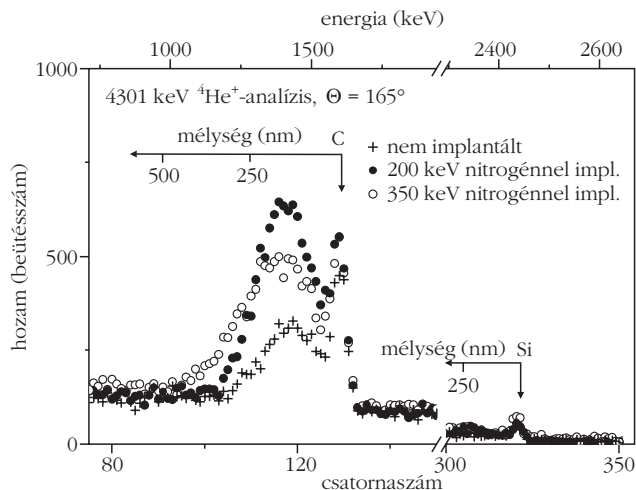
1. ábra. Másolat az eredeti jegyzőkönyvből és az első alkalmazás.





2. ábra. Az oxigén-rezonancia első alkalmazása (az eredeti jegyzőkönyvből kimásolva): visszashórési spektrum különböző ionenergiák esetében. Megfigyelhető, hogy 3050 keV-es energián az oxigén-csúcs jelentősen megnőtt.

Szemléletes példa látható az 1. ábrán, ahol a nitrogén-csúcs a szilíciumról szórt ionok folytonos hátterén ül. A probléma megoldásában segítséget jelentett, hogy a visszashórásos technikával foglalkozó kutatóink korábban magfizikával foglalkoztak, ellentétben a világ többi helyével, ahol szilárdtest-fizikusok indították el az RBS-laboratóriumokat. A magfizikusok jól tudták, hogy az ötvenes-hatvanas években a magszerkezet-kutatások során sok elem szórásis hatáskeresztmetszetét megmérték abban az energiatarományban is, ahol az RBS-méréseket végezzük. Egyes könnyű elemek esetén rugalmas rezonanciaszórásokat találtak, ahol a szórás kinematikája nem változik, de a hatáskeresztmetszet egy szűk energiatarományon belül a Rutherford-érték többszöröse lehet. Az oxigén esetében a $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$ szórásnak 3045 keV-en van egy ilyen rezonanciája, ahol a hatáskeresztmetszet a Rutherford-érték 17-szerese, és a rezonancia félértékszélessége 13 keV [12]. Ezért ezen



3. ábra. Szén rács sugárzáskárosodásának kimutatása szilícium-karbidban csatornahatással kombinált rezonanciaszórással. A kereszt a nem implantált, a fekete kör a 200 keV, üres kör a 350 keV energiájú nitrogénnel implantált minta spektrumát jelöli.

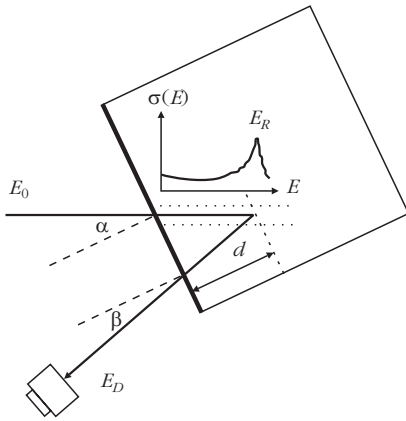
az energián mérve az oxigén-csúcs jól kiemelkedik a szilícium-háttérből (2. ábra).

Kutatóink nem csak kimutatták a rezonanciaszórás alkalmazhatóságát [2], hanem kidolgozták az ilyen spektrumok kiértékelésének szabályait is [3]. Ez az eredmény ma is minden RBS-sel foglalkozó tankönyvben szerepel.

Hasonló problémába ütköztünk a kilencvenes évek elején a szilíciumkarbid vizsgálatokor. A SiC nagy tiltott sávzélessége miatt igen alkalmas optoeletronikai és nagyáramú félvezető eszközök készítésére. A gyártás egyik nagy problémája, hogy nehéz adalékanyagokat bevinni. Szinte egyedüli járható út az ionimplantáció. Ezért volt fontos meghatározni az implantáció okozta rácskárosodást és megszüntetésének módját. Kiváló eszköz erre a csatornahatással kombinált RBS, azonban a szilícium jele elnyomja a szénét. A korábbi tapasztalatokból okulva kerestünk egy olyan rezonanciaszórás szén esetére, amelyet felhasználhatnánk az analízishez. 4260 keV-en találtuk meg a számunkra legalkalmasabb $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ rezonanciát, amely hatáskeresztmetszete a rezonancia energián százszorosa a Rutherford-értéknek [13]. Felhasználásával kimutathattuk a sugárkárosodás mértékét mind a szilícium, mind a szén rácsban (3. ábra) [11].

Rezonanciaszórás speciális alkalmazása

Az RBS-mérések kiértékelésének egyik sarkalatos pontja, hogy ismerni kell az ion és a szórt részecske fékeződését (energiavesztését) a vizsgálandó mintában. Erre pontos elméleti számolás nem létezik, a mért fékeződési adatokra illesztett fél-empirikus képletekkel dolgozunk. A csatornázott ionokról csak annyit tudunk, hogy fékeződésük kisebb, mint az amorf anyagban mért érték. Néhány levékonyított, illetve speciálisan preparált egykristály-mintán történtek már mérések, de ezek nem szolgáltattak elég információt a kristályhibákat tartalmazó mintákban mérhető fékező-



4. ábra. A csatornázott ionok fékeződésének meghatározására szolgáló kísérlet elrendezése. E_0 a belépő ion energiája, α a belépési szög, d a szórás távolsága a felülettől, E_D a detektált energia, β a kilépési szög.

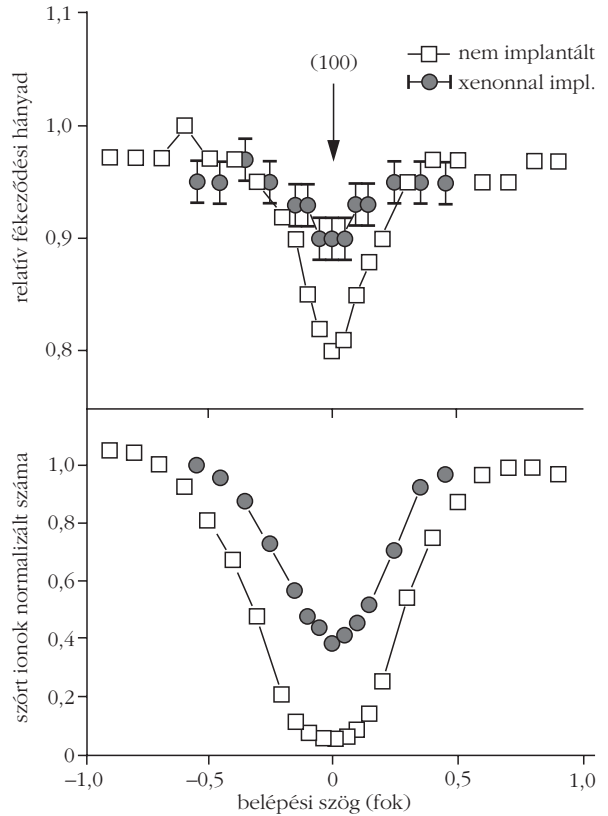
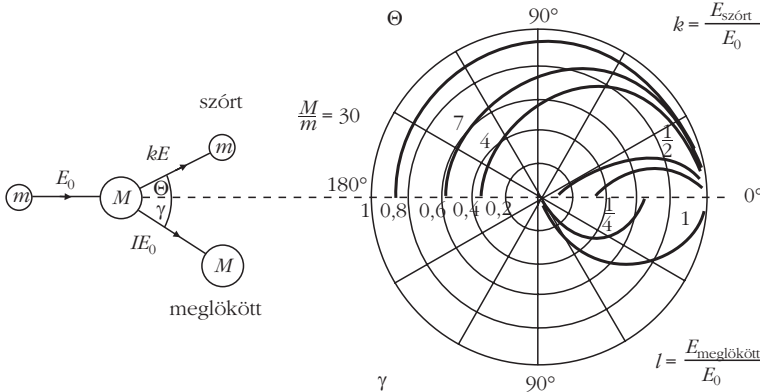
désekről. A nagyon keskeny (néhány keV-es) rezonanciákat használtuk fel a csatornázott ionok fékeződésének meghatározására. Az egykristály-mintát úgy orientáltuk, hogy az ionok befelé csatornában haladjanak, majd a szórt ionok kifelé csatornán kívül (4. ábra). A mért energiaspektrumokból meg tudtuk határozni a rezonánsan szóródott ion energiáját, majd a rezonanciaenergia ismeretében kiszámolhattuk, milyen mélyen történt a szórás. Ezután már egyszerűen megadható a befelé csatornában haladó ion átlagos fékeződése. Kimutattuk a fékeződés változását egykristályban, illetve kristályhibákat tartalmazó kristályok esetében (5. ábra) [14].

Könnyű elemek kimutatása

Az ionok csak olyan atomokról képesek visszaszóródni, amelyek tömege nagyobb, mint a bombázó ion tömege. A vele egyenlő tömegű, vagy könnyebb atomokról csak előre tudnak szóródni. A kinematika ismeretében megadható az a határszög, amelynél nagyobb szögben nem képes az ion szóródni:

$$\Theta_{\min} = \arcsin\left(\frac{M}{m}\right).$$

6. ábra. A szóródott ion és a meglökött atom kinematikai faktora a szög és a tömegarány (M/m) függvényében.



5. ábra. Felső ábrán a csatornázott ionok relatív fékeződése tökéletes (üres kocka) és implantált szilíciumkristályban (szürke kör) a csatornairányhoz képest mért belépési szög függvényében. Az alsó ábrán a szórt ionok száma látszik.

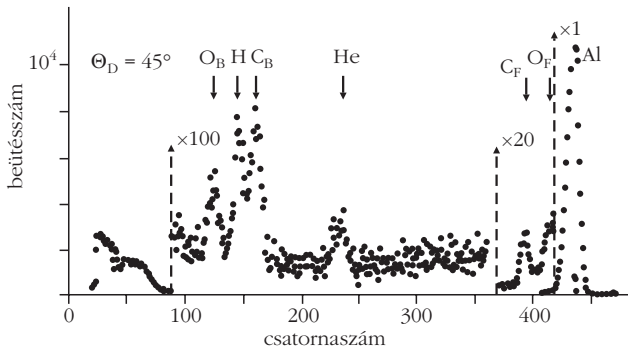
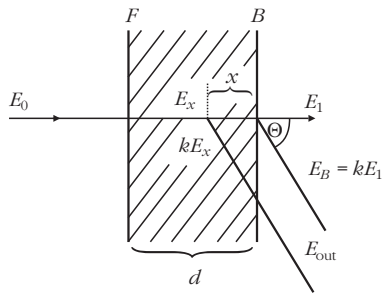
Kis szögben azonban nem csak az előreszórt ion mozog, hanem az általa meglökött atom is. Ennek energiája szintén arányos az ion szórás előtti energiájával, amely arányossági (kinematikai) faktort a következő képlet írja le (laboratóriumi rendszerben):

$$l = \frac{4 m M}{(m + M)^2} \cos^2 \gamma,$$

ahol γ a meglökött atom mozgásának szöge az ion útjához képest. A két kinematikai faktort a szög függvényében a 6. ábra mutatja.

Az első kísérleteket vékony alumíniumfólián végeztük, amelybe He-ionokat implantáltunk. Két detektort használtunk, az egyikkel a 45 fokban az előreszórt ionokat és kilökött atomokat, a másikkal 165 fokban a visszaszórt ionokat detektáltuk [5]. A 45 fokban elhelyezett detektor által mért energia spektrumot a 7. ábra mutatja.

A bejelölt csúcsok a következők: a kilökött oxigén (O_B), szén (C_B) és hidrogén (H) atomok, illetve az oxigénről (O_F) és szénről (C_F), valamint az alumíniumfóliáról szóródott ionok (Al). A spektrum közepén a kilökött, illetve szóródott He-ionok láthatók (He). Az utóbbi esetben, mivel He-ionokat használtunk és 45 fokban mér-



7. ábra. Héliumot tartalmazó alumíniumfólián mért előreszórt spektrum és a mérési elrendezés. A mérést 4000 keV-es He-nyalábbal végeztük. E_0 a belépő ion energiája, E_1 a kilépő ion, E_{out} a detektált részecske energiája, x a szórás helyének távolsága a fólia hátsó falától, d a fólia vastagsága, k a kinematikai faktor, Θ a detektálás szöge.

tünk, a szóródott ionok és meglökött atomok energiája azonos.

Látható, hogy sikerült hidrogént és héliumot is kimutatni. Az előreszórás hátránya, hogy csak megfelelően vékony fólia esetében lehet alkalmazni. Ez a hátrány kiküszöbölhető, ha nem transzmissziós, hanem érintőleges mérési elrendezés használnánk. Ebben az esetben azonban a szórt ionok igen nagy háttérrel adnának a kilökött ionok számára. Ha azonban valamilyen módszerrel el lehetne különíteni a szórt és meglökött részecskéket, akkor a könnyű elemek háttérmentesen is detektálhatók lennének. Ennek egyik módszere, ha tömeg szerint tudnánk szeparálni. Ez történhet mágneses vagy repülési idő spektrométerrel. Ezek azonban drága berendezések és nehezen illeszthetők a meglévő kamrához.

Tudjuk azonban, hogy a könnyebb elemek fékeződése a különféle anyagokban általában kisebb, mint a nehezebbeké. Ha egy vékony fóliát helyeznénk a detektor elé, ami elnyelné a szóródott héliumot és nehezebb részecskéket, de a kilökött hidrogént átengedné, akkor egy könnyen megvalósítható, olcsó módszert kapnánk. Laboratóriumunkban éppen azt számoltuk ki, hogy milyen anyagú és vastagságú fóliát kellene használni, amikor megjelent a fóliás módszer leíró első publikáció. A ma használt elrendezést a 8. ábra mutatja.

A módszert ma ERDA-nak (Elastic Recoiled Detection Analysis) hívják.

Habár ebben az esetben lemaradtunk az elsőbbségről, nem adtuk fel. Kimértük a mérések kiértékeléséhez szükséges hatáskeresztmetszeteket az általunk használt energia- és szögterületben [6]. A kiértékelés

és a spektrumszimulációk segítségével egy közelítő képletet dolgoztunk ki:

$$\frac{d\sigma}{d\Theta} = 8,91 E^2 - 0,119 \Theta^2 - 455,7 E + 10,2 \Theta - 1,38 \Theta E + 693,$$

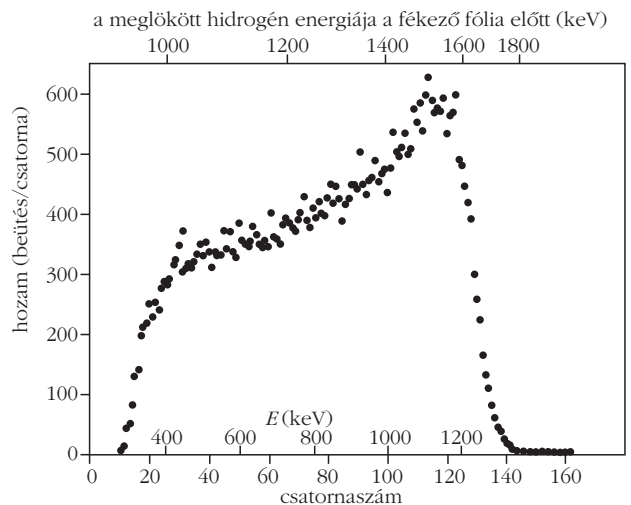
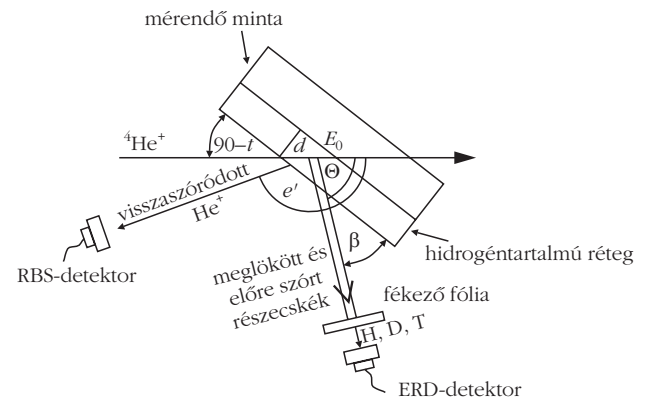
ahol E az ion energiája (MeV), Θ a szórás szög (fok) és a számított hatáskeresztmetszet mértékegysége $10^{-31} \text{ m}^2/\text{sr}$. A képlet 1 és 3,5 MeV energiatarományban érvényes.

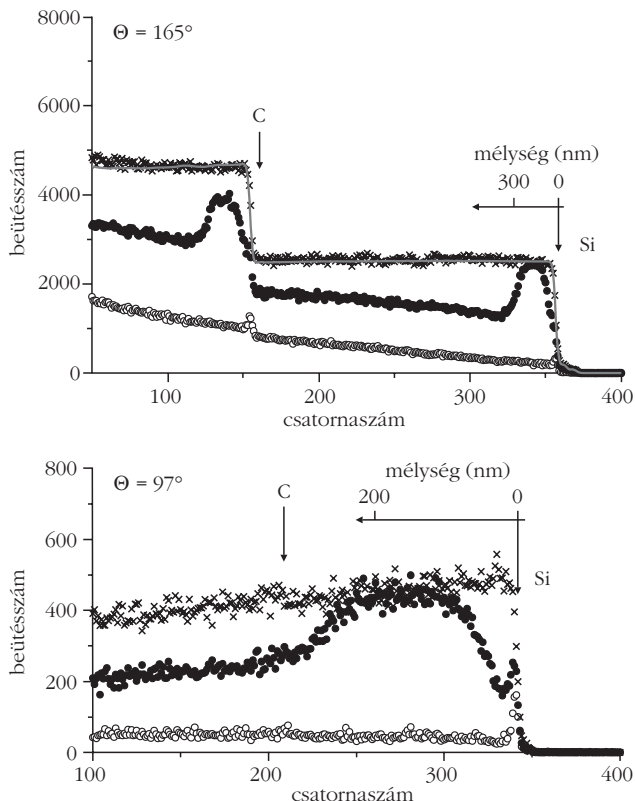
Mélységfelbontó-képesség növelése

Mélységnek az ionnyaláb-analitikában a felülettől mért távolságot nevezzük. Mélységfelbontó-képességen azt a minimális mélységkülönbséget értjük, amely esetben az ott elhelyezkedő atomokról szóródott ionokat meg tudjuk különböztetni, azaz meg tudjuk mondani, hogy az atomok különböző mélységben vannak. A standard RBS-mérések esetében (1–2 MeV He ionok, 165° detektálási szög) ez az érték 20–50 nm.

Mitől függ a mélységfelbontó-képesség? RBS esetében a szóródott ionok energiáját mérjük, ezért a különböző mélységben levő atomokról szórt ionok mér-

8. ábra. Ma használatos ERDA-elrendezés és egy mért hidrogén-spektrum.





9. ábra. Szilíciumkarbid csatornázott spektruma 165 és 97 fokos detektálási szög esetében. A nyitott kör a nem implantált, a fekete kör a csatornázott, a kereszt a nem csatornázott ionok spektrumát jelöli. A folytonos szürke vonal a szimulált spektrumot mutatja.

hető energiakülönbségétől függ. Triviális, hogy az egyik meghatározó tényező az alkalmazott detektor energiafelbontó-képessége. Az általánosan használt felületi záróréteges detektorok esetében ez 12–15 keV. Javítani lehet, ha más elven működő detektorokat használunk, mint az elektrosztatikus, mágneses vagy repülési idő spektrométereket. Habár ezek felbontóképessége 2–5 keV, azonban drága és nagyméretű berendezések, hatásfokuk pedig kicsiny (A felületi záróréteges detektorok hatásfoka 100%).

A másik alaptényező, ami a mélységfelbontó-képességet meghatározza, az ionok energia-vesztése, azaz a fékeződése. Két különböző mélységben levő atom által szórt ionok energiakülönbsége annál nagyobb, minél több energiát veszít az ion a közöttük levő útszakaszon (befelé és kifelé is). A fékezőképesség az ionok és az anyag kölcsönhatásától függ, azaz az alkalmazott ion fajtájától, energiájától és a minta összetételétől. Mivel éppen ez utóbbit akarjuk meghatározni, ezért csak az első kettő tényezőt változtathatjuk. Könnyű ionok esetében tudjuk, hogy kisebb energiákon (< 1 MeV) a fékező-

dés nagyobb. Ezzel a módszerrel ugyan növelhetjük az energiakülönbséget, azonban a konstans kinematikai faktor miatt a tömegfelbontó-képesség romlik. Másik lehetőség, hogy nehezebb iont használunk, amelynek fékeződése az adott energiatarományban nagyobb. Csoportunk mutatta ki, hogy nitrogén ionok alkalmazásával ugyan javítható a mélységfelbontó-képesség, azonban a nehezebb ionok jobban roncsolják a mintát, sőt a detektort is [15]. Ezért ez az út felületi záróréteges detektorokkal nem járható.

Mit lehet tenni, ha nincs pénzünk jobb detektor vásárlására? Hogyan növeljük a különböző mélységben levő atomokról szórt ionok közötti energiakülönbséget, ha a minta és az ion is adott? Már az RBS alkalmazásának első évtizedében rájöttek, hogy úgy is lehet az energiakülönbséget növelni, ha az úthosszat növeljük. Ezt úgy érjük el, hogy a mintát megdöntjük, az ion nem merőlegesen esik be. Ezzel a módszerrel 2–3 szoros mélységfelbontó-képesség javulást lehet elérni. A módszer hátránya, hogy csatornahatás esetén nem alkalmazható, hiszen a beesés szögét a csatorna iránya szabja meg. Csoportunk jött rá, hogy nem kell a mintát megdönteni, elég, ha a detektálási szöget úgy választjuk meg, hogy a detektált ionok közel sűrűlő irányban lépjenek ki a mintából [4]. Az eredményt a 9. ábra mutatja.

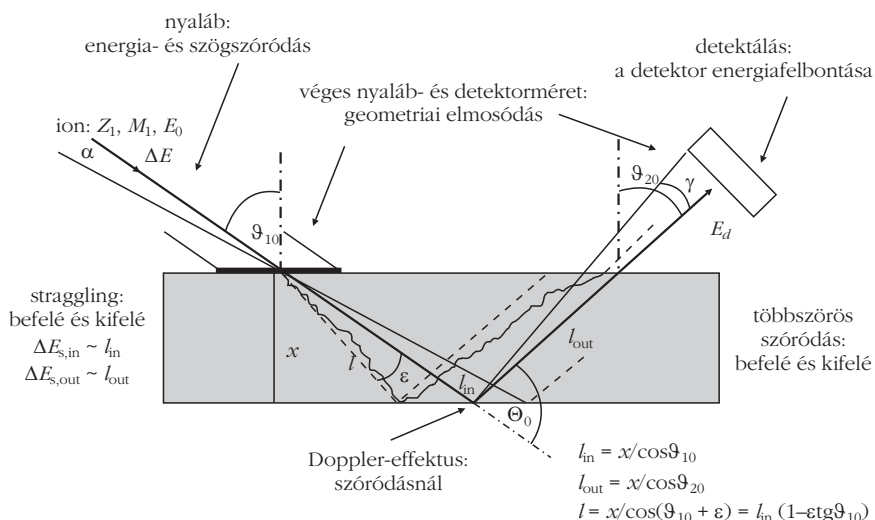
Ezzel a módszerrel 2 MeV-es He-ionok alkalmazása esetében elérhető az 5 nm-es felbontóképesség. A különféle csoportok között zajló versenyt mutatja, hogy ez az eredményünk egy időben jelent meg egy ausztrál csoport hasonló eredményével.

Eddig két tényezőről esik szó, ami meghatározza a mélységfelbontó-képességet. Valójában ezt több más effektus is befolyásolja, amelyek adott esetben drasztikusabb hozzájárulást is adnak. Csoportunk tagjai a Párizsi Egyetem professzorával, *Amsel Györggyel* együttműködve elhatározták, hogy utánajárnak az összes effektusnak és megpróbálnak elméleti leírást adni ezekről.

A számba vehető effektusokat a 10. ábra mutatja.

1. *A nyaláb energia- és szögszórása.* A belépő ionnyaláb nem teljesen monoenergiás, az alkalmazott gyor-

10. ábra. A mélységfelbontó-képességet befolyásoló tényezők.



sítótól függően az energiaszórása 0,5–2 keV lehet. A nyaláb nem is teljesen párhuzamos, hanem az alkalmazott nyalábkollimáló rendszerek miatt 0,1–1 fokos eltérés is lehet. Mindez befolyásolja az adott mélységig megtett utat és a szórás előtti ionenergiát.

2. *A detektor energiafelbontása.* Ezt már részletesen ismertettem.

3. *Véges nyaláb- és detektorméret.* A nem pontszerű méretek befolyásolják a detektálás szögét és az ion által megtett utat is. Geometriai elmosódásnak is hívják.

4. *Straggling.* Erre nincs bevált magyar név, talán energiaelmosódásnak lehetne fordítani. Az effektus lényege, hogy az ion-anyag kölcsönhatás nem folytonos jelenség. A fékeződés az ionok atomokkal és elektronokkal való kölcsönhatásaként írható le, amely statisztikai folyamat. Ez azt jelenti, hogy két ion ugyanolyan hosszú úton nem teljesen egyenlő mennyiségű energiát veszít.

4. *Többszörös szórás.* Az ionok az anyagban haladva több kisszögű szórást szenvednek el. Ez azt jelenti, hogy a megtett út nagyobb, mint a két pont közötti egyenes szakasz hossza.

6. *Doppler-effektus.* A szóró centrumok – atomok – nem fixen rögzített pontban állnak. Az atomok hőmozgást végeznek, azaz az ion energiája a szóródás előtt az atomhoz rögzített koordináta-rendszerben változhat.

Kollégáinknak sikerült ezeket az effektusokat elméletileg leírni és kidolgozták, hogyan lehet ezen effektusok járulékát összegezni [9]. Az eredmények alapján készült el a DEPTH program, amely segítségével kiszámolhatóvá vált, hogy adott mérési elrendezés esetén mennyi a mérhető mélységfelbontás és hogyan függ a mélységtől. Ez a program nagyban segíti a kutatókat, hogy a mérésüket minél pontosabban megtervezhessék.

Nanotechnológiai alkalmazás

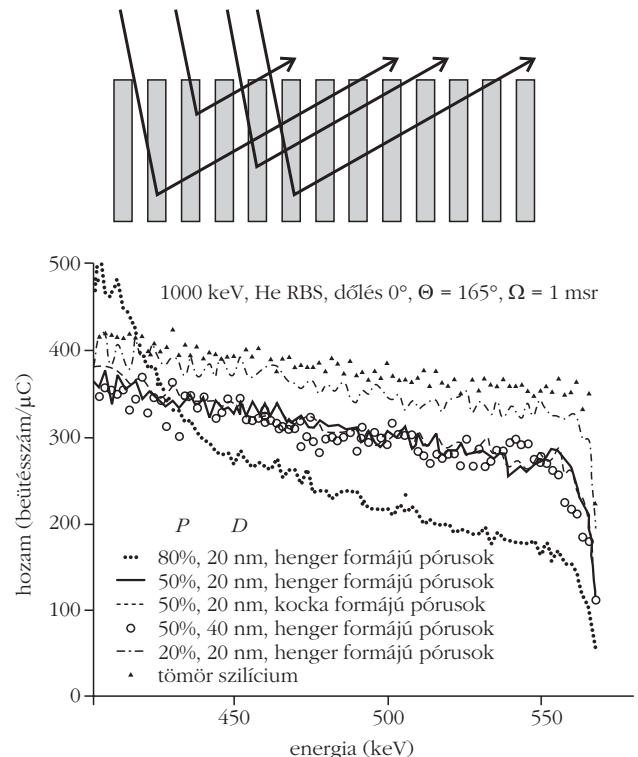
A Rutherford-visszaszórási technika kiválóan alkalmazható volt a mikroelektronikában. Az RBS érzékenysége (10^{13} – 10^{15} atom/cm²), analizálható mélységtartománya (0–1 μ m) és mélységfelbontó-képessége (20–50 nm standard módban és 5 nm optimalizált elrendezésben) megfelelt az akkor alkalmazott vékonyrétegek és implantált dózisok analizálására. A csatornahatással kombinált mérések megadták a szükséges információt az adalékatomok rácshelyzetére, a kristályhibák nagyságára és eloszlására. Az alkalmazott nyaláb átmérője általában $1 \times 1 - 0,3 \times 0,3$ mm volt.

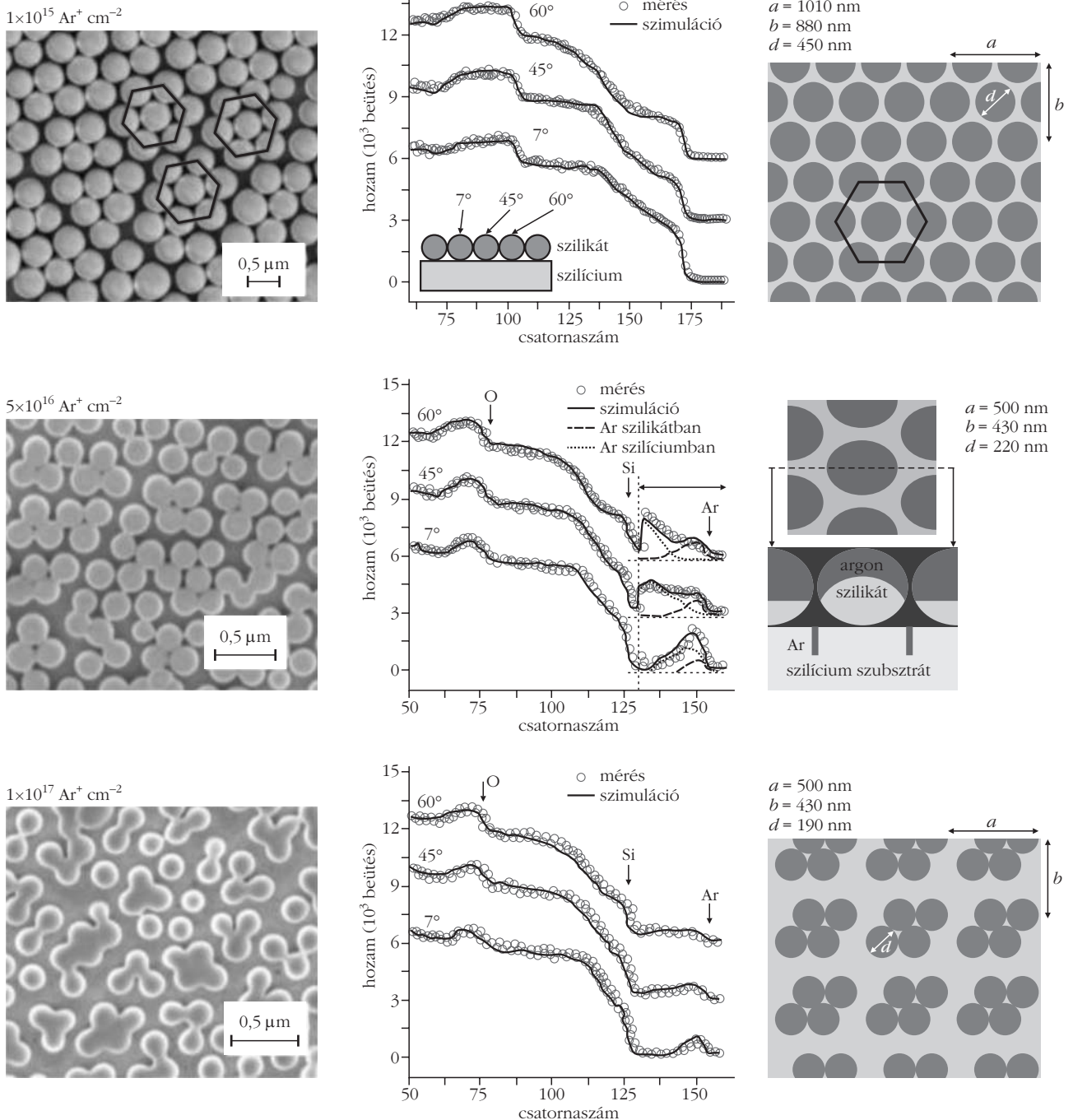
Mára azonban a mikroelektronikai elemek mérete 50 nm alá csökkent. Az implantáció jelentősége ugyan fennmaradt, de ma már nagyságrenddel kisebb dózisokat és sokkal kisebb energiát használnak. Az elemek laterális mérete is nanométeres tartományba csökkent. Az elmúlt két évtizedben történtek próbálkozások az RBS alkalmazásának kiterjesztésére nanométer méretű elemekre, mint például a MEIS (Medium Energy Ion Scattering – közepes energiájú ionszórás),

vagy FIB (Focused Ion Beam – mikrométer alatti fókuszált ion nyaláb). Ezek azonban speciális és drága berendezések, a világon csak néhány laboratóriumban állnak rendelkezésre. A fókuszált nyalábok esetében további problémát jelent a nyalábtintenzitás. Mivel a szórás hatáskeresztmetszete adott, ezért ugyanolyan pontosságú méréshez ugyanakkora iondózsist kell alkalmazni, függetlenül a nyaláb méretétől. Ez azt jelenti, hogy fókuszált esetben a vizsgálandó folton a mintát ért sugárkárosodás, illetve a bevitt energia és töltés több nagyságrenddel nagyobb. Ez utóbbiak hő-, illetve töltés-sokkot okozhatnak, és módosíthatják a minta összetételét.

A kilencvenes évek elején csoportunk a porózus anyagok vizsgálatával foglalkozott. Ezek az anyagok általában mikrométer alatti üregeket vagy oszlopokat tartalmaznak. Felmerült a kérdés, meg tudjuk-e határozni az üregek méretét és az üregek falára lerakódott rétegek összetételét. A kérdésre szimulációval kerestük a választ. Kifejlesztettünk egy olyan programot (RBS-MAST), amely nanométer méretű elemeket tartalmazó minták RBS-spektrumát volt képes szimulálni [8]. A szimuláció megmutatta, hogy periodikus szerkezetű anyagokban a mérési geometria megfelelő megválasztásával a fenti kérdésekre választ tudunk adni. A 11. ábra bemutatja hogyan tudunk különbséget tenni a különböző porozitású, illetve különböző oszlopméretű anyagok között. Az eredményt kísérlettel igazoltuk oszlopos szerkezetű szilícium mintákon [8]. Megmutattuk, hogy az oszlopok falán levő oxidrétegek vastagsága is meghatározható.

11. ábra. Oszlopos szerkezetű porózus minta szimulált spektrumai különböző porozitás és oszlopméret esetén (P a porozitás, D a pórusok átmérője).



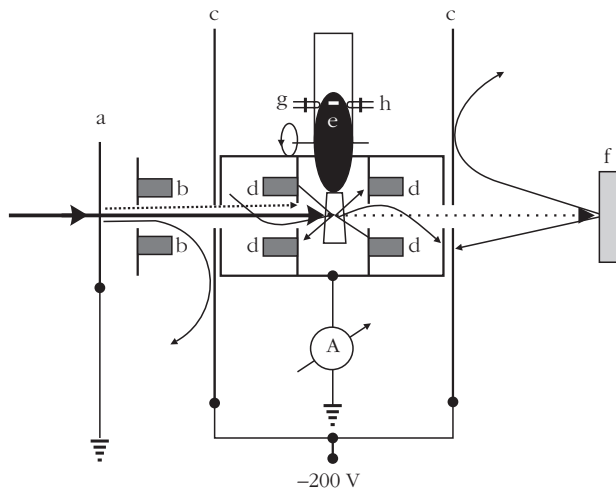


12. ábra. Argonnal különböző mértékben implantált nanométeres szilikát gömbök pásztázó elektronmikroszkópos képei balra, az RBS-MAST program nekik megfelelő cellamodelljei jobbra, valamint a szimulált (folytonos vonal) és a mért RBS-spektrumok (üres körök) középen.

További vizsgálatainkkal kimutattuk, hogy többféle beesési szög mellett végzett mérésekből meghatározható a nanométeres részecskék mérete is. A 12. ábra mutat egy példát. A feladat a következő volt: a nanogömb-litográfiában (NSL – nanosphere lithography) nanométer méretű kolloid részecskék önszerveződő rétegrendszerét használják maszkolásra, akár ionbesugárással kombinálva, rendezett mintázatok kialakítására. Azonban az ion-anyag kölcsönhatás miatt az ilyen méretű részecskék deformálódnak, sőt a hordozó anyagához „ragadhatnak”. Kérdésünk az volt, kimutatható-e a gömbök alak és méretváltozása, illetve

a besugárzott ionok eloszlása a gömbökben. Szilíciumlemez felületére nanométer méretű úgynevezett Ströber szilikát gömböket vittünk fel Langmuir–Blodgett (LB) technikával. A mintákat ezután 500 keV energiájú Ar ionokkal sugároztuk be. A mért és a szimulált spektrumokat a 12. ábra mutatja. Látható, hogy a gömbök méretét, az Ar atomok eloszlását igen pontosan meg tudtuk határozni [16].

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az RBS ma is alkalmazható periodikus szerkezetű, nanométer méretű elemek analizésére az általunk kifejlesztett RBS-MAST program segítségével.



- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a) utolsó nyílábrés | — belépő nyíláb |
| b) d) állandó mágnes, | kilépő nyíláb |
| c) árnyékolás | szórt ion |
| e) nyílábszaggató lemez | — másodlagos elektronok |
| f) a mérendő minta | |
| g) LED | |
| h) fototranzisztor | |

13. ábra. Transzmissziós Faraday-kalitka elvi vázlata.

Hardverfejlesztés

A visszaszórásos spektrumok kiértékeléséhez pontosan ismerni kell az analizáló ionok számát, függetlenül a minták szerkezetétől, összetételétől, az alkalmazott geometriától. Az ionok számát a begyűjtött töltésből határozzuk meg. A pontos mérést megnehezíti, hogy az ionok nemcsak szóródnak a szilárd anyagok atomjain, hanem másodlagos elektronokat is keltenek. A mintát elhagyó elektronok száma függ az ion fajtájától, energiájától, a belépés szögétől, a minta összetételétől és egy ion akár több elektront is kelthet. A mérés során ezért gondoskodni kell arról, hogy az elektronok ne szóródjanak el, hanem tereljük vissza a töltésmérő eszközbe. Ilyen eszköz a magfizikusok által már régóta használt Faraday-kalitka. A kalitka egy zárt doboz, amelynek egy szűk nyílása van csak, ahol az ion beléphet. Annak valószínűsége, hogy a szórt ionok, vagy a kilökött elektronok kijussanak a kalitkából igen csekély, ezért a kalitkába jutott töltések mérésével, kicsi hibával az ionok által hordozott töltéseket tudjuk megkapni. A módszer hátránya, hogy a mintát és a detektort is a kalitkában kellene elhelyezni úgy, hogy a mintát forogtatni is tudjuk. Ha az egész vákuumkamrát tekintenénk egy Faraday-kalitkának, akkor is számolni kellene a szivárgó áramokkal.

Ennél jobb megoldást fejlesztett ki korán elhunyt kollégánk, *Pászti Ferenc*. Transzmissziós Faraday-kalitkát tervezett (13. ábra). A kalitkán két, egyvonalban elhelyezett lyuk található. Az egyikben belép az ion-nyíláb, a másikon kilép és eljut a vizsgálandó mintára. A kalitkában egy forgó lemez található, amely periodikusan elzárja a nyíláb útját. Amikor a nyílábút zárva van, a berendezés úgy működik, mint egy valódi Faraday-kalitka. Nyitott állapotban pedig

mérhető a mintáról szórt spektrum. A zárt és nyitott állapot időtartamának pontos beállításával – feltételezve, hogy a nyílábáram egy periódus alatt nem változik – pontosan meghatározható az ionok száma. Arról, hogy a mérőberendezés más elemeiben keletkező másodlagos elektronok ne jussanak a kalitkába, a be- és kilépő rések elé helyezett feszültség alatt álló „szupresszor” lemezek gondoskodnak. Ezzel a berendezéssel nagyobb, mint 99% pontossággal határozható meg az ionok száma [7]. A berendezést több országba is szállítottuk, ahol ma is használják.

Szoftverfejlesztés

Intézetünkben több RBS-szimulációs és kiértékelő programot fejlesztettünk, amelyek közül többet ma már a világ számos laboratóriumában használnak. A három legismertebb közülük a következő:

1. RBX: az egyik legkorábbi kiértékelő és szimulációs program (1984-től folyamatos a fejlesztése). A mai napig az egyetlen alkalmazás, amely képes csatornahatással kombinált spektrumok analitikus kiértékelésére és kristályhibák szimulációjára is [17].

2. DEPTH: Az RBS, NRA, ERDA mérések mélységfelbontásának igen pontos meghatározására kifejlesztett eszköz, amelyet ma már igen széles körben (néhány száz keV-es – több száz MeV-es könnyű és nehéz ionokra) alkalmaznak [9].

3. RBS-MAST: Pórusos anyagok RBS-spektrumának szimulálására kifejlesztett program. Ma már nanoméretű szemcsék és zárványok kimutatására szolgáló mérések kiértékelésére is alkalmazzák [8].

A világon alkalmazott RBS-szimulációs programokról jó áttekintést olvashatunk a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) megrendelésére készült összefoglalóban [18].

Összefoglalás

Hazánk a Rutherford-visszaszórásos technika fejlesztésében kiemelkedő szerepet játszott. Köszönhető ez annak, hogy a KFKI-ban *Simonyi Károly* vezetésével az ötvenes években elkezdett gyorsítófejlesztések eredményeképpen a 70-es évekre rendelkezésre állt a megfelelő iongyorsító. A mag- és szilárdtest-fizikusok, valamint félvezető-kutatók között igen szoros együttműködés alakult ki. Az ionimplantációs eljárások fejlesztése, a vékonyrétegek fizikájának tanulmányozása inspirálta az RBS-módszer fejlesztését. A szűkös anyagok nem tették lehetővé drága berendezések vásárlását. Ezt innovációval kellett pótolni.

Köszönetnyilvánítás

Az itt felsorolt eredményeket a következő kutatók érték el: *Battistig Gábor*, *†Csepregi László*, *Demeter István*, *Fried Miklós*, *Gyulai József*, *Hajdu Csaba*,

Keszthelyi Lajos, Kótai Endre, Nguyen Quoc Khánh, Lohner Tivadar, †Manuaba Asbrama, Mezei Gábor, Nagy Tibor, †Pásztai Ferenc, Révész Péter, Szilágyi Edit, Szőkefalvi-Nagy Zoltán, Tunyogi Árpád, Varga László, Vizkelethy György, Zolnai Zsolt.

Külön köszönet illeti az EG2R Van de Graaff gyorsító tervezőit, építőit és üzemeltetőit. A gyorsítót teljes egészében Magyarországon tervezték és építették. Túl a második rekonstrukción a gyorsító ma is üzemképes és tudja a tervezési paramétereiket. A KFKI gyorsítóiról részletesebb információ olvasható a *Fizikai Szemle* 54. évfolyamában [19].

Irodalom

1. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodríguez: Analysis of silicon nitride layers on silicon by backscattering and channeling effect measurements. *Appl. Phys. Lett.* 16 (1970) 232.
2. L. Keszthelyi, I. Demeter, G. Mezei, Z. Szőkefalvi-Nagy, L. Varga: Backscattering Investigations on Silicon. *ZfK* 236 (1972) 111.
3. G. Mezey, J. Gyulai, T. Nagy, E. Kótai, A. Manuaba: Enhanced Sensitivity of Oxygen Detection by the 3.05 MeV (α, α) Elastic Scattering. *Ion Beam Surface Layer Analysis 1* (1976) 303.
4. G. Mezey, E. Kótai, T. Lohner, T. Nagy, J. Gyulai, A. Manuaba: Improved Depth Resolution of Channeling Measurement in Rutherford Backscattering by Detector Tilt. *Nucl. Instr. and Methods* 149 (1978) 235.
5. E. Kótai, G. Mezey, F. Pásztai, T. Lohner, A. Manuaba, L. Pócs: Light Impurity Measurements by 2–4 MeV He Beam using Recoil Detection and Forward Scattering. *Proc. of the 2nd All-Union Conf. on Eng. Problems of Fusion Reactors* (1982) 235.
6. E. Szilágyi, F. Pásztai, A. Manuaba, C. Hajdu, E. Kótai: Cross section measurements of the $^1\text{H}(^4\text{He}, ^3\text{He})^1\text{H}$ elastic recoil reaction for ERD analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 43 (1989) 502.

7. F. Pásztai, A. Manuaba, C. Hajdu, A. A. Melo, M. F. DA Silva: Current measurement on MeV Energy ion beam. *Nucl. Instr. Meth. B* 47 (1990) 187.
8. Z. Hajnal, E. Szilágyi, F. Pásztai, G. Battistig: Channeling-like effects due to the macroscopic structure of porous silicon. *Nucl. Instr. Meth. B* 118 (1996) 617.
9. E. Szilágyi, F. Pásztai, G. Amsel: Theoretical approximations for depth resolution calculations in IBA methods. *Nucl. Instr. Meth. B* 100 (1995) 103.
10. E. Szilágyi: Energy spread in ion beam analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 161 (2000) 37.
11. E. Szilágyi, N. Q. Khánh, Z. E. Horváth, T. Lohner, G. Battistig, Z. Zolnai, E. Kótai, J. Gyulai: Ion Bombardment Induced Damage in Silicon Carbide Studied by Ion Beam Analytical Methods. *Mater. Sci. Forum* 353–356 (2001) 271.
12. J. R. Cameron: Elastic Scattering of Alpha-Particles by Oxygen. *Phys. Rev.* 90 (1953) 839.
13. Ye Feng, Zhluing Zhou, Yingyao Zhou, Guoqing Zhao: Cross sections for 165° backscattering of 2.0–9.0 MeV ^4He from carbon. *Nucl. Instr. Meth. B* 86 (1994) 225.
14. E. Kótai: Measurement of the stopping powers for channeled ions in ion implanted single crystal. *Nucl. Instr. Meth. B* 118 (1996) 43.
15. F. Pásztai, G. Mezey, E. Kótai, T. Lohner, A. Manuaba, J. Gyulai, L. Pócs: Surface impurity loss during MeV $^{14}\text{N}^+$ ion bombardment. *Nucl. Instr. Meth. B* 182–183 (1981) 283.
16. Z. Zolnai, A. Deák, N. Nagy, A. L. Tóth, E. Kótai, G. Battistig: A 3D-RBS study of irradiation-induced deformation and masking properties of ordered colloidal nanoparticulate masks. *Nucl. Instr. Meth. B* 268 (2010) 79.
17. E. Kótai: Computer Methods for Analysis and Simulation of RBS and ERDA spectra. *Nucl. Instr. Meth. B* 85 (1994) 588.
18. N. P. Barradas, K. Arstila, G. Battistig, M. Bianconi, N. Dytlewski, C. Jeynes, E. Kótai, G. Lulli, M. Mayer, E. Rauhala, E. Szilágyi, M. Thompson: International Atomic Energy Agency intercomparison of ion beam analysis software. *Nucl. Instr. Meth. B* 262 (2007) 281.
19. Kloppfer E.: Simonyi Károly és a magyar részecskegyorsítók. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 204.

VEKTOROK PÁRHUZAMOS ELTOLÁSÁNAK SZEMLÉLTETÉSE – II. RÉSZ

A Foucault-inga és egyebek

Cikkünk első részében először általánosságban vizsgáltuk a vektorok párhuzamos eltolásának kérdését. Ezután egy érdekes antik eszköz, a kínai délirányt jelző kordé működését mutattuk be, amely a jelenséget fizikailag is illusztrálja: miközben a kordé adott felületen adott görbe mentén gurul, a ráerősített jelző kar „tartja az irányát”, pontosabban: párhuzamosan tolódik el. Cikkünk második részében néhány további illusztrációt mutatunk be arra, hogy a párhuzamos eltolás jelensége hol érhető tetten a természetben.

A Foucault-inga

A *Léon Foucault* által javasolt, és először a 19. század közepén elvégzett ingakísérlet a fizika leghíresebb

Bokor Nándor, BME Fizika Tanszék

Laczik Bálint, BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

vizsgálatai közé tartozik. A hosszú fonálra függesztett pontszerű tömeg lengési síkja elfordul a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerhez képest, szemléltetve ezzel a Föld forgását.¹

Manapság is előfordul, különösen a fizikát népszerűsítő irodalomban, az a megfogalmazás, hogy a jelenség oka: a matematikai inga a Föld mozgásától függetlenül megőrzi lengési síkját a *globális inerciarendszerhez*, azaz az állócsillagokhoz rögzített vonatkoztatási rendszerhez képest. Ezen állítás képtelenségét egysze-

¹ Ha az ingakísérlettel célunk kifejezetten a Föld forgásának bizonyítása, akkor ne az Egyenlítőn állítsuk fel a kísérleti apparátust: ott ugyanis – mint látni fogjuk – az inga lengési síkja a mi nézőpontunkból, azaz a *Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben* nem fordul el.