

amelyre a nagyenergiás neutronok lassítása miatt van szükség. A rendszer rugalmas kialakítású, a mérési terv függvényében két elrendezést használhatunk. A 148 darab számlálóból és két darab „clower” típusú HPGe detektorból álló elrendezés béta-neutron-gamma koincidenciamérésekre ad lehetőséget. Ezt az elrendezést ~70%-os neutronszámlálási hatásfok és 1% gamma-detektálási hatásfok ( $E_\gamma = 1,33$  MeV esetén) jellemzi. Amennyiben a germániumdetektorokat nem kívánjuk használni, újabb számlálócsövek behelyezésére nyílik lehetőség, amelynek eredményeképp ~76% neutrondetektálási hatásfok érhető el. Így elmondhatjuk, hogy az amerikai Oak Ridge Nemzeti Laboratórium, a németországi GSI, az orosz JINR (Egyesített Atommagkutató Intézet), a spanyolországi UPC (Katalán Tudományegyetem) és a japán RIKEN kutatóintézet együttműködésében felépített BRIKEN-rendszer a késleltetett neutronok detektálására valaha épített legnagyobb hatásfokú rendszer. A számlálócsövek elhelyezésének megtervezésekor nemcsak a legnagyobb hatásfok elérésére törekedtünk, hanem konstans közeli hatásfok-energia függvény elérése is célunk volt. Ennek oka, hogy a jelenlegi berendezéssel „csak” számláljuk a neutronokat, energiájukat nem mérjük. Mivel a stabilitási völgytől távoli magokról van szó, a késleltetett neutronok energiájáról nem rendelkezünk részletes kísérleti információval. Héjmodellszámítások alapján (amelyeket a stabilitási völgyhöz közelebb található, késleltetett neutront kibocsátó magok, például:  $^{87,88}\text{Br}$ ,  $^{137}\text{I}$ -magok segítségével ellenőriztünk) azonban tudjuk, hogy ezen neut-

ronok energiája általában 1 MeV-nél alacsonyabb. Detektorunk hatásfokfüggvénye 2,9%-on (166 számlálócsöves elrendezés), illetve 3,6%-on (148 számlálócső és két germániumdetektor) állandó a 0–1 MeV tartományban, ezért a  $P_n$ -értékek meghatározásának – a neutronenergia-mérés hiányából származó – szisztematikus hibája kisebb, mint 4%, szemben a korábbi hasonló detektorok 10%-ot meghaladó bizonytalanságával. A 6. ábrán a BRIKEN-detektor hatásfok-energia függvénye, az utolsó számlálócső behelyezéséről készített fényképem, illetve a számlálócsövek elhelyezkedését ábrázoló sematikus rajz láthatók.

A 2016 őszi és 2017 tavaszi félévek során öt, a RIKEN Program Tanácsadó Testület által jóváhagyott mérési kampányban neutrongazdag  $^{28}\text{Fe}$ - és  $^{65}\text{Tb}$ -izotópok között ~160 új mag esetében fogjuk az egy, két, illetve három késleltetett neutronkibocsátás valószínűségeit meghatározni, ezzel mintegy megduplázva a rendelkezésre álló adatbázis méretét. Az új kísérleti eredmények várhatóan az r-folyamat modelljei pontosságát fogják lehetővé tenni, illetve segítenek a jövőben a GSI-ben végrehajtandó mérések tervezésében.

#### Irodalom

1. C. Iliadis: *Nuclear Physics of Stars*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007).
2. Gy. Gyürky, *Fizikai Szemle* 60 (2010) 37.
3. J. J. Cowan, *Nature* 440 (2006) 27.
4. J. Prochaska, *Nature* 423 (2003) 57.
5. S. Goriely és mts., *Astrophysical Journal Letter* 738 (2011) L21.
6. Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, INDC (NDS)-0599 összefoglaló, <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0599>
7. G. Lorusso és mts. *Physical Review Letters* 114 (2015) 1925201.

## SZIGETELŐ ANYAGOK IONNYALÁBOS ANALÍZISE

Szilágyi Edit, Kótai Endre

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet

Dielektrikumokat az anyagtudomány számos területén használnak, mint például űrtechnikában (hőszigetelő bevonatok), optoelektronikában, napelemeknél vagy polimerek széleskörű alkalmazásainál. Az ionsugaras mérőműszerekkel, nevezetesen a visszaszórás-

szos spektrometriával (BS), a rugalmasan meglökött magok detektálásával (ERD), a magreakciós analízissel (NRA) a dielektrikumok vizsgálata során – mint minden más anyag esetén is – elsősorban a mintákat alkotó anyagok, szennyezők mélységeloszlása határozható meg. Az ionsugaras nukleáris analitikai (IBA, Ion Beam Analysis) mérőműszerek lényege, hogy néhány keV-től néhány MeV-ig terjedő energiájú

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.



Szilágyi Edit, az MTA doktora, az MTA Wigner FK Nukleáris Anyagtudományi Osztály és az ionnyaláb-fizika kutatócsoport vezetője. Nevéhez fűződik az ionnyalábos analitikai mérőműszerek energia- és mélység-felbontóképességének kísérleti és elméleti meghatározása, valamint e módszerek spektrometria-számításába beépítette az energiaelmosódás hatását is. A módszerfejlesztéseken túl az ionbesugárzás felületmódosító hatásai, vékony- és multirétegek, valamint nanosztruktúrák vizsgálatával is foglalkozik.



Kótai Endre, a fizikai tudomány kandidátusa, az MTA Wigner FK külső munkatársa. Főbb kutatási területe az ionnyaláb-analitika, ionimplantáció fizikai folyamatainak tanulmányozása. Nevéhez fűződik a több külföldi laboratóriumban is használt RBX szimulációs program kifejlesztése.

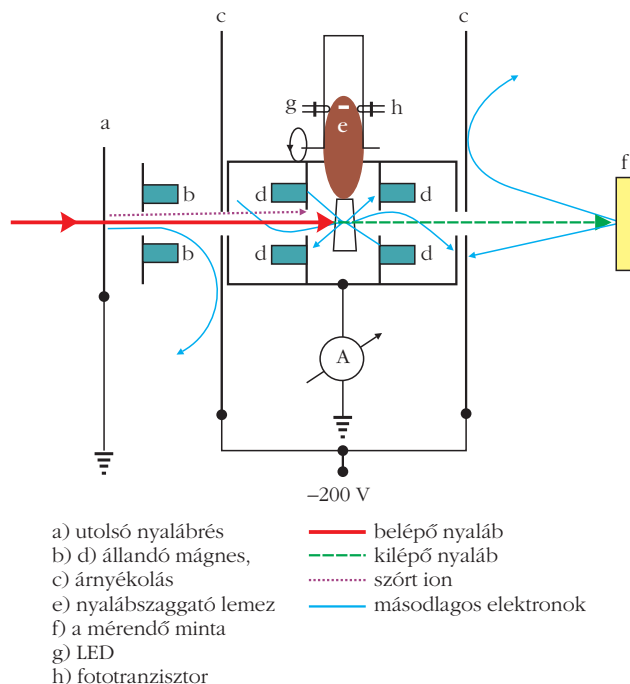
ionokkal bombázzuk az analizálni kívánt minta felületét, majd a minta atomjain kiváltott atomfizikai és magfizikai reakciók termékeit (röntgen- vagy  $\gamma$ -sugárzást, könnyű ionokat:  $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ , esetleg neutron) detektáljuk. A reakciótermékek energiája függ attól, hogy milyen mélységben, milyen tömegű és rendszámú atomon, milyen reakció történt. Így általában egyidejűleg van lehetőség elem- és mélységanalízisre is [1–4]. A módszerek elterjedésében a félvezető detektorok megjelenése játszott szerepet.

Az elmúlt években egyre gyakrabban használják az ionlumineszcencia módszerét is. Ionnyaláb-kölcsönhatás során sok szigetelő anyag erős fénykibocsátást produkál, ami felhasználható az anyagok hibaszervezetének tanulmányozására. A fény detektálásával, valamint energiájának és intenzitásának meghatározásával információ nyerhető az anyagban lévő színcentrumokról, hibahelyekről, illetve ezek kémiai környezetéről [5].

Szigetelő anyagokból készült minták azonban az ionnyalábos besugárzás során világíthatnak, *feltöltődhetnek, illetve szikrázhatnak*. Egyik jelenség sem segíti az ionnyalábos kísérletek végzését, illetve a mérési eredmények értelmezését. A fenti jelenségek természetesen egyszerre zajlanak, így egyszerre kell megoldást találnunk az összes jelenségre, hogy pontos méréseket tudjunk végezni elektromosan szigetelő anyagokból készült mintákon is.

## Árammérés

Az ionnyalábos analitikai mérések értelmezéséhez pontosan kell ismerni az analizáló ionok számát, függetlenül a minták szerkezetétől, összetételétől és az alkalmazott geometriától. Az ionok számát a begyűjtött töltésből határozzuk meg. Ez történhet a mintán keresztül áramintegrálással is, de ebben az esetben szigetelő minta nem mérhető. A pontos árammérést megnehezíti, hogy az ionok nemcsak szóródnak a szilárd anyagok atomjain, hanem úgynevezett másodlagos elektronokat keltnek. A mintát elhagyó elektronok száma függ az ion fajtájától, energiájától, a belépés szögétől, a minta összetételétől. Egy ion akár több elektront is kelthet. A mérés során ezért gondoskodni kell arról, hogy az elektronok ne szóródjanak szét, hanem azokat 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 forgatni is tudjuk. Igen gyakran az egész vákuumkamrát tekintik egy Faraday-kalitkának, de szivárgó áramokkal ilyenkor is számolni kell. Szigetelő minták mérésakor a szikrázás igencsak zavaró hatású lenne, a feltöltődés



1. ábra. A transzmissziós Faraday-kalitka elvi vázlata [4, 6].

elkerülése érdekében a kamrába behelyezett elektronforrás pedig meghamisítaná az árammérést.

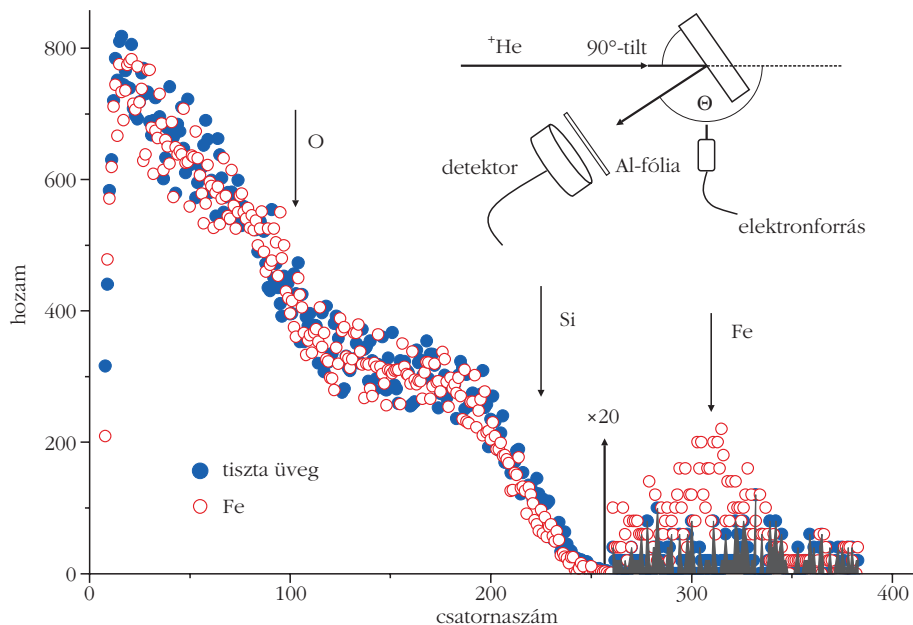
Csoportunkban már több mint 25 éve használunk egy  $-$  volt kollégánk, *Pászti Ferenc* által kifejlesztett  $-$  transzmissziós Faraday-kalitkának nevezett árammérőt [4, 6], amely sokkal jobb megoldást nyújt az árammérésre. Az eszköz elvi ábrája az 1. ábrán látható. A kalitkán két, a nyaláb útvonala mentén elhelyezett lyuk található. Az egyikben belép az ionnyaláb, a másikon kilép, majd eljut a vizsgálandó mintára. A kalitkában egy forgó lemez található, amely periodikusan elzárja a nyaláb útját. Amikor a nyalábút zárva van, a berendezés úgy működik, mint egy valódi Faraday-kalitka, a nyalábút nyitott állapotában pedig mérhető a mintáról szórt spektrum. A zárt és a nyitott állapotok időtartamainak pontos beállításával  $-$  feltételezve, hogy a nyalábrám egy periódus alatt nem változik  $-$  pontosan meghatározható az ionok száma. Arról, hogy a mérőberendezés más elemeiben az ionok által keltett másodlagos elektronok ne jussanak a kalitkába, a be- és kilépő rések elé helyezett, feszültség alatt álló úgynevezett „szupresszor”-lemezek gondoskodnak. Ezzel a berendezéssel 1%-nyi pontossággal határozható meg az ionok száma [6]. Így ez a megoldás ideális szigetelő minták mérésére is.

## Fénykibocsátás

A felületi záróréteges félvezető-detektorok kiürített rétegében fény hatására is keletkezik töltéshordozó (elektron-lyuk pár). Ez egyrészt hamis jeleket generál, és ezzel „zajossá” teszi a mért spektrumokat, másrészt olyan nagy áramok is folyhatnak a detektorokban, amelyek már tönkre is tehetik őket. A jelenség ellen

aránylag egyszerűen lehet védekezni: biztosítani kell, hogy a detektorok érzékeny tartományát ne érje fény. Ez történhet egy egyszerű vékony fényzáró fólia általi takarással is. A 2. ábrán erre mutatunk egy példát. Az alkalmazott 1  $\mu\text{m}$  vastag alumíniumfólia ugyan rontja a mérés energiafelbontását, de lehetővé teszi a vas mennyiségének meghatározását [7].

A fényvédő fólia alkalmazásánál ma már sokkal jobb megoldást nyújt a fényre érzéketlen, úgynevezett vak detektorok használata. A vak detektorokra már gyárilag vékony fényátmeresztő réteget (például alumíniumot) párolnak. Ennek következtében az ilyen detektorok energiafelbontása csak egy kicsit rosszabb (~15 keV), mint a legjobb felbontású félvezető detektoroké (~12-13 keV).



2. ábra. Nitrogénnel besugározott (implantált) fémek kopásának mérése Rutherford-visszaszórással. A nitrogénnel implantált fémeket egy erre a célra kifejlesztett koptatógépen koptattuk egy üvegrúdra felszívott kopásnyommal. Az üvegrúdra tapadt vas mennyiségének mérésével (ez arányos a 260–350 csatornaszámmal levő csúcs területével) vizsgálható a kopás, a rudat milliméterenként végigmérve akár a kopási úthossz függvényében is. A spektrumok élének elmosódásáért a fényzáró fólia a felelős. A spektrumok mellett a mérési elrendezés látható a detektor, a fényzáró fólia és az elektronforrás helyzetének megjelölésével. Az elektronforrást a feltöltés elkerülése végett használtuk [7].

## Feltöltődés – szikrázás

Az ionok által okozott feltöltődés következtében létrejövő szikrázás zavarja az elektronikát, és így zajossá teheti a mérést. A szigetelő minták mérésekor egyaránt fontos, hogy feltöltődésmentesen tudjunk mérni, illetve hogy észrevegyük a spektrumokon, ha a minta feltöltődött. A feltöltődést a mérések értelmezésénél figyelembe lehet venni, de a legjobb, ha a kísérlet azonnal megismételhető úgy, hogy feltöltődésmentességet biztosítunk.

A feltöltődés és így a szikrázás elkerülésére több hatékony módszer is kipróbálható.

### A minta csomagolása

A mintát magát ilyenkor egy vékony alumíniumfóliával borítjuk be, csak egy kicsi ablakot hagyva a méréshez. Így a mérési felülettől pár mm-re már vezető anyag lesz, ezzel biztosítjuk a töltések elszivárgásának lehetőségét. A módszer előnye, hogy olcsó és szinte mindig alkalmazható, ha előre számítunk a feltöltődésre. Hátránya, hogy a minta felületének nagy részét elveszítjük a mérés alatt, nagyobb felület homogenitástérképe ezért így nem állapítható meg. Az ionok súroló beesésekor, illetve kilépéskor a csomagoló anyag könnyen okozhat árnyékhatást, amennyiben a csomagolás nem tökéletesen fekszik fel a minta felületére.

### Bevonat

Megpróbálhatjuk vezetőképessé tenni a felületet egy alkalmas vezetőképes bevonattal. Egészen vé-

kony szén- vagy aranyréteg elegendő ahhoz, hogy a feltöltődést elkerüljük. A módszer hátránya, hogy ezzel magát a mintát is megváltoztatjuk. Ráadásul egy komolyabb mintakészítő berendezésre is szükség lehet.

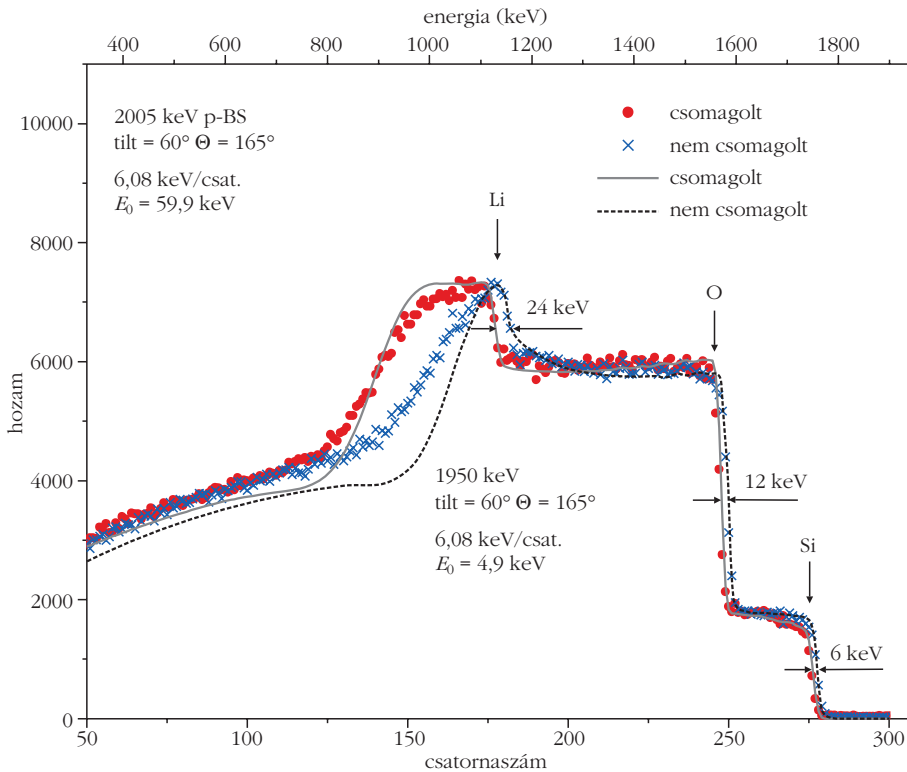
### Kis áramerősség használata

A feltöltődés lényegesen csökkenthető, és a szikrázás elkerülhető, ha lényegesen csökkentjük a nyalábáramot. A nyaláb áramerősségét a szokásos 10-20 nA-ról 1-4 nA-re csökkentve a legtöbb minta mérhetővé válik, hiszen így elegendő idő lesz arra, hogy a felületre jutó töltés elszivárogjon. A módszer hátránya, hogy ugyanolyan jószágú (statisztikájú) mérése sokkal hosszabb mérési időre lesz szükség.

### Elektronforrás

A leghatékonyabb védekezési mód a feltöltődés és szikrázás megakadályozására egy alkalmas elektronforrás használata. Saját készítésű, egyszerű, izzólámpából kialakított elektronforrás is megfelel a célra. Alkalmazásának feltétele, hogy az árammérés a mérőkamrától, illetve a mintától független legyen. Hátránya lehet, hogy megfelelő működésnél elég erősen világíthat, így csak vakdetektorral együtt érdemes használni.

A minta feltöltődés hatására elért feszültsége akár több 10 kV is lehet, anélkül, hogy szikrázna. Ez akkor következhet be, ha a felületi szivárgás következtében nem éri el a minta a szikra kialakulásához szükséges átütési feszültséget. A feltöltődés ekkor is



3. ábra. Protonvisszaszórásos spektrometria (p-BS) feltöltődött és feltöltődésmentes  $(\text{Li}_2\text{O}_x(\text{SiO}_2)_{1-x})$  kerámián [11]. A feltöltődés hatásának bemutatására az egyik mintát alumíniumfóliába csomagoltuk, a másik pedig nem kapott borítást. (A mért spektrumokat a szimbólumok, a számoltakat vonalak jelölik.) Mindkét esetben elmosódásmentes Li, O és Si felületi éleket kaptunk, amelyek a feltöltődés hatására a kinematikai faktornak megfelelően csúsztak a nagyobb energia felé 24, 12, illetve 6 keV-vel. A minta 55 kV-ra töltődött fel a mérés során és  $q_1 = q_2 = 1$  adódott, ami várható volt a p-BS-nél. A Li hatáskeresztmetszete ebben az energiatarományban erősen függ a proton energiájától; 55 keV különbség erős torzulást okoz a spektrumban. A feltöltődés jól értelmezhető a nyálábenergia és az energiakalibráció nullpontjának együttes változtatásával.

lelassítja a bejövő iont, ami – a hatáskeresztmetszete energiafüggése révén – megváltoztathatja a spektrum alakját. A reakcióterméket – amennyiben az töltéssel rendelkezik – viszont gyorsítani fogja, és ezzel energiája a feltöltődésmentes méréshez képest jelentősen megváltozik. Ez gondot okoz az ionok energiaeloszlásán alapuló módszer mérési eredményeinek értelmezésében is.

Ez a jelenség ugyanakkor lehetőséget ad arra is, hogy akár mérés közben észrevegyük, ha a minta feltöltődik. A feltöltődésmentes minták segítségével meghatározott energiakalibrációhoz képest a feltöltődött minták felületi élei egy kicsit magasabb energián jelennek meg (amint az a 3. ábrán látszik), ugyanis a visszaszóródott ion energiája rugalmas szórás esetén

$$E_M = (E_0 - q_1 \Delta U) K + q_2 \Delta U,$$

ahol  $E_0$  a nyáláb energiája,  $q_1$  és  $q_2$  a beeső, illetve a szóródott ion töltésállapota,  $K$  a kinematikai faktor (a szóródott és a bejövő ion energiájának hányadosa),  $\Delta U$  pedig a minta feltöltődése. Az élek eltolódása a feltöltődés hatására:

$$\Delta E = (q_2 - q_1 K) \Delta U$$

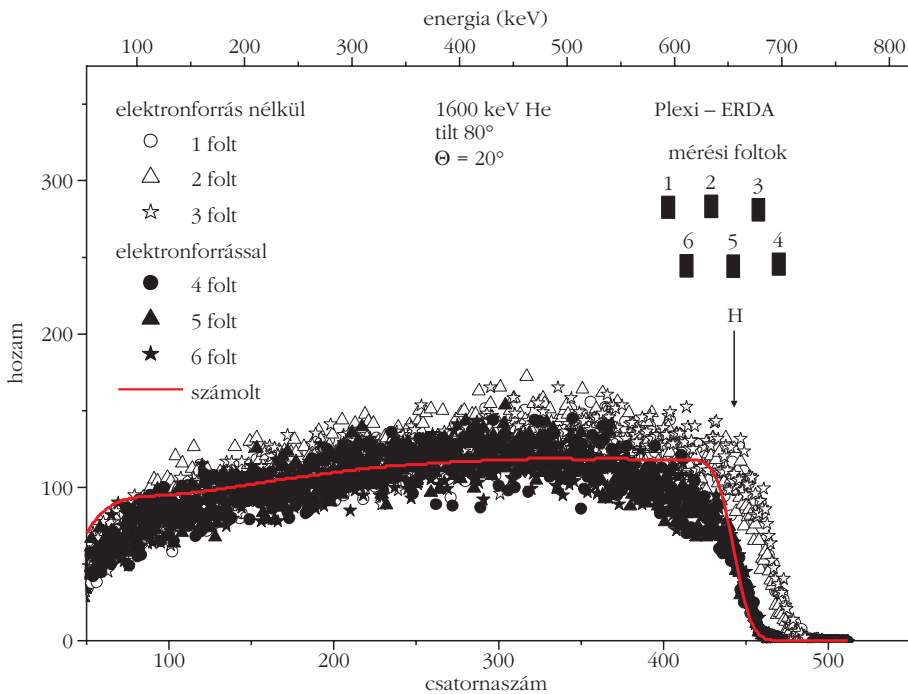
a kinematikai faktortól, azaz a szóró atom tömegétől fog függni, ami egyszerűen ellenőrizhető. Ha  $q_1$  és  $q_2$  állandó, az élek elmosódása nem várható. Ez következik be proton-BS esetén, ahol mind a beeső, mind a visszaszóró ion töltésállapota 1. Héliummal vagy nehézionokkal történő méréskor azonban csak a beeső ion töltésállapota ismert, a szóródott ioné viszont nem, pedig ennek ismerete is fontos [8, 9]. A több töltésállapot jó felbontású detektálási módszer esetén lépcsőket, rosszabb felbontású detektor esetén elmosódott éleket eredményez.

A feltöltődés hatása akkor jelentkezik igazán jelentősen a spektrumokban, ha a hatáskeresztmetszet energiafüggése nem hanyagolható el. Ez látszik a 3. ábra Li-hoz tartozó spektrumrészletében is. Az ionnyaláb-analitikai mérésekre használt legtöbb kiértékelő programba [10] a feltöltődés hatásainak számolását még nem építették be, ezért a mérések értelmezésekor csak valamilyen paraméterkorrekcióval lehet próbálkozni. Bár a feltöltődött minta spektruma jól értelmezhető a nyálábenergia és az energiakalibráció nullpontjának együttes változtatásával, a finomabb részletek (például a Li hátsó élének) leírásához a feltöltődési folyamat pontosabb leírása lenne szükséges.

Rugalmasan meglökött magok detektálásán (ERDA, Elastic Recoil Detection Analysis) alapuló mérőmódszernél, amelyet elterjedten használnak hidrogén meghatározására, ugyancsak zavaró lehet, hogy a felületi él nagyobb energián jelentkezik, mint ahol az a feltöltődésmentes mintákon alapuló mérésnél lenne. A feltöltődött minta spektrumának számolásánál a mérés során alkalmazott abszorbens okozhat nehézséget, így a számolás korrekciója helyett gyakran egyszerűbb feltöltődésmentesen mérni.

Az elektronforrásból származó felgyorsított elektronok is kölcsönhatásba léphetnek a mintával. Elvileg ez a kölcsönhatás is okozhatna szerkezeti vagy összetételei változásokat, csakúgy, mint maga az ionnyaláb is (4. ábra). Az elektronok által okozott szerkezeti változások – legalábbis a jelen esetben – nem voltak jelentősek, mivel a megismételt mérések nem mutatnak mérési hibán kívüli eltérést.

Az ionlumineszcencia-módszer alkalmazásánál azonban, ahol éppen az ionok által keltett fénykibocsátást

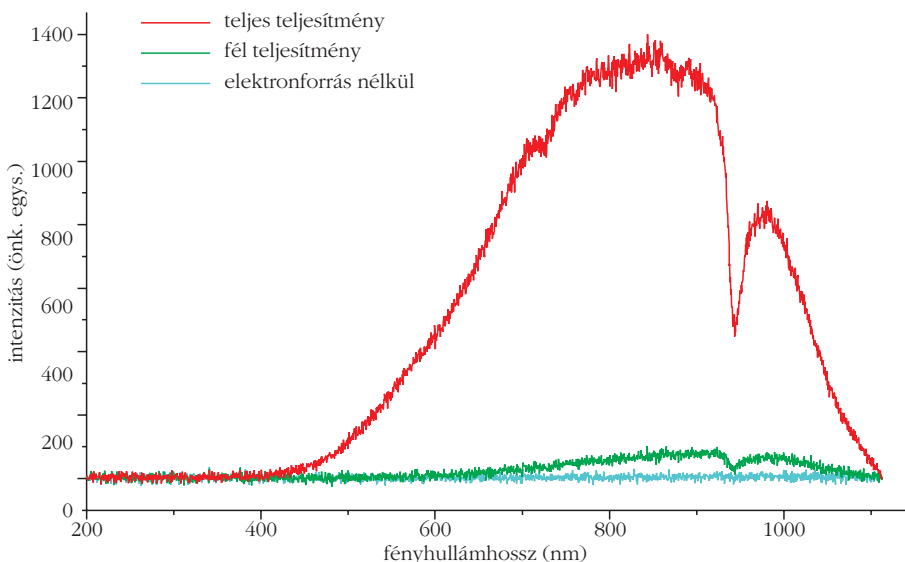


4. ábra. Feltöltődés hatása hidrogén meghatározására alkalmazott ERDA-módszernél. Az „utógyorsított” protonok lényegesen nagyobb energiával képesek áthatolni a fólián; ez okozza azt, hogy a felületi él körülbelül 20 keV-vel nagyobb energiánál jelentkeznek. A mérések sorrendje megegyezett a mérési foltok számozásával.

mérjük, más megoldást kell alkalmazni, mivel az elektronforrás fénykibocsátása zavarja a mérést (5. ábra).

Ebben az esetben a mintákra felületi vezető réteget sem érdemes tenni, mert ez megakadályozza a fénykibocsátást. A módszer annyira érzékeny, hogy törekedni kell a minél jobb és tisztább vákuumban való mérésre, hogy a felületre kirakódó szénhidrogén mennyisége is csökkenjen. A minta csomagolása elvileg járható út lenne, viszont ez a módszer erősen korlátozza a minta mérhető felületét. Az ionlumineszcencia-mérések során elég gyakran kell friss mérési pontra állni,

5. ábra. Az elektronforrás fénykibocsátásának zavaró hatása ionlumineszcencia-mérésnél a szikrázás megakadályozásához szükséges teljesítménynél (teljes teljesítmény), illetve fél teljesítménynél.



mert az ionok által okozott sugárkárosodás hatással van a fénykibocsátásra is. Ezért ennél a módszernél aránylag kis áramerősséget (1-4 nA) szoktak használni, amivel elkerülhető a feltöltődés is.

## Összefoglalás

Az elmúlt évek során csoportunkban a feltöltődés megakadályozására mindegyik módszert alkalmaztuk. A legjobb megoldásnak így szigetelő minták mérésére a Pászti-féle transzmissziós Faraday-kalitka, vakdetektor és elektronforrás együttes alkalmazását tartjuk a legtöbb ionsugaras mérési módszerre. Az ionlumineszcencia módszer alkalmazásánál elektronforrás helyett az áramerősséget kell elegendően lecsökkenteni a szikrázás elkerüléséhez.

## Irodalom

1. J. R. Tesner, M. Nastasi (szerk.): *Handbook of modern ion beam materials analysis*. Mat. Res. Soc., Pittsburgh, PA, 1995.
2. W. K. Chu, J. W. Mayer, M. Nicolet: *Backscattering Spectrometry*. Academic Press, New York, 1978.
3. Gyulai J.: A Rutherford-visszaszórás és „karrierje” a mikroelektronikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 293.
4. Kótai E., Szilágyi E.: Magyar innovációk a Rutherford-visszaszórási technikában. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 301.
5. P. D. Townsend: Variations on the use of ion beam luminescence. *Nucl. Instr. Meth. B* 286 (2012) 35.
6. F. Pászti, 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.
7. E. Szilágyi, F. Pászti, Z. Vértsey: Influence of nitrogen ion implantation on wear studied by a new laboratory wear test. *Nucl. Instr. Meth. B* 58 (1991) 98.
8. E. Szilágyi: On the limitations introduced by energy spread in elastic recoil detection analysis. *Nucl. Instr. Meth. B* 183 (2001) 25.
9. Y. Kitsudo, K. Shibuya, T. Nishimura, Y. Hoshino, I. Vickridge, Y. Kido: Charge exchange of medium energy H and He ions emerging from solid surfaces. *Nucl. Instr. Meth. B* 267 (2009) 566.
10. E. Rauhala, N. P. Barradas, S. Fazinic, M. Mayer, E. Szilágyi, M. Thompson: Status of ion beam data analysis and simulation software. *Nucl. Instr. Meth. B* 244 (2006) 436.
11. D. E. Szócs, E. Szilágyi, Cs. Bogdán, E. Kótai, Z. E. Horváth: Lithium concentration dependence of implanted helium retention in lithium silicates. *Nucl. Instr. Meth. B* 268 (2010) 1857.