

nyaláb eléréséhez emellett rétegzett, illetve mikrostrukturált targeteket használnak. Ezekkel sikerült nukleonként több MeV energiát elérni. Még nem versenyezhetnek a hagyományos iongyorsítókkal, de már ma is alkalmasak arra, hogy kiinduló nyalábot szolgáltatassanak számukra. Rendkívül izgalmasak a protonterápiás és egyéb orvosi alkalmazások is.

Talán már ebből a rövid összefoglalóból is kiderült, hogy a lézeres részecskegyorsítás fantasztikus új lehetőségeket jelent. Egyelőre még nem érjük el a konvencionális gyorsítók legnagyobb energiáit, de a kapott energiákkal már magfizikai és fotonukleáris reakciókat, aktivációs analízist stb. is lehetett végezni. Egy érdekes alkalmazásként viszonylag kisméretű lézerral pozitronokat sikerült kelteni, a kapott ráta másodpercenként 10^7 pozitron volt [8]. A pozitronkeltés a gyors elektronoknak az ionok terében keltett fékezési sugárzásával, illetve a trident folyamattal (virtuális fotonok kicserélése) történt.

Irodalom

1. J.R. MARQUES – in Atoms, Solids, and Plasmas in Super-Intense Laser Fields (szerk.: D. Batani, C.J. Joachim, S. Martellucci, A.N. Chester) Kluwer Academic/Plenum Publ. NY. 339–350, 2001.
2. T. TAJIMA, J. DAWSON – Phys. Rev. Lett. 69(1979) 267
3. M. KALUZA, I.B. FÖLDES, E. RÁCZ, M.I.K. SANTALA, G.D. TSAKIRIS, K.-J. WITTE – IEEE Trans. Plasma Sci. 33(2005) 480
4. A. PUKHOV, J. MEYER-TER-VEHN – Appl. Phys. B 74(2002) 355
5. S.P.D. MANGLES ET AL. – Nature 431(2004) 535, C.G.R. GEDDES ET AL. – Nature 431(2004) 538 és J. FAURE ET AL. – Nature 431(2004) 541
6. Cs. TÓTH ET AL. – IAMP 2006, Book of Abstracts, Szeged és W.P. LEEMANS ET AL. Nature Physics 2(2006) 696
7. P. MCKENNA – Phys. Rev. E 70(2004) 036405
8. G. GAHN ET AL. – Appl. Phys. Lett. 77(2000) 2662

25 ÉVES A RUGALMAS ELEKTRONSZÓRÁS-SPEKTROMETRIA

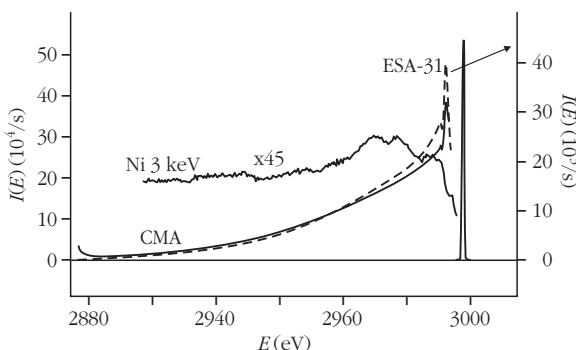
Gergely György

Professor emeritus instituti, MTA MFA

Szilárdtestek felületét elektronokkal bombázva az elektronok nagy része behatol az anyagba, kisebb hányaduk több-kevesebb energiavesztéssel visszaszóródik, folytonos spektrumot alkot. Az energiavesztés nélküli szórás rugalmas szórásnak nevezzük. Ezzel foglalkozik a rugalmas elektronszórás-spektroszkópia, melyet 1981-ben az MTA MFKI-ban fejlesztettünk ki, alkalmazásával 1997 óta az MTA MFA-ban folytatjuk a kutatásokat. Nemzetközileg elfogadott jele EPES (Elastic Peak Electron Spectroscopy) [1]. Definícióját és jelét az ISO is felvette 18115/7.26 számmal. Az RBS mellett ez a második hazai felületvizsgálati eljárás, melyet az ISO felvett listájára.

A *Fizikai Szemlé*ben 1988-ban ismertettem az eljárást [2], mely indulása óta folyamatosan továbbfejlődött. A hivatkozásokból kitűnik, hogy 16 ország 33 kutatóhelye alkalmazta és fejlesztette tovább. 2002-ben tanulmányban [3] foglaltam össze a nemzetközi kutatások addigi eredményeit, de azóta is lényeges előrehaladás történt mind az MFA-ban, mind külföldön. Jelen megemlékezésem kereteit messze túllépné ezek ismertetése, ezért inkább [3] munkámra utalok a részletek tekintetében.

1. ábra. Ni teljes visszaszórási spektruma. Az ESA 31 (ATOMKI) és K. Goto CMA-eredményeinek összehasonlítása. Az ábra tartalmazza az Ni veszteségi spektrumát is a rugalmas csúcs mellett.



Valamely szilárdtest felületét elektronokkal bombázva megjelenik az elektronok energiatfüggő spektruma: a szekunder elektronokat ($E < 50$ eV) a visszaszórt elektronok folytonos spektruma követi, erre rakódnak az Auger- és veszteségi csúcsok. Az 1. ábra mutatja a Ni teljes spektrumát K. Goto féle CMA-val (Cylindrical Mirror Analyser, hengeres tükör analízátor) összehasonlítva, továbbá a rugalmas csúcs közelében a veszteségi spektrumot.

Tekintsük át az elektrontranszport-folyamatokat: ezek eredménye a teljes visszaszórási spektrum. A behatoló elektron rugalmas és rugalmatlan (veszteséges) szórásokat szenved. Két szórás, ütközés között λ_e a rugalmas, λ_i a rugalmatlan közepes szabad úthossz (IMFP), $\lambda_e < \lambda_i$. Általában több rugalmas szórás után az elektron energiát veszít. E szórási folyamatokat az atom elektronjai és a szilárdtest határozzák meg. Közleményem csak a rugalmasan szórt elektronokra korlátozódik. A rugalmas szórás az elektronok irányváltozásával jár, a spektrométerbe történő visszaszórás látjuk a rugalmas csúcsban. Mellőzve a részleteket, szólnom kell még két fontos folyamatról. Lényegesen kisebb veszteséget okoz az elektron atommag által okozott Rutherford-szórása, visszalökés (recoil) hatás. Alapvetően fontos az elektronok behatolásánál és kilépésénél bekövetkező felületi veszteség. A transzportfolyamatok határozzák meg a rugalmas csúcs intenzitását és irányeloszlását.

A spektrumban $E = E_p$ -nél a legnagyobb csúcs, a rugalmas csúcs jelenik meg [1, 2]. Az elektronok rugalmas szórása a legerősebb elektron-atom kölcsönhatás. Ennek energiája azonban csak közelítőleg E_p , pontos helyzetét az elektronok Rutherford-típusú szóródása határozza meg. Az eltolódás

$$\Delta E_{rec} = E \frac{m}{M} \sin\Theta,$$

ahol m az elektron, M az atom tömege, Θ a szórás szöge. Ez 2 keV-en C (grafit) esetében 300 meV, de a H eseté-

ben már 3,8 eV polietilén felületén, a rugalmas csúcs felhasad. MFA–ATOMKI közös eredmény volt a H közvetlen kimutatása az elektronok spektrumában [4]. Itt emlitem, hogy a felületvizsgálatoknál gyakran alkalmazott CMA hengeres tükör analizátornál az E energiájú csúcs helyzete számítható. Meglepő, hogy 2 keV-en már 2 eV relativisztikus eltolódást szenved a rugalmas csúcs, ami 5 keV-en 11 eV.

Hazánkban és külföldön az EPES-vizsgálatokat többféle spektrométerrel végezték (RFA fékezőrácsos, CMA hengeres tükör, HSA félgömb, DESA-Staib stb.). A nagyszámú kísérleti eredményt összefoglaltam tanulmányomban [3]. A mért rugalmas csúcs intenzitását az anyagtól (Z rendszám) és energiától függő elektrontranszport-folyamatok, a gerjesztés és detektálás szöge mellett a spektrométer detektálási szögterülete és válaszfüggvénye határozzák meg.

A rugalmas csúcs mért szélességét több tényező határozza meg: a spektrométer energiafelbontása (E -függő) mellett az elektronágyú által okozott félértékszélesség, mivel nem áll rendelkezésünkre elektron-monokromátor (kivéve a Szegei Egyetemet). A rugalmas csúcs fizikai kiszélesedését okozza részben a visszalökési hatás, részben kis energiájú ($< 0,5$ eV) veszteségek, például fononok [3].

A következőkben tekintjük át az EPES fejlődésének főbb állomásait:

- az elektronok rugalmatlan szabad úthosszának (IMFP) kísérleti meghatározása EPES alkalmazásával, az LTA Fizikai Kémiai Intézetével közös eredményünk [5, 6];
- az IMFP meghatározása referenciamintával a rugalmas csúcsok intenzitás arányából, Monte Carlo-számítással [6];
- az elektronok visszalökési hatása [4, 7];
- az elektron veszteségi spektrumok (REELS) kvantifikálása a rugalmas csúccsal [8];
- az elektronsugár refrakciója [3];
- az EPES alkalmazása Ar^+ ionmarásos mélységi elemzésnél [9];
- a felületi veszteségi paraméter (SEP) kísérleti meghatározása [10];
- rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetei NIST SRD 64;
- a SEP kísérleti meghatározása minta/referencia rugalmas csúcsok intenzitásából [11] standard elemekre (Si, Cu, Ni, Ag, Au);
- a SEP kísérleti meghatározása REELS abszolút (%) méréssel [12];
- vékony szigetelő rétegek EPES-vizsgálatai [13];

Jelenleg az EPES kvantifikálásával foglalkozunk, a cél a rugalmas csúcs meghatározása abszolút egységekben. Kvantitatív adatokat tartalmaz K. Goto CMA spektrométerrel mért, interneten megtalálható adatbázisa. Saját spektrométereink (ESA 31, DESA) kvantifikálása új feladat. Legújabb eredményeinkről a JVC-11 konferencián (2006, Prága) számoltunk be, ezeket egy későbbi közleményben fogjuk ismertetni.

Az EPES széleskörű alkalmazást nyert az elektrontranszport-folyamatoknál alkalmazott fizikai, anyagi paraméterek kísérleti meghatározásánál. Ilyen paraméterek:

- az elektronok rugalmas szórás hatáskeresztmetszete: (Nat. Inst. Standards Technology, USA), NIST 64 SRD adatbázis;
- az elektronok rugalmatlan szabad úthossza (IMFP), NIST SRD 71 [5, 6];
- az elektronok rugalmatlan szórás hatáskeresztmetszete, fajlagos energiavesztesége/cm [8];
- a felületi gerjesztési paraméter SEP (ISO 18115/7.80) [11, 12].

Az EPES-t széles körben alkalmazta a kvantitatív felület- és vékonyréteg-elemzés.

Az EPES volt tárgya számos disszertációnak (MTA cand, DSc, PhD, habil): hazai 5, francia 9, német 4, lengyel > 2 , dán > 1 . Tudomásunk van japán, orosz, ukrán, kínai, tajvani munkákról is.

2000 óta két évenként nemzetközi műhelyeket rendeztek (IMFP, ESS), 1982 óta az ECASIA, EVC, ECOSS, JVC stb. konferenciákon nagyszámú EPES-eredményről számoltak be. Az EPES-eljárást szerény hazai lehetőségek mellett fejlesztettük ki, nemzetközi hatása jelentős lett. Az EPES-sel kapcsolatos adatbázisokat nagyszámú kutató használja. Az NIST az EPES-módszert javasolta [6] az IMFP kísérleti meghatározására.

Hazánkban az EPES-kutatásokkal az MFKI–MFA-ban és az ATOMKI-ban foglalkoznak. A köszönetnyilvánításban felsorolt kollégák mellett lényeges szerepet játszottak: *C. Powell* (NIST), *K. Goto* (Nagoya), *Nakbodikin* és munkatársai (Kiev), *W. Werner* (TU Wien), *Ding* (Hefei, Kína), *Kwei* (Tajvan), *Gaukler* (Tübingen), *Salvat* (Barcelona), *S. Tanuma* (Japán), *J. Zemek* (Prága). A bevezetőmben említett 33 kutatóhely mellett számos egyéb kutatóhely közleménye jelent meg az EPES jelöléssel.

Köszönetet mondok azoknak, akikkel több közös közleményem jelent meg, így *Menyhárd Miklósnak*, *Sulyok Attilának*, *Gurbán Sándornak*, *Orosz Tamásnak* (MFA), *Tóth Józsefnek*, *Varga Dezsőnek*, *Tőkési Károlynak*, *Csernyi Istvánnak*, *Kövér Lászlónak* (ATOMKI) stb. Köszönet illeti az LTA Fizikai Kémiai Intézetét (*A. Jablonskit* és munkatársait), a Clermont-Ferrand-i Blaise Pascal Egyetemet (*B. Gruzat* és munkatársait), a Lyoni Claude Bernard Egyetemet (*P. Michelt*, *C. Jardint* és munkatársait), Odense Egyetemet (*S. Tougaard*), akik jelentős szerepet játszottak az EPES-kutatásokban. Külön köszönetet mondok *Tóth Józsefnek* (ATOMKI), akitől átvettem ábrámat.

Irodalom

1. G. GERGELY – Surf. Interface Anal. (SIA) 3 (1981) 201, Vacuum 33 (1983) 89
2. GERGELY GY. – Fizikai Szemle 36 (1986) 325
3. G. GERGELY – Progr. Surf. Sci. 71 (2002) 31
4. G.T. OROSZ et al. – Surf. Sci. 566–568 (2004) 544
5. A. JABLONSKI et al. – SIA 6 (1984) 291
6. C.J. POWELL et al. – J. Phys. Chem. Ref. Data 28 (1999) 19
7. D. VARGA et al. – SIA 31 (2001) 1019, Vacuum 61 (2001) 107
8. S. TOUGAARD et al. – Phys. Rev. B 43 (1991) 1651
9. M. MENYHARD et al. – J. Electron Spectrosc. 68 (1994) 653
10. S. TANUMA et al. – SIA 30 (2000) 212
11. G. GERGELY 1098 – SIA 36 (2004) 1098
12. T. NAGATOMI et al. – Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 224107
13. S. GURBAN et al. – SIA 38 (2006) 624
14. K. GOTO – <http://www.sasj.jp/compro>