

RÖNTGEN- ÉS ELEKTRONGERJESZTÉSES ELEKTRONSPEKTROMETRIAI MÓDSZEREK ÉS ALKALMAZÁSAIK

Tóth József
MTA ATOMKI, Debrecen

Az elektron-spektrometria a különböző atomfizikai, szilárdtest-fizikai, felületfizikai és felületkémiai (korrózió, katalízis, elektrokémia, ...) alkalmazások számára korszerű, informatív, sok esetben egyedülálló minőségi és mennyiségi kémiai elemzési módszer. Az utóbbi években előtérbe került nanotudományok stratégiai jelentőségű módszere lett a röntgenfoto-elektron-spektroszkópia (XPS: X-ray photoelectron spectroscopy), így várható, hogy a nanoszerkezetek (beleértve a néhány nanométer vastagságú ultravékony-rétegeket) és a bio-nanoszerkezetek tanulmányozásában fényes jövő előtt áll az XPS technika. A jelen munka áttekinti az XPS (ESCA) [1] módszer legalapvetőbb kémiai analitikai jellemzőit egy – a napelem technológiához kapcsolódó – alkalmazási példán keresztül (Al-mal nagyon erősen adalékolt – dopolt – ZnO kémiai analízise). A nagy feloldású rugalmas csúcs elektron-spektroszkópia (HR-EPES: high resolution elastic peak electron spectroscopy) elemvizsgálásra történő alkalmazását a LiF tanulmányozásával mutatjuk be. A gyakorlati szempontból is fontos alkalmazási példákon kívül egy rövid áttekintést adunk a saját nagyműszer fejlesztésekről, amelyek a szilárdtest felületanalitikai munkák megvalósításához nélkülözhetetlenek.

Az elektron-spektrometria elektromágneses sugárzás (fény), elektron, pozitron, atom, ion és más részecskenyaláb hatására a céltárgy atomjain szóródott, vagy azok atomhéjaiból keltett elektronok minőségi és mennyiségi elemzésével (körülbelül 0,1 atomszázalékos kimutathatósági határral) foglalkozó tudományterület. Az elektron-spektrum a kirepülő elektronok darabszámának mozgási energiájuk szerinti eloszlásfüggvénye. A mozgási energia mérése elektrosztatikus (vagy mágneses) analizátorok segítségével történik [2]. A cikk további részében az ilyen típusú spektrumok (színképek) elemzéséről lesz szó. Mivel elemzésről van szó, ezért beszélünk spektrometriáról (színképelemzésről), és nem csupán spektroszkópiáról (színképnézésről, vagy színképfelvételről), bár sokan már ezen utóbbi kifejezés alatt is elemzést értenek.

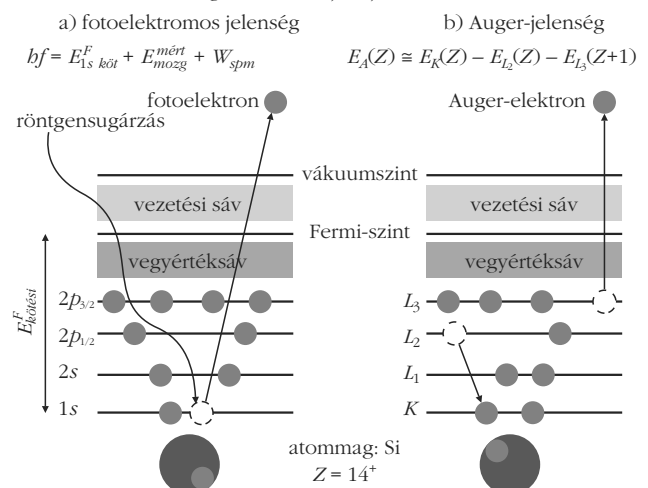
Amikor röntgen- vagy elektrongerjesztést alkalmazunk az atomhéj ionizációjára, akkor a véletlenszerűen bekövetkező folyamatban (elméletileg a kvantummechanika írja le), például egy szilárdtestmintát atomjainak különböző atomhéjaikról, eltérő valószínűséggel lépnek ki az elektronok és sokféle irányba repülnek. A szilárdtestminták esetében lesznek olyan elektronok, amelyek kis energiavesztéssel (néhány

vagy néhányszor 10 meV-os fononvesztéssel (rácsrezgések) és magmeglökési veszteséssel (kvázi rugalmas szórás: HR-EPES)) repülnek ki, de nagyon sok olyan is lesz, amelyek nagyobb energiavesztéssel (néhány vagy néhányszor 10 eV) szenvednek el. Az előbbieket nagy csúcsokként jelennek meg a spektrumban, az utóbbiak pedig kisebb csúcsokként (vesztésgic csúcsok: valenciaelektronok, plazmonok és belső héj elektronok okozta csúcsok) és folytonos „háttérként”. A szóban forgó fizikai jelenségeken alapuló módszer a rugalmatlanul visszaszórt elektronok energiavesztésgic spektroszkópiája (REELS: reflexion electron energy loss spectroscopy).

A röntgen fotoelektromos és az Auger-jelenség

Az XPS módszer fizikai alapja a fotoelektromos jelenség. Amennyiben az atomok belső héján levő elektronok kötési energiájánál nagyobb a gerjesztő röntgensugárzás energiája, a fotoeffektus (fényelektromos jelenség) bekövetkezik, azaz egy fotoelektron repül ki a gerjesztett atomhéjról, az 1. ábrán szereplő példában az 1s (K) héjról. A röntgensugárzás hatására végbemenő fotoelektromos jelenség segítségével az atommag közeli (ez energetikai szempontból értendő) atomi belső héjak tanulmányozhatók. A fotoeffektusban a gerjesztési energia egyrészt az atomi belső héjon kötött elektron kiszakítására fordítódik, másrészt az atomból kirepülő fotoelektron mozgási energiájára. Amennyiben ismert energiájú és keskeny

1. ábra. A fotoelektromos és az Auger-jelenség során az atomban lejátszódó gerjesztési és lyukelbomlási folyamatok egyszerűsített vázlatja. Az atomhéjak jelölése az ábrán kétféle, az XPS-ben (a) és az XAES, AES-ben (b) leginkább elterjedt jelölést követi.



Jelen munka Varga Dezső 70. születésnapja alkalmából készült az Atomfizikai Főosztály 2010. június 30-i szemináriuma keretében elhangzott előadás alapján, ATOMKI, Debrecen.

természetes vonalszélességű karakterisztikus röntgensugárzást alkalmazunk gerjesztő sugárzasként (például Al K_{α}), akkor az atomban a kötött elektronokra jellemző diszkrét energiaállapotok (1.a ábra), a karakterisztikus atomi kötési energiák meghatározhatók, ha megmérjük a fotoelektronok mozgási energiáját. Az atomi belső héjak kötési energiája jó közelítéssel a fotoelektromos egyenlettel adható meg:

$$E_{kötési}^F = hf - E_{mozgási} - W, \quad (1)$$

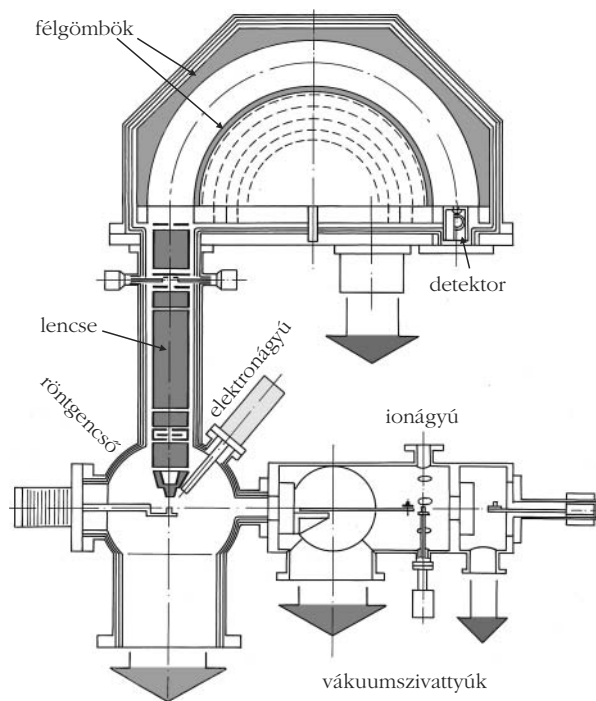
ahol f a gerjesztő röntgensugárzás frekvenciája, h a Planck-állandó, azaz hf a röntgensugárzás energiája; $E_{mozgási}$ a fotoelektronok mért mozgási energiája (azaz a spektrométerbeli mozgási energia); $E_{kötési}^F$ az adott atomhéj kötési energiája a Fermi-szintre vonatkoztatva és W a spektrométer kilépési munkája. A fotoelektron kirepülése után visszamaradt lyuk bomlásából származó elektronokat Auger-elektronoknak nevezzük (1.b ábra). A fotoeffektust követő spontán bekövetkező másodlagos folyamatok egyike az Auger-jelenség, a másik a karakterisztikus röntgensugárzás kibocsátása (emisziója), a két folyamat egymással versengő, a $Z < 25$ rendszám tartományban az Auger-folyamat sokkal nagyobb valószínűséggel megy végbe, mint a röntgensugárzás emissziója. Az 1.b ábrán vázlatosan bemutatott KL_2L_3 Auger-folyamatban három különböző atomhéj vesz részt, a K ($1s$) héj, amelyikről a fotoelektron kirepült, az L_2 ($2p_{1/2}$) héj, amelyikről a lyuk betöltődött és az L_3 ($2p_{3/2}$) héj, amelyikről az Auger-elektron kirepült. A Z rendszámú atom KL_2L_3 Auger-elektron energiája jó közelítéssel az említett három atomhéj kötési energiáiból a (2) formulával megbecsülhető,

$$E_A(Z) = E_K(Z) - E_{L_2}(Z) - E_{L_3}(Z + 1), \quad (2)$$

ahol E_A az Auger-elektron energiája (az Auger-elektron mért mozgási energiáját jól közelíti), az $E_K(Z)$ és a $E_{L_2}(Z)$ a K és az L_2 atomi héjak kötési energiái a Z rendszámú atomra vonatkozóan, az E_{L_3} pedig az L_3 atomi belső héj kötési energiája a $Z+1$ rendszámú atomra vonatkozóan (a $Z+1$ rendszámú atomra vonatkozó kötési energia használatával jobb közelítést kapunk az E_A kísérleti értékre mintha a Z rendszámú atomra vonatkozó L_3 kötési energiát használnánk). A röntgenerjesztéses Auger-elektron spektroszkópia az XAES (X-ray excited Auger electron spectroscopy), az elektron gerjesztéses Auger-elektron spektroszkópia pedig az AES (Auger electron spectroscopy).

Felület analitika

Az XPS felületérzékeny analitikai módszer [3]. A fent említett 1486,67 eV energiájú Al $K_{\alpha 1,2}$ gerjesztő röntgensugárzás körülbelül 0,1 mm (100 μm) mélységig is behatol a vizsgált szilárdtestminta belsejébe. A fotoelektronok és az Auger-elektronok a minta felületétől mérve csupán néhány nanométer (1 nm = 10^{-9} m) mélységből lépnek ki. Ez arra utal, hogy a szilárd



2. ábra. Az ATOMKI ESA-31 elektron-spektrométerének vázlata, paramétereit lásd a szövegben.

anyagban az elektronokra több nagyságrenddel nagyobb a gyengítési tényező, mint a röntgensugárzásra, azaz az elektron- és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatása az anyaggal nagyon különböző.

A HR-EPES a 0,5–5 keV primer-elektron-energiatarományban szintén jó felületérzékenységgűnek tekinthető, azaz felületanalízist végezhetünk az elektron-gerjesztéses technikával is.

Az XPS-XAES-AES és REELS-EPES-(HR-EPES) módszer együttes kombinálásával felületkémi (például a klasszikus nanotudományok területéhez tartozó katalitikus, kolloidikai és elektrokémiai), valamint felületfizikai (például a rugalmas elektronszórás csúcsok magmeglökés okozta finom szerkezetének a felderítésével) jelenségeket tanulmányozhatunk.

Az ESA-31 elektronspektrométer

Az ATOMKI-ban fejlesztett spektrométerek [2, 4–7] segítségével többféle alkalmazási területen (korrózió, félvezetők, napelemek, polimerek, ötvözetek stb.) értünk el tudományos eredményeket [4, 7–12] az elmúlt 30 év során. Az egyik legbonyolultabb elektron-spektrométerünk (2. ábra) az ESA-31 (gerjesztő forrásai: 2 röntgensugárzó (4 röntgenanód, 2 elektronágyú); elektronoptikája: félgömb-analizátor és lencserendszer; mérési tartománya: 0,01–10 keV; energiafeloldása: $3 \cdot 10^{-5}$; a vákuum nagysága: $5 \cdot 10^{-10}$ mbar), amelyet elsősorban az XPS-re és az XAES-re használjuk, de jelentős eredmények születtek a HR-EPES-sel is. A maguk idejében a 0,5–5 keV primerenergia-tartományban igen jónak számított az általunk mért rugalmas elektronszórás részleteinek feloldása [9] (HR-

EPES). A precíz és megbízható, üzembiztosan működő ESA-31 nagyműszerünk segítségével az ipar számára is tudunk vizsgálatokat végezni (például az atomerőmű rozsdamentes acélból készült egyes alkatrészeinek tanulmányozása is fontos feladatunk [13]).

ZnO(Al) kémiai analízise XPS-XAES-sel

A fotoelektronok és az Auger-elektronok nagy hányada (a rugalmasan szóródottak, pontosabban a kvázi rugalmasan szóródottak) egyaránt diszkrét csúcsokként jelennek meg az elektronspektrumokban. A csúcsok megfelelnek az atomi héjaknak, kötési energiájuk az illető atomra jellemző, amely alapján minőségi kémiai elemzés végezhető. Az elemek és az atomhéjak szerint a szelektivitás nagyon jó a röntgenfotoelektronspektroszkópia esetében, azaz az atomi belső héjak kötési energiái jól elkülönülnek és a kémiai környezet (a „vegérték”) függvényében is változnak (kémiai eltolódás). A kémiai eltolódások a belső atomhéjak esetében körülbelül a 0,1–10 eV nagyságúak. Az XPS-ben gerjesztésre leggyakrabban az 1486,67 eV energiájú, 0,9 eV szélességű (a csúcsmagasság felénél) Al $K_{\alpha 1,2}$ karakterisztikus röntgensugárzás használatos. Az ESA-31 elektronspektrométer relatív energiafeloldása – definíció szerint a spektrométer által okozott vonalkiszélesedés (ΔE) osztva az elektron mozgási energiájával (E) – a mérések során változtatható. Két tipikus értéket említek: $\Delta E/E = 4 \cdot 10^{-4}$ (XPS) és $3 \cdot 10^{-5}$ (HR-EPES). Ezek a feloldásértékek megfelelőek (1000 eV-os mozgási energiájú, teljesen monokromatikus, Dirac-delta függvénnyel ábrázolható elektronok esetén 0,4–0,03 eV kiszélesedést okoz a spektrométer) ahhoz, hogy az atomi belső elektronhéjak egymástól jól különváló természetes, vonalas spektrumát ne mossák össze, hanem meghagyják vonalasanak, és a HR-EPES-sel mérhető rugalmas elektronszórás csúcs finom részleteit is feloldhassuk. A matematika nyelvén megfogalmazva: a gerjesztő röntgensugárzás, a spektrométer és a valamilyen természetes szélességgel rendelkező fotoelektrononvonalfüggvényeinek konvolúciós szorzataként előálló függvény, azaz a mért spektrum „vonalas” marad, ilyen módon a finom kémiai részletek feloldhatók. A fotoelektronvonalaknak megfelelő kötési energia – a spektrumban a vonalak (csúcsok) helyzete –, amely a kémiai állapotra jellemző, 0,1–0,2 eV pontossággal meghatározható. Gyakran előfordul, hogy nemcsak a vonal helyzete, hanem a vonal szélessége is hordoz kémiai információt. Különösen akkor fontos ez, amikor a különböző kémiai állapotok olyan kis kémiai eltolódásokat eredményeznek, amelyeket a fent említett igen jó 0,4–0,5 eV energiafeloldás ellenére sem tudunk szétválasztani (mert a röntgengerjesztés által okozott kiszélesedéssel együtt értendő a teljes instrumentális kiszélesedés). Ilyen esetekben a fotoelektronvonalak (csúcsalak) elemzésével is finom kémiai részletekre lehet következtetni. Amennyiben lehetőség van rá, érdemes monokromatikusabbá tenni a gerjesztő

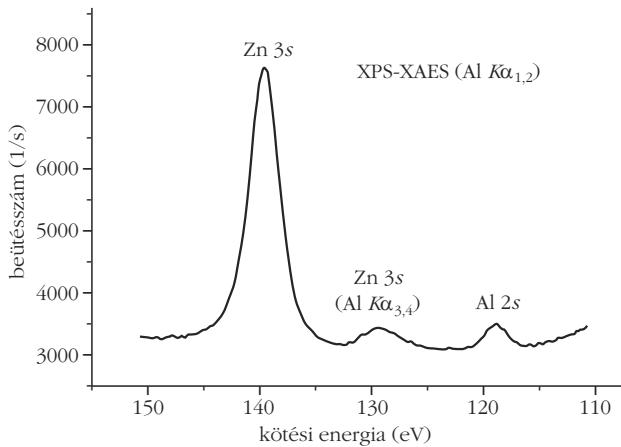
röntgensugárzást kristály- vagy multiréteg-monokromátor alkalmazásával, azaz az Al $K_{\alpha 1,2}$ 0,9 eV természetes szélességgel rendelkező vonalából érdemes kivágni 0,6 eV szélességűt, vagy még finomabb részletek feloldására akár 0,2–0,3 eV is elérhető, sőt a szinkrotronoknál körülbelül 10 meV-os szélességű gerjesztéssel is lehet dolgozni. Ekkor már az is természetes, hogy az XPS-nél körülbelül $3 \cdot 10^{-5}$ relatív energiafeloldással érdemes dolgozni, hogy a teljes instrumentális vonalszélesítő hatás elhanyagolható legyen a természetes vonalkiszélesedéshez képest.

Az elektronspektrumban lévő vonalak (csúcsok) területeinek meghatározásával az XPS mennyiségi analízisre is felhasználható (kvantitatív XPS). Az XPS kísérletek során nyert fotoelektronvonalak területeiből egy adott minta, például a napelemek ablakaként ismert ZnO(Al) atomi koncentráció arányai a (3) formulával adhatók meg (végtelen vastagnak tekintett és homogén minta, a felületi fedő és szennyező réteg elhanyagolásával, Al és Zn arányra konkretizálva):

$$\frac{n_{\text{Al}}}{n_{\text{Zn}}} = \frac{I_{\text{Al}2s}}{I_{\text{Zn}3s}} \frac{\sigma_{\text{Zn}3s}(E_{\text{röntgen}})}{\sigma_{\text{Al}2s}(E_{\text{röntgen}})} \left(\frac{E_{\text{mozg}}(\text{Zn}3s)}{E_{\text{mozg}}(\text{Al}2s)} \right)^{1,75}, \quad (3)$$

ahol n az atomi koncentráció; I a mért fotoelektroncsúcs területe egy adott atomhéjra; $\sigma(E_{\text{röntgen}})$ a fotoionizációs hatáskeresztmetszet, amely a gerjesztő röntgensugárzás energiájától, az elem fajtájától és az atomhéjtól függ; E_{mozg} a fotoelektron mozgási energiája; az elektronspektrométer hatásfoka (az általunk használt FRR, azaz állandó fékezési arányú üzemmódban) a fotoelektron mozgási energiájának lineáris függvénye, a rugalmatlan szórás közepes szabad úthossz (IMFP) pedig az E_{mozg} 0,75-os hatványával közelíthető. A képletben az $E_{\text{mozg}}^{1,75}$ -os hatványa a spektrométer-hatásfok lineáris függvényéből (1-es kitevő) és az IMFP 0,75-os hatványfüggéséből tevődik össze. Jelen példában a detektor hatásfokának energia szerinti változása elhanyagolható. A (3) formula tetszőleges elem párra alkalmazható.

Az MTA MFA-val együttműködésben, NKTH és OTKA projektek keretében, a CIGS (Cu-In-Ga-Se₂) vékonyréteg napelemek fejlesztéséhez járult hozzá kutatócsoportunk a ZnO(Al) rétegek felületi kémia állapotának és atomi összetételének vizsgálatával. A CIGS napelem ablakrétegének jó vezetőnek kell lennie, a széles tiltott sávú (3,34 eV) ZnO félvezetőt Al-mal igen nagymértékben adalékolva (sokkal nagyobb mértékű az adalékolás, mint amit a félvezetőiparban az erősen adalékolt kifejezés alatt értenek) ez elérhető, közben az ablak nagyon jó átlátszósága, fényátteresztő képessége (85–90%) is megmarad. Az Al-mal erősen adalékolt ZnO minta készítésénél Zn_{95,3}Al_{4,7} ötvözetből indultak ki. DC magnetronnal Ar⁺ plazmában O₂ gáz adagolással, reaktív porlasztással végezték a minta készítését Na-üveg szubsztrátra [10]. *A fotoelektron-spektrum (3. ábra) az Al-oxid állapotára jellemző, amit XAES-sel, az Al KL_2L_3 Auger-vonal mérésével is igazoltunk. A kísérletileg meghatározott Zn 3s és Al 2s fotoelektroncsúcsok területeinek arányá-*



3. ábra. ZnO(Al) vékonyréteg Zn 3s és Al 2s XPS spektruma.

ból, a szóban forgó atomhéjak fotoionizációs hatáskeresztmetszeteinek, a fotoelektronok rugalmatlan elektronszórás szabad úthosszainak (a mintában) és a spektrométer detektálási hatásfokának ismeretében az atomi koncentráció arányok meghatározhatók (lásd (3) formula). Az eredeti ötvözet összetételét (4,7 atom%) jól követi az oxid keverék összetétele. Az XPS méréssel az oxid formában jelenlevő Al koncentrációját 3–5 atom% közöttinek találtuk.

A LiF tanulmányozása HR-EPES-sel

Abban az esetben, ha a gerjesztés elektronokkal történik, a teljes energiaspektrum-tartományban mérjük azokat az elektronokat, amelyek rugalmas szórás követően lépnek ki a mintából (HR-EPES), és mérjük azokat is, amelyek rugalmatlan szórás követően karakterisztikus energiavesztéssel lépnek ki (REELS). A veszteségi spektrum tartományban például grafit esetében a kettős kötésre jellemző $\pi \rightarrow \pi^*$ átmenet energiavesztési csúcsa, vagy Al, Si, GaAs stb. esetében a plazmon energiavesztési csúcsok – és természetesen a szekunder folyamatokból eredő Auger-csúcsok is – karakterisztikus jellemzői egy adott kémiai anyagnak. A HR-EPES mérésekben a rugalmas csúcsok energiahelyzetei függenek a gerjesztő primer elektron energiájától és a minta atomjainak tömegétől. A vonaleltolódás elemenként más és más lesz. A rugalmas csúcs energia eltolódása (E_{r0}) a szórt elektron és a szóró atommag tömegarányán és a primer elektron energiáján (E_0) kívül függ a mérési geometriától is, pontosabban az úgynevezett szórás szög függvénye (a Θ_0 szórás szög az elektron detektálási iránya a primer elektronnaláb irányához képest), lásd a (4) formulát:

$$E_{r0} = \frac{4 m E_0 \sin^2(\Theta_0/2)}{M}, \quad (4)$$

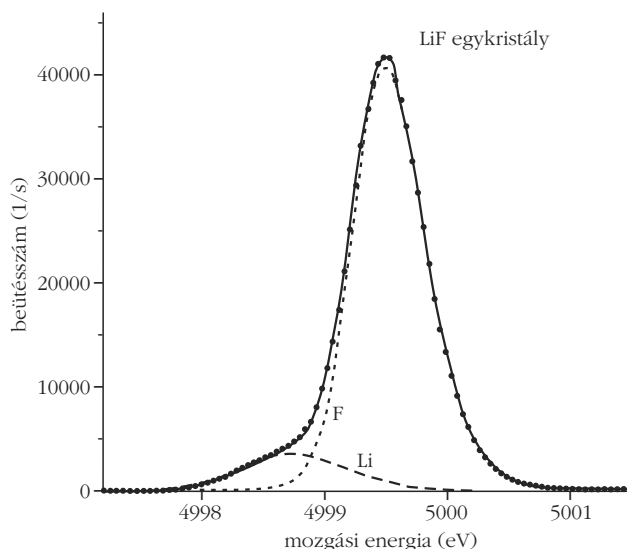
ahol E_{r0} a primer elektron energiaeltolódása, m az elektron tömege, M az elektron által meglökött atommag tömege, E_0 a primer elektronenergia, Θ_0 pedig a szórás szög.

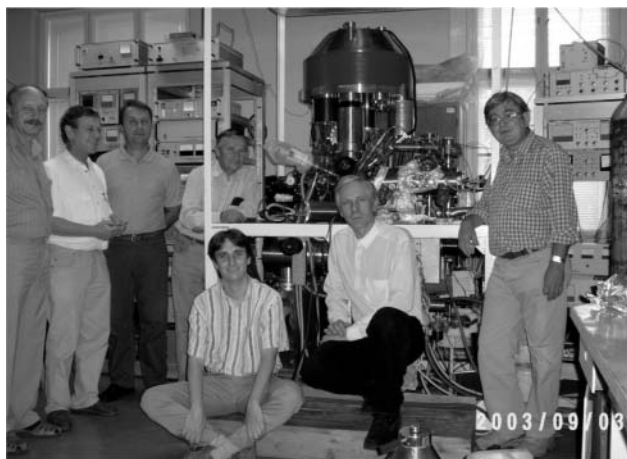
Az elektronszórás kísérletben a nagyon jó energia feloldású ($\Delta E/E = 3 \cdot 10^{-5}$) ESA-31 spektrométerünk segítségével [7] mért rugalmas csúcs (például 5 keV primer energiánál és 130° szórás szögnél) mennyiségi elemzést tesz lehetővé többkomponensű anyagokon. A magmeglökési folyamat miatt az elektron energiája egy adott primer energiánál és egy adott szórás szögnél annak függvényében változik, hogy mekkora tömegű atomon szóródott. Az elektron rugalmas szórás hatáskeresztmetszete az atom rendszámával változik, ez teszi lehetővé a mennyiségi elemzést. Ilyen anyag többek között a LiF, ennek segítségével vizsgáltuk a rugalmas szórás jelenségét és bizonyítottuk a HR-EPES analitikai eszközként való alkalmazhatóságát.

A LiF rugalmas (pontosabban kvázi rugalmas) csúcsában (4. ábra) a különálló csúcsok a Li és a F. A magmeglökés miatt a F-nál kisebb tömegű Li atomon történt szóródás során az elektron nagyobb energiát veszít, mint a F-ról visszaszórt elektron. A (4) formula az energia és az impulzus megmaradás törvényének alkalmazásával elemi számolással levezethető, klasszikus ütközést feltételezve. A (4) formula 5 keV energiájú primer elektrorra, 130° szórás szögnél 1,3 eV energiaeltolódást ad a Li rugalmas csúcsára, 0,5 eV-ot a F-éra, a különbség 0,8 eV. Ezeket az értékeket kísérleti eredményként is megkaphatjuk az összetett rugalmas elektroncsúcs komponenseinek illesztésével. A csúcsterületek arányából (egyszeres szórás feltételezve), figyelembe véve a Li-ra, és a F-ra egy adott primer energiánál (például 5 keV-nél) a rugalmas elektronszórás hatáskeresztmetszeteit, a Li és a F atomok számának egy az egybe aránya jó közelítéssel visszakapható [9].

Az EPES módszert főleg a rugalmatlan elektronszórás közepes szabad úthosszak (IMFP: inelastic mean free path) meghatározására használtuk [11]. A (3) formulában implicit jelen van az IMFP, azaz a kvantitatív XPS számára nélkülözhetetlen paraméter, ami nemcsak a primer elektron energiájától, hanem a szilárd minta anyagi minőségétől is függ. Fentebb már

4. ábra. A LiF egykristály minta 5 keV primer energiánál HR-EPES-sel mért kvázi-rugalmas csúcsa [5].





5. ábra. Az ESA-31 körüli elektronspektroszkóposok baráti köre: (balról-jobbra) Kövér László, Ricz Sándor, Cserny István, Varga Dezső, Berényi Zoltán, Tóth József, Kövér Ákos.

említettem, hogy a HR-EPES-sel jelentős eredményeket értünk el az ESA-31 spektrométer segítségével végzett kísérleti munkáinkban. A felülettudományban, egyes speciális esetekben, különleges információ nyerhető a HR-EPES-sel. A közepes primer elektronenergia tartományban, például 2–5 keV-ig, a H direkt kimutatását elsők között valósítottuk meg [12].

A HR-EPES általánosságban nem alkalmazható kvantitatív analízis céljára (például a szóban forgó kis és közepes primer elektronenergiáknál, 0,5–5 keV, a közepes rendszám tartományban a szomszédos vagy egymáshoz közeli rendszámok nem szeparálhatók), de speciális esetekben igen, például egy kis rendszámú elem mellett egy nagy rendszámú elem igen kis koncentrációban (az elektronspektroszkópiában nem szokványos 0,01%-os koncentrációkat kell ez alatt érteni) is meghatározható (néhány perces mérési idővel), ami nemcsak tudományos szempontból érdekes, hanem az alkalmazások (orvos-biológiai, ipari stb.) számára is nagyon fontos lehet.

Összefoglalás helyett

Vallomás: az ATOMKI-ban az elektronspektroszkópiának több évtizedes hagyománya vannak [2, 4]. Számomra nagy örömet jelentett, hogy a *színes, nagy fantáziát és sok intuíciót igénylő fejlesztési és tudományos kutatási munkákba* bekapcsolódhattam az 1980-as évek elejétől. Varga Dezsőtől, mint az általam

használt elektron-spektrométerek fejlesztőjétől, a közös munkák során sokféle műhelytitkot sikerült tanulnom. Ő volt többek között az első hazai XPS röntgenforrás (1970-es évek első fele) fejlesztője. Számomra ez történelem, pontosabban továbbélő hagyomány – ez derült ki az XPS röntgensövek fejlesztése során. Nemcsak a műszerek alkotásában volt nagy hatással rám ez az iskola, hanem a spektroszkópiai alapok és általában a tudományos kutatási módszerek megismerésében is.

Irodalom

1. Szepes L.: A kémiai kötés tanulmányozása gázfázisú fotoelektron-spektroszkópiával. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 365.
2. Kövér Á.: Elektrosztatikus elektron-spektrométerek fejlesztése az ATOMKI-ban. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 339.
3. Kövér L.: Elektronspektroszkópia és felületkutatás. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 120.
4. Varga D.: β -spektroszkópiától az atomfizikáig. *Fizikai Szemle* 54 (2004) 117.
5. Varga D., Kádár I., Kövér Á., Kövér L., Móri Gy.: An electron spectrometer of double-pass cylindrical mirror type for nuclear spectroscopy and atomic physics. *Nuclear Instruments and Methods* 154 (1978) 477.
6. Varga D., Kádár I., Kövér Á., Cserny I., Móri Gy., Brabec V., Dragoun O., Kovalik A., Adam J.: Electrostatic spectrometer for measurement of internal conversion electrons in the 0.1–20 keV region. *Nuclear Instruments and Methods* 192 (1982) 277.
7. Kövér L., Varga D., Cserny I., Tóth J., Tőkési K.: Some applications of high-energy, high-resolution Auger electron spectroscopy using bremsstrahlung radiation. *Surface and Interface Analysis* 19 (1992) 9.
8. Spalek A., Dragoun O., Kovalik A., Yakushev E. A., Rysavy M., Frána J., Brabec V., Novgorodov A. F., Cserny I., Tóth J., Varga D., Kövér L.: Study of the conversion electron and XPS spectra of radioactive ^{57}Co sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 196 (2002) 35.
9. Gergely G., Menyhárd M., Benedek Zs., Sulyok A., Kövér L., Tóth J., Varga D., Berényi Z., Tőkési K.: Recoil broadening of the elastic peak in electron spectroscopy. *Vacuum* 61 (2001) 107–111.
10. Németh A., Tóth A. L., Horváth E., Kövér L., Tóth J., Volk J., Mizsei J., Lábadi Z.: Study of the effect of different plasma density areas on the properties of ZnO thin films deposited by DC reactive sputtering. *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona, Spain, 6–10 June, 2005. Eds: W. Palz, H. Ossenbrink, P. Helm. München, WIP-Renewable Energies (2005) 1847–1850.
11. Gergely G., Konkol A., Menyhárd M., Lesiak B., Jablonski A., Varga D., Tóth J.: Determination of the inelastic mean free path (IMFP) of electrons in germanium and silicon by elastic peak electron spectroscopy (EPES) using an analyser of high resolution. *Vacuum* 48 (1997) 621–624.
12. Orosz G. T., Gergely G., Menyhárd M., Tóth J., Varga D., Lesiak B., Jablonski A.: Hydrogen and surface excitation in electron spectra of polyethylene. *Surface Science* 566 (2004) 544–548.
13. Baja B., Németh Z., Kádár P., Varga K., Nagyné Szabó A., Oravetz D., Homonnay Z., Kuzmann E., Kövér L., Varga D., Cserny I., Tóth J., Schunk J., Patek G.: Korróziós-eróziós tendenciák a Paksi Atomerőmű gőzfejlesztőiben. *Korróziós Figyelő* 47 (2007) 62–71.

HIVATKOZÁS

Az 2010/12 és 2011/1 számban megjelent *Hogyan is mozog egy tömeges rugó?* cikkem második részének véglegesítése után tudtam meg, hogy korábban *Wiedemann László* az azóta a *Fizikai Szemlébe* olvadt *Magyar Fizikai Folyóiratban* hasonló tárgyú cikket jelentetett meg *A mergeterbelt rugalmas szál rezgése* (XXXV. kötet, (1987–88.) 6. füzet 499. old.) címmel.

Ebben egy véges tömegű, függőleges, rugalmas szálból és egy rá akasztott súlyból álló rendszer esetét vizsgálja, részletesen elemzi a mozgásegyenleteket, a normál módusokat és egy speciális kezdeti feltétel mellett megvalósuló mozgást is. A munkát tisztelettel ajánlom az érdeklődők figyelmébe.

Woynarovich Ferenc