

Külön meg kell említeni *Somogyi Istvánnét* – egy megszűnő KFKI-intézet, az MSZKI⁷ korábbi gazdasági vezetőjét –, aki vállalkozott a gazdasági igazgatói szerepre, és aki le tudta vezényelni mind pénzügyileg, mind humánpolitikai ügyintézőként a rövid távon rendkívül hálátlan feladatot.

Az MFKI laborjai, témái közül néhány azonban felszámolódott, átalakult, például kisvállalattá. A legnagyobb költözési veszteség két MFKI-s témát érintett: a vegyületfelvevő kutatást, ugyanis az úgynevezett MOCVD-technika⁸ áttelepítésének környezetvédelmi szempontjai a budai hegyekben teljesíthetetlennek bizonyultak (csak az LPE-technikát tudtuk áttelepíteni), valamint a magas olvadáspontú fémek kutatásának témáját. Ez utóbbi, korábban súlyponti és rendkívül sikeres

⁷ KFKI Mérés- és Számítástechnikai Kutató Intézet

⁸ MetalOrganic Chemical Vapor Deposition

⁹ Hányódtunk, de nem merülünk el...

témánál az ipari érdeklődés lecsökkenése és a tudományos utánpótlás szinte teljes hiánya miatt kellett a laboratóriumok áttelepítésétől eltekinteni. De a leginkább értékesíthető eredményt, a környezetbarát volfrám-, illetve molibdén-visszanyerésnek a szabadalomértékű megoldását (*Vadasdi Károly*) egy, az MFA-val szoros együttműködésben álló kisvállalkozásban (Tungslab) sikerült túlélteni és sikerre is vinni.

A jelen összeállítás további fejezetei alapján a Tisztelt Olvasó eldöntheti, hogy a küzdelem megérte-e? Különösképpen ma, az új, az uniós Magyarország gazdasági nehézségeinek kulminálása idején éles a kérdés, amikor a következő ötven év elérését kell a mai vezetésnek a célkeresztbe állítania – a szakmának az emberiség összérdekében játszott szerepe fontosságának tudatában.

A tudásunk ma is eladható – és ezen írás idején látszik, hogy az ötven év beérett.

„Fluctuavimus, nec mergimur”⁹

ELEKTRONTRANSZPORT-PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

A LEED-től az EPES-ig

Gergely György, Gurbán Sándor,
Sulyok Attila, Menyhárd Miklós

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Hazánkban a felületfizikai kutatások 1968-ban kezdődtek. 1967-ben *Szigeti György* akadémikus javaslatunkra jóváhagyta egy akkor korszerű, ultravákuumban (10^{-10} mbar) működő, fékező rácsozott analizátor (RFA) beszerzését, amit 1968-ban üzembe helyeztünk. A nemzetközi felületfizikai kutatások atomosan tiszta felületeken a 60-as években indultak. A legtöbbször alkalmazott kísérleti módszer a kisenergiájú elektron-diffrakció (LEED) volt. Az 1964-ben induló *Surface Science* folyóirat első számában az első oldal *Farnsworth* LEED-közleményével kezdődik.

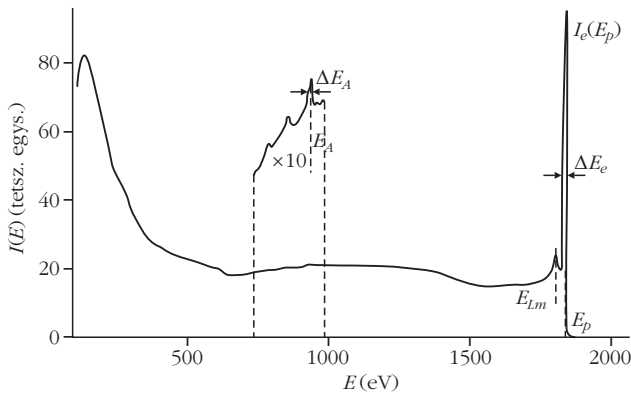
1968-ban a felületfizikában forradalmi újdonság volt *L. Harris* cikke, az Auger-elektron-spektroszkópia megjelenése. Ennek nemzetközi jele AES, *N. Taylortól* származik, aki a Varian cég LEED-berendezését továbbfejlesztve megvalósította, és kereskedelmi forgalomba bocsátotta az első Auger-spektrométert.

Az AES történetéről közlemény jelent meg a *Fizikai Szemlében* [1]. Rövidesen a Varian után a VG is elkészítette a kiegészítő elektronikai egységeket 4 rácsozott RFA-spektrométeréhez AES célra. Javaslatunkra *Szigeti György* akadémikus jóváhagyta VG-spektrométerünkhöz az AES elektronika beszerzését, az akkori devizahiány miatt azonban ez csak 1973-ban valósult meg [2]. Az RFA-spektrométerek mellett *Palmberg* (Physical Electronics) már 1969-ben kifejlesztette a hengeres tükör (CMA) spektrométert, nagymértékben javítva az Auger-spektrométer energiafeloldását és érzékenységét. A Riber OPC 103 CMA beszerzését az MFKI-ban 1977-

ben sikerült megvalósítani. Ehhez a Riber cég UHV-kamrarajzot is adott. A teljes mérőrendszert az MFKI-ban építettük fel, a Tungslab Kutatóval és a KFKI-val együttműködve. A spektrométer UHV-kamrát *Barla Endre* vezetésével *Zalaba Andor* és munkatársai építették meg, a KFKI elektronikát *Tóth Ferenc* fejlesztette ki számunkra. A KFKI NV-255 szinkron detektorát alkalmaztuk. MFKI-fejlesztés volt a spektrumok felvétele analóg üzemmódban [3].

A további fejlesztéssel a KFKI 1024 csatornás analizátorához az MMG SAM 85 kisszámítógépet csatlakoztattuk, így megvalósult a spektrumok automatikus gyűjtése és adatfeldolgozása. 1998-ban helyeztük üzembe a Staib DESA 100 típusú spektrométerét. Nem részletezzük a továbbiakban az alkalmazott mérőberendezéseket. Kutatásaink jelentős hányadát az MTA ATOMKI-val együttműködve végeztük, az ATOMKI által kifejlesztett ESA 31 félgömb (HSA) spektrométerrel, melynek kiváló az energiafeloldása, de igen kicsi és energiafüggő a detektálási szögterülete.

A felsorolt spektrométerekkel végeztük a felületek és vékonyrétegek kvantitatív AES-elemzéseit, az energiavesztési spektrometriát, valamint a közleményünkben ismertetett transzportparaméterek meghatározását, főként a rugalmas elektronszórás spektrometria (EPES) segítségével. A továbbiakban atomosan tiszta felületekről beszélünk. A közleményünkben LEED és AES-sel kapcsolatos fogalmak megtalálhatók két tanulmányunkban [4, 5].



1. ábra. Egy tipikus emissziós spektrum, amit E_p energiájú primer elektronokkal gerjesztettünk.

Elektrontranszport-paraméterek

Szilárdtest felületét elektronokkal bombázva a kilépő elektronok folytonos $N(E)$ spektrumot alkotnak, melyre lényegesen kisebb intenzitású csúcsok rakódnak. Az 1. ábra tipikus spektrumot mutat, mely $E = 0$ és E_p (primér) energia között 3 tartományt fog át. 50 eV alatt szekundér elektronok (SEE) keletkeznek. Az 50 eV ISO-szabvány, ezen elektronok integrálja a szekundéremissziós tényező, anyagi paraméter. Ezzel nem foglalkoztunk.

Az 50 eV – E_p tartományban a folytonos spektrumot a visszaszórt elektronok alkotják. A rugalmas+rugalmatlan (energiavesztéses) szórt elektronok integrálja a visszaszórás hozam (backscattering yield, BY) anyagi paraméter (ISO 18115/5.94:2001), melyet az E_p energia és a primér elektronok beesési szöge határoznak meg. A teljes féltérre vonatkozik. BY számításával és mérésével gazdag irodalom foglalkozik. Spektrométerünk azonban csak kis szögtartományban detektálja az elektronokat. Saját $N(E)$ spektrumainkat a Riber OPC 103 CMA-val vettük fel [3], a detektálás szögtartománya $42 \pm 4^\circ$, a primér elektronok merőlegesen érik a mintát. Így a detektált elektronok a teljes BY kis hányadát jelentik csupán. Az $N(E)$ spektrumokból határoztuk meg az AES anyagi paramétereit, az Auger-visszaszórás tényezőt (ISO 11815/5.90) [3]. Az $N(E)$ spektrumok kvantifikálása jelenlegi kutatásaink egyik témája.

Tekintsük át a transzportfolyamatokat. A belépő vagy távozó elektron a felületen energiavesztéget szenved. Az anyag belsejében kölcsönhat, szóródik az atomokon. A szórás lehet rugalmas (vesztés nélkül), vagy rugalmatlan. A rugalmas szórás hatáskeletkezési mérete nagyobb, mint a rugalmatlané. A két szórás között megtett közepes úthosszat szabad úthossznak nevezzük. A rugalmas szabad úthossz $\lambda_e < \lambda_i$ rugalmatlan szabad úthossz (IMFP). Az elektron pályáján eléri λ_r -t, majd energiája csökken.

Az elektron pályája folyamán még sok szóródást szenved, energiája eléri a SEE-tartományt. Minden egyes rugalmas szórás folyamat lényeges irányváltást is eredményez, mely végül meghatározza az elektronok szögeloszlását. Egyetlen rugalmatlan szórás után az impulzus megmaradása következtében az elektron csekély irányváltást szenved.

Az elektronok kis hányada (néhány százalék) csupán rugalmas szórást szenved, majd eljut a felülethez és kilép. Ezek alkotják a rugalmas csúcsot, energiájuk $E = E_p$. $N(E_p)$ a legintenzívebb csúcs a spektrumban. A rugalmas csúcs elektron-spektrometria az MFKI eredménye [6]. 1981 óta folyamatosan fejlesztjük, ma már 34 kutatóhely foglalkozik vele, 2006-ban összefoglaló közleményünk jelent meg [7]. Jele EPES (ISO 18115/7.26:2001/PDAM 2).

A transzportfolyamatokat Monte-Carlo (MC) számítógéppel szimuláljuk [6]. A MC-analízis felhasználja a NIST (National Institute of Standards and Technology) SRD 64 (rugalmas elektronszórás), továbbá SRD 71 (IMFP) adattárakat. Az MC-szimuláció a következő kísérleti eredményekre terjed ki: a teljes $N(E)$ spektrumok, az Auger-visszaszórás tényező, az $N(E_p)$ rugalmas csúcs, a veszteségi spektrumok, mindezek integrálja a 2π térfelre, továbbá szögeloszlása. Itt szembesülünk a kísérleteknél használt elektron-spektrométerrel, annak szögviszonyaival. Általában a spektrométer csak kis szögtartományban detektálja az elektronokat. Lényeges a spektrométer $R(E)$ válaszfüggvénye, illetve $T_r(E)$ transzmissziója.

Veszteségi és emissziós csúcsok

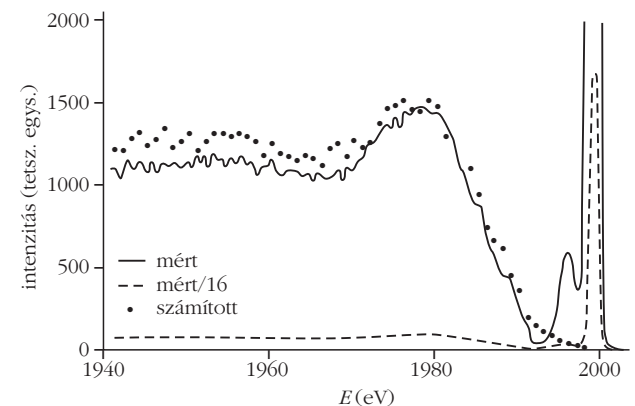
A folytonos $N(E)$ spektrumra meghatározott E energiáknál igen kis intenzitású csúcsok rakódnak. Ezek:

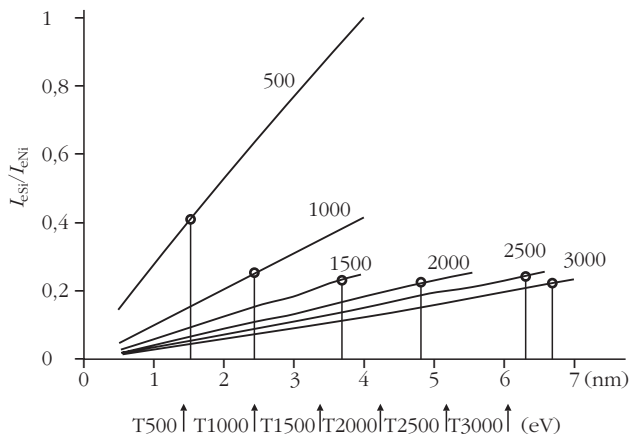
- Ionizációs, veszteségi csúcsok, az ionizációs spektrometria (ILS) foglalkozik velük. Az ATOMKI ESA 31 spektrométerével kis könyökként jelent meg az $N(E)$ spektrumban a Si és a Ni törzselektronjának gerjesztésénél [7].

- Az EA Auger-csúcsok anyagi paraméterek, energiájuk független E_p -tól. Értékük megtalálható kézikönyvekben, adattárakban. Az Auger-elektron-spektroszkópia (AES) a felületi és vékonyréteg-analízis hatékony módszere [5].

- Az E_p közelében elhelyezkedő veszteségi tartományt az anyag veszteségi függvénye, a dielektromos függvény képzetes része határozza meg. Az REELS, veszteségi spektrometria reflexiós módban szolgáltatja a kísérleti eredményeket. A 2. ábra mutatja poliétilén számított és mért REELS–EPES spektrumát, mely-

2. ábra. A poliétilén számított és mért REELS–EPES spektruma. A hidrogén jelenléte miatt észleljük a felhasadást.





3. ábra. Mestergörbék a Si/Ni-re különböző E_p energiák mellett, amelyekből a fejlettebb szoftverek megjelenése előtt a rugalmatlan szabad úthosszt meg lehetett határozni.

nek érdekessége, hogy a rugalmas csúcs felhasad és a hidrogén rugalmas csúcsa megjelenik a visszalökési hatás következtében [6]. Az MFKI-ATOMKI-Varsóval közös munkánkban elsőként észleltük az elektron-spektrumban a H-t. A transzportfolyamatok MC-szimulálása *Sulyok Attila* eredménye.

Az összes felsorolt csúcsokhoz tartozó elektron felületenergia-veszteséget szenved, mely a csúcs intenzitását csökkenti. Ugyanez érvényes a folytonos $N(E)$ spektrumra is.

Fizikai transzportparaméterek kísérleti meghatározása

A következőkben három transzportparamétrőről szövelünk, melyeket EPES, illetve REELS-EPES alkalmazásával határoztunk meg:

Rugalmatlan szabad úthossz

A kvantitatív felület- és vékonyréteg-elemzés alapvető paramétere az IMFP λ_i rugalmatlan szabad úthossz. Az elemzés információs mélységét, tartományát az IMFP határozza meg. Az elektronok szökési mélysége, vagy csillapodási hossza $\lambda_a < \lambda_i$, a többszörös rugalmas szórás következtében. Már 1981-ben, első EPES-közleményünkben [6, 7] kimutattuk, hogy a rugalmas csúcs intenzitását λ_i határozza meg a rugalmas visszashórással együtt. 1984-ben az LTA Fizikai Kémiai Intézetével közös munkánk volt λ_i kísérleti meghatározása EPES segítségével, akkor még Al referenciaminta segítségével. Később több, jobb referenciát használtunk és fejlesztettünk ki [6, 7]. 1989-ben *Alexander Jablonski*val közös munkánk volt a kvantitatív eljárás [8]. Jablonski fejlesztette ki a MC-analízist. Akkor még számított mestergörbékét használtunk, a mért rugalmas csúcs arányt számította Jablonski a λ_i szabad paraméter függvényében. A 3. ábra mutat ilyen mestergörbékét Si/Ni-re, különböző E_p energiák mellett. Ma már Jablonski EPESWIN programcsomagjával dolgozunk.

Az IMFP-ről Jablonski és Powell (NIST) tanulmányt közöltek, összefoglalva az addigi eredményeket. Javá-

solták az EPES-eljárás alkalmazását λ_i kísérleti meghatározására. 1999-ig és azóta is ezt alkalmazták a Clermont-Ferrand, Tübingen, Stuttgart Hohenheim, TU Wien, Boroszló, Szentpétervár stb. egyetemeken. Akkor még elhanyagolták a felületi veszteségeket. Számos fémre (Ni, Cu, Ag, Au, W stb.), félvezetőre (Si, Ge, III-V) és néhány szigetelőre (SiO₂, MgO, Al₂O₃ stb.) határoztuk meg $\lambda_i(E)$ -t a nagyszámú külföldi munka mellett. Kiemeljük az LTA Fizikai Kémiai Intézetével vezető polimérekén végzett vizsgálatainkat.

Felületi gerjesztési paraméter (SEP)

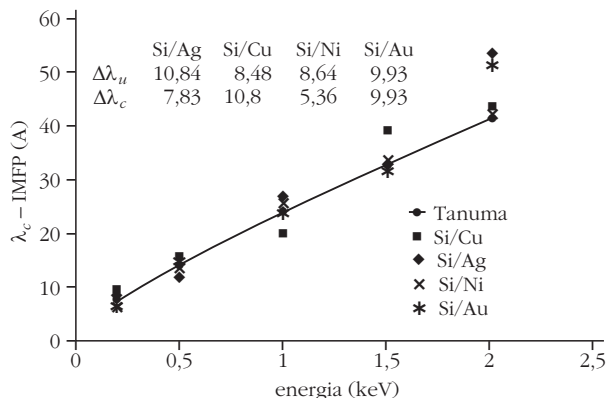
2007-ig a referenciaminta-módszert használtuk, de már 2004-ben kezdtük a felületi veszteségi korrekciót. Itt jutunk el a felületi veszteségi paraméterhez (SEP), melyet javaslatunkra már az ISO is definiált (18115/7.74:2001/PDAM 2). A SEP-paraméter jelenti a felületen áthaladó elektron által gerjesztett elektronok számát, mely Poisson-típusú folyamat. A rugalmas csúcs intenzitását csökkenti a számított, elméleti értékhez képest (NIST TPP-2M). A SEP anyagi transzportparaméterből származtatható, energia- és szögfüggő. A SEP-re több képlet és modell található az irodalomban, azonban mindegyik egyetlen anyagi paramétert tartalmaz. A 4. ábra összehasonlítja Si SEP-pel korrigált λ_i értékeit a nem korrigált adatokkal, Ag, Cu, Ni és Au referenciamintával [9], az ATOMKI-val és Jablonski-val közös eredményünket. A SEP-paramétert részben *Chen* alapján határoztuk meg, szintén minta és referencia rugalmas csúcsainak felhasználásával. Saját eredményünk a Ni SEP anyagi paramétere, melyet *Nagatomi* REELS-vizsgálatai megerősítettek.

Rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszet

Sven Tougaard a rugalmas csúcsot használva referenciának meghatározta a $K\lambda_i$ függvényt. K az elektron energiavesztesége 1 cm úthossznál és E energiánál. Tougaarddal együttműködve határoztuk meg a $K\lambda_i$ kísérleti eredményeket Si, Ge és III-V (GaAs, InAs, GaP, InSb) félvezetőkre.

A $K\lambda_i$ függvényt az anyag optikai állandóiból számítják. Tougaard jó egyezést talált számos anyagra. A

4. ábra. A SEP-pel korrigált rugalmatlan szabad úthossz, λ_i -értékek Ag, Cu, Ni és Au referenciaminták esetén, valamint a TPP-2M-mel meghatározott érték.



tömbi veszteségi függvény félvezetők (Si, Ge stb.) és néhány fém (pl. In, Sb stb.) esetében egyetlen plazmoncsúcs. Erre rakódik a felületi plazmon csúcsa, melynek leválasztására eljárást dolgoztunk ki [10]. Itt említjük, hogy GaSe plazmon csúcsát már 1973-ban RFA-spektrométerünkkel észleltük. A legtöbb anyag esetében a veszteségi függvény bonyolult.

Köszönetnyilvánítás

Az itt ismertetett kutatásokban részt vett *Orosz Gábor Tamás* (MFA), *Tóth József*, *Varga Dezső*, *Kövér László*, *Tőkési Károly* (ATOMKI, Debrecen), *Alexander Jablonski*, *Beata Lesiak*, *Mirosław Krawczyk*, *Lubomir Zommer* (LTA Varsó), *Bernard Gruzza*, *Luc Bideux*, *Christine Robert*, *Paul Bondot* (Clermont-Ferrand), *Swen Tougaard* (Odense, Dánia), akikkel számos közös közleményünk jelent meg. Az együttműködést nagyra becsüljük.

Irodalom

1. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 53/9 (2003) 331.
2. Gergely Gy., Menyhárd M., Németh K.: A szilárdtestkutatás korszerű berendezései. *GTE Konferencia*. Budapest, 1973. 21.
3. G. Gergely, B. Gruzza, M. Menyhárd. *Acta Phys. Hung.* 48 (1980) 337.
4. Menyhárd M.: Kisenergiájú elektron diffrakció (LEED). In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 7–10.
5. Gergely Gy.: Szekundermissziós spektrometria, AES, SEES, ELS. In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 107–174.
6. G. Gergely. *Progr. Surf. Sci.* 71 (2002) 31–88.
7. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 369.
8. A. Jablonski, B. Lesiak, G. Gergely. *Phys. Scripta* 39 (1989) 363.
9. G. Gergely, M. Menyhárd, S. Gurban, J. Toth, D. Varga, A. Jablonski. *J. Surf. Anal.* 12 (2005) 14.
10. G. Gergely, M. Menyhárd, S. Gurban, A. Sulyok, J. Toth, D. Varga, S. Tougaard. *Solid State Ionics* 141–142 (2001) 47.

MIKROMÉRETŰ MONODOMÉNES RÉSZECSKÉK MÁGNESES VISELKEDÉSE

Vértesy Gábor

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Pardaviné Horváth Márta

George Washington University, Washington DC, USA

A kisméretű mágneses részecskékből álló kétdimenziós periodikus rendszereknek nagy gyakorlati jelentősége van a jövőbeni, extrém nagy sűrűségű mágneses adattárolók, mágneses MRAM memóriák és szenzorhálózatok megvalósításában. Ezért az ilyen rendszerek létrehozása, valamint mágneses viselkedésük vizsgálata komoly gyakorlati jelentőséggel bír. Másrészt ezen mágneses rendszerek tanulmányozása nagy segítséget jelent az elméleti hiszterézismodellek fejlesztésében, valamint az egymással kölcsönható mágneses részecskék viselkedésének jobb megértésében is. Az alábbiakban bemutatunk egy ilyen rendszert, és röviden összefoglaljuk az azon elvégzett mérések és modellezések néhány eredményét.

Mágneses szigetek kialakítása nem-mágneses hordozón, és tulajdonságaik mérése

Nem-mágneses hordozóra folyadékfázisú epitaxiás módszerrel növesztett, néhány mikrométer vastagságú, egykristályos mágneses gránátrétegben, megfelelő maszkolás és az azt követő kémiai marás segítségével létrehozhatók egymástól elkülönülő, szabályos négyzet alakú szigetek (pixelek). A pixelek pásztázó elektronmikroszkópban felvett képét mutatja az *1. ábra*.

A mágneses gránátrétegekben az összetétel módosításával jelentős egytengelyű anizotropia alakítható ki, amely biztosítja, hogy a mágnesezési irány merőleges a rétegek felületére. A marás utáni struktúrában a szigetek közötti utcák elkülönítik egymástól a mágneses részecskéket, ezért köztük nincs kicserélődési kölcsönha-

tás. Az egyedüli csatolás a pixelek között a magneto-sztatikus kölcsönhatás. Az egyes pixelek, a nagy egytengelyű anizotropia, valamint a kisméretű szigetek következtében, monodoménes módon viselkednek, azaz a pixelek mágnesesen telítettek, és az egyik telített állapottól kapcsolhatók át ellentétes irányú és megfelelő nagyságú külső mágneses térrel a másik, ellenkező irányban telített stabil állapotba. A gránátrétegek a nor-

1. ábra. Gránátrétegben marással kialakított pixelek elektronmikroszkópos képe.

