



Szilárdtestek felületi rétegeiben zajló elektrontranszport folyamatok modellezése

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Novák Mihály

Debreceni Egyetem
Természettudományi Doktori Tanács
Fizikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2008



Szilárdtestek felületi rétegeiben zajló elektrontranszport folyamatok modellezése

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Novák Mihály

Debreceni Egyetem
Természettudományi Doktori Tanács
Fizikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2008

Bevezetés

Az elektronok energiaveszteségével járó elektron-szilárdtest kölcsönhatások alapos ismerete nélkülözhetetlen az elektronspektroszkópiai módszerek kvantitatív felületi- és határréteg-analitikai alkalmazásai pontosságának a javításához. Az elektron-szilárdtest kölcsönhatások során az általam vizsgált elektron energiatartományban (500-5000 eV) a legvalószínűbb energiaveszteséggel járó folyamat a szilárdtest szabad, illetve közel szabad elektronjainak a kollektív gerjesztése, azaz a plazmonkeltés. E kölcsönhatások jellege a felületközeli rétegekben a szilárdtest-vákuum határfelület jelenléte miatt megváltozott elektronszerkezetnek köszönhetően eltér a mélyen a mintán belül tapasztalhatótól, ezért az elektronok felületközeli transzportjának modellezése során az ebből eredő különbségeket figyelembe kell venni.

Mivel a szilárdtestek felületéről visszaszóródó kis és közepes energiájú elektronok transzportja a felület közelében zajlik, ezért a visszaszórt elektronok energiaspektrumának (REELS) mérése és modellezése kiválóan alkalmas az elektronok szilárdtest felületek közelében végbemenő elektrontranszport folyamatainak a tanulmányozására. Részletesen bemutatom azokat a modelleket, amelyek a felület közelében lejátszódó, energiaveszteséggel járó elektron-szilárdtest kölcsönhatások elméleti leírására is alkalmasak. Ismertetem, illetve összehasonlítom a felületi gerjesztések leírására is alkalmas, különböző elméleti közelítésekre épülő modellszámításaim eredményeit. A szilárdtestben végbemenő elektron-transzport folyamatok számítógépes szimulációjához szükséges bemenő fizikai paraméterek meghatározását követően bemutatom a felületközeli elektron-szilárdtest kölcsönhatásokat különböző közelítések alkalmazásával modellező Monte Carlo szimulációim eredményeit.

Az energiaveszteséggel járó elektron-szilárdtest kölcsönhatásokat leíró elméleti modellek egy csoportja a transzport során bekövetkező energiaveszteségi folyamatot, mint Markov-folyamatot kezeli, ahol az elektron „múltjának” semmiféle hatása nincs az aktuális energiaveszteségre, azaz az energiaveszteségi folyamatot sztochasztikus folyamatnak tételezi fel. Más modellek azonban figyelembe veszik, hogy az elektron pályájának korábbi szakaszán az elektron által a mintában előidézett változások és a minta tulajdonságai megszabják az aktuális energiaveszteség jellegét, azaz az energiaveszteségi folyamatot, mint determinisztikus folyamatot kezelik. Ezen utóbbi modellek figyelembe veszik az elektron aktuális energiaveszteségére a pálya korábbi szakaszán az elektron által indukált elektromos terek hatását, azaz az interferencia-hatást. A szilárdtestbeli elektrontranszport modellezése esetén tehát fontos kérdés az interferencia hatásának mértéke, illetve az ezen effektus elhanyagolásából eredő hiba nagysága.

A szilárd testek felületéről visszaszóródó elektronok transzport folyamatainak a leírásához kifejlesztett eszközök, illetve a transzport vizsgálata során szerzett információk kiválóan alkalmasak a röntgenkeltésű fotoelektronok és Auger elektronok energiaspektrumában (XPS, XAES) megjelenő, rugalmatlan elektronszórásból eredő járulék (háttér) pontosabb leírására. Mindez jelentősen növeli az XPS spektrumokból nyerhető elektronszerkezeti információk meghatározásának a pontosságát. Ugyanakkor lehetőségünk nyílik arra is, hogy a transzport-folyamatok modellezése során kapott információkra támaszkodva egyszerűbb modelleket dolgozzunk ki, amelyek bizonyos közelítések teljesülése esetén a jóval komplikáltabb modellekkel kaphatóakkal azonos eredményekre vezetnek. Az ilyen kisebb számolási igényű, ugyanakkor elegendően pontos eljárások főként a gyakorlati alkalmazások szempontjából fontosak.

Vizsgált problémák, alkalmazott módszerek

A munkám első részében szilárdtestek felületéről visszaszóródó elektronok felületközeli transzportjának modellezésével foglalkozom. Az elektronok felületközeli energiaveszteségeit is leíró, a dielektromos formalizmusra épülő különböző elméleti közelítések (Tung-modell, Li-modell, Yubero-Tougaard modell) bemutatása, illetve összehasonlítása után az egyes elméleti közelítéseknek megfelelő Monte Carlo szimulációs eljárásaimat, illetve azok alkalmazási lehetőségeit ismertetem. Részletesen vizsgálom, illetve összehasonlítom azon eljárásokat is, amelyek az egyszerűen rugalmatlanul szóródott elektronok energiaeloszlásának kísérleti REELS spektrumokból való meghatározására alkalmasak. Az elektronok transzportja során bekövetkező rugalmas szórás, valamint az interferencia (a visszaszóródó elektronnak az általa a pályája korábbi szakaszán a mintában indukált elektromos térrel való kölcsönhatása) elektrontranszport folyamatokra gyakorolt hatásait vizsgálom, a transzport során bekövetkező kollektív energiaveszteségek sztochasztikus és determinisztikus közelítésével. A szilárd minták felületéről visszaszóródó elektronok transzportjának modellezése során nyert információk és eszközök kis módosítással a röntgenkeltésű fotoelektronok és Auger elektronok energiaeloszlásában (XPS, XAES) megjelenő energiaveszteségi háttér nagy pontosságú modellezését teszik lehetővé, amit a munkám második részében mutatok be. Ezen kombinált módszerek az XPS spektrumokban megjelenő elektronszerkezeti információk pontosabb kinyerését teszik lehetővé. Továbbá, a fotoelektronok szilárdtestbeli transzportjának Monte Carlo modellezésénél kapott eredmények részletes vizsgálata lehetővé tette olyan egyszerűbb statisztikai modell kidolgozását, amely Monte Carlo szimuláció nélkül képes az XPS spektrumokban megjelenő, különböző plazmonkeltési folyamatokból eredő veszteségi háttér pontos leírására, mely a gyakorlati alkalmazások szempontjából is jelentőséggel bíró eredmény.

A munkám során használt kísérleti módszerek és berendezések

A szilárd minták felületéről visszaszóródó elektronok energiaeloszlását, azaz a REELS spektrumokat az ATOMKI saját fejlesztésű ESA 31 elektron spektrométerével mérték. A hozzá kapcsolódó LEG-62 elektronágyú segítségével 0.1-5 keV primer energiájú elektronok állíthatóak elő, amelyek a mintára kapcsolt gyorsító feszültség segítségével 10 keV energiáig gyorsíthatók. A bejövő elektronnyaláb a felületi merőlegessel 50° -os szöget zárt be míg a kilépő elektronok a felületi merőlegessel megegyező irányban lettek detektálva. Az energiafelbontás 5 keV elektron energia esetén 1.5 eV.

A munkám során vizsgált *Fe 1s* és *Ge 2s* fotoelektron spektrumok mérésére a hamburgi DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) HASYLAB intézetében, a DORIS tároló-gyűrű BW2 nyalábcatornájánál került sor, mely nagy intenzitású, monokromatikus, 2,2-11 keV között folytonosan változtatható energiájú, polarizált röntgen-fotonnyaláb használatát teszi lehetővé. A mintából kilépő fotoelektronokat egy SCIENTA SES-200 típusú, félgömb analízátoros elektronspektrométer segítségével detektáltuk oly módon, hogy a mintát érő fotonnyaláb és a kilépő fotoelektronok által bezárt szög rögzített, 45° volt. A fotoelektronok minden esetben a felület normálisának irányában léptek be a detektorba. Az analízátor FAT (Fixed Analyser Transmission) üzemmódban, állandó átmenő analízátor energián működik, ~ 0.2 eV energiafelbontással, így a teljes instrumentális kiszélesedés ~ 0.5 eV.

A munkám során a különböző számolásokhoz használt programok és modellek

Saját fejlesztésű számítógépes kódok:

- 1., Elektronok szilárdtestbeli rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszetét (DIIMFP, DSEP), rugalmatlan közepes szabad úthosszát (IMFP), valamint felületi gerjesztési valószínűségeket (SEP) a dielektrikus modell, illetve a Tung-elmélet segítségével számoló számítógépes kód
- 2., Elektronok pozíció-függő rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszetét, pozíció-függő rugalmatlan közepes szabad úthosszát, valamint pozíció-függő felületi gerjesztési valószínűségét a Li-modellnek megfelelően számoló, párhuzamos rendszereken futtatható számítógépes program
- 3., Szilárdtest felületekről visszaszóródó, különböző mélységeket elérő elektronok effektív rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszetét a Li-elmélet szerint, valamint ezekből az egyszerűen rugalmatlanul szóródott elektronok energiaeloszlását a Yubero-Tougaard modellnek megfelelő súlyozással számoló számítógépes kód
- 4., A Tougaard-Chorkendorff algoritmusnak megfelelő számítógépes kód az egyszerűen rugalmatlanul szóródott elektronok energiaeloszlásának a kísérleti REELS spektrumokból történő meghatározásához
5. A Werner-féle W-algoritmusra épülő, FFT (Fast Fourier Transformation) algoritmust is magában foglaló számítógépes kód a normált területű DIIMFP és DSEP eloszlások kísérleti REELS spektrumokból való meghatározásához, valamint az eljárásához szükséges Fourier térbeli tenzorelemeknek és együttható-mátrixoknak az elektronok rugalmatlan ütközési statisztikájából való számítására alkalmas program
- 6., A szilárdtest felületekről visszaszóródó elektronok transzport folyamatainak Monte Carlo szimulációjára alkalmas, a kvázi-rugalmas közelítésre épülő számítógépes kód (úthossz-eloszlás, rugalmas és rugalmatlan ütközési statisztika, maximális mélység eloszlás, differenciális rugalmas visszaszórási együttható, stb. számítása)
- 7., A visszaszórt elektronok energiavesztései spektrumának gyors, közvetett modellezésére alkalmas, FFT algoritmusra épülő számítógépes program
- 8., Az általam kidolgozott, az elektronok pozíció-függő rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszeteire épülő direkt spektrum-szimulációs modellnek megfelelő Monte Carlo szimulációs kód (REELS)
- 9., A szilárdtestek felületéről visszaszóródó elektronok kollektív (tömbi, felületi) gerjesztésekben elszenvedett átlagos energiavesztését a Vicanek-elméletnek megfelelően, az energiavesztési folyamat determinisztikus és sztochasztikus közelítéseivel, egyenes vonalú, illetve valódi elektron pályák esetén számoló program, illetve párhuzamos rendszereken is futtatható Monte Carlo szimulációs kód
- 10., A röntgenkeltésű fotoelektronok szilárdtestbeli transzport-folyamatainak a modellezésére alkalmas Monte Carlo szimulációs program (úthossz-eloszlás, ütközési statisztikák, parciális mélységi-eloszlás függvény számolása, stb.)
- 11., A parciális intenzitások analizésére épülő spektrum-dekonvolúciós eljárásnak megfelelő, FFT eljárást használó számítógépes program
- 12., A fotoelektronok energiaeloszlásában megjelenő komplex energiavesztési háttér pontos leírására alkalmas, általam kidolgozott statisztikai modellnek megfelelő, FFT algoritmusra alapozott paraméter-optimalizációs kód.

Nem saját fejlesztésű számítógépes kódok: az elektronokra vonatkozó differenciális rugalmas szórási hatáskeresztmetszetet a NIST SRD64 adatbázisból vettem; az egyszerű gerjesztési folyamatban energiavesztést szenvedett fotoelektronok energia eloszlásának a Yubero-Tougaard elmélet szerinti számolásához a Yubero és Tougaard által kifejlesztett Yubero-Tougaard XPS programot használtam

Új tudományos eredmények

1. Az elektronok pozíció-függő rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszeteire épülő direkt spektrum-szimulációs Monte Carlo eljárás.

(a.) Direkt spektrum-szimulációs Monte Carlo modellt dolgoztam ki, amely az elektronok pozíció-függő differenciális rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszeteinek az ismeretére épül. Ezen nagy pontosságú Monte Carlo modell képes figyelembe venni a mintán belüli és a vákuumbeli felületi gerjesztéseket, a felületi és tömbi gerjesztések változó valószínűségét, amely az elektron aktuális helyzetének (felülettől mért távolságának), illetve az elektron sebességvektorának a felületi merőlegessel bezárt szögének a függvénye. [1, 2]

(b.) A megfelelő pozíció-függő rugalmatlan elektronszórási hatáskeresztmetszeteket a dielektromos elméletre épülő Li-modell segítségével numerikusan származtattam. Az így előálló, nagy pontosságú Monte Carlo modellnek megfelelő direkt spektrum-szimulációs kódot fejlesztettem ki, mely a felület közeli elektrontranszport helyes fizikai képre épülő leírását teszi lehetővé. Ennek köszönhetően a modell alkalmas a felületközeli gerjesztések részletes vizsgálatára. Ezt a Monte Carlo szimulációs eljárást használva, mely az első olyan Monte Carlo szimulációs modell, amely az elektronok Li-féle elmélettel számolt pozíció-függő rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszetére épül, *Cu*, *Si*, *Fe* minták felületéről visszaszóródó, különböző kezdeti energiájú (0.5-3 keV) elektronok energiavesztési eloszlását modelleztem. A szimulált és a kísérletileg mért REELS spektrumokat összehasonlítva kielégítő egyezést kaptam, ez igazolja az általam alkalmazott eljárás érvényét. [1]

(c.) Mivel a fenti Monte Carlo szimulációs modell az elektron felületközeli energiavesztési folyamatainak pontos leírását teszi lehetővé a felület mindkét oldalán, így lehetővé vált a mintán belüli és a vákuumbeli felületi gerjesztési járulékok vizsgálata. Megállapítottam, hogy a mintán belüli és vákuumbeli felületi gerjesztéseknek a spektrumban megjelenő járuléka kis és közepes energiájú elektronok esetén különböző, amely az elektronok átlagos behatolási mélysége és a mintán belüli felületi gerjesztési réteg vastagsága közötti eltérésekből ered. [1]

2. A Yubero-Tougaard (YT) és a Li-féle elmélet összehasonlítása Si minta esetén

(a.) A Li-féle elméletre épülő olyan modellt, illetve programot dolgoztam ki, mely segítségével a visszaszórt elektronok energiavesztési spektrumaiban megjelenő, az egyszerűen rugalmatlanul szóródott elektronoktól származó járuléka a különböző mélységet elérő elektronokhoz tartozó effektív rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszetekből a YT-modellnek megfelelő súlyozással számolható. Az eljárás segítségével *Si* minta felületéről, különböző szórási geometriák esetén visszaszóródó 800 eV és 2000 eV primer energiájú elektronok közül a csak egyszer energiavesztést szenvedett elektronok járulékát számoltam, illetve hasonlítottam össze a YT-moddal számolt eredményekkel, azonos bemenő paraméterek mellett. Megállapítottam, hogy a jóval egyszerűbb Li-modell alkalmazása és a fenti eljárás az elektronpályáknak a YT-modell szerinti közelítése mellett a YT-moddal származtatottal közel azonos eredményeket szolgáltat, annak ellenére, hogy a Li-modellben a tömbi és felületi gerjesztések járuléka tökéletesen szeparált, illetve az interferencia hatása nincs figyelembe véve. A számolások eredménye azonban mindkét modell esetén jelentősen eltér a rendelkezésre álló kísérleti adatoktól.

(b.) A fenti számolásaimban is használt, a Li-féle elmélettel a *Si* minta esetére általam származtatott pozíció-függő rugalmatlan szórási hatáskeresztmetszeteket, illetve az 1. tézispontban említett Monte Carlo eljárásomat (mely a rugalmas szórás hatását is pontosan figyelembe veszi) használva a kísérleti adatokkal sokkal pontosabb egyezést kaptam, mint a YT-modell eredményei, minden vizsgált primer elektron energia (800 eV és 2000 eV), illetve szórási geometria mellett. Ez azt mutatja, hogy az interferencia hatásának az elhanyagolásából eredő hiba még viszonylag kis elektronenergia (800 eV) és a differenciális rugalmas elektronszórási hatáskeresztmetszet szórási szög szerinti sima függése esetén (pl. *Si*) is jóval kisebb, mint a rugalmas szórás hatásának pontatlan figyelembevételéből eredő hiba. Ezenkívül az általam kidolgozott Monte Carlo szimulációs eljárás - a YT-modellel ellentétben - a teljes REELS spektrum modellezésére is alkalmas.

3. Szilárdtestek felületéről visszaszóródó elektronok átlagos energiavesztésének vizsgálata az energiavesztési folyamat sztochasztikus és determinisztikus közelítésével

(a.) *Si* minta felületéről különböző geometriai elrendezés mellett (normális irányban történő emisszió és $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ -os belépési szög esetén) visszaszóródó 500 eV energiájú elektronok átlagos energiavesztését vizsgáltam egyenes pályaközelítésben, illetve Monte Carlo szimulációval nyert valódi pályák esetén, a transzport során bekövetkező kollektív gerjesztésekben elszenvedett átlagos energiavesztés determinisztikus és sztochasztikus közelítésével, Vicanek-féle elmélet alapján. Az eredményeimet elemezve megállapítottam, hogy az interferencia hatása csak a felületi gerjesztésekben elszenvedett átlagos energiavesztésekben jelentkezik erőteljesen, ami azzal magyarázható, hogy az interferencia hatására létrejövő átlagos energiavesztés értékében mutatkozó ingadozások mértéke a vizsgált energiájú elektronok esetén csak a felületi gerjesztésekben elszenvedett átlagos energiavesztéssel mérhető össze és jóval kisebb a tömbi gerjesztésekben elszenvedett átlagos energiavesztéseknél. Az ingadozások mértéke mélyebbre behatoló elektronok esetén kisebb, mint a felület közvetlen közeléből visszaszóródó elektronok esetén, azonos geometriai elrendezés és elektronenergia mellett, ami az elektronok bejövő pályaszakaszán keltett töltéssűrűség-oszcillációk gyors lecsengésével magyarázható. A tapasztalható ingadozások mértéke egyenes vonalú pálya-közelítés esetén jóval markánsabb, mint a valódi pályák esetén, amely a valódi pályák kisebb átfedésével magyarázható, ez viszont a rugalmas szórás hatásának tulajdonítható.

(b.) Az elektronok rugalmatlan ütközési statisztikáját vizsgálva megállapítottam, hogy az interferencia elhanyagolása ilyen kis (500 eV) elektronenergia esetén sem okoz jelentős hibát, még akkor sem, amikor az egyenespálya-közelítés a legnagyobb különbségeket jósolja, noha a kétféle közelítés számolási igényében nagyságrendi különbségek vannak.

Az itt kapott eredményeim alátámasztják az előző tézispontban az interferencia hatásának mértékéről tett megállapításomat.

4. A fotonnyaláb polarizáltságának hatása a fotoelektronok szilárdtestbeli transzportja során bekövetkező rugalmatlan ütközések statisztikájára

Kvázi-rugalmas közelítésre épülő Monte Carlo szimulációs programot fejlesztettem ki, amely képes figyelembe venni a minta atomjaiból kilépő fotoelektronok anizotróp szögeloszlását, így a fotoelektronok szilárdtestbeli transzportjának pontos modellezését teszi lehetővé. Ezen Monte Carlo szimulációs kódom segítségével a gerjesztő fotonnyaláb polarizáltságának a

fotoelektronok transzportja során bekövetkező rugalmatlan ütközések statisztikájára gyakorolt hatását vizsgáltam. Megmutattam, hogy a polarizálatlan (vagy cirkulárisan poláros) és a lineárisan polarizált fotonnalábbal keltett fotoelektronok szilárdtestbeli transzportja során bekövetkező rugalmatlan ütközések statisztikája jelentős mértékben eltérő, mely eltérés a kilépő fotoelektronok különböző kezdeti szögeloszlásának tulajdonítható.

5. Fém Fe mintából keltett Fe 1s XPS spektrum analízise

Az előző tézispontban említett Monte Carlo szimulációval nyert rugalmatlan ütközési statisztika, valamint a parciális intenzitások analízisére épülő spektrum-dekompozíciós algoritmus segítségével fém Fe mintából keltett Fe 1s fotoelektronok kísérleti energiaspektrumát (XPS) vizsgáltam. Ez az eljárás, a Werner által kidolgozott W-algoritmus segítségével kísérleti REELS spektrumokból meghatározott energiaveszteségi eloszlásokkal kiegészítve, a kísérleti XPS spektrumok nagypontosságú analízisét teszi lehetővé. A fenti eljárás segítségével a kísérleti fotoelektron-spektrumból a transzport során bekövetkező (extrinsic) energiaveszteségi folyamatok járulékaiknak eltávolításával az eddigi eredményeknél jóval pontosabban meghatároztam a Fe 1s XPS spektrum intrinsic (a kezdeti állapotú vakancia megjelenésének tulajdonítható) veszteségi járulékát. Ezzel megmutattam, hogy a korábban publikált eredmények a helytelen háttérkorrekciós eljárásnak és energiaveszteségi eloszlásoknak köszönhetően túlbecsülik mind a tömbi, mind a felületi intrinsic gerjesztések valószínűségét. Az eredményeimet megerősítik a Yubero-Tougaard XPS modellel végzett számolásaim is.

6. A kiterjesztett Hüfner-model

(a.) Statisztikai modellt dolgoztam ki, amely alkalmas a kísérleti XPS (és XAES) spektrumokban megjelenő, kollektív gerjesztésekből eredő, összetett energiaveszteségi háttér viszonylag egyszerű, Monte Carlo szimulációt nem igénylő figyelembevételére. Megmutattam, hogy az általam kidolgozott egyszerű eljárásnak - bizonyos feltételek teljesülése mellett - a jóval összetettebb és komplikáltabb parciális intenzitások analízise módszerrel kaphatóval közel azonos eredményeket kell szolgáltatnia. [3]

(b.) Ezen statisztikai modellre épülő paraméter-optimalizációs kódot fejlesztettem, amely segítségével meghatároztam a különböző energiájú fotonokkal (4000 eV, 6000 eV, 8000 eV) gerjesztett Ge 2s fotoelektron-spektrumokban megjelenő kollektív gerjesztéseknek tulajdonítható veszteségeknek megfelelő plazmonkeltési valószínűségeit. A Ge mintára vonatkozó energiaveszteségi eloszlásokat a Werner-féle W-algoritmus segítségével kísérleti Ge REELS spektrumokból származtattam, mely eloszlások a fotoelektronok transzportja során bekövetkező energiaveszteségek nagypontosságú modellezését teszik lehetővé. Az így kapott eredményeimet a parciális intenzitások analízisével nyert eredményeimmel összevetve igen jó egyezést kaptam, ami fenti állításaimat igazolja. [3, 4, 5]

Az értekezés alapjául szolgáló publikációk

[1] M. Novák: *Monte Carlo simulation of energy loss of electrons backscattered from solid surfaces*

Surface Science **602** (2008) 1458

[2] M. Novák, R. J. Berezky, Z. M. Zhang, Z. J. Ding, J. Tóth, D. Varga, K. Tókési: *Energy loss spectra of iron*

Surface and Interface Analysis **40** (2008) 522

[3] M. Novák, L. Kövér, S. Egri, I. Cserny, J. Tóth, D. Varga and W. Drube: *A simple statistical model for quantitative analysis of plasmon structures in XPS and Auger spectra of free-electron-like materials*

Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **163** (2008) 7

[4] M. Novák, S. Egri, L. Kövér, I. Cserny, W. Drube, W. S. M. Werner: *Energy dependence of electron energy loss processes in Ge 2s photoemission*

Surface Science **601** (2007) 2344

[5] L. Kövér, M. Novák, S. Egri, I. Cserny, Z. Berényi, J. Tóth, D. Varga, W. Drube, F. Yubero, S. Tougaard, W. S. M. Werner: *Intrinsic and extrinsic excitations in deep core photoelectron spectra of solid Ge*

Surface and Interface Analysis **38** (2006) 569