

A FELÜLETTUDOMÁNYTÓL A NANOTECHNOLÓGIÁIG: REAKCIÓK TANULMÁNYOZÁSA ATOMI LÉPTÉKBEN

Berkó András

az MTA doktora, Szegedi Tudományegyetem MTA Reakciókinetikai Kutatócsoport, Szeged
aberko@chem.u-szeged.hu

1. Bevezetés

A felülettudomány a fizikai-kémiai tudományok fontos területe, amelynek kezdetei a múlt század közepére tehetőek. Az akkoriban már széles körben elterjedt nagyvákuumtechnika és az annak fejlesztését szükségessé tevő elektronikai ipar (világítóeszközök, elektroncsövek) serkentették a legnagyobb mértékben a felülettudomány kifejlődését. Mindehhez további erőteljes lökést adott a születőben lévő mikroelektronika fejlődésének (dióda, tranzisztor), és jelentős várakozások mutatkoztak a heterogén katalízis vonatkozásában is. Nyilvánvalóan már a XX. sz. első felében létrejöttek azok az elméleti eredmények, amelyek a kvantummechanika szilárdtestfizikai adaptációjával lehetőséget teremtettek a felületi jelenségek leírására. Napjainkban az ultravákuumtechnikai (UHV) eszközök és a felületanalitikai komplex berendezések gyártása már egy jól körülhatárolt iparágnak tekinthető (O'Connor, 2001).

Az anyagi jelenségek atomi léptékű megértése Démokritosz kora óta reményteli célja a természettudományok művelőinek, mégis, csupán a XX. század közepétől tekinthető reális lehetőségnek a szilárdtest-felületeken lejátszódó folyamatok atomi szintű tanulmányozása. Többek között éppen ebben jelölhető meg a felülettudomány legfontosabb feladata is. Számos összefoglaló mű készült már a területről, illusztrációként csak

néhány újabban megjelent kötetet említünk meg (Duke, 2002; Razumas, 2001; Desjonquères, 1998). A felülettudomány igazi jelentőségét azonban az elmúlt években kifejlődő ún. nanotechnológia fényében érthetjük meg leginkább. Ki gondolta volna még két évtizeddel ezelőtt, hogy akár egyetlen atom pozíciójának szándékolt megváltoztatása is lehetséges? Ki fogadott volna akkoriban arra, hogy egyszer *in situ* filmezhetjük le individualis atomok felületi diffúzióját? Napjainkban mindezt a felületkutatás már megvalósult eredményei között tartjuk számon.

A jelen összefoglalóban rövid áttekintést kívánunk adni az elmúlt fél évszázad jelentősebb felülettudományi eredményeiről, megemlítve a legfontosabb módszereket, néhány kiemelkedő elméleti és alapvetési eredményt, valamint olyan gyakorlati alkalmazásokat, amelyek nélkül civilizációnk életben maradási lehetőségei bizonyosan korlátozottabbak lennének.

2. A legfontosabb felületvizsgálati módszerek történeti áttekintése

Felülettudományi vizsgálatokról attól kezdve beszélhetünk, amióta sikerült megoldani a szilárdtest-felületek szerkezetének, kémiai összetételének atomi szintű kézbe tartását. Az alábbiakban ismertetjük azokat a legfőbb módszereket, amelyek ma a felületanalitika kísérleti bázisát jelentik (O'Connor, 2001).

Az 1960-as években dolgozták ki azokat a mintaelőkészítési és felülettisztítási módszereket, amelyek mind a mai napig használatosak, s egyben kiindulási pontját jelentik minden felületkutatási programnak. Ezek között meg kell említenünk a vizsgált minták ultravákuum ($<10^{-9}$ mbar) körülmények között végrehajtható hőkezelését – legalább az olvadáspont 60-70 %-áig –, amellyel a tömbi szennyeződések felületre történő szegregációját aktiválhatjuk. Amennyiben a felületre került szennyeződés az adott hőmérsékleten nem deszorbeálódik (s általában ez a jellemző), akkor további felületkezelési eljárásokat is be kell vetni. Erre vonatkozóan két alapvető módszer ismeretes: (i) kisenergiájú (0,5-2 keV) nemesgáz ionokkal (Ar, Ne) történő bombázás; (ii) a gáztérből adszorbeálódó gázokkal (például H_2 , O_2) történő reakció, melynek során deszorbeálódó termékek keletkeznek. Ma már a legtöbb fém és félvezető anyag esetében részletesen leírt tisztítási receptekkel rendelkezünk (Vickerman, 2001).

A felülettudományi kutatások korai szakaszából a kisenergiájú elektrondiffrakciót (Low Energy Electron Diffraction – LEED) és az Auger-elektron spektroszkópiát (Auger Electron Spectroscopy – AES) kell mindenképpen megemlítenünk. Ugyancsak a kezdetekig nyúlik vissza a téremissziós és térionizációs mikroszkópia (Field Emission Microscopy – FEM; Field Ionization Microscopy – FIM) alkalmazása is. Természetesen idővel újabb és újabb elektronerjesztéses elektron-spektroszkópiái módszerek jelentek meg, többek között a pásztázó Auger-elektron-spektroszkópia (Scanning Auger Electron Spectroscopy – SAES), az elektronenergia-veszteségi spektroszkópia (Electron Energy Loss Spectroscopy – ELS), azonban látványosan új lehetőséget a fotoelektron-spektroszkópiák (X-ray Photoelectron Spectroscopy – XPS illetve Electron Spectroscopy for Chemical Analysis – ESCA, Ultraviolet Pho-

toelectron Spectroscopy – UPS, Angular Resolved UPS – ARUPS) kifejlesztése jelentette az 1970-es évek elején. Az ESCA napjainkban a felületek kémiai analizisében az egyik legszélesebb körben alkalmazott módszer.

Nagyon hatékonyak bizonyultak az ionok szóródásán alapuló módszerek is, mint például a szekunder-ion tömegspektrometria (Secunder Ion Mass Spectrometry – SIMS), illetve az alacsony energiájú ion visszaszórás spektroszkópia (Low Energy Ion Scattering – LEIS vagy Ion Scattering Spectroscopy – ISS). Itt említhetjük meg a felületanalitika kezdeteitől fontos szerepet játszó termikus deszorpciós tömegspektroszkópiát (Thermal Programmed Desorption – TPD) is, amellyel a felület hőmérsékletének függvényében tanulmányozhatjuk a deszorbeálódó termékek kémiai összetételét.

Az 1980-as évek közepétől a laterális felbontás területén forradalmi változást hoztak az atomszondás pásztázó módszerek (Scanning Probe Microscopy – SPM), mint például a pásztázó alagútmikroszkópia (Scanning Tunneling Microscopy – STM) és a pásztázó erőmikroszkópia (Atomic Force Microscopy – AFM). Ma már egyértelműen látható, hogy ezen eljárások nyitották meg az utat az ún. nanotechnológiai kutatások irányába, mivel nem csupán arra alkalmasak, hogy információt szolgáltatassanak a felületek szerkezetéről, hanem lehetővé teszik az atomi léptékű manipulációt is (individuális atomok, molekulák szándékolt mozgatása). Érdemes megjegyeznünk, hogy az SPM a különböző diffrakciós eljárásoknál (LEED, Reflection High Energy Electron Diffraction – RHEED) általában egyszerűbben értelmezhető kísérleti adatokat szolgáltat. Közben olyan kapcsolódó új módszereket is kifejlesztettek, mint az alacsonyenergiájú elektronmikroszkópia (Low Energy Electron Microscopy – LEEM), illetve a pásztázó alagútspektroszkópia (Scanning Tunneling Spectroscopy – STS). Megemlíthetjük továbbá, hogy a klasszikus

módszernek számító elektronmikroszkópia (High Resolution Electron Microscopy – HREM) is hatalmas fejlődésen ment keresztül az utóbbi két évtizedben.

Külön ki kell emelnünk a rezgési elektronátmenetek érzékelésére alkalmas technikákat, mint például a nagy felbontású elektronenergia-vesztési spektroszkópiát (High Resolution Electron Energy Loss – HREELS), valamint az 1990-es évek elejétől egyre intenzívebben alkalmazott reflektált abszorpciós infravörös spektroszkópiát (Reflection Absorption Infrared Spectroscopy – RAIRS). Ezek a módszerek még alkalmasabbnak látszanak a kémiai kötések azonosítására, mint a korábban már széles körben elterjedt ESCA és UPS fotoelektron spektroszkópiák. Napjainkban egy új technika, a lézeres összefrekvencia-spektroszkópia (Sum Frequency Generation – SFG) váltott ki igen nagy érdeklődést, amellyel *in situ* nagyobb nyomásokon is követhetőek a rezgési állapotok változásai.

A felületvizsgálati módszerek bemutatásakor nem hagyhatjuk említés nélkül a szinkrotronforrások mellett folyó kutatómunkát. A szinkrotron tárológyűrűk lényegében olyan folytonos szinképpel rendelkező fotonforrást jelentenek, amelyekkel a távoli infravöröstől a röntgentartományig monokromatizált gerjesztés révén a legváltozatosabb (nagy sebességű, illetve nagy laterális felbontású) fotoelektron-spektroszkópiái módszerekre van lehetőség (például: Extended X-ray Absorption Fine Structure – EXAFS, Near Edge X-ray Absorption Fine Structure – NEXAFS).

Fentieket összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az elmúlt 20-30 évben a felületanalitikai módszerek igen széles köre jött létre. Természetesen egy adott felületanalitikai berendezést nem szerelhetünk fel az összes technikával, de törekedhetünk rá, hogy olyan, egymást kiegészítő módszerek kerüljenek beépítésre, amelyekkel a felület kémiai összetétele, a szerkezeti felépítése és a molekuláris kötések egyaránt meghatározhatók (1. ábra).



1. ábra • Felületanalitikai UHV nagyberendezés

3. A legegyszerűbb anyagi rendszerek vizsgálatától a komplex rendszerekig

A felületi reakciók tanulmányozásának közel fél évszázados története jól mutatja, hogy az anyagi jelenségek megismerése a legegyszerűbb rendszerektől fokozatosan a bonyolultabb, a valóságot egyre jobban megközelítő folyamatok tanulmányozása és megértése irányába halad. A felülettudományi alap kutatási eredmények gyakorlati hasznosíthatóságát megkérdőjelező szakemberek legfőbb érve hosszú ideig az volt, hogy az egyszerű kémiai rendszerekről kapott információk csupán nagyon közvetett ismereteket szolgáltatnak a reális anyagi rendszerek megértéséhez. A bonyolult rendszerek viszont nem vizsgálhatók felülettudományi módszerekkel, különösen nem nagyobb gáznyomásokon („pressure gap”). Ezt szokás mostanában bonyolultsági szakadékának („material gap”) is nevezni.

Az 1960-as években főként a tiszta fémegyikristály-felületeket, illetve az azokon történő adszorpciós folyamatokat vizsgálták. Csupán címszavakban a következő tématerületeket emelhetjük ki: (i) tiszta fémfelületek orientációfüggő relaxációja és rekonstrukciója; (ii) kis atomszámú molekulák adszorpciós és deszorpciós tulajdonságai átmenetifém-felületeken; (iii) adszorbeátumok közötti reakciók tanulmányozása; (iv) gázok adszorpciójának vizsgálata moleku-

lársugár technikával, illetve nagynyomású katalitikus cellában. A 1970-es években a fémek mellett egyre nagyobb hangsúlyt kapott a mikroelektronikában széles körben használt félvezető egykristály felületek vizsgálata. Kiemelkedő jelentőségű volt azon kutatási témák megjelenése, amelyek korábban a „hagyományos” vékonyfilmek témakörébe tartoztak, de a vizsgálat alapvetően az egy-két atomi rétegben felvitt epitaxiákra vonatkozott (ultravékonyréteg). A fém-fém, félvezető-fém, az oxid-fém határfelületek atomi szintű megértése egyre inkább közvetlen ipari igényként jelentkezett ebben az időszakban, amelyet joggal jelölhetünk a mikroelektronika fénykoraként. Természetesen más hangsúlyos anyagtudományi, illetve felülettudományi kutatási területek is megemlíthetők ebből a korszakból, így például az optikai, a nagy szilárdságú és az antikorróziós bevonatok kifejlesztése. Az 1980-as években a – főként katalitikus indítatású – felületanalitikai munkák egy jelentős része a felületi adalékok (pozitív és negatív elektronaffinitású preadszorbeátumok) szerepének tisztázására irányult (közvetlen/közvetlen hatás).

Az 1980-as évek vége radikális szemlélet- és témaváltást eredményezett. Míg korábban az atomi szerkezet tanulmányozása főként csak diffrakciós módszerekkel volt lehetséges, addig az SPM módszerek alkalmazása lehetővé tette a nem periodikus felületi szerkezetek nanométer léptékű tanulmányozását is. Ily módon megnyílt az út a hordozott nanoklaszterek, kristallitok, rekonstrukcióval kialakuló felületi nanoszerkezetek tanulmányozása előtt. Az ezen témákkal kapcsolatos alapkutatások az 1990-es évek közepétől egyre inkább meghatározóvá váltak, s még napjainkban is erőteljes bővülés tapasztalható. Itt említhetjük meg a heterogén katalízis vonatkozásában, hogy a korábban említett „material gap” áthidalását célozza a kétdimenziós modellkatalizátorok alkal-

mazása, amelyek előállításánál oxid-egy-kristály-felületekre fémkristallitokat juttatunk. Egy ilyen anyagi rendszer kitűnően alkalmas felületanalitikai vizsgálatokra, ugyanakkor összetettségében, komplexitásában már megközelíti a reális katalizátorokat.

Napjainkban a felülettudományi módszerek néhány egészen távolinak tűnő területen is alkalmazásra kerültek, mint például a biotechnológia vagy az űrkutatás, illetve a csillagászat. Az előbbi vonatkozásában az élőszövet-barát protézisfelületek kialakítása vagy a funkcionális nanoszerkezetek bioszenzorként történő felhasználása említhető meg. Az utóbbi esetében a foton-, elektron- és ionsugárzás hatására az égitestek (például a Hold) közeleiben bekövetkező változások tanulmányozása emelhető ki, ami a műholdas telekommunikációban lehet rendkívüli fontosságú.

4. Az utóbbi évtizedek kiemelkedő felülettudományi eredményei

A szilárdtest felületek viselkedésére vonatkozó jelentős felismerések sora igen hosszú, amelyet – a teljesség igénye nélkül – az alábbi néhány példával szeretnénk illusztrálni.

4. 1 Felületek atomi szerkezete

A szilárd felületek reakcióképességét döntően befolyásolja azok szerkezete, amelynek felderítése a felülettudományi vizsgálatok első és legfontosabb területe volt. A felületi szabadenergia minimalizálása következtében – a szorosan pakolt felületek kivételével – a tömbi szerkezetre jellemző atomi pozíciók jelentősen megváltozhatnak („relaxation, reconstruction, faceting, buckling”). Bár a legtöbb ilyen irányú vizsgálat fémeken történt, hasonló jelenségek lépnek fel félvezetők és oxidok esetében is. Három nevezetes példát szeretnénk megemlíteni: (i) a Pt(110)-(1x2) felületen minden második sor hiányzik a tömbi szerkezethez képest; (ii) a Si(111)-(7x7) felület elemi cellája, amely kö-

zel száz, megváltozott pozíciójú atomot tartalmaz; a $\text{TiO}_2(110)-(1 \times n)$ felület, amelyen egydimenziós redukált Ti_2O_3 oxidfázis alakul ki. A heterogén katalízis vonatkozásában számos esetben (például az ammóniaszintézis, szénhidrogén-átalakítás) sikerült összefüggést találni a felület szerkezete és aktivitása között (Dwyer, 1992). Ezen jelenségek önmagukban is izgalmasak, mindenesetre napjainkban az önszerveződő felületi folyamatok az érdeklődés homlokterébe kerültek bizonyos nanotechnológia eljárások kidolgozásában (nanohuzalozás, speciális foto-reflexió és elektronemisszió stb.) (Pearsall, 2000).

4.2 Adszorbeált molekulák és felületi csoportok reakciói

A gázfázisban instabil fragmentek a szilárdtestekhez kötődve stabil felületi formát képezhetnek, s szerepük bizonyos katalitikus reakciók köztitermékeként rendkívül jelentős lehet. Tanulmányozásuk érdekében létre kell hoznunk őket az adott felületen, s erre ma már több módszert is ismerünk: (i) gyökforrás segítségével előállított fragmentek adszorpciója alacsony hőmérsékleteken; (ii) az adott felületi csoportot tartalmazó adszorbeált molekulák „in situ” fragmentációja fény, elektronbesugárzás hatására, illetve termikus gerjesztéssel. Természetesen mindegyik eljárásnak vannak korlátai, de például a felületi C_xH_y csoportok kémiaiját sikerült eléggé részletesen megismerni ezekkel a módszerekkel (Zaera, 2001).

4.3 Felületi adalékanyagok hatásának megismerése

A szilárdtestek felületén jelen lévő idegen atomok jelentősen befolyásolhatják annak reakcióképességét. Ezen felületi adalékanyagok hatása számos esetben káros (ilyenkor szennyezőkről, illetve mérgező/inhibitor anyagokról beszélünk), de sokszor előnyös is lehet, például a felület passzivitásának

megnövelésében (korróziógátló anyagok) vagy bizonyos katalitikus folyamatokban a szelektivitás növelésére (promotorok), esetleg a kilépési munka lecsökkentésében (katódbevonatok). A nyolcvanas években a világ számos laboratóriumában vizsgálták az alkáli atomok hatását különböző adszorbeált molekulák esetében átmenetifém felületeken (Somorjai, 1989). Az egyik alapvető megállapítás szerint az alkáli atom a szubsztrátfémen keresztül elektront donál a koadsorbeált molekulára, aminek következtében felületi negatív ionok jönnek létre (CO^- , CO_2^- stb.). Ebből a szempontból mind az elektropozitív, mind az elektronegatív koadsorbeált atomok hatásának szisztematikus vizsgálatára sor került, sőt nemcsak adszorpciós kísérletekben, hanem egykristály felületeken végrehajtott katalitikus folyamatokban is (Kiskinova, 1992).

4.4 Ultravékony filmek: fém-fém, oxid-fém és félvezető-fém határátmenetek

Számos alkalmazási területet érintenek azok a kutatások, amelyek az epitaxiális növekedés korai szakaszával, azaz az egy-két atomi réteg vastagságú filmek szerkezetével foglalkoznak (Freund, 2002). A mikroelektronikai vonatkozású fém-félvezető határátmenetek ilyen mélységű vizsgálatát a miniatürizálás tette szükségessé, sőt napjainkban az ún. nanoelektronika új igényei (kvantumpöttyök, egyelektron eszközök, atomi kapcsolóelemek) ezt a tématerületet a nemzetközi kutatás homlokterébe helyezték. A fém-fém homo-, illetve heteroepitaxiák atomi szintű tanulmányozása a nanoötvözetek világába vezet bennünket, amelyeknek a korrózióálló, magas keménységi fokú anyagok gyártásában, valamint a heterogén katalízisben van döntő szerepük. Az oxid-fém határátmenetek megismerése szintén nagy jelentőségű, különösen a heterogén katalízis, a gázszenzorika és a nanoelektronika területén (Ertl, 1999).

4.5 *A felülettudomány orvostudományi és biotechnológiai vonatkozásai*

Az utóbbi két évtizedben az orvosi rehabilitációban jelentősen megnőtt az igény a szövetbarát protézisek előállítására. A hagyományos felületkezeléseken kívül igen hatásosnak mutatkozott a vákuumban történő ionbesugárzás, amelynek a protézisfelületekre gyakorolt hatása vizsgálatában a felületanalitika jelentős segítséget jelenthet (Kasemo, 2002). A testbe épített anyagok esetében (például fog-implantátum) érvényes felülettudományi modellrendszer például a következő: titán-fémén képződő epitaxiális titán-oxid kölcsönhatása a testnedvekben előforduló molekulákkal és ionokkal. A legutóbbi időkben egy másik lényeges biotechnológiai területen – a funkcionizált, bioszektív felületek, bioszenzorok nanotechnológiai előállításában – is felmerült a felülettudomány alkalmazhatósága. További jelentős témák is ígértesek, mint például a DNS-szekvencia meghatározás SPM módszerrel; a mesterséges fotoszintézis, illetve az idegsejteknek integrált áramkörökkel történő összekapcsolása.

4.6 *Mágneses ultravékony rétegek előállítása*

A gyors és nagy kapacitású optikai, illetve mágneses adattárolók kétségkívül korunk információs társadalmának igen fontos kellei (floppy, CD, DVD, winchester). Az információsűrűség növelése vezetett ahhoz a felismeréshez, hogy a felületi mágneses jelenségek megértése alapvetően szükséges a továbblépéshez (Shen, 2002). E kihívás jegyében kezdtek tanulmányozni a 2D-s (kétdimenziós) mágneses filmeket, az 1D-s mágneses vezetékeket, valamint legújabban a 0D-s mágneses nanopöttyöket. A terület kapcsolódik a fentebb már említett fém-fém ultravékony filmek kérdésköréhez is (pl. a Cu-Co-Cu szendvicsszerkezetek). Ma a mesterséges mágneses nanoszerkezetek kialakí-

tása olyan újszerű lehetőségeket tárt fel, mint például (i) a spin-polarizációs alagútmikroszkópia kifejlesztése; (ii) a makroszkópikus méretekben instabil, de nm-tartományban stabil mágneses nanoötvözetek (Fe/Cu(100), Fe/Pt(111)) létrehozása.

4.7 *Felülettudományi kvantumkémia*

A fentiekben már említett – a kvantumkémia által kezelhető modellrendszerek és a technológiai felületek közötti bonyolultsági szakadék („material gap”) sokáig jelentősen korlátozta a számítógéppel végezhető felülettudományi kutatásokat. Az utóbbi tíz év számítástechnikai fejlődése azonban sokkal közelebb vitt ehhez a célhoz, és ugyanebbe az irányba mutatnak a felülettudomány azon törekvései is, hogy atomi léptékben ellenőrzött modellrendszerekkel végezzünk kísérleteket. A XXI. század elejére lehetségessé vált, hogy „ab initio”, illetve sűrűségfüggő számításokkal másodperces időintervallumban lehessen követni a 10^4 atomot tartalmazó rendszerek dinamikáját (molecular dynamics) (Stampfl, 2002). Így például sikerült modellezni valós felületi rendszerek fázisátalakulását, adszorpció és deszorpció dinamikáját (oscilláló felületi reakciók). Az utóbbi idők lényeges fejleménye, hogy míg a korábbi elméleti modellek csupán egyes molekulák dinamikáját voltak képesek leírni, manapság az adszorbeált molekulák kölcsönhatását is figyelembe lehet venni a szimulációban (például CO oxidációja Ru(0001) felületen) (Bottcher, 2000).

5. *A felülettudomány hazai helyzete és eredményei*

A fentiekből talán érzékelhető, hogy a felülettudomány műveléséhez meglehetősen egyedi, sokszor igen nagy értékű berendezésekre van szükség. A szűkös anyagi források ellenére a magyarországi felületkutatási programok és eredmények a közép-európai régióban kiemelkedőnek mondha-

tók, ugyanakkor Nyugat-Európához és a fejlett világhoz képest 5-10 éves hátrányban vagyunk. A tudományterület vezető folyóirataiban (Surf. Sci., Appl Surf. Sci., Rep. Surf. Sci., Prog. Surf. Sci., Phys. Rev. B, J. Phys. Chem., J. Chem. Phys.) az utóbbi 15-20 évben magyar szerzők tollából megjelent dolgozatok száma kb. 300, ami az ország nagyságához és a ráfordított pénzügyi forrásokhoz viszonyítva jó eredménynek tűnik. A felülettudomány területén nemzetközileg is elismert hazai laboratóriumok a következők: ATOMKI Elektron-spektroszkópiai Osztály (Varga Dezső, Kövér László), BME Atomfizikai Tanszék (Giber János, Deák Péter), MFA Felületfizikai Laboratórium (Gergely György, Menyhárd Miklós), KK-AKK Felületkémiai Csoport (Bertóti Imre), KK Izotóp- és Felületkémiai Intézet (Guczi László), KK-KI Felületkémiai és Korróziós Osztály (Kálmán Erika), KLTE Szilárdtest Fizika Tanszék (Beke Dezső), SZTE-MTA Reakciókinetikai Kutatócsoport (Solymosi Frigyes, Kiss János). Az elmúlt években nemzetközi visszhangot is kiváltó eredmények az alábbi tématerületeken születtek: (i) a szénhidrogének katalitikus átalakításában fontos szerepet játszó köztitermékek tanulmányozása; (ii) felületi adalékanyagok hatásmechanizmusának felderítése; (iii) vékonyréteg szendvicsszerkezetek mélységi összetételének

meghatározására szolgáló módszerek kidolgozása; (iv) 2D modellkatalizátorok előállítása, átmenetifém-nanoszemcsék gázok hatására bekövetkező morfológiai változásának kimutatása; (v) kompakt gyémánt vékonyrétegek és egyéb antikorróziós bevonatok létrehozása.

Összességében megállapítható, hogy jelenleg működőképes kutatási háttérrel rendelkezünk a felülettudomány és a kapcsolódó nanotechnológia területén, s ez jó alapot jelenthet a terület szükséges továbbfejlesztéséhez az elkövetkező néhány évben.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Solymosi Frigyes akadémikusnak és Kiss János MTA-doktor-nak a kézirat gondos átolvasásáért és hasznos észrevételeikért. A felülettudomány terén végzett tevékenységem több mint két évtizedes támogatásáért és közös munkáinkban adott tanácsaiért külön is hálás köszönettel tartozom Solymosi Frigyes akadémikusnak.

Kulcsszavak: felülettudomány, nanotechnológia, redukált dimenziójú önszerveződés, felületanalitikai módszerek, elektron- és fotoelektron-spektroszkópia, atomszondás technika, kétdimenziós modellrendszerek.

IRODALOM

- Bottcher, A. Krenzer, B. Conrad, H. Niehus, H. (2000). Surf. Sci. **466**, L811
- Desjonquères, M.C. Spanjaard, D. (1998). *Concepts in Surface Physics*. Elsevier, Amsterdam
- Duke, C. B. Plummer, E.W. (Editors) (2002). Jubilee Volume Surf. Sci. **500**
- Dwyer, D. J. Hoffman, F.M. (1992). *Surf. Sci. and Catal. Symposium Series* 482, Washington D.C.
- Ertl, G. Freund, H.-J. (1999). Phys. Today. **1**, 32
- Freund H.-J. (2002). Surf. Sci. **500**, 271
- Kasemo, B. (2002). Surf. Sci. **500**, 656
- Kiskinova, M. P. (1992). *Studies in Surf. Sci. and Cat.* Vol. 70
- O'Connor, D. J. Sexton, B. A. (2001). *Surf. Anal. Methods in Mat. Sci.* Springer Series in Surf. Sci. Vol. 23
- Pearsall, T. P. (2000). *Quantum Semiconductor Devices and Technologies*, Kluwer Academic Publishers. London
- Razumas, V. Nylander, T. (2001). *Surf. and Coll. Sci.* Elsevier, Amsterdam
- Shen, J. Kirschner, J. (2002). Surf. Sci. **500**, 300
- Somorjai, G. A. Garfunkel, E. L. (1989). *Alkali Adsorption on Metals and Semiconductors*, Bonzel, H. P. Ertl, G. (eds). Elsevier, Amsterdam, 319
- Stampfl, C. Ganduglia Pirovano, M. V. Reuter, K. Scheffler, M. (2002). Surf. Sci. **500**, 368
- Vickerman, J. C. (2001). *Surface Analysis*, UMIST, Manchester, UK
- Zaera, F. (2001). Progr. in Surf. Sci. **69**, 1