Fémes nanoszerkezetek elektrokémiai leválasztása és vizsgálata

- Doktori értekezés tézisei -

Neuróhr Katalin

okleveles vegyész

Témavezető: Dr. Péter László, Ph.D.

Magyar Tudományos Akadémia Wigner Fizikai Kutatóközpont

Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

Komplex Folyadékok Osztály

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Kémia Doktori Iskola
Analitikai, kolloid- és környezetkémia, elektrokémia doktori program

Doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Inzelt György
Doktori program vezetője: Prof. Dr. Záray Gyula

2013.

1. Bevezetés

"A tudomány izgalmas kaland.
Ajtókat nyitogatunk, keressük az igazságot,
s egyszerre ott van előttünk, mint mesebeli kincs,
a maga kézzelfogható, tündöklő valóságában."

(Kosztolányi Dezső)

Napjainkban a nanotechnológia egyre fontosabb szerepet kap. A nanoszerkezetű anyagok előállítása és vizsgálata a tudomány fontos feladata, ugyanis ezen anyagok kutatása során fény derült rá, hogy a makroszkopikus méretű anyagokban lejátszódó alapvető fizikai-kémiai folyamatok a nanoszerkezetű anyagokban más módon mennek végbe. A nanotechnológia robbanásszerű megjelenése új távlatokat nyitott a tudományos életben, igy az eddig érvényben lévő szemléletmód gyökeresen megváltozott.

A nanotechnológia első említésének időpontja pontosan ismert: 1959. december 29-én, az ekkor már Nobel-díjas tudós, Richard Feynman előadást tartott az amerikai fizikusok éves találkozóján a California Institute of Technology-n „There's Plenty of Room at the Bottom" címmel. Az előadás az anyagkészítés kisebb méretskálán történő szabályozásának problémájáról szólt, megjósolva, hogy egy napon a tudomány segítségével képesek leszünk egy egész enciklopédia tartalmát egyetlen tűhegyre felírni. Az ismert fizikai törvényekből extrapolálva egy olyan technológiát képzelt el, amely a természet alapvető folyamatát követné, nanoobjektumok építését atomról atomra, molekuláról molekulára. A témában az első tudományos értekezés 1981 szeptemberében készült. Azóta a nanoobjektumok előállításával, felfedezésével kapcsolatban megjelent számos tanulmány megerősítette ezt a jóslatot, hiszen napjainkban már arra is lehetőségünk nyílik, hogy a kívánt nanostruktúrájú anyagot előzetes számítások alapján akár atomi szinten építsük fel.

A nanotechnológia eddig ismeretlen felhasználási területeket tett elérhetővé, és forradalmi változáson mentek át a nanotechnológiával kezelt felületek, anyagok tulajdonságai. Ilyen tulajdonságok többek között a fényáteresztés, a karcolás- és kopásállóság, az elektromos vezetés és a korrózióval szembeni ellenállás. Ezekkel az új anyagokkal számos, a mindennapokban használatos terméket is gyártanak már, úgymint eső- és szennyeződéstaszító ruházat, nedvességnek ellenálló napvédőszer, sebtapasz antibiotikus tulajdonságokkal stb.

Doktori értekezésem témájából kifolyólag számomra a nanotechnológia egyik legfontosabb területe a nanoskálájú tartományban történő elektrokémiai fémleválasztás.

Az MTA Wigner SZFI Fémkutatási Osztályán (2013 januárjától Komplex Folyadékok Osztály) két évtizede foglalkoznak elektrokémiai úton előállított mágneses/nemmágneses fémes multirétegek szerkezetének, mágneses és elektromos transzport tulajdonságainak vizsgálatával. Elektrokémiai úton történő fémleválasztással előállítottak már számos különleges tulajdonságú fémet és fémötvözetet (például Ni-P amorf ötvözeteket, nanokristályos nikkelt, és kobaltot),

valamint mágneses/nemmágneses rétegpárokból felépített multirétegeket (Ni-Cu/Cu, Co-Cu/Cu, Co-Ni-Cu/Cu).

Elektrokémiai módszerrel a multirétegek egyes rétegeinek vastagságát nanométeres tartományban lehet szabályozni, és az így kapott nominális rétegvastagságok jól egyeznek a közvetlen szerkezetvizsgálatok eredményeivel. Ez azt jelzi, hogy a nanoskálán történő mintakészítés folyamata pontosan szabályozható, és ezáltal lehetőség nyílik ezen anyagok fizikai tulajdonságainak vizsgálatára az előállítási paraméterek függvényében. A mágneses/nemmágneses multirétegekben az ún. „óriás" mágneses ellenállás (GMR) jelensége figyelhető meg. A jelenség 1988-ban történt kimutatását – ami Grünberg és Fert egymástól független felfedezése volt – 2007-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazták. Tehát a szerkezeti paraméterek vizsgálatán túl fontos cél a mágneses és magnetotranszport tulajdonságok tanulmányozása is ezen anyagcsoport esetén.

Fémes nanoszerkezetek hordozóhoz közeli vizsgálatából fontos összefüggéseket állapíthatunk meg a leválasztás folyamatáról, valamint a leválasztott anyag mélységprofiljáról. Mindezek mellett többet megtudhatunk az ötvözetek hordozóhoz közeli zónájáról is, aminek leválása a leválasztás tranziens szakaszába esik. Csoportunk (Elektrolitikus Nanoszerkezetek Csoport) az elektrokémiai fémleválasztással készült minták mélységprofil-analízisére olyan mintakészítési eljárást dolgozott ki, mellyel a minta a szilícium lapka hordozótól elválasztható, így a vizsgálat kiindulási felülete elegendően sima. Ezáltal a mélységprofil-analízis a hordozóhoz közeli zóna összetételi változásait a legérzékenyebben tudja leképezni.

2. Célkitűzések

Munkám témája fémes nanoszerkezetek elektrokémiai úton történő leválasztása és vizsgálata, valamint az előállítási paraméterek, a leválasztott anyag mágneses ellenállása és az elektrokémiai viselkedés közötti kapcsolat tanulmányozása volt. Ezen cél megvalósítása érdekében igyekeztem a rendelkezésemre álló kísérleti technikák minél szélesebb körű felhasználására.

Elektrokémiai fémleválasztási folyamatokban a leválasztás kezdetekor kialakul egy átmeneti, tranziens szakasz, míg a leválási folyamat körülményei az állandósult állapotot el nem érik. Azonban 200 nm-nél vékonyabb bevonatok esetén ez az állandósult állapot nem biztos, hogy kialakul. A tranziens szakaszban képződő fémréteg összetétele emiatt folyamatosan változhat, ami ronthatja a bevonattól elvárt tulajdonságokat. Ezért célul tűztem ki elektrokémiai úton előállított Fe-Ni minták hordozóhoz közeli összetételének vizsgálatát, valamint az impulzusos és egyenáramú leválasztással készült minták összehasonlítását.

Ni-X (X = Cu, Cd, Sn) rendszerek esetén célom volt az ötvözetben a Ni mellett más preferáltan leváló fém jelenlétében ellenőrízni, hogy a preferált leválás és a Fe-Ni rendszer esetében a komponenseloszlásban tapasztalt változás (azaz a preferáltan leváló komponens viszonylagos felhalmozódása a hordozó közelében) általánosítható-e ezen rendszerekre.

A Co-Cu rendszernél mágneses ellenállást mutató Co/Cu multirétegeket elektrokémiai úton állítottam elő megfelelő fürdőösszetétel megválasztásával. Fizikai módon előállított Co/Cu mulirétegek esetén a Cu réteg szigetes növekedésének megakadályozását fémes adalékanyagok hordozóra történő párologtatásával érték el. Célom volt annak tanulmányozása, hogy mindez elektrokémiai leválasztással is megvalósítható-e, továbbá az ezüst, bizmut és ólom mint fémes adalékanyagok hatását is vizsgáltam a leválasztott anyag mágneses ellenálására. Mindezek mellett célul tűztem ki bizmut tartalmú elektrolitok esetén a fémleválasztás erősen savas közegben történő vizsgálatát, mivel a savas közeg kedvez a Bi(III) sók oldhatóságának.

Co/Cu multirétegek elektrokémiai úton történő leválasztása korábban már többféle elektrolitból, különböző hőmérsékleteken is történt, azonban a leválasztási hőmérséklet hatását eddig még nem vizsgálták szisztematikusan. Ezért célom volt azt vizsgálni, hogy az elektrokémiai úton leválasztott Co/Cu multirétegek esetén a leválasztáskor alkalmazott elektrolit hőmérséklete hogyan hat a leválasztott anyag mágneses elleállására, tulajdonságaira.

Co-Ni/Cu rendszerek esetén célom modulált összetételű fürdőkből különböző hőmérsékleteken előállított elektrolitikus minták mágneses ellenállásának és szerkezetének vizsgálata volt, ugyanis korábban ilyen irányú szisztematikus vizsgálatok még nem történtek.

További célom volt olyan fürdők kifejlesztése, melyek alkalmasak az ólom és a kobalt együttleválására folytonos filmek, ötvözetek és multirétegek előállítása céljából.

3. Alkalmazott módszerek

3.1. Mintakészítés elektrokémiai leválasztással

Az egyes mintákat elektrokémiai úton történő fémleválasztással – egyenárammal, illetve impluzusos módot alkalmazva – állítottam elő.

A minták előállításánál hordozóként 0,26 mm vastagságú (100) orientációjú Si egykristályt használtam. A hordozóként használt szilícium lapkára 5 nm krómot párologtattak a megfelelő tapadás biztosítása miatt, valamint 20 nm rezet az elektromos kontaktus biztosításáért. Atomerő mikroszkóppal történt mérések alapján a hordozó durvasága az egyes rétegek párologtatással történő felvitele után legfeljebb 3 nm-nek adódott.

A minták elektrokémiai leválasztása *ELEKTROFLEX* gyártmányú *EF453* típusú potenciosztát-galvanosztáttal történt. A leválasztás során két- vagy háromelektródos cella-elrendezést használtam. A katód, azaz a munkaelektród mintakészítések esetén Si/Cr/Cu hordózó volt, de egyes elővizsgálatok során a leváló fémeknél nemesebb fémet (Cu vagy Pt) is alkalmaztam. A cella keresztmetszete téglalap volt, de a cella alján, a katódhoz közel a keresztmetszete kisebb volt, ezáltal küszöböltük ki a szélhatást és sikerült elérni az egyenletes árameloszlást. Az anódot, azaz a segédelektródot a cella nyitott felső végéről meritettük az oldatba. Segédelektródként mindig a magasabb leválási potenciálú fémet használtam a leválasztás során, valamint egyes vizsgálatokat inert elektróddal (pl.: Pt) végeztem. A katód potenciáljának

méréséhez (galvanosztatikus üzemmód), illetve a katód potenciáljának beállításához (potenciosztatikus üzemmód és CV mérések) KCl-dal telített kalomelektródot ($Hg(l)|Hg_2Cl_2(s)|KCl(sat)$) használtam. A referenciaelektród az ohmikus potenciál csökkentése érdekében egy Luggin-kapilláris segítségével volt az elektrolithoz vezetve, hogy a kapilláris vége minden mérésnél reprodukálható, azonos távolságban legyen elhelyezve a katódtól.

Azon kísérletekhez, melyek során a fürdő hőmérsékletének hatását vizsgáltam, másik cellaelrendezést használtam. A két cella közötti különbség a következő módon foglalható össze: a cella keresztmetszete az utóbbi esetben kör volt, valamint a cella teteje zárt volt az egyenletes hőmérsékleteloszlás biztosítása miatt. Az anód össze volt építve a cella tetejével.

3.2. Mintakészítés fordított mélységprofil-analízishez

Fe-Ni és Ni-X (X = Cu, Cd, Sn) ötvözetek fordított mélységprofil-analitikai vizsgálata esetén a fémionokat tartalmazó elektrolitból történő leválasztást követően Ni fedőréteget választottam le az elkészített mintákra a mechanikai stabilitás biztosítása érdekében. Majd a Si lapka eltörése után a mintát lehúztam a hordozóról. A minta így önhordó lett, a második Ni réteg kellő szakítószilárdságának köszönhetően. Az ehhez szükséges Ni réteg vastagsága kb. 2 μm volt.

3.3. Analitikai vizsgálati módszerek

Az elektrokémiai fémleválasztással készült minták elemösszetételének elemzése egy JEOL JSM 840 típusú pásztázó elektronmikroszkóp RÖNTEC gyártmányú elemző szondájával történt. A kémiai analízis a minta 1 mm^2 területén, mintánként jellemzően három ponton, 25 kV feszültség mellett történt.

Elektrokémiai kvarckristály mikromérleggel (EQCM) történő mérésekhez SRS-200 műszert és arannyal bevont kvarckristályt használtam. A kristály alapfrekvenciája 5 MHz volt.

A mélységprofil-analitikai vizsgálatokat Debrecenben az MTA ATOMKI Elekton-spektroszkópiai és Anyagtudományi Osztályán az SNMS/SIMS Laboratóriumában üzemeltetett szekunder semleges tömegspektrométerrel (SNMS) végezték. A műszer egy INA-X (SPECS GmbH, Berlin) gyártmányú SNMS készülék volt. Az ionokkal bombázott kör alakú terület 2-3 mm átmérőjű volt, amit Ta maszkkal határoltak el. Az Ar^+ ionok 350 keV energiával rendelkeztek a porlasztás során. Ez az ionenergia egy nagyságrenddel kisebb annál, mint ami általában használatos a felületi rétegek eltávolítására pl. XPS esetén. Ez az energia elég kicsi ahhoz, hogy a mintában a porlasztás nem okoz számottevő keveredést.

A mélységprofil számításokhoz az egyes minták vastagságát szintén Debrecenben, ugyanezen laboratóriumban mérték egy Ambois Technology gyártmányú, 1 nm-es vertikális felbontású profilométerrel.

3.4. Fizikai vizsgálati módszerek

A leválasztott anyagok mágneses ellenállásának mérésére egy 8 kOe (0,8 T) nagyságú mágneses tér elérésére alkalmas vasmagos léghűtéses elektromágnes szolgált 4,0 cm-es légréssel. A forgatható mintatartó ebbe a légrésbe került. A mintatartó két részből áll, egy elektródokkal rendelkező plexilap, és egy, a minta felületének elektródokhoz való szorítására alkalmas mintatartó tető. A mágneses ellenállás mérés úgy történt, hogy a mintatartóban négypontos ellenállásméréshez kontaktáltam az egyes mintákat. A mágneses ellenállást minden esetben longitudinális (LMR) és transzverzális (TMR) elrendezésben is megmértem. Longitudinális elrendezésben a mágneses tér és az áram iránya párhuzamos, míg transzverzális elrendezés esetén merőlegesek egymásra.

A röntgendiffraktogramok az ELTE Anyagfizikai Tanszékének Philips X'pert típusú, Θ-2Θ rendszerű röntgen pordiffraktométerével, melyben a réz katód Kα vonalát alkalmaztuk. A vizsgált szögtartomány minden esetben 20-100°, a lépésköz pedig 0,02° volt.

4. Tézisek

A) Eredmények az egyenáramú és impulzusos leválasztással készült Fe-Ni minták SNMS-sel végzett fordított mélységprofil-analitikai vizsgálatával kapcsolatban [S3]

T1. Egyenáramú és impulzusos leválasztással készült Fe-Ni minták mélységprofil-analitikai vizsgálatának eredményei alapján megállapítottam, hogy az egyenárammal és az impulzusos leválasztással készült ötvözetek komponenseloszlása egymástól lényegesen eltérő. Impulzusos leválasztással készült minták esetén az állandósult és a kezdeti összetétel között alig van különbség, tehát a vastagság mentén egyenletes összetételű minták állíthatók elő. Ezzel szemben az egyenáramú leválasztással készült minták esetén drasztikus különbség van a két érték között, az így készült minta a növekedés irányában változó összetételű lesz.

T2. Igazoltam, hogy az impulzusos leválasztással készült Fe-Ni minták kezdeti összetétele független az áramsűrűségtől abban az esetben, ha a minták készítésekor alkalmazott áramsűrűség a -12 – -30 $mAcm^{-2}$ tartományban van. Egyenáramú módban készült minták kezdeti összetétele megegyezik az impulzusidő során azonos áramsűrűség alkalmazásával impulzusos módban készült minták átlagos összetételével.

T3. Impulzusos leválasztásnál minél nagyobb a cikluskitöltési tényező (ε), annál nagyobb összetétel-változás tapasztalható a kezdeti összetételhez képest. 45 mmol dm^{-3} Fe^{2+} koncentráció esetén $\varepsilon < 0{,}2$ cikluskitöltési tényező szükséges a vastagság mentén állandó ötvözetösszetétel eléréséhez, de 5 mmol dm^{-3} Fe^{2+} koncentráció mellett ugyanez csak $\varepsilon < 0{,}04$ cikluskitöltési tényező alkalmazásakor valósítható meg. Impulzusos leválasztás esetén minél kisebb a galvánfürdő Fe^{2+} tartalma, annál kisebb cikluskitöltési tényezőt célszerű választani ahhoz, hogy a leválasztott anyag összetétele ne változzon a vastagság mentén. Egyenárammal leválasztott minták esetében, amikor a cikluskitöltési tényező 1, az állandósult állapot összetételét a leválasztott anyag 90 nm után éri el, azonban a vas móltörtje ebben az esetben csak mintegy fele lesz a kezdeti értéknek.

B) Eredmények elektrokémiai úton leválasztott Ni-X (X = Cu, Cd, Sn) ötvözetek SNMS-sel végzett fordított mélységprofil-analitikai vizsgálatával kapcsolatban [S1]

T4. Számos Ni ötvözetre igazoltam, hogy egyenáramú leválasztás esetén a hordózóhoz közeli 150 nm vastagságú zónában feldúsul a preferáltan leváló fém (Cu, Cd és Sn), ezért az ennél vékonyabb ötvözetbevonatok esetén nem lehet biztosítani a leválasztott anyag összetételi homogenitását egyenáramú leválasztás során.

T5. Ni-Sn ötvözetek esetében kimutattam a hordozó réz atomjainak diffúzióját a leválasztott anyagba. A hordozó és a leválasztott ötvözet keveredését nagy Sn tartalmú bevonatok képződésekor a Cu és Sn erős ötvözetképző hajlama okozza.

C) Eredmények a fürdőhőmérséklet hatásának vizsgálatáról Co/Cu és Co-Ni/Cu multirétegekre vonatkozóan

T6. Elsőként vizsgáltam szisztematikusan elektrokémiai úton előállított multirétegek esetén a leválasztáskor alkalmazott hőmérséklet hatását a leválasztott anyag mágneses ellenállására. Míg Co/Cu multirétegek esetén a fürdő hőmérsékletének hatása a leválasztott anyag magnetotranszport tulajdonságaira kimutatható volt, addig Co-Ni/Cu multirétegek esetén nem lehetett megállapítani a mágneses ellenállás mérések eredményeiből ezt a tendenciát. Co/Cu multirétegek esetén a hőmérséklet növelésének hatására nőtt a mágneses ellenállás ferromágneses járuléka.

D) Eredmények a fémes adalékanyag, valamint az anion hatásának vizsgálatáról az elektrokémiai úton leválasztott Co/Cu multirétegekre vonatkozóan

T7. Ólom mint fémes adalékanyag hatását vizsgálva megállapítottam, hogy a mágneses ellenállás a fürdő ólomion koncentrációjának növelésekor monoton csökken. Az acetátos és perklorátos fürdőkkel végzett kísérletek alapján általános tapasztalat volt, hogy az ólomkationok a multiréteg-képződésére nem simító, hanem szerkezettörő hatásúak. A leválasztott Co/Cu multirétegek óriás mágneses ellenállása a kétfajta anion jelenlétében az ólomkation koncentráció függvényében eltérő ütemben változott (azonos nominális rétegvastagságok mellett).

T8. Perklorátos fürdőből leválasztott Co/Cu multirétegek esetén az ezüst pozitív hatása jelentkezik a GMR effektus nagyságában. A fürdő optimális Ag^+ koncentrációja mellett a minták mágneses ellenállásának nagysága mintegy kétszerese az azonos kísérleti feltételek mellett ezüstion mentes fürdőből készült mintákénak.

E) Eredmények elektrokémiai leválasztással készült Co/Pb granuláris elegyekre vonatkozóan [S2]

T9. Megmutattam, hogy az oldhatósági feltételeknek eleget tevő lehetséges fürdőtípusok közül csak az acetát aniont tartalmazó fürdők alkalmasak kobalt és ólom egyidejű elektrokémiai leválasztására. A ciklikus voltammogramok alapján megállapítottam, hogy az ólom leválási és oldódási potenciálja a Co leválási és oldódási potenciálja közé esik, ezért impulzusos

leválasztási módban az ólom leválását nem kísérheti a kobalt oldódása az ólomleválás potenciál-intervallumában.

T10. Megmutattam, hogy míg egyenáramú leválasztással nem lehet kompakt mintát készíteni 80 at.% alatti Co tartalommal, addig impulzusos leválasztással bármely mintaösszetétel elérhető. Az impulzusos leválasztással készült minták összetételi elemzései alapján igazoltam, hogy ha az ólom leválasztási potenciálja telített kalomel elektródhoz képest a -0,58 V – -0,63 V tartományban van, továbbá a Co-dús anyag leválasztási áramsűrűsége a -10 – -50 $mAcm^{-2}$ tartományban, akkor a minta összetételét csak az impulzusok során áthaladt töltés határozza meg.

T11. Több kísérleti módszerrel kapott eredmények egyértelműen igazolják, hogy az egyensúlyi körülmények között elegyedést nem mutató Co-Pb rendszerben az elektrokémia leválasztás sem vezet a két fém számottevő elegyedéséhez, illetve multiréteg képződése sem történik. Ezt a következtetést a röntgendiffrakciós mérések eredményei egyértelműen igazolják, és mindez összhangban van a mágneses ellenállás mérések által mutatott anizotrop mágneses ellenállással is. A leválasztás során képződő bevonatok a két fém granuláris elegyei.

5. Következtetések

Munkám során részletesen vizsgáltam különféle körülmények között elektrokémiai úton leválasztott Fe-Ni ötvözetek mélységi összetételét. Az impulzusos leválasztás előnyös akár 200 nm-nél is vékonyabb egyenletes összetételű ötvözetek előállítására. Minél kisebb a preferáltan leváló fémion koncentrációja az oldatban, annál kisebb cikluskitöltési tényező szükséges az egyenletes komponenseloszlás eléréséhez.

Az összes eddig vizsgált rendszerre helytállónak bizonyult egyenáramú módban történő elektrokémiai leválasztás esetén az a feltételezés, hogy a preferáltan leváló komponens feldúsul a bevonat hordozóhoz közeli rétegekben. A fémötvözetek leválasztásával kapcsolatos eredmények rámutatnak arra, hogy a gyakorlati szempontból fontos ultravékony bevonatok összetételének ellenőrzése elkerülhetetlen, és kívánatos az impulzusos leválasztási mód alkalmazása.

Munkám során vizsgáltam különféle ionok hatását elektrolitikus Co/Cu multirétegekre, hogy összehasonlítsam az elektrokémiai leválasztást a szakirodalomban szereplő fizikai módszerek eredményeivel. Az ólom mint fémes adalékanyag ezen multirétegek képződésére nem simító, hanem inkább szerkezettörő hatású volt. Az ólommal ellentétben az ezüstnek pozitív hatása jelentkezik a Co/Cu multirétegekre a GMR effektus nagyságában, de a mért *MR(H)* görbe jellege nem támasztja alá, hogy a fizikai módszereknél kapott erősen csatolt multiréteghez hasonló szerkezetű mintát kapnánk.

Részletesen vizsgáltam impulzusos leválasztással, G/P módban készült Co-Pb granuláris elegyek összetételét, magnetotranszport tulajdonságait és szerkezetét. Beigazolódott, hogy a minták semmilyen irányban nem textúráltak és valószínűsíthető, hogy egy granuláris elegy jön létre.

6. A tézisek alapjául szolgáló tudományos munkák, valamint egyéb közlemények

A Ph.D dolgozat alapjául szolgáló közlemények

[S1] K. Neuróhr, A. Csik, K. Vad, A. Bartók, G. Molnár, L. Péter;
Composition depth profile analysis of electrodeposited alloys and metal multilayers: the reverse approach
Journal of Solid State Electrochemistry **15** (2011) 2523–2544**.** [IF(2011): 2,131]

[S2] K. Neuróhr, J. Dégi, L. Pogány, I. Bakonyi, D. Ungvári, K. Vad, J. Hackl, Á. Révész, L. Péter;
Composition, morphology and electrical transport properties of Co-Pb electrodeposits
Journal of Alloys and Compounds **545** (2012) 111-121. [IF(2011): 2,289]

[S3] K. Neuróhr, A. Csik, K. Vad, G. Molnár, I. Bakonyi, L. Péter;
Near-substrate composition depth profile of d.c.-plated and pulse-plated Fe-Ni alloys
Electrochimica Acta **103** (2013) 179– 187 [IF(2011): 3,832]

Egyéb közlemények

[S4] P. Jedlovszky, G. Hantal, K. Neuróhr, S. Picaud, P. N. M. Hoang, P. von Hessberg and J. N. Crowley;
Adsorption Isotherm of Formic Acid on the Surface of Ice, as Seen from Experiments and Grand Canonical Monte Carlo Simulation
Journal of Physical Chemistry C **112**(24) (2008) 8976-8987**.** (IF: 3.396; FH = 3)

[S5] K. Zih-Perényi, K. Neuróhr, G. Nagy, M. Balla, A. Lásztity;
Selective extraction of traffic-related antimony compounds for speciation analysis by graphite furnace atomic absorption spectrometry
Spectrocimica Acta Part B **65** (2010) 847-851. (IF: 3.549; FH = 2)

[S6] M. Jafari Fesharaki, L. Péter, T. Schucknecht, D. Rafaja, J.Dégi, L. Pogány, K. Neuróhr, É. Széles, G. Nabiyouni, I. Bakonyi;
Magnetoresistance and structural study of electrodeposited Ni-Cu/Cu multilayers.
Journal of the Electrochemical Society **159**(3) (2012) D162-D171**.** (IF: 2.420; FH: 5)