

dc_92_10

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**ELEKTROKÉMIAI ÚTON LEVÁLASZTOTT
FÉMES NANOSZERKEZETEK**

**Az értekezést készítette:
Péter László, Ph.D.**

**MTA WIGNER FIZIKAI KUTATÓKÖZPONT
Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet
Fémkutatási Osztály**

**Budapest
2012.**

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom elsősorban szüleimnek, akik tiszteletben tartották pályaválasztásomat, tanulmányaimhoz ideális feltételeket biztosítottak, és kicsi koromtól fogva alaposságra és igényességre neveltek. Köszönöm nekik azt is, hogy kitartó segítségükkel felnőtt életem válságos időszakaiban is lehetővé tették, hogy választott pályámat folytassam.

Köszönöm feleségemnek, Erikának, hogy mellettem állt, biztatott és türelemmel támogatott a munkában, viselte a családról való gondoskodás összes nehézségét távollétem idején, töretlenül bízott munkám sikerében és segített átlendülnöm az utóbbi évtized számos nehéz időszakán.

Szeretném megköszönni mindazon tanárainknak a munkáját, akik hozzásegítettek a tudomány alapjainak elsajátításához és megismertették velem a tudomány csodálatos világát. Kiemelt köszönettel tartozom középiskolai kémiatanáromnak, néhai dr. Varga Ernőnek, továbbá diplomamunka és doktori témavezetőmnek, Láng Győzőnek.

Köszönöm munkahelyi vezetőmnek, Bakonyi Imrének, hogy 1998-ban a hazatérés és a tudományos életpálya lehetőségét kínálta nekem. Hálával tartozom továbbá kitartó támogatásáért és temérdek segítségéért, ami meghatározó hatást gyakorolt szakmai kibontakozásomra. Köszönöm az MTA SZFKI (ma: MTA Wigner FK SZFI) kiváló szakmai közösségének és az intézet vezetésének a hozzájárulását munkám sikeréhez.

Köszönöm mindazon kollégák támogatását, akik szakmai tanácsokkal, mérési eljárásokhoz való hozzáférés biztosításával és bátorításukkal segítséget nyújtottak. Kiemelt köszönettel tartozom Vad Kálmánnak (MTA ATOMKI Elekrnspektroszkópiai és Anyagtudományi Osztály) a mélységprofil-analitikai mérésekért és a példaértékű önzetlen együttműködésért.

Köszönöm mindazon kollégák támogatását, akikkel a doktori munka egyes részterületein hosszabban is együttműködtem. Ugyancsak nagy hálával tartozom mindazon magyar diákoknak és külföldi posztdoktor kollégáknak, akik irányítással dolgoztak az elmúlt években, és akiknek munkájára magam is számíthattam. Köszönöm továbbá mindazt a sok-sok technikai segítséget, amivel a technikus kollégák járultak hozzá munkám sikeréhez.

I. BEVEZETÉS, ELŐZMÉNYEK

Az anyagtudományokhoz kapcsolódó megmunkálási módszerekben folyamatos változás figyelhető meg az elmúlt évtizedekben, melynek során a homogén és termodinamikai értelemben stabil fázissal rendelkező anyagok helyébe nemegyensúlyi eljárással készült metastabil és egyre kisebb méretskálákon tagolt anyagok lépnek. Szálerősítésű műanyagok, nanokristályos vagy amorf fémötvözetek, kompozit anyagok és igen nagy diszperzitású részecskéket tartalmazó rendszerek váltják fel a korábban használt homogén anyagokat. A változások hajtóereje sokrétű: felöleli a mechanikai tulajdonságok széles körét (mint például a szakítószilárdság, keménység, kopásállóság növelése), a korrózióval szembeni ellenállást, a megnövelt fajlagos felület igényét (például katalizátoroknál vagy adszorbenseknél), a kis koercitív térrel rendelkező mágnesek létrehozását, de kiterjedhet az időbeni stabilitás növelésére is (például olyan többkomponensű diszperz rendszereknél mint a kozmetikai termékek sokasága).

A technológiai fejlesztések során előtérbe kerültek azok az anyagok, amelyeknek saját maguknak vagy az őket alkotó homogén tartományoknak legalább a tér egyik irányában vett mérete az 1-100 nm-es méretskálán mérhető. Ezeket az anyagokat összefoglaló néven nanoszerkezetű anyagoknak vagy nanostruktúráknak, az előállításukat biztosító eljárásokat összességében nanotechnológiának szokás nevezni.

A nanoszerkezetű anyagok tag csoportjából számomra elsősorban a fémek, illetve a fémek családján belül mágneses fémeket is tartalmazó nanoszerkezetek voltak fontosak. A hagyományos mikrokristályos fémek esetén az elektrontranszportot jellemző jellegzetes távolságok (úgy mint a közepes szabad úthossz és a spindiffúziós távolság) a kristályméretnél jellemzően kisebbek. Ezzel szemben a fémes nanoszerkezeteknél az összetételi moduláció távolságskálája legalább a tér egyik irányában kisebb, mint az elektrontranszportot jellemző jellegzetes távolságok. Emiatt a nanoszerkezetek esetében a közel egyensúlyi szerkezetű mikrokristályos anyagokhoz képest új típusú transzportjelenségek tapasztalhatók.

A nanométer közeli összetételi modulációval rendelkező ferromágneses/nemmágneses struktúrák esetén fellépő egyik új jelenség az óriás mágneses ellenállás (giant magnetoresistance, elterjedt rövidítésével GMR). Az 1980-as évek legvégén felfedezett effektus kimutatásáért és értelmezéséért 2007-ben Albert Fert és Peter Grünberg megkapta a fizikai Nobel-díjat. A jelenség lényege röviden a következő:

Egy mágneses tartományban az elektronok szóródásának valószínűsége függ a elektron spinje és az adott helyen vett mágnesezettség viszonylagos irányától. A helyi mágnesezettség szempontjából kedvező spinorientációval rendelkező elektronok mágneses eredetű szórás nélkül haladhatnak az adott mágneses tartományban, míg a kedvezőtlen spinorientáció mágneses eredetű szórás fellépéséhez vezet. A teljes elektrontranszportot Mott nyomán két párhuzamos spincsatornán történő vezetésként tekintjük. A mágneses eredetű szórás hozzájárul az adott anyag teljes ellenállásához. Egymással váltakozó ferromágneses és nemmágneses[#] rétegeket tartalmazó anyagban a szomszédos mágneses rétegek mágnesezettségének iránya különféle módokon állhat be. Rendkívül kis rétegvastagság-fluktuációval rendelkező multirétegek esetén a nemmágneses réteg vastagságától függően mind parallel (azaz ferromágneses), mind antiparallel (azaz antiferromágneses) csatolás megvalósulhat a szomszédos mágneses rétegek mágnesezettsége között. A csatolás jellege a nemmágneses réteg vastagságának oszcilláló függvénye, míg a csatolási erősség a mágneses rétegek közötti elválasztó réteg vastagságának növelésével monoton csökken. Amennyiben az adott multirétegben a rétegvastagságok fluktuációja vagy más szerkezeti tényező nem teszi lehetővé az egyöntetű csatolás kialakulását, a szomszédos mágneses rétegek mágnesezettsége még rendszerint rendelkezik kisebb arányú antiparallel komponenssel. A nagy antiparallel mágnesezettség komponens a spindiffúziós távolságon belüli mágneses tartományoknál nagy ellenállású állapothoz vezet, mivel bármilyen spinű elektron transzportja során felléphet a mágneses eredetű elektronszórás is.

Kellően nagy külső mágneses térbe helyezve a mágneses/nemmágneses multiréteget elérhető, hogy az összes mágneses réteg (ill. tartomány vagy domén) mágnesezettsége a külső tér irányába mutasson. Ilyenkor az ellenállás mindig csökken, mivel a két spincsatorna közül az egyik nem érintett a mágneses eredetű szórási eseményekben. A jelenség felhasználható mágneses tér érzékelésére is. A GMR jelenség, illetve az arra alapuló többrétegű egység, az ún. spinszelep igen hamar teret nyert a mágneses adathordozók kiolvasó egységében. Ez ugyanis mind az érzékenység, mind a sebesség, mind a méret szempontjából előnyökkel rendelkezett a tekercsek segítségével történő kiolvasáshoz képest.

[#] A mágneses térrel kölcsönhatásba kerülő anyag mágnesezettsége természetesen sohasem lesz szigorúan zérus. A nemmágneses anyag, nemmágneses réteg kifejezéseket e munka keretei között a nem ferromágneses, azaz diamágneses vagy paramágneses anyagoknak tartom fenn, igazodva a szakirodalomban megszokott egyszerű, de lényegretörő szóhasználathoz.

A GMR jelenség tanulmányozása fizikai módszerekkel (pl. vákuumpárolgatással, porlasztással) előállított multirétegeken kezdődött meg. Hamar kiderült, hogy elektrokémiai fémleválasztással is létrehozhatók olyan anyagok, amelyekben megvan a megfelelő összetételi moduláció a GMR jelenség észleléséhez. Az első közlemény a GMR-t mutató elektrolitikus multirétegek tárgyában 1993-ban jelent meg, és azóta kb. 170 közlemény foglalkozott a témával. A GMR-t mutató multirétegek elektrokémiai fémleválasztással történő létrehozását az első sikeres próbálkozástól kezdve mint a vákuumrendszereken alapuló előállítási eljárások költséghatékony alternatívát tartják számon.

A témában megjelent közlemények számottevő része demonstrációs jellegű esettanulmány annak érzékeltetésére, hogy lehetséges különféle összetételű GMR-t mutató multirétegek előállítása elektrokémiai fémleválasztással is. A teljes szakirodalmi palettának csak kis része az, amely vállalkozik akár az elektrokémiai fémleválasztás paramétereinek szisztematikus tanulmányozására, akár a kapott multiréteg mintákban a "leválasztási körülmények $\rightarrow$ szerkezet $\rightarrow$ mágneses és magnetotranszport sajátságok" hatáslánc részletes feltárására. Az ilyen tanulmányok következetes elvégzése azonban elengedhetetlen annak tisztázásához, hogy az elektrolitikus GMR multirétegek miért mutatnak egyrészt kisebb mágneses ellenállást a fizikai módszerekkel előállított hasonló mintákhoz képest, illetve miért nem találunk megfelelő antiparallel csatolást az elektrolitikus multirétegek mágneses rétegei között. Hasonlóképpen csak a rendszerezett vizsgálat képes megválaszolni azt a kérdést, hogy az elektrolitikus multirétegek esetén a telítés eléréséhez szükséges mágneses tér miért válik a ferromágneses anyagoknál megszokott 1-2 kOe-es tér helyett sok esetben néhányszor 10 kOe-es nagyságúvá, és mi okozza a szuperparamágneses jellegű viselkedés fellépését.

Mindezek a jelenségek szorosan összefüggenek azzal, hogy a fémleválasztás során alkalmazott fürdő milyen anyagokat tartalmaz és milyen kémiai jelenségekre kell számítani a fémionok redukcióján kívül. A fellépő jelenségek komplex értelmezéséhez szükség van az elektrolitban fellépő fémion transzport figyelembe vételére, a mágneses és nemmágneses fémek egymás felületén történő nukleációjának megértésére, a rácsillesztetlenség szerepének magyarázatára a nukleáció és a folytonos réteg kialakulásának vonatkozásában, a kevésbé nemes mágneses fém viselkedésének leírására a nemesebb nemmágneses fém ionjának jelenlétében, a nemelegyedő fémek szegregációjának figyelembevételére, továbbá a galvántechnikából sokszor csupán a hagyomány alapján átvett, de a kialakuló szerkezet sajátságait erősen befolyásoló adalékanyagoknak a leválasztási folyamatban játszott szerepének megértésére is. A fent említett jelenségekört kiegészítve a mágneses és

magnetotranszport sajátságok tanulmányozásával olyan interdiszciplináris területre érünk, amelynek kémiai vonatkozásai a fizikusok, míg fizikai háttere a vegyészek számára jelent nehézséget, de kellő fizikai-kémiai ismeretek birtokában az egész jelenségkör együttesen és egységesen kezelhető. E tudományágak közötti határterületeket is átívelő kutatómunka számomra igazi kihívást jelentett, és munkám számottevő részét képezte az elmúlt másfél évtizedben.

Az elektrolitikus multirétegek fizikai jellegű vizsgálatait számos analitikai jellegű eljárás alkalmazása teheti teljesebbé (felületi durvaság mérése, mélységprofil-analitikai vizsgálatok). Ezen eljárások alkalmazása korábban elszigetelt próbálkozások keretein belül történt, és a vizsgálatokat végző kutatók nem törekedtek arra, hogy az ezekből kapott eredményeket egységbe foglalják. Ez utóbbi törekvés vonul végig azokon a munkáimon, amik az elektrolitikus multiréteg minták mélységi komponens-eloszlásának tanulmányozásával függenek össze.

A mágneses/nem-mágneses multirétegek tanulmányozása akaratlanul is felszínre hozott számos olyan kérdést, ami maguknak a tömbi (azaz: nem szándékoltan nanoszerkezetű és nem a nanoszerkezetek leválasztásánál megszokott impulzusos, hanem egyenáramú leválasztással létrehozott) mágneses anyagoknak és egyéb ötvözeteknek a leválasztásával függ össze. Elektrokémiai leválasztással létrehozott mágneses ötvözetekről számos tanulmány készült, amelyekben a leválasztott rétegek vastagsága 1 μm körüli, azaz mind a mágneses tulajdonságok, mint az elektromos transzport szempontjából tömbi anyagnak tekinthetők. A szakirodalom rendezett és szisztematikus ismereteket közöl a mágneses tulajdonságoknak az előállítási paramétereiktől való függése tekintetében, de kisebb ellentmondások lelhetők fel a leválasztott anyagok (pl. FeCoNi ötvözetek) összetételének vastagságfüggése terén. Az ultravékony elektrolitikus mágneses rétegekre vonatkozó eredmények azonban a mágneses tulajdonságok szempontjából sem egységesek, és az összetételi vizsgálatok is rendre hiányoznak. Mindezek felvetik annak a kérdését, hogy valóban elhanyagolhatók-e a leválasztási folyamat kezdetén fellépő tranziens jelenségek, és valóban homogén anyagokat kapunk-e már néhányszor 10 nm-es vastagság-skálán is, ha állandó leválasztási körülményeket alkalmazunk. E vonatkozásokban célszerűnek látszott mélységprofil-analitikai vizsgálatokat végzni. Ennek során hamar felmerült az az igény, hogy a mágneses sajátságoktól teljesen függetlenül a különféle elektrokémiai együttelezési módozatokat is jellemezni kell aszerint, hogy milyen komponens-eloszláshoz vezetnek a leválás kezdeti szakaszában.

A mélységprofil-analitikai módszerek alkalmazását összekapcsoltam egy olyan technikai újítással, ami lehetővé tette a leválasztott anyagok hordozó közeli zónáinak tanulmányozását. Ennek azért van jelentősége, mert a nagy mintamélységből származó jel minden roncsolásos mélységi analitikai eljárás során a roncsolásos eljárás okozta felületi érdesség növekedés és a kiindulási érdesség egymásra hatásának eredményeként alakul ki. Emiatt a nagy mélységben levő zónák észlelése során a módszerek mélységi feloldása már jóval kisebb, mint a felület közeli rétegeknél volt az eljárás megkezdésekor. Ezek a problémák az elektrokémiai leválasztással készített minták analízisében azért különösen jelentősek, mert a felületi érdesség növekedése a mintavastagsággal elektrokémiai fémleválasztás során rendszerint jóval gyorsabb, mint porlasztáson vagy párologtatáson alapuló növesztési módszereknél.

II. CÉLKITŰZÉSEK

Dolgozatomban olyan anyagokkal foglalkozom, amelyekben az elektrokémiai leválasztás során vagy szándékosan alakítjuk ki a néhány nanométeres ismétlődési távolságú összetételi modulációt a leválasztási paraméterek megfelelő változtatásával (modulációjával), vagy az összetételi változások spontán jönnek létre a leválasztási paraméterek konstans értéke mellett jellemzően 200 nm-nél nem nagyobb távolságokon. A célkitűzések az anyagcsoportok előállításának, fizikai tulajdonságainak és összetételi változásainak vizsgálata szerint három csoportba különíthetők el.

Az elektrokémiai leválasztással létrehozott mágneses/nemmágneses multirétegek előállításával és fizikai tulajdonságainak vizsgálatával kapcsolatban célom volt magának a leválasztási eljárásnak a megértése annak fényében, hogy a leválasztás során a létrehozott fém nanoszerkezet magával az elektrolitoldattal, azaz egy reaktív közeggel végig érintkezésben marad. Ez olyan lényeges különbséget jelent a vákuumtechnikán alapuló fizikai módszerrel történő leválasztásokhoz képest, ami a korábbiakban nem kapott a szakirodalomban megfelelő figyelmet. Az elektrokémiai leválasztási folyamat megértésétől aztán egyenes út vezet azon módszerek felé, amik lehetővé teszik a leválasztási eljárás paramétereinek optimális megválasztását. Az optimalizációs eljárás célja egyrészt az, hogy a nominális összetétel és a ténylegesen meghatározható összetétel azonos legyen, másrészt az, hogy a leválasztás során olyan morfológiai változások se történjenek, amik rontják a multiréteges minták tulajdonságait, ezek között is elsősorban a fő vizsgálati paraméternek tekintett mágneses ellenállást. Ugyancsak célom volt egységes értelmezést adni a

leválasztás folyamatát befolyásoló különféle körülményeknek, úgy mint a pH és az adalékanyagok hatása különösen a minták mágneses ellenállására. A kapott mágneses/nemmágneses multirétegek fizikai tulajdonságainak vizsgálata során a fő törekvésem az volt, hogy világos szabályszerűségeket állapítsak meg az "előállítási paraméterek → szerkezeti tulajdonságok → transzport sajátságok" ok-okazati láncolatában.

Az elektrokémiai leválasztással létrehozott multirétegek összetételi változásának vizsgálatával kapcsolatban az a cél vezérelt, hogy megfelelő analitikai eljárás alkalmazásával a kapott anyagok mélységi komponens-eloszlását a nanométeres méretskálán jellemezni tudjam. Nagyon érdekes problémának találtam, hogy az összetételi változásokat összefüggésbe lehet-e hozni a leválasztás során fellépő morfológiai változásokkal, illetve a minőségi megállapításokon túl ezeket lehetséges-e egységes kvantitatív módszerrel is kezelni.

Az egyenáramú elektrokémiai leválasztással előállított ötvözetekkel kapcsolatban több két- és háromkomponensű rendszert vizsgáltam meg. Ezeket az ötvözeteket korábban a növekedési irányban nézve homogénnek gondolták (vagy legalább is nem volt szakirodalmi adat a növekedés kezdeti szakaszában kialakuló inhomogenitásról). Mivel ezen ötvözeteknél az összetételi változások nem a leválasztási paraméterek modulációjának eredményeként, hanem spontán jönnek létre, a célom a megfelelő nanoanalitikai módszer kiválasztása és alkalmazása volt annak érdekében, hogy a minták kvantitatív jellemzése is lehetővé váljék. Elsősorban mélységprofil-analitikai módszer alkalmazásával kívántam vizsgálni a fémleválasztás során a hordozó közelében kialakuló összetételi zónákat, és olyan módszert igyekeztem kifejleszteni, hogy a hordozó közelében is nagy felbontással jellemezhessem a leváló fémötvözetet. Igyekeztem általános érvényű választ találni arra, hogy az elektrokémiai fémleválasztás kezdeti szakaszában az oldatban jelenlévő fémionok transzportja miként vehető figyelembe a leváló fém összetételének kialakításában, és mi a szerepe a leválási preferenciának a hordozó közeli zóna összetételének változásaiban. Az utóbbi kérdést több együttleválási módozat esetén is igyekeztem tanulmányozni.

III. A KUTATÓMUNKÁBAN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Az elektrokémiai fémleválasztással kapcsolatos kísérleteket és a minták készítését nagyrészt EF453 típusú elektrokémiai munkaállomással, majd 2010-től részben Ivium CompactStat berendezéssel végeztem. Az egyenletes árameloszlást és anyagtranszportot, illetve ezen keresztül egyenletes laterális komponens-eloszlást biztosító elektrokémiai cellákat saját magam terveztem. A minták készítéséhez a szakirodalomban részletesen leírt egyfűrdős eljárást alkalmaztam, amelyben az összes reaktáns egyetlen elektrolitoldatban van jelen, az összetételi modulációt pedig a leválasztás elektromos paraméterének (áram vagy potenciál) váltakozása idézi elő.

A minták bruttó összetételének elemzése egy JEOL-840 típusú pásztázó elektronmikroszkóp Röntec gyártmányú elemző feltétjének segítségével történt. Magnetotranszport vizsgálatokhoz egy házi építésű, a kutatómunka során alegységeiben és programozásában többször továbbfejlesztett mérőrendszert használtam, amely elektromágnesből, annak tápegységéből, a mágneses tér mérésére szolgáló Hall-szondából, áramgenerátorból, nanovoltmérőből (Keithley), számítógép-vezérelt méréspont-váltóból és számítógépes adatgyűjtő rendszerből állt. Az alacsony hőmérsékleten végzett magnetotranszport vizsgálatokat egy Leybold gyártmányú zárt ciklusú hélium-kriosztát és a fent részletezett mérőállomás együttes használatával oldottam meg. A mágneses mérések egy Foner típusú vibrációs magnetométer, illetve egy Quantum Design gyártmányú SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnetométer segítségével történtek. A röntgendiffrakciós vizsgálatokat az együttműködő partnereink által üzemeltetett különféle típusú (jellemzően Philips, ill. Bruker gyártmányú) diffraktométerek segítségével sikerült megoldani. Ugyancsak külső együttműködések keretében volt lehetőségem a minták transzmissziós elektronmikroszkóppal történő tanulmányozására.

A minták mélységi komponens-eloszlásának vizsgálata a debreceni ATOMKI Elektron-spektroszkópiai és Anyagtudományi Osztályán üzemeltetett szekunder semleges tömegspektrometriás (Secondary Neutral Mass Spectrometry, SNMS) készülék használatával történtek. A mélységi komponens-eloszlással kapcsolatos bonyolultabb számításokat egy MAPLE programban futtatott algoritmus segítségével oldottuk meg.

Az atomerő mikroszkópi mérésekhez a Veeco Metrology cég MultiMode AFM készülékét használtuk.

IV. AZ ÚJ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA (TÉZISEK)

A. Eredmények a mágneses/nemmágneses multirétegek elektrokémiai leválasztásával és a kapott anyagok fizikai tulajdonságaival kapcsolatban

- T1 Mágneses/nemmágneses multirétegek egyfűrdős rendszerből impulzusos módszerrel történő elektrokémiai leválasztásának tanulmányozása során megállapítottam, hogy a pozitívabb leválási potenciállal rendelkező nemmágneses fém ionjainak jelenléte számottevően befolyásolhatja a már leválasztott kevésbé nemes mágneses réteg viselkedését [S1, S2, S4, S5]. A nemesebb fém leválasztási körülményeinek helytelen megválasztása azt eredményezi, hogy az utolsóként létrejött mágneses réteg oldódik, míg a nemesebb fémből leválasztott réteg vastagabb lesz az adott leválasztási impulzus paramétereiből számolt nominális rétegvastagságnál. Az oldódási folyamatot a keresztmetszeti csiszolatokon felvett elemtérkép is kimutatja olyan módon, hogy a nemmágneses $\rightarrow$ mágneses és a mágneses $\rightarrow$ nemmágneses réteghatárok élessége különböző [S10]. A mágneses réteg oldódásának mértékét és a nemmágneses fém ezzel azonos mértékű többlet leválását a multiréteg bruttó összetételéből [S4, S10], illetve a nemmágneses fém potenciosztatikus impulzussal történő leválasztása esetén az adott impulzusban felvett áram-idő függvényből lehet kiszámítani [S5]. Kimutattam, hogy a mágneses fém és a nemmágneses fém ionja közötti cserereakció (cementálódás) önmagában is elegendő lehet multiréteges bevonat létrehozásához [S2].
- T2 Co/Cu multirétegek elektrokémiai leválasztásával kapcsolatban számos fűrdőre igazoltam, hogy a közkeletű ciklikus voltammetriás elővizsgálat nem megbízható módszer a nemesebb fém leválasztási körülményeinek pontos meghatározásához. Ehelyett olyan optimálási módszert javasoltam [S7], amely a nemesebb fém leválasztására használt potenciosztatikus impulzus során felvett áram-idő függvény elemzésén alapul, és olyan potenciált jelöl ki a nemesebb fém leválasztásához, amelyen az előzőleg leválasztott mágneses réteg anyagának sem a további leválása, sem az oldódása nem történhet meg. A kidolgozott módszer hatásosnak bizonyult más normális együttleválási módot mutató mágneses/nemmágneses fémpárok leválasztási körülményeinek optimális megválasztásában is (pl. Co/Ag [S17]). A nemesebb fém leválasztásához helyesen megválasztott elektródpotenciál lehetővé teszi, hogy a multiréteg bruttó összetételét és az egyes rétegek vastagságát a leválasztás paramétereiből is meghatározhassuk [S14].

- T3 Egységes módon értelmeztem az elektrokémiai fürdőkben alkalmazott komplexképzők és egyéb, a felületen megkötődni képes adalékanyagok hatását a multirétegek elektrokémiai leválasztása során [S3, S20]. Ráműtattam, hogy az adalékanyagok mindegyike a kristálynövekedés folyamatára nézve inhibeáló hatású, így alkalmazásukkor a kialakuló kristálméret és a szerkezeti rendezettség csökken. A mágneses ellenállás adalékanyagok hatására történő csökkenésének a kristályhatárokon történő megnövekedett elektronszórás, a réteges szerkezet fokozott rendezetlensége és a határréteg élességének csökkenése egyaránt oka lehet.
- T4 Az elektrokémiai úton leválasztott Co-Cu multirétegek kristályszerkezetéről megállapítottam, hogy az erősen függ a hordozó felületének sajátságaitól. A kívánt multiréteg periodicitásához képest nagy felületi érdességet mutató és megfelelő kristálytani illeszkedést nem biztosító hordozó felületén a leválás kezdeti szakasza szabályos multiréteges periodicitást nem mutató bevonathoz vezet, és csak mintegy 50 nm vastagság elérése után indul meg a már kimutathatóan réteges növekedés [S6]. A kívánt multiréteg periodicitásához képest kis felületi érdességet mutató és megfelelő kristálytani illeszkedést is biztosító hordozón a rendezetlen kiindulási zóna nem volt kimutatható. A multiréteges periodicitást jelző szatellit-csúcsok a röntgendiffrakciós mérésekben annál élesebben jelentkeznek, minél kisebb a kiindulási felületi érdesség [S6, S10] és minél kisebb a határrétegek élességét csökkentő fémoldódás lehetősége a mágneses $\rightarrow$ nemmágneses impulzusváltások során [S14]. A minták textúrája és a Co rétegek tökéletlen elhatárolása miatt kialakuló, a multirétegtől eltérő kristálytani módosulatú Co kristályok aránya egymással korrelált módon változik, és a mágneses ellenállás optimumát jelentő Cu rétegvastagság megegyezik a szerkezeti optimumot jelentő Cu rétegvastagsággal [S14].
- T5 Elektrokémiai úton leválasztott, különféle vastagságú Co és Cu rétegeket tartalmazó Co/Cu multiréteg minták vizsgálatával megmutattam, hogy a minták mágneses ellenállása jellegzetes módon változik meg, ha az egyes rétegvastagságokat a folytonosságot biztosító minimális rétegvastagság alá csökkentjük [S8]. A nemmágneses réteg túl kicsi vastagsága óriás mágneses ellenállás helyett anizotrop mágneses ellenállást eredményez. A Cu réteg folytonosságot biztosító küszöbvastagsága a leválasztáshoz használt fürdőre jellemző, de mindig a 0,8-2,5 nm közötti tartományban van [S8, S14]. Mindkét réteg vastagságával a folytonosságot biztosító határ alatt maradva granuláris jellegű anyagot kapunk, amelyben réteges rend nem

mutatható ki, és a mágneses ellenállást a szuperparamágneses járulék dominálja [S8]. Kimutattam, hogy a minták szerkezete szintén szorosan összefügg a rétegvastagságokkal. Co/Cu multirétegek kristálytani paraméterei szoros összhangban változnak a mágneses ellenállással annak megfelelően, hogy a Cu réteg vastagsága a folytonossági határ alatt vagy felett van-e [S14, S16].

- T6 Megmutattam, hogy elektrokémiai úton leválasztott Co/Cu multirétegek esetén a mágneses ellenállás szuperparamágneses járuléka erőteljesen függ a Co réteg Cu tartalmától [S9]. A jelenség a Co és Cu kedvezőtlen elegyedési sajátságaival és az ebből fakadó szegregációval magyarázható. A rezet különböző koncentrációban tartalmazó kobaltrétegekkel felépített multirétegek mikroszerkezetének vizsgálatával kimutattam, hogy a szegregációs folyamat elsősorban a szemcsehatárokon megy végbe [S23].
- T7 Elektrokémiai úton leválasztott Co/Cu multirétegek mágneses ellenállásának hőmérsékletfüggését vizsgálva igazoltam, hogy a minták tulajdonságait a kölcsönható szuperparamágneses rendszerek elmélete alapján lehet értelmezni [S11]. Módszert dolgoztam ki arra vonatkozóan, hogy miként lehet kizárólag a magnetotranszport adatokból kiszámolni a tényleges átlagos mágneses tartományméretet és a kölcsönhatást jellemző energetikai paramétert [S11]. A kidolgozott módszert Co/Ag multirétegek vizsgálatában is sikerrel alkalmaztam [S17].

B. Eredmények az elektrokémiai leválasztással létrehozott multirétegek komponens-eloszlásával kapcsolatban

- T8 Megmutattam, hogy az elektrokémiai úton leválasztott multirétegek mélységi komponenseloszlása SNMS módszerrel jól vizsgálható [S13, S15]. Kimutattam, hogy a mélységprofil-analitikai módszer hagyományos porlasztási irányban történő alkalmazásakor a még feloldható réteg legkisebb vastagsága a porlasztás kezdetekor 20 nm, és a rétegszerkezet kimutatásához szükséges minimális rétegvastagság a porlasztási folyamat előrehaladtával növekszik [S15].
- T9 Elektrokémiai leválasztással előállított Co-Ni-Cu/Cu multirétegek bruttó összetételének elemzésével kimutattam, hogy a kobaltot és nikkelt tartalmazó mágneses rétegben a rétegnövekedés irányában összetételi gradiensnek kell kialakulnia [S12]. A jelenséget két tényező együttes hatása okozza: egyrészt a kobalt preferált

leválása a nikkel mellett, másrészt az elektrolit kimerülése a katód közelében a nagy sebességgel leváló kobalt ionjaira nézve az adott réteg növekedésének kezdeti szakaszában. A bruttó összetételnek a rétegvastagságtól való függése alapján levont következtetést SNMS mélységprofil-analitikai módszer alkalmazásával közvetlenül is igazoltam [S13]. Értelmeztem a Co-Ni rétegekben kialakuló Co:Ni aránynak a leválasztáshoz használt áramsűrűségtől való függését [S13].

T10 Mintakészítési módszert dolgoztam ki abból a célból, hogy az elektrokémiai úton leválasztott anyagok mélységprofil-analitikai vizsgálatát ne a leválasztás befejezésekor kialakuló viszonylag durva felület irányából, hanem a létrehozott rétegnek a hordozó elválasztása után kapott kis felületi érdességű kiindulási zónája felől lehessen végrehajtani (fordított porlasztási irány) [S18, S21]. Kimutattam, hogy a mélységprofil-analízis lényegesen jobb feloldással jellemzi a hordozó közeli zónát és rétegszerkezetet 10 nm-nél kisebb rétegpár-vastagság esetén, ha az analízist a hordozó elválasztása után kapott kis érdességű felület irányából indítjuk [S18, S21].

T11 Megmutattam, hogy az elektrokémiai úton leválasztott Co/Cu multirétegek esetén a felületi érdességnek a leválasztás előrehaladtával történő megnövekedése meghatározó szerepet játszik a minták komponens-eloszlásában [S18]. Matematikai eljárást javasoltam arra, hogy a leválasztás egyes fázisai után atomerő-mikroszkóppal mért felületi érdességet miként kell figyelembe venni a komponensek eloszlásának kiszámításában és a kialakuló réteghatárok hullámosságának jellemzésében [S18]. Bizonyítottam, hogy a Co/Cu multirétegek esetén a kísérleti mélységprofil-analitikai eredmények a felületi érdesség vastagság-függésének figyelembe vételével számolhatóak [S18].

C. Az elektrokémiai leválasztással előállított fémötvözetek komponens-eloszlásával kapcsolatos eredmények

T12 Elektrokémiai úton leválasztott Ni-Fe-Co ötvözetek vizsgálatával megmutattam, hogy fordított mélységprofil-analízissel jól vizsgálhatók a hordozó közelében kialakuló azon átmeneti zónák, amelyeknek még a létrejötte sem mutatható ki a hagyományos porlasztási irány alkalmazásával [S19, S22]. A leválás során a hordozó közeli zónában a vas móltörtje minden vizsgált elektrolit-összetétel és áramsűrűség esetén lényegesen nagyobb volt, mint a leválás állandósult állapotában [S22]. Az állandósult állapotot minden vizsgált körülmény esetén kb. 150 nm vastag réteg leválása után értük el [S22].

- T13 A fordított mélységprofil-analízis segítségével számos bevonat-összetétel esetén kimutatható volt, hogy a preferáltan leváló komponens(ek)re nézve dús kiindulási zónát követően ezen komponens(ek) móltörtjének minimuma van. Ezt a jelenséget Ni-Co ötvözetek esetén a Co, Ni-Sn ötvözetek esetén az CuSn, Ni-Cd ötvözetek esetén a Cd, Ni-Fe-Co ötvözetek esetében a Fe és Co, továbbá Ni-Co-Cu ötvözetek esetén a Co és a Cu móltörtjében mutattam ki [S22, S24].
- T14 Megmutattam, hogy amennyiben az elektrokémiai leválási folyamatban két preferáltan leváló, de kis mennyiségben jelenlévő komponens játszik szerepet, akkor ezek móltörtjének fluktuációja a képződő fémekben szoros korrelációt mutat. A jelenséget Ni-Fe-Co ötvözetek esetében az Fe és Co, továbbá Ni-Co-Cu ötvözetek esetén a Co és a Cu móltörtje között sikerült kimutatni [S22, S24]. A korreláció nem függött attól, hogy a preferált leválás milyen együttleválási mód eredményeként alakult ki. A jelenséget a katód környezetében kialakuló hidrodinamikai instabilitással, illetve az ebből fakadó konvektív hatással ellentmondásmentesen meg lehet magyarázni.

V. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁUL SZOLGÁLÓ SAJÁT KÖZLEMÉNYEK (A MEGJELENÉS SORRENDJÉBEN)

- S1 E. Tóth-Kádár, L. Péter, T. Becsei, J. Tóth, L. Pogány, T. Tarnóczy, P. Kamasa, I. Bakonyi, G. Láng, Á. Cziráki, W. Schwarzacher; Preparation and magnetoresistance characteristics of electrodeposited Ni-Cu alloys and multilayers
Journal of The Electrochemical Society **147** (2000) 3311-3318.
- S2 L. Péter, Á. Cziráki, L. Pogány, Z. Kupay, I. Bakonyi, M. Uhlemann, M. Herrich, B. Arnold, T. Bauer, K. Wetzig; Microstructure and Giant Magnetoresistance of Electrodeposited Co-Cu/Cu Multilayers
Journal of The Electrochemical Society **148** (2001) C168-C176.
- S3 L. Péter, Z. Kupay, Á. Cziráki, J. Pádár, J. Tóth and I. Bakonyi; Additive Effects in Multilayer Electrodeposition: Properties of Co-Cu/Cu Multilayers deposited with NaCl Additive
Journal of Physical Chemistry B **105** (2001) 10867-10873.
- S4 W. R. A. Meuleman, S. Roy, L. Péter and I. Varga; Effect of Current and Potential Waveforms on Sublayer Thickness on Electrodeposited Copper-Nickel Multilayers
Journal of The Electrochemical Society **149** (2002) C479-C486.
- S5 V. Weihnacht, L. Péter, J. Tóth, J. Pádár, Zs. Kerner, C. M. Schneider, I. Bakonyi; Giant magnetoresistance in Co-Cu/Cu multilayers prepared by various electrodeposition control modes
Journal of The Electrochemical Society **150** (2003) C507-C515.
- S6 Á. Cziráki, L. Péter, B. Arnold, J. Thomas, H. D. Bauer, K. Wetzig, I. Bakonyi; Structural evolution during growth of electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers with giant magnetoresistance
Thin Solid Films **424** (2003) 229-238.
- S7 L. Péter, Q. X. Liu, Zs. Kerner, I. Bakonyi, Relevance of the potentiodynamic method in parameter selection for pulse-plating of Co-Cu/Cu multilayers
Electrochimica Acta **49** (2004) 1513-1526.
- S8 Q.X. Liu, L. Péter, J. Tóth, L.F. Kiss, Á. Cziráki, I. Bakonyi; The role of nucleation in the evolution of giant magnetoresistance with layer thicknesses in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers
Journal of Magnetism and Magnetic Materials **280** (2004) 60-74.
- S9 Q.-X. Liu, L. Péter, J. Pádár and I. Bakonyi; Ferromagnetic and Superparamagnetic Contributions in the Magnetoresistance of Electrodeposited Co-Cu/Cu Multilayers
Journal of The Electrochemical Society **152** (2005) C316-C323.
- S10 Á. Cziráki, L. Péter, V. Weihnacht, J. Tóth, E. Simon, J. Pádár, L. Pogány, C. M. Schneider, T. Gemming, K. Wetzig, G. Tichy, I. Bakonyi; Structure and giant magnetoresistance behaviour of Co-Cu/Cu multilayers electrodeposited under various deposition conditions
Journal of Nanoscience and Nanotechnology **6** (2006) 2000-2012.

- S11 L. Péter, Z. Rolik, L.F. Kiss, J. Tóth, V. Weihnacht, C.M.Schneider and I. Bakonyi, Temperature dependence of the giant magnetoresistance and magnetic properties in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers: the role of superparamagnetic regions *Physical Review B* **73** (2006) 174410/1-10.
- S12 L. Péter, J. Pádár, E. Tóth-Kádár, Á. Cziráki, P. Sóki, L. Pogány and I. Bakonyi; Electrodeposition of Co-Ni-Cu/Cu multilayers. 1. Composition, structure and magnetotransport properties *Electrochimica Acta* **52** (2007) 3813-3821.
- S13 L. Péter, G. L. Katona, Z. Berényi, K. Vad, G. A. Langer, E. Tóth-Kádár, J. Pádár, L. Pogány and I. Bakonyi; Electrodeposition of Ni-Co-Cu/Cu multilayers. 2. Calculations of the element distribution and experimental depth profile analysis *Electrochimica Acta* **53** (2007) 837-845.
- S14 I. Bakonyi, L. Péter, Z.E. Horváth, J. Pádár, L. Pogány and G. Molnár; Evolution of structure with spacer layer thickness in electrodeposited Co/Cu multilayers *Journal of The Electrochemical Society* **155** (2008) D688-D692.
- S15 G. L. Katona, Z. Berényi, L. Péter, K. Vad; Depth profile analysis of electrodeposited nanoscale multilayers by SNMS *Vacuum* **82** (2008) 270-273.
- S16 D. Rafaja, C. Schimpf, V. Klemm, G. Schreiber, I. Bakonyi and L. Péter; Formation of microstructure defects in electrodeposited Co/Cu multilayers *Acta Materialia* **57** (2009) 3211-3222.
- S17 J. García-Torres, L. Péter, Á. Révész, L. Pogány and I. Bakonyi; Preparation and giant magnetoresistance of electrodeposited Co-Ag/Ag multilayers *Thin Solid Films* **517** (2009) 6081–6090.
- S18 A. Bartók, A. Csik, K. Vad, G. Molnár, E. Tóth-Kádár, L. Péter; Application of Surface Roughness Data for the Evaluation of Depth Profile Measurements of Nanoscale Multilayers *Journal of The Electrochemical Society* **156** (2009) D253-D260.
- S19 A. Csik, K. Vad, E. Tóth-Kádár, L. Péter; Spontaneous near-substrate composition modulation in electrodeposited Fe-Co-Ni alloys *Electrochemistry Communications* **11** (2009) 1289-1291.
- S20 I. Bakonyi and L. Péter; Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): progress and problems *Progress in Materials Science* **55** (2010) 107-245.
- S21 A. Csik, K. Vad, G.A. Langer, G.L. Katona, E. Tóth-Kádár, L. Péter; Analysis of Co/Cu multilayers by SNMS reverse depth profiling *Vacuum* **84** (2010) 141-143.
- S22 L. Péter, A. Csik, K. Vad, E. Tóth-Kádár, Á. Pekker, G. Molnár; On the composition depth profile of electrodeposited Fe Co Ni alloys *Electrochimica Acta* **55** (2010) 4734-4741.

- S23 D. Rafaja, C. Schimpf, T. Schucknecht, V. Klemm, L. Péter, I. Bakonyi;
Microstructure formation in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers with GMR effect:
influence of current density during the magnetic layer deposition
Acta Materialia **59** (2011) 2992-3001
- S24 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.

VI. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ EGYÉB PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG

A. Referált folyóirat cikkek idegen nyelven (a megjelenés sorrendjében)

- E1 Á. Cziráki, M. Köteles, L. Péter, Z. Kupay, J. Pádár, L. Pogány, I. Bakonyi, M. Uhlemann, M. Herrich, B. Arnold, J. Thomas, H. D. Bauer, K. Wetzig; Correlation between interface structure and GMR in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers *Thin Solids Films* **433** (2003) 237-242.
- E2 W. R. A. Meuleman, S. Roy, L. Péter, I. Bakonyi; Effect of current and potential waveforms on structure and GMR characteristics of electrodeposited Ni(Cu)/Cu multilayers *Journal of The Electrochemical Society* **151** (2004) C256-C261.
- E3 I. Bakonyi, J. Tóth, L. F. Kiss, E. Tóth-Kádár, L. Péter, A. Dinia, Origin of giant magnetoresistance contributions in electrodeposited Ni-Cu/Cu multilayers *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **269** (2004) 156-167.
- E4 M. Alper, M.C. Baykul, L. Péter, J. Tóth, I. Bakonyi; Preparation and characterisation of electrodeposited Ni-Cu/Cu multilayers *Journal of Applied Electrochemistry* **34** (2004) 841-848.
- E5 I. Bakonyi, L. Péter, Z. Rolik, K. Kis-Szabó, Z. Kupay, J. Tóth, L. F. Kiss, J. Pádár; Decomposition of the magnetoresistance of multilayers into ferromagnetic and superparamagnetic contributions *Physical Review B* **70** (2004) 054427(1-10).
- E6 L. Péter, Z. Kupay, J. Pádár, Á. Cziráki, Zs. Kerner, I. Bakonyi; Electrodeposition of Co Cu Zn/Cu multilayers: Influence of anomalous codeposition on the formation of ternary multilayers *Electrochimica Acta* **49** (2004) 3613-3621.
- E7 I. Bakonyi, L. Péter, V. Weihnacht, J. Tóth, L. F. Kiss, C. M. Schneider; Giant magnetoresistance in electrodeposited multilayer films. The influence of superparamagnetic regions *Journal of Optoelectronic and Advanced Materials* **7** (2005) 589-598.
- E8 L. Péter, V. Weihnacht, J. Tóth, J. Pádár, L. Pogány, C.M.Schneider, I. Bakonyi; Influence of superparamagnetic regions on the giant magnetoresistance of electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **312** (2007) 258-265.
- E9 I. Bakonyi, E. Simon, L. Péter, B.G. Tóth and L.F. Kiss; Giant magnetoresistance in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers: origin of absence of oscillatory behaviour *Physical Review B* **79** (2009) 174421 (1-13).

- E10 B.G. Tóth, L. Péter, Á. Révész, J. Pádár and I. Bakonyi; Temperature dependence of the electrical resistivity and the anisotropic magnetoresistance (AMR) of electrodeposited Ni Co alloys
European Physical Journal B **75** (2010) 167-177.
- E11 L. Péter; Comment on "Magnetoresistance of CoNiCu/Cu Multilayers Electrodeposited from Electrolytes with Different Ni ion concentrations" (J. Electrochem. Soc. 157(10) D538-D545 (2010).)
Journal of The Electrochemical Society **158** (2011) S1-S2.
- E12 B.G. Tóth, L. Péter and I. Bakonyi; Magnetoresistance and surface roughness study of the initial growth of electrodeposited Co/Cu multilayers
Journal of The Electrochemical Society **158**(11) (2011) D671-D680
- E13 M. Jafari Fesharaki, L. Péter, T. Schucknecht, D. Rafaja, J. Dégi, L. Pogány, K. Neuróhr, É. Széles, G. Nabiyouni, and I. Bakonyi; Magnetoresistance and Structural Study of Electrodeposited Ni-Cu/Cu Multilayers
Journal of The Electrochemical Society **159**(3) (2012) D162-D171.
- E14 S. Esmaili, M. E. Bahrololoom, L. Péter; Magnetoresistance of electrodeposited NiFeCu alloys
Thin Solid Films **520** (2012) 2190.
- E15 R. Caballero-Flores, V. Franco, A. Conde, L. F. Kiss, L. Péter, I. Bakonyi; Magnetic multilayers as a way to increase the magnetic field responsiveness of magnetocaloric materials
Journal of Nanoscience and Nanotechnology, közlésre elfogadva.

B. Könyvfejezetek idegen nyelven

- E16 L. Péter and I. Bakonyi; Electrodeposition and Properties of Nanoscale Magnetic/Non-Magnetic Metallic Multilayer Films
in: *Electrocrystallization in Nanotechnology*, Chapter 12 (pp.242-260), Ed. Georgi Staikov, Wiley-VCH, 2007. (ISBN 978-3-527-31515-4)
- E17 L. Péter and I. Bakonyi, Electrodeposition as a Fabrication Method of Magnetic Nanostructures
in: *Nanomagnetism and Spintronics*, Chapter 5 (pp.89-120), Eds. F. Narirpouri and A. Nogaret, World Scientific Publisher, 2010. (ISBN: 978-981-4273-05-3)

C. Előadások nemzetközi konferenciákon (előadóként)

- E18 L. Péter; Additive effects in multilayer electrodeposition
Workshop on Electrodeposited Nanostructures, Budapest, 2001. május 25.
- E19 L. Péter, V. Weihnacht, J. Tóth, J. Pádár, Zs. Kerner, C. M. Schneider, I. Bakonyi; Giant magnetoresistance in Co-Cu/Cu multilayers prepared by various electrodeposition control modes
2nd International Workshop on Electrodeposited Nanostructures, Budapest, 2002. október 11-12.

- E20 L. Péter, V. Weichnacht, Z. Kupay, Á. Cziráki, J. Pádár, L. Pogány, J. Tóth, I. Bakonyi; Pulse-plating versus d.c. plating: Purposes and ways of optimization EAST Forum 2003 (European Academy of Surface Technology szervezet szimpóziuma), Lyngby, Dánia, 2003. április 10-12.
- E21 L. Péter, Relevance of the potentiodynamic method and current transient analysis in parameter selection for multilayer pulse-plating
3rd International Workshop on Electrodeposited Nanostructures, Newcastle, Anglia, 2004. március 25-27.
- E22 L. Péter; Interface formation during electrodeposition of metallic multilayers
Gordon Research Conference on Electrodeposition, New London (NH, USA), 2004. augusztus 8-13.
- E23 L. Péter, J. Pádár, E. Tóth-Kádár, I. Bakonyi, K. Vad, Z. Berényi; Effect of the anomalous codeposition on the composition and depth profile of nanoscale NiCoCu/Cu multilayers
4th International Workshop on Electrodeposited Nanostructures, Drezda, Németország, 2006. március 16-18.
- E24 L. Péter, G. L. Katona, Z. Berényi, K. Vad, E. Tóth-Kádár, J. Pádár and I. Bakonyi; Complementary information of the composition analysis and direct depth profile imaging of electrodeposited multilayers
5th International Workshop on Electrodeposited Nanostructures, Iasi, Románia, 2007. június 5-7.
- E25 L. Péter, E. Tóth-Kádár, I. Bakonyi, K. Vad, G. L. Katona; Interface stability and composition profile of electrodeposited nanolayers
Fall Meeting of the European Materials Research Society, Symposium D: 9th International Symposium on Electrochemical/Chemical Reactivity of Metastable Materials; Varsó, Lengyelország, 2007. szeptember 17-21.
- E26 L. Péter, I. Bakonyi, E. Tóth-Kádár, J. Pádár, K. Vad, G. L. Katona, Z. Berényi; Depth profile analysis of electrodeposited magnetic multilayers;
INA-User Meeting, Kaiserslautern, Németország, 2007. december 10.
- E27 L. Péter, I. Bakonyi, E. Tóth-Kádár, J. Pádár, K. Vad, G. L. Katona, A. Csík; Depth profile analysis of pulse-plated multilayer films
3rd European Pulse Plating Seminar, Bécs, Ausztria, 2008. március 7.
- E28 L. Péter, E. Tóth-Kádár, J. Pádár, I. Bakonyi, K. Vad, G. L. Katona, A. Csík, A. Bartók; Electrodeposition, composition and depth profile analysis of Co/Cu and Co-Ni/Cu multilayers
59th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (ISE), Sevilla, Spanyolország, 2008. szeptember 8-12.
- E29 L. Péter, A. Csík, K. Vad, A. Bartók, E. Tóth-Kádár, G. Molnár; Reverse depth profile analysis of electrodeposited Fe-Co-Ni alloys and Co/Cu multilayers
216th Meeting of The Electrochemical Society, Bécs, Ausztria, 2009. október 4-9.

- E30 L. Péter: Application of pulse plating for codeposition of immiscible metals: Deposit properties and trends of the structure formation.
4th European Pulse Plating Seminar, Bécs, Ausztria, 2010. március 5.
- E31 L. Péter, A. Csik, K. Vad, E. Tóth-Kádár, G. Molnár: Composition depth profile of electrodeposited Fe-Co-Ni alloys
2nd Regional Symposium on Electrochemistry – South-East Europe; Belgrád, Szerbia, 2010. június 5-10.

D. Konferencia kiadványokban megjelent munkák

- E32 I. Bakonyi, L. Péter, E. Tóth-Kádár, J. Tóth: Giant magnetoresistance (GMR) in nanoscale metallic multilayers: Achievements and challenges in electrochemistry.
In: Bulletin of the Technical Division on Fine Plating of the Surface Finishing Society of Japan, No. 59, pp. 31-40 (2000) [Invited paper at the 59th Symposium of the Fine Plating Division (Chuo University, Tokyo, 2000)]
- E33 W.R.A. Meuleman, S. Roy, L. Péter; Electrodeposition of Cu/Ni(Cu) multilayers from a citrate electrolyte in a flow cell;
Extended Abstracts of the 200th Electrochemical Society Meeting (San Francisco, CA, USA, 2001), Abstract #743.
- E34 S.M.S.I. Dulal, E. A. Charles, L. Péter, I. Bakonyi, S. Roy; Giant magnetoresistance of Ni-Co(Cu)/Cu and Cu/Ni-Co multilayers plated from a citrate electrolyte;
Extended Abstracts of the 202nd Electrochemical Society Meeting (Salt Lake City, Utah, USA, 2002), Abstract #518.
- E35 S.M.S.I. Dulal, E. A. Charles, L. Péter, I. Bakonyi, S. Roy; Giant magnetoresistance in electrodeposited Cu/Ni, Cu/Co and Cu/Ni-Co multilayers;
Extended Abstracts of the Conference on Electrochemistry (Preston, U.K., 2002)
- E36 Á. Cziráki, T. Gemming, V. Weihnacht, K. Wetzig, L. Péter, J. Pádár, I. Bakonyi, G. Tichy; Co-deposition, dissolution and replacement process during electrochemical deposition of Co/Cu multilayers.
In: Proc. Microscopy Conference (Dresden, 2003), Eds. T. Gemming, M. Lehmann, H. Lichte and K. Wetzig; *Microscopy and Microanalysis* **9**, Suppl. 3 (2003) 237-242.
- E37 I. Bakonyi, L. Péter: Progress on Electrodeposited Multilayer Films with Giant Magnetoresistance (GMR) Behaviour: 1993-2004. 8th International Symposium on Magnetic Materials, Processes and Devices (Meeting of The Electrochemical Society, Honolulu, Hawaii, USA, 2004.),
The Electrochemical Society PV 2004-23, pp. 227-244.
- E38 I. Bakonyi, L. Péter: Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR) behaviour.
In: Proc. Int. Workshop on Nanostructured Materials by Electroplating (Sandanski, Bulgaria, 2006). Eds. D. Stoychev, E. Valova, I. Krastev and N. Atanasov (St. Kliment Ohridski University Press, Sofia, 2006), pp. 75-80.

E. Ismeretterjesztő írások magyar nyelven

- E39 Bakonyi Imre, Simon Eszter, Péter László: Az óriás mágneses ellenállás felfedezése (1988) – A spintronika nyitánya (A 2007. évi fizikai Nobel-díj és háttere). *Fizikai Szemle* 58. évf. 2. szám (2008.) 41-45.
- E40 Bakonyi Imre, Simon Eszter, Péter László: Mágneses ellenállás ferromágneses fémekben és mágneses nanoszerkezetekben; *Fizikai Szemle* 58. évf. 3. szám (2008.) 93-98.

F. Összefoglaló táblázat a saját publikációkról

	összesen (ezekből a tézisek alapjául szolgáló közleményekre vonatkozó adat, ahol ez releváns)
Idegen nyelvű tudományos közlemény referált folyóiratban	530 (24)
Összesített impakt faktor	123,4 (72,2)
Független hivatkozások száma	510 (337) *
Könyvfejezet idegen nyelven	2
Előadások nemzetközi konferenciákon	21
Poszterek nemzetközi konferenciákon	16
Előadás MTA munkabizottsági üléseken	7 (5)
Ismeretterjesztő írások magyarul	2
Tankönyvek	1

* A hivatkozások száma az összes forrást tartalmazza: a szakönyvek, független doktori munkák és a közkeletű tudományos adatbázisokban nem szereplő folyóirat cikkek hivatkozásait is. Az összesítés dátuma: 2012. 02. 10.