

## **Csatolási, anizotrópia- és doménjelenségek mágneses vékonyrétegekben**

### **I. A kutatás célja, a munkatervben vállalt kutatási program, a kutatási eredmények, amelyeket a támogatás felhasználása tett lehetővé**

A jövő információs társadalmának műszaki alapját az egyre miniaturizálódó és egyre nagyobb hatékonyságú számítástechnikai, informatikai, távközlési és folyamatszabályzási eszközök kifejlesztése jelenti, amelyek az elektromos vezetés és általában az elektron-szerkezet szempontjából különleges tulajdonságú anyagokat igényelnek. Nanométeres vastagságú, egymástól nemmágneses fémréteggel elválasztott ferromágneses fémrétegekből álló antiferromágneses (AF) beállású multirétegeket külső mágneses térnek kitéve a mágnesezettség átrendeződik, és a multiréteg elektromos ellenállása jelentősen csökken. Ez az „óriás mágneses ellenállás” (GMR) jelensége, amelyet ma kiterjedten alkalmaznak merevlemezek olvasófejeiben és mágneses szenzorokban, és amelynek felfedezését 2007-ben fizikai Nobel-díjjal honorálták. Projektünk kutatási célja az volt, hogy hozzájáruljon antiferromágnesesen csatolt fémes multirétegekben megfigyelhető néhány olyan jelenség részleteinek tisztázásához, amelyek alapvetően befolyásolják a GMR-eszközök teljesítőképességét (érzékenységet, zaját, stb.). Mindehhez elsősorban a réteg-réteg csatolás, a mágneses anizotrópia, valamint a doménszerkezet, valamint ezeknek a transzporttulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálatára volt szükség.

A kutatási tervet úgy állítottuk össze, hogy a minták előállítása lehetőleg saját kezünkben legyen. Ezt jelentős részben az RMKI molekulanyaláb-epitaxia (MBE) berendezésére alapoztuk, amelynek üzembe állását a pályázat benyújtásakor 2003 őszére vártuk, vagyis ez a lehetőség eredeti terveink szerint kezdettől fogva a projekt rendelkezésére állt volna. Sajnos a berendezés a szállító cégnek felróható okokból csak két évvel később, 2005 és 2006 fordulóján kezdett megfelelően működni, ezért a projekt első két évében még nagymértékben rá voltunk utalva együttműködő partnereink, elsősorban a Leuveni Egyetem MBE-berendezéseire. Ez a tény egyrészt számottevő csúszást okozott a projekt végrehajtásában, másrészt az eredeti program jelentős módosulásának egyik fő tényezője is volt.

Az AF multirétegek doménszerkezetének tanulmányozására főként a reflektometria (polarizált neutronreflektometria (PNR), röntgenreflektometria, szinkrotron-Mössbauer-reflektometria (SMR)) diffúz szórásai változatait alkalmaztuk. Ezek segítségével már a projektet megelőzően különféle, a multiréteg mágnestér-történetétől függő doménátalakulásokat figyeltünk meg, amelyekben a réteg-réteg csatolás mellett a mágneses anizotrópia is lényeges szerepet játszik. A projekt fő célkitűzése az volt, hogy ezen átalakulások részleteit, valamint az azokat befolyásoló csatolási tulajdonságokat vizsgálja a csatolt multirétegek lehetőség szerint széles körében.

Az *eredetileg kiválasztott kutatási részfeladatok* a projekt végrehajtása során természet-szerűleg módosultak. A feladatok nagyobb részét végrehajtottuk, míg egyeseket elhagytunk, illetve helyükbe más, időközben felmerült feladatokat fogalmazzunk meg az alábbiak szerint (*dőlt betűkkel* szerepelnek az eredeti feladatok):

0. *Különbéle módszerekkel egytengelyű mágneses anizotrópiájú, AF csatolt multirétegeket állítunk elő; e mintákon megkíséreljük kimutatni az SSF-átalakulást, majd tanulmányozzuk az átalakulás dinamikáját.* Ezt a feladatot már a projekt első évében töröltük a feladatlistáról, mivel két másik kutatócsoport 2003 végén, ill. 2004 elején mind kísérleti,<sup>1</sup> mind elméleti<sup>2</sup> szempontból lényegében megoldotta a kérdést, és úgy ítéltük meg, hogy a még fennmaradt részletkérdések tisztázása által várható eredmények nem lennének arányban az egytengelyű anizotrópiájú csatolt Fe/Cr multiréteg előállítására fordítandó erőfeszítésekkel (saját MBE-berendezésünk ekkor még nem működött).
1. *A doménérés<sup>3</sup> és a doméndurulás<sup>3</sup> jelenségeit korábban csak a bcc Fe/Cr rendszeren mutattuk ki. Mivel e jelenségekben a magnetokristályos anizotrópia jelentős szerepet játszik, megvizsgáljuk, hogy a jelenségek fellépnek-e az fcc Co/Cu rendszerben is, ami által megnyithatjuk az utat a Co/Cu alapú mágneses szenzorok GMR-zajának csökkentése felé.* Bár jelentős erőfeszítéseket tettünk annak érdekében, hogy a rendelkezésünkre álló és már korábban kipróbált technológiával, az elektrolitikus leválasztással olyan, erős AF-csatolású Co/Cu multirétegeket állítsunk elő, amelyeken ezeket a vizsgálatokat elvégezhetjük volna, próbálkozásaink nem jártak sikerrel. Ezért eredeti tervünket módosítva, az elektrolitikusan leválasztott Co/Cu multirétegek esetében egy, a GMR-szenzorok minőségét más módon, a szuperparamágneses tartományokon bekövetkező elektronszórás által korlátozó jelenség vizsgálatára koncentráltunk. Ezek a vizsgálatok igen eredményesek voltak, de e döntés következtében a projekt két, egymással csak laza kapcsolatban álló részre vált szét.
2. *A doménérés folyamatának leírására javasolt fenomenologikus modellünk szerint a domének méretét remanenciában döntően a FM réteg koercitív ereje határozza meg; e feltételezést kísérletileg ellenőrizzük.* A feladatot végrehajtottuk, de úgy, hogy a koercitív erőt – az eredeti tervtől eltérően – nem a FM réteg nemmágneses szennyezőkkel történő adalékolásával, hanem a hőmérséklet változtatásával befolyásoltuk.
3. *Tisztázzuk a köztes réteg mágnesezettségének szerepét a Fe/Cr multiréteg-rendszeren általunk korábban megfigyelt „útléltelési” domén-memória-hatásban.* A feladatot végrehajtottuk, és megállapítottuk, hogy az említett hatásban nem a köztes réteg mágnesezettsége, hanem a réteg–réteg csatolás eloszlása játssza a fő szerepet.
4. *Kidolgozzuk a doménérés és a doméndurulás mikroszkopikus dinamikai modelljeit, és ezek alapján Monte-Carlo számolásokkal meghatározzuk a mágnesezettség önkorrélációs függvényeit a különböző, könnyű és nehéz irányokban alkalmazott mágnesészekvenciák alkalmazása után az egyes multirétegekben. Ezeket az önkorrélációs függvényeket nagy pontosságú, off-spekuláris reflektometriai mérésekkel hasonlítjuk össze, ami lehetőséget ad a modellek szabad paramétereinek meghatározására.* A feladatot végrehajtottuk, de annak tartalma menet közben kissé módosult. Részletes modelleket dolgoztunk ki a doménérés esetére (ahol a mágneses anizotrópia nem játszik lényeges szerepet), a doméndurulás mikroszkopikus modelljének kidolgozása viszont még továbbra is előttünk áll. Ugyanakkor a méréseket az eredetileg tervezettnél lényegesen többféle irányú és nagyságú mágnesészekvenciánál hajtottuk végre, amivel egy újfajta (és a felületi spin-flop átalakulással szoros kapcsolatban álló) doménátalakulást figyeltünk meg. A reflektometriai mérések (a diffúz szórás vonalalak) értelmezése a vártnál sokkal nagyobb feladatnak bizonyult az SMR esetében, és e tekintetben az áttörést csak 2008 végén, sőt teljes mértékben csak 2009 elején értük el. Ma már kezünkben van a diffúz SMR vonalalakot pontosan leíró elmélet és az azt

<sup>1</sup> V. Lauter-Pasyuk et al., J. Magn. Magn. Mat. **258–259**, 382 (2003).

<sup>2</sup> U.K. Rößler, A.N. Bogdanov, Phys. Rev. B **69**, 184420 (2004).

<sup>3</sup> D.L. Nagy et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 157202 (2002).

megvalósító program, de az a tény, hogy ez mindeddig nem állt rendelkezésünkre, jelentős akadálya volt annak, hogy a reflektometriai kísérleti eredményeinket megfelelő módon publikáljuk. A korábbi mérések kiértékelésére a következő hónapokban fog sor kerülni; az azokból megírandó cikkeken a T047049-es projektszámot továbbra is fel fogjuk tüntetni.

5. A fentebb (elsősorban a 4. pontban) felsorolt feladatok végrehajtása során merült fel annak szükségessége, hogy a csatolt multirétegekben az egyes rétegek mágnesezettségének beállítását (hatásvonalát), sőt esetenként a mágnesezettség előjeles irányát is meghatározzuk. Ezért kifejlesztettük a laboratóriumi konverzióelektron-Mössbauer-polarimetria lineáris és cirkuláris változatait, továbbá kidolgoztuk a szinkrotronos cirkuláris Mössbauer-polarimetria egy alapvetően új, a korábbiaknál technikai szempontból lényegesen egyszerűbb változatát. Mindhárom módszert alkalmaztuk csatolási és anizotrópiajelenségek vizsgálatára különféle Fe/Cr és Fe/Gd multirétegeken, továbbá Fe/Cr multirétegek nehéz irányú mágnesezéssel és lemágnesezéssel történő előkészítésére szinkrotronos doménvizsgálatok céljából.

A fenti célkitűzések megvalósítása során kiterjedt nemzetközi kapcsolatainkat is igénybe vettük, és más projektekkel is együttműködve elértük a témára fordítható források jelentős bővülését. Ezek között kiemelt jelentőségű volt az a lehetőség, amelyet két nagy külföldi kutatási infrastruktúra, a grenoble-i European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) és a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet IBR-2 impulzusreaktora nyálábainak igénybevétele nyújtott.

Az alábbiakban összefoglaljuk az egyes részfeladatok teljesítése során elért eredményeinket. (A hivatkozásokat az adatbázisban, illetve a II. fejezetben felsorolt cikkek sorszámaival jelöljük, ezért itt számozásuk nem folyamatos.)

### **1. Szuperparamágneses tartományok szerepe Co/Cu multirétegek óriás mágneses ellenállásában [4, 5, 6, 7, 10, 11]**

Az elektrokémiai úton előállított ferromágneses/nemmágneses (FM/NM) multirétegek esetében régóta közismert, hogy a mágneses ellenállás általában nem telítődik teljesen még 1 T körüli mágneses terekben sem. A fizikai módszerekkel előállított hasonló multirétegekéhez képest amúgy is kisebb értékű GMR hatás mellett ez a nem telítődő jelleg is hátrányt jelent a szenzoralkalmazások szempontjából. Mivel a fizikai módszerekkel leválasztott multirétegeknél a GMR telítése pl. Co/Cu multirétegek esetén általában legfeljebb 500 mT nagyságú térben már elérhető, az elektrolitikus multirétegek tulajdonságainak javítása szempontjából fontosnak tartottuk a telítésbeli eltérés okainak megértését.

Egy előző OTKA projektben (T 037673) sikeresen adaptáltunk egy, a nemideális granuláris mágneses fémekre korábban kidolgozott modellt a nemideális FM/NM multirétegekre; ezzel jól meg lehetett magyarázni az elektrolitikus multirétegek mágneses ellenállásának telítéséhez szükséges nagy mágneses tereket. Röviden összefoglalva, a modell szerint feltételeztük, hogy a nemideális viselkedésű elektrolitikus multirétegek mágneses rétegeiben nemcsak FM, hanem szuperparamágneses (SPM) tartományok is vannak. Emiatt a GMR-hez – az ideális FM/NM multirétegekben megfigyelhető spinfüggő szórási jelenségek (elektronaszórás egy  $FM_1 \rightarrow NM \rightarrow FM_2$  elektronpálya végén, ahol a két FM tartomány mágnesezettségének iránya eltérő) mellett – járulékok adnak az  $SPM \rightarrow NM \rightarrow FM$  és az  $FM \rightarrow NM \rightarrow SPM$  elektronpályák végén bekövetkező szórások is, mivel a térben fluktuáló SPM momentumok irányai általában nagy valószínűséggel eltérnek a szomszédos FM tartományok mágnesezettségének rögzített irányától (a tapasztalat szerint multirétegekben az  $SPM \rightarrow NM \rightarrow SPM$  típusú járulékok elhanyagolhatók). Az első járulék ( $GMR_{FM}$ ) az FM tartományok  $H_s$  telítési tere

(Co/Cu multirétegek esetén tipikusan 200 mT) felett már nem változik, míg a második járulékos térfüggését a  $GMR_{SPM} \cdot L(\mu H/kT)$  kifejezés írja le, ahol  $\mu$  az SPM tartományok átlagos mágneses nyomatéka. Ennek alapján  $H > H_s$  esetén a teljes GMR térfüggésére a

$$GMR(H) = GMR_{FM} + GMR_{SPM} \cdot L(\mu H/kT)$$

kifejezés adódik, és ezen összefüggés segítségével a kísérletileg mért  $MR(H)$  adatokból a GMR ferromágneses és szuperparamágneses eredetű járulékos szétválaszthatók.

Jelen projekt keretében erre alapozva főleg azt vizsgáltuk elektrolitikus úton előállított Co-Cu/Cu multirétegekben (ahol a mágneses rétegben tipikusan 1–5 at. % Cu jelenléte a leválasztási módszer miatt elkerülhetetlen), hogy az előállítási körülmények hogyan befolyásolják a  $GMR_{SPM}$  járulékos megjelenését. Tettük ezt annak érdekében, hogy ezt a nagy telítési teret igénylő és így végül is kis mágneses térérzékenységet eredményező mágneses ellenállás járulékos minél jobban ki tudjuk küszöbölni az elektrolitikus multirétegekben. A GMR járulékos dekomponálására kidolgozott módszer jelentősége, hogy ezáltal mennyiségileg vizsgálható a multirétegben a nemkívánatos SPM járulékos jelenléte az előállítási paraméterek függvényében.

Részletes szerkezetvizsgálatokat végeztünk transzmissziós elektronmikroszkópiával és röntgendiffrakcióval különböző körülmények között elektrolitikusan előállított Co-Cu/Cu multirétegeken. A vékony és kb. 1 nm felületi érdességű Ta és Cu alaprétegekkel bepárolgatott Si hordozóra leválasztott elektrolitikus multirétegek szerkezetileg lényegesen jobb minőségűek voltak, mint a mechanikailag polírozott, durva felületű Ti hordozóra azonos körülmények között leválasztott multirétegek. A Si/Ta/Cu hordozón kapott multirétegeknél kisebb mágneses térben telítődő mágneses ellenállást figyeltünk meg a Ti hordozóra leválasztott multirétegekhez képest, ami jól korrelál a vizsgált multirétegek szerkezetének minőségében tapasztalt különbségekkel. Az  $MR(H)$  adatok térfüggésének illesztéséből az átlagos SPM momentum nagysága meghatározható, ebből pedig bizonyos feltevésekkel az SPM tartományok mérete is megbecsülhető. Így azt kaptuk, hogy a sima hordozón lényegesen nagyobbak a mágneses réteg FM részeitől elszigetelt SPM tartományok, mint a durva hordozón, sőt egyes esetekben olyan nagyok, hogy szinte blokkolt (FM) viselkedést mutatnak [6].

Megjegyezzük, hogy a mágneses ellenállás ilyen dekomponálási módszere nemcsak az elektrolitikus multirétegek mágneses ellenállásának tanulmányozására használható, mert az SPM tartományok más előállítási módszerek esetén is kialakulnak. Már meg is jelent a szakirodalomban egy közlemény,<sup>4</sup> amelyben a közreműködésünkkel ugyanezt a dekomponálási módszert alkalmazták porlasztott Co/Cu multirétegek GMR viselkedésének megértésére. Ugyan további szerzők is alkalmazták már módszerünket, de csak e szerzők munkáját említjük, mert az analízisük eredményei szerint az alapréteg mért felületi durvasága egyértelműen hatással van a rá felvitt multiréteg GMR viselkedésére, azaz közvetlenül is kimutatták, hogy a nagyobb felületi durvaság elősegíti az SPM tartományok kialakulását és erre egy szemléletes modellt is adtak.

Említésre méltó egy további fontos eredményünk is, amikor nem optimalizált Cu leválasztási potenciállal készítettünk Co-Cu/Cu multirétegeket 1,7 nm-es és 3,4 nm-es nominális vastagságú mágneses réteggel. A nem optimalizált Cu leválasztási ciklus során az előző ciklusban levált mágneses réteg oly mértékben visszaoldódik, hogy a fenti két multirétegnél a mágneses réteg (független tömbi analízisből megállapított) átlagos vastagsága 0,5 nm, illetve 2,0 nm lett. Természetesen a 0,5 nm-es átlagvastagságú réteg már nem folytonos és nagyon sok és kisméretű elszigetelt SPM tartomány fellé-

<sup>4</sup> K. Ishiji, H. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 4187 (2006).

pése várható. Ezt igazolta is a GMR dekomponálási analízis, amiből az adódott, hogy ebben a mintában a GMR-ben az SPM járulék dominált és az SPM tartományok mérete kb. feleakkora volt, mint a második, vastagabb mágneses réteggel készített mintán, ahol az SPM járulék relatív súlya a GMR-ben szintén kisebb volt. Ez fontos bizonyítékát adta annak, hogy a szakirodalomban az elektrolitikus multirétegeken általában megfigyelt nagy GMR telítő terek nagyrészt azért lépnek fel, mert a többnyire nem optimalizált Cu leválasztási potenciál miatt a mágneses rétegek erősen visszaoldódhatnak és SPM tartományok jöhetnek létre [4, 5, 6]. A nemmágneses réteg leválasztására korábban kidolgozott optimalizációs eljárásunkat részletesen egy felkérésre írt könyvfejezetben foglaltuk össze [10].

Egy nagy és egy kis SPM/FM mágneses ellenállás járulék aránnyal rendelkező Co-Cu/Cu multirétegen tanulmányoztuk a mágneses ellenállás hőmérsékletfüggését is, kiegészítve a mágnesezettség hasonló vizsgálatával. Ezen eredmények analíziséből megpróbáltunk következtetéseket levonni az SPM tartományok formájáról és térfogati elhelyezkedéséről (mágnesesen elszigetelt tartományok a teljes mágneses rétegvastagságban vagy esetleg a határfelületekben lévő, néhány atomréteg vastagságú tartományok ún. „loose-spin” viselkedéssel), de a két lehetőség közötti döntéshez további vizsgálatokra van szükség [7].

A GMR dekomponálási módszer egy fontos további alkalmazását jelentette az a vizsgálatunk, amelynek során a Cu réteg vastagságának függvényében tanulmányoztuk a GMR-t nem optimalizált Cu réteg leválasztási potenciállal készült Co-Cu/Cu multirétegekben. Azt találtuk, hogy a 800 mT mágneses térben mért teljes GMR egy minimumot mutat a Cu réteg vastagságának függvényében, miközben az  $MR(H)$  görbe szélessége is jelentősen változik. A dekomponálás nyomán kiderült, hogy a minimum annak az eredménye, hogy az FM járulék nő, az SPM járulék pedig csökken a Cu vastagsággal, miközben az SPM tartományok mérete állandó maradt. Becslésünk szerint a szigetszerűnek elképzelt SPM tartományok mérete kb.  $2 \text{ nm} \times 3,5 \text{ nm} \times 3,5 \text{ nm}$ , ahol a 2 nm a tényleges mágneses rétegvastagságot jelenti, hiszen ennél nagyobb mérete az SPM tartományoknak sem lehet a rétegsíkokra merőlegesen. Az SPM tartomány méretének állandósága jól összhangban van a keletkezésükre vonatkozólag fentebb ismertetett elképzelésekkel, miszerint a mágneses réteg részleges visszaoldódása alakítja ki őket, ez pedig az alkalmazott Cu leválasztási potenciáltól függ, és mivel ez állandó volt a sorozatban, az SPM tartományok méretét is állandónak várjuk, ahogy azt meg is figyeltük [11].

## **2. A ferromágneses réteg koercitív erejének szerepe a doménérésben [1, 15]**

Az erősen AF-csatolt multirétegekben lezajló doménérést a T029409 sz. OTKA-projekt végrehajtása során jóslottuk meg elméletileg, majd az első kísérleti megfigyeléseket is e projekt keretei között tettük meg. A jelenség lényege a multiréteg – egymástól csak a rétegmágnesezettség forgásirányának értelmében különböző – AF doménjeinek a telítésből csökkenő mágneses térben fellépő spontán és irreverzibilis méternövekedése. Jelen projekt keretében részletesen vizsgáltuk a doménérést egy  $\text{MgO}(001)/[^{57}\text{Fe}(2.6 \text{ nm})/\text{Cr}(1.3 \text{ nm})]_{20}$  epitaxiális multirétegen. A doménérés szoba-hőmérsékleten 200 mT-nál indult meg, és 100 mT-nál befejeződött, eközben a domének mérete (a rétegmágnesezettség laterális korrelációs hossza) 370 nm-ről 800 nm-re nőtt. A doménérés hajtóereje a csökkenő térben monoton növekvő fajlagos (felületegységre jutó) doménfal-energia; ez csökken a domének méretének növekedésével. Korábban javasolt modellünk szerint<sup>3,5</sup> ezt korlátozza a ferromágneses réteg koercitív ereje a hiszterézisvesztéssel kapcsolatos sűrűdásszerű disszipáció által. A

<sup>5</sup> D.L. Nagy et al., Phys. Stat. Sol. (a) **189**, 591 (2002).

domének nem lehetnek kisebbek annál a kritikus (esetünkben kb. 300 nm-es) értéknél, mint amit a tömbi és a réteg-réteg csatolás aránya lehetővé tesz. Az érés csak akkor indul el, amikor a növekvő fajlagos falenergia az adott méret esetén már képes legyőzni a koercitív erőből adódó, a doménfalakra ható „súrlódást”. A leállás pedig azért következik be, mert kis terekben, ahol az AF szerkezet kihajlása már elhanyagolható, a tér további csökkenésével gyakorlatilag már alig nő tovább a fajlagos doménfal-energia. E modell úgy ellenőrizhető, hogy megváltoztatjuk a ferromágneses réteg koercitív erejét, és azt vizsgáljuk, hogy ez milyen hatással van az érésre. Eredetileg azt terveztük, hogy egy olyan mintasorozatot készítünk, amelyben a ferromágneses réteget nemmágneses szennyezőkkel adalékoljuk, ezzel megnövelve a réteg koercitív erejét. Ennél azonban egyszerűbb eljárásnak bizonyult a doménérés hőmérsékletfüggését vizsgálata egyetlen minta esetében. Kompenzált multiréteg-antiferromágnesben a koercitív erő közvetlenül nem mérhető, de ferromágneses Fe/Cr multirétegekre vonatkozólag léteznek ilyen adatok,<sup>6</sup> amelyek azt mutatják, hogy a Fe koercitív ereje a hőmérsékletet 300 K-ről 15 K-re csökkentve mintegy 6-szorosára nő. A mintát 15 K-en telítés feletti (3,7 T) térből remanenciára lemágnesezve a doménérés nem következett be; a doménméret eredeti, kb. 370 nm-es értékén maradt [15]. A hőmérsékletet remanenciában fokozatosan szobahőmérsékletre emelve azonban ismét bekövetkezett a doménérés [15], ami egyértelmű bizonyítékát adja a koercitív erő szerepének, teljes összhangban korábbi modellünkkel. A diffúz SMR-görbék részletes analízise a közelmúltban elkészült DWBA-programmal folyik; az eredményeket az analízis elvégzése után fogjuk publikálni [15].

### 3. A „tútelítési” domén-memória hatás [8]

A már említett  $\text{MgO}(001)/[^{57}\text{Fe}(2.6 \text{ nm})/\text{Cr}(1.3 \text{ nm})]_{20}$  epitaxiális multirétegen végzett különféle SMR- és PNR-méréseink azt mutatták, hogy akár doménérés, akár doméndurvulás során kialakult új, nagyobb korrelációs hosszú doménszerkezet csak akkor törölődik ki a mintából, ha azt jelentősen a ferromágneses rétegek beállításából származtatott, látszólagos telítési tér fölé mágnesezzük. Szobahőmérsékleten a spekuláris SMR- és PNR-mérések AF reflexióinak intenzitásából számolt telítési tér könnyű irányban 850 mT, nehéz irányban 1,05 T volt, míg az új doménszerkezet kitörléséhez mindkét esetben 1,25 T térre volt szükség. Még látványosabban jelentkezett ez a hatás 15 K-en, ahol könnyű irányban a látszólagos telítési tér 1,55 T volt, de az új doménszerkezetet csak 3,60 T térben „felejtette el” a rendszer. A különös jelenséget először a Cr-réteg mágnességével, a Cr kicserélődési rugó mágneses térben való „feltörésével” próbáltuk magyarázni; ez szerepelt a projekt eredeti munkatervében. Kiderült azonban, hogy ilyen hatás bármilyen reális modell szerint csak nagyságrendekkel nagyobb térben következhetne be. Ezért megvizsgáltuk, hogy milyen összefüggés áll fenn a „tútelítési” domén-memória hatás fellépte és az AF csatolt multiréteg mágnesezési görbéjének alakja között; ez utóbbi a réteg-réteg-csatolás erősségének laterális eloszlásáról ad felvilágosítást. PNR-mérésekkel megmutattuk [8], hogy a hatás csak olyan mintákon figyelhető meg, amelyek mágnesezési görbéje elnyújtott, a telítést lassan elérő, S-alakú, míg a határozott telítést mutató, lineáris, Z-alakú mágnesezési görbéjű mintákon ilyen hatás nem lép fel. Ezt a megfigyelést újabb mintáinkon végzett SMR-mérések is alátámasztják.

A „tútelítési” domén-memória hatást ezek után azzal magyarázzuk, hogy amennyiben a réteg-réteg-csatolásnak, és így a ferromágneses rétegek telítési terének viszonylag széles eloszlása van, a valóban teljes telítés elérése előtt a multiréteg területének néhány százalékát kitevő, legerősebben csatolt tartományok megtartják a

<sup>6</sup> J. Hauschild et al., Appl. Phys. A **74**, [Suppl.], S1541 (2002).

doménátalakulás után kialakult doménszerkezetet, majd a teret ismét csökkentve, ezekre a „csírákra” visszanő a már átalakult doménszerkezet. Ezenközben úgy tűnik, hogy a mágnesezési görbe már elérte a telítést, hiszen a néhány százaléknyi, valójában még nem telített tartomány a mérési hibán belül már nem befolyásolja a mágnesezési görbét [8].

#### 4. A diffúz SMR elmélete, a doménérés mikroszkopikus modellje [7, 16, 19, 21]

A diffúz PNR torzított hullámú Born-közelítésen (DWBA-n) alapuló elméletét és a hozzá tartozó kiértékelési algoritmust már tíz évvel ezelőtt kidolgozták.<sup>7</sup> A diffúz SMR elmélete ennél jóval bonyolultabb, mivel a hiperfinom felhasadást szenvedett Mössbauer-rezonanciák környékén a szórási amplitúdó igen gyors energiafüggést mutat, aminek következtében az idődoménben kvantumlebegés áll elő, és ennek figyelembe vétele a diffúz SMR-ben még időintegrális mérések esetén sem triviális feladat. Ez a körülmény további nehézséget okoz a numerikus számolásnál, mivel az időfüggés miatt az algoritmus az időcsatornák számával arányosan meghosszabbodik a diffúz PNR DWBA-algoritmusához képest.

A projekt keretében kidolgoztuk a diffúz SMR DWBA-elméletét, illetve annak egy olyan közelítését, amely a teljes DWBA-számolásnál mintegy egy nagyságrenddel gyorsabb numerikus algoritmust eredményez, és ezért még a mérések illesztésére is alkalmas. A közelítés lényege, hogy – ellentétben a DWBA-módszerrel, ahol a minta laterális szerkezetéből adódó perturbáció mind a beeső, mind a kifutó hullámot módosítja – csak a beeső hullámot perturbáljuk (természetesen a szórási szögeknek csak abban a tartományában, ahol ez a közelítés megengedett) [7]. A közelítés a „torzított beeső hullámú közelítés” (DIWA), illetve annak szimmetrizált változata, az SDIWA igen jól reprodukálta a  $\text{MgO}(001)/[^{57}\text{Fe}(2.6\text{ nm})/\text{Cr}(1.3\text{ nm})]_{20}$  epitaxiális multiréteg első AF-reflexióján mért diffúz vonalalakot [7]. A DIWA-közelítést alkalmaztuk a diffúz PNR esetére is [7].

2008 végén, 2009 elején – tehát részben már a projekt formális lezárulása után – fejeztük be a diffúz SMR teljes DWBA-algoritmusának kifejlesztését [21]. Ezzel megnyílt az út korábbi, mennyiségileg még csak közelítőleg kiértékelt korábbi diffúz SMR-méréseink pontos kiértékelése előtt, ami több, függőben lévő cikkünk [15,16,19] megírásának előfeltétele. Bár sikerült a DWBA-algoritmust is lényegesen felgyorsítanunk, egy kétdimenziós diffúz SMR-felület kiszámítása még mindig több órát vesz igénybe, így az illesztésre egyelőre nem alkalmas. Az SMR-felületek szimulálása a rétegmágnesezettség exponenciális alakú laterális korrelációs függvényének esetére azt mutatta, hogy az úgynevezett  $\omega$ -szkenek alakja a korrelációs kb. 300 nm-ről kb. 800 nm-re való növekedése esetén pontosan reprodukálja a diffúz görbe alakjában megfigyelhető Gauss  $\rightarrow$  exponenciális átalakulást [21].

Mind a DIWA, mind a teljes DWBA-modell egyetlen bemenő mennyisége a multiréteg mágnesezettségének önkorrelációs függvénye. Ennek mikroszkopikus modellezése volt a projekt következő elméleti feladata.

A projekt során kifejlesztettünk egy, a doménfalak mozgását a doménérés során leíró mikroszkopikus modellt [16]. A modellen alapuló sejtautomata-szimuláció – igen kis számú paraméter megfelelő beállításával – képes reprodukálni a doménérés valamennyi, kísérletileg megfigyelt részletét. A „pixel-modell” a multiréteget olyan AF domének sokaságaként írja le, amelyek mérete jóval nagyobb, mint a köztük lévő falak vastagsága. A multiréteg rétegmágnesezettsége a modellben kétalrácson viselkedést követ, amit a  $2\varphi$  nyílási szög jellemez; ezt  $H$  mágnesezéses térben a  $\varphi = \arccos H/H_s(\mathbf{r})$

<sup>7</sup> A. Rühm, B.P. Toperverg, H. Dosch, Phys. Rev. B **60**, 16073 (1999).

összefüggés adja meg, ahol  $H_s(\mathbf{r})$  a laterálisan helyfüggő telítési tér. Feltételezzük, hogy a réteg–réteg-csatolás, és következésképpen  $H_s(\mathbf{r})$  is egy adott (pl. Gauss-) alakú eloszlást követ; az eloszlás várható értéke és szórása a modell paraméterei. Feltételezzük, hogy a doménfal-energia arányos a doménfal szögének négyzetével, és hogy a  $D$  csatolási állandónak nincs laterális eloszlása. Feltesszük továbbá, hogy a ferromágneses rétegek  $H_c$  koercitív ereje az egész multirétegre azonos (de hőmérsékletfüggő).

A multiréteg olyan, teljes mikromágneses szimulációja, amely lehetővé tenné a mágnesezettség önkorrelációs függvényének kellő pontosságú meghatározását, mintegy  $10^{13}$  spint tartalmazna, ezért végrehajtása eleve reménytelen. A szabadságfokok számának drasztikus csökkentését az teszi lehetővé, hogy erősen csatolt multirétegek esetére szorítkozunk. A Monte Carlo-szimuláció a véletlen  $H_s(\mathbf{r})$  függvény előállításával kezdődik a „pixelek” rácsán; a pixelek egy sejtautomata rácspontjai. Fizikailag egy pixel a multirétegeknek egy, a doménnekél kisebb, de a doménfal-vastagságnál nagyobb méretű, kb.  $10^8$  erősen korrelált spinből álló része. Így a teljes szimuláció már csak legfeljebb mintegy  $10^5$  rácspontot tartalmaz, ami már megvalósítható. A multiréteg doménfal-energiáját az elsőszomszéd pixelek doménfal-energiáinak összegeként számítjuk ki. Egy pixelek átbillenése a rétegmágnesezettség ellentétes forgásirányára a teljes hiszterézisveszteség felének,  $2H_c M \sin \varphi$  energiának a disszipálásával jár, ahol  $M$  egy pixel telítési mágnesezettsége. A sejtautomata szabálya a rács teljes energiájának minimalizálása  $H$  vagy  $H_c$  monoton változása során. A hiszterézisveszteséget a sejtautomata büntetőfüggvényeként vesszük tekintetbe. A mágneses szerkezetet alapvetően meghatározó két legjelentősebb tagot, a Zeeman-energiát, illetve a bilineáris réteg–réteg-csatolást a sejtautomata-szabályban nem vesszük figyelembe, mivel ezek egy pixel átbillenése esetén nem változnak.

Az így készült szimuláció  $H_s(\mathbf{r})$  várható értékén és szórásán kívül csak a  $D/H_c$  aránytól függ. E három paramétert alkalmasan megválasztva szinte tökéletesen le tudtuk írni a  $\text{MgO}(001)/[^{57}\text{Fe}(2.6 \text{ nm})/\text{Cr}(1.3 \text{ nm})]_{20}$  epitaxiális multirétegen a) telítésből csökkenő térben megfigyelt doménérést, b) a „túltelítési” doménmemória-hatást és c) az alacsony hőmérsékleten lemágnesezett, majd onnan remanenciában felmelegített mintán a hőmérséklet emelése során megfigyelt doménérést [16]. A doménérés nem a domének fraktálszerű, önhasonló növekedésében, hanem a doménfalak „érdességének” kisimulásában nyilvánul meg, ami a rövid hatótávolságú pixel–pixel-kölcsönhatás következménye [16].

Általánosabban is megvizsgáltuk, hogy melyek azok a sejtautomaták, amelyekben fellép a doménérés jelensége. Azt találtuk, hogy ebben a döntő szerepet az energiakifejezésben szereplő disszipatív büntetőfüggvény játssza, míg a doménfal-energia változásának megfelelő sejtautomata-szabály konkrét alakja másodlagos, ezért az helyettesíthető egy igen gyors algoritmust eredményező, geometriai feltételekkel megfogalmazott sejtautomata-szabállyal is [19]. Ez utóbbi sejtautomatát „súlyozott falhosszúság-automata” (WWLA) névvel illetjük.

A DWBA-algoritmus kifejlesztése lehetővé tette, hogy a pixel-modell és a WWLA-modell szimulációit mennyiségileg is összehasonlítsuk az SMR- és a PNR-mérésekkel, és publikáljuk ezzel kapcsolatos cikkeinket [16,19].

## **5. Laboratóriumi és szinkrotronos Mössbauer-polarimetria fejlesztése és a módszerek alkalmazásai [2, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 22, 23]**

A vékonyrétegekre is alkalmazható Mössbauer-polarimetria fejlesztése projektünk talán legjelentősebb „mellékterméke”, amit már közvetlenül is alkalmaztunk két olyan probléma megoldására, amelyek közvetlenül vagy áttételesen szerepeltek a projekt eredeti tervében is.



A laboratóriumi vékonyréteges Mössbauer-polarimetria kizárólag a konverzióelektron-Mössbauer-spektroszkópia (CEMS) módszerével valósítható meg. Jóllehet mind a lineáris,<sup>8,9</sup> mind a cirkuláris<sup>10</sup> (pontosabban elliptikus<sup>11</sup>) Mössbauer-polarimetria alapjait már a hatvanas években kidolgozták, a módszer három oknál fogva nem volt alkalmas arra, hogy segítségével vékonyrétegek (adott esetben eltemetett) rétegeiben határozzák meg a mágnesezettség beállítását vagy akár irányát is. Egyrészt nem léteztek olyan CEMS-detektorok és velük kompatibilis mágnesező eszközök, amelyek segítségével CEMS-mérések az adott geometriák mellett mágnestérben elvégezhetőek lettek volna. Másrészt az elliptikus polarimetria esetére nem voltak ismertek olyan kifejezések, amelyek segítségével a mágnesezettség irányát a mért vonalintenzitásokból egyszerű, áttekinthető módon lehetett volna meghatározni. Harmadrészt pedig az elliptikus CEMS-polarimetria geometriájához nem volt kidolgozva a kis beesési szögű CEMS esetére a véges vastagságú rezonáns mintákban fellépő „feketeség hatás”, vagyis a vonalalak és a vonalintenzitás torzulása polarizált sugárzás esetén. További, általános problémája volt a laboratóriumi Mössbauer-polarimetriának, hogy a polarizált sugárzást általában egyvonalas, polarizálatlan forrásból különféle polarizációs szűrők alkalmazásával állították elő, amelyeknek mind minősége, mind hatásfoka igen korlátozott volt.

A szinkrotronos esetben csak cirkuláris polarimetriáról beszélhetünk megkülönböztetett módon, hiszen a szinkrotronsugárzás eleve lineárisan polarizált. A vékonyrétegekre – tehát súroló beesésben – szinkrotronos cirkuláris polarimetriát eddig egyetlen, bár általánosan alkalmazható, de meglehetősen bonyolult módon, félrehangolt Bragg-reflexión alapuló  $\lambda/4$ -es fáziskésleltető lemez és egy állandó sebességgel mozgatott egyvonalas rezonanciaszűrő közbeiktatásával valósították meg.<sup>12</sup> Felmerült a kérdés, megoldható-e a szinkrotronos cirkuláris (vagy elliptikus) Mössbauer-polarimetria problémája ennél egyszerűbb módon is.

Laboratóriumi Mössbauer-polarimetriára alapvetően új megközelítést választottunk azáltal, hogy a polarizált rezonáns  $\gamma$ -sugárzást egy telítésbe mágnesezett ferromágneses <sup>57</sup>Co( $\alpha$ -Fe) forrás mágnesezen felhasadt spektrumából állítottuk elő. Ez a módszer ugyan bonyolultabb polarimetriai spektrumokat eredményez, mint ha egyvonalas forrást használnánk polarizációs szűrővel, de a polarizáció csaknem 100 %-os, és intenzitásvesztés sem lép fel.

Első lépésként – az említett módszert alkalmazva – kifejlesztettük a világ első lineáris CEMS-polariméterét [2], majd ennek segítségével ugyancsak első ízben mutattuk ki laboratóriumi körülmények között AF-csatolt epitaxiális multirétegen, a már említett MgO(001)/[<sup>57</sup>Fe(2.6 nm)/Cr(1.3 nm)]<sub>20</sub> mintán a korábban csak PNR<sup>13</sup> vagy SMR<sup>14</sup> módszerrel kimutatható tömbi spin-flop átalakulást [2]. A polarimétert azóta is folyamatosan használjuk, és a kutatási feladatokban való alkalmazása mellett az MBE-be rendezésen készített <sup>57</sup>Fe-tartalmú vékonyréteg-minták egyik legfontosabb minősítő eszközévé vált.

A lineáris CEMS-polariméter segítségével méréseket végeztünk több epitaxiális <sup>57</sup>Fe/Cr multirétegen mind a könnyű, mind a nehéz mágnesezési irányban, illetve ez utóbbihoz közeli beállítások esetén, a forrásvonalak lineáris polarizációját a külső térrel párhuzamos, arra merőleges, valamint vele 45°-os szöget bezáró irányban. A mérés-

<sup>8</sup> G.J. Perlow et al., Phys. Rev. Lett. **4**, 74 (1960).

<sup>9</sup> U. Gonser, R.W. Grant, Phys. Stat. Sol. **21**, 331 (1967).

<sup>10</sup> S. Shtrikman, S. Somekh, Rev. Sci. Instr. **40**, 1151 (1969).

<sup>11</sup> H. Frauenfelder et al., Phys. Rev. **126**, 1065 (1962).

<sup>12</sup> C. L'abbé et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 037201 (2004).

<sup>13</sup> K. Temst et al., Physica B **276–278**, 684 (2000).

<sup>14</sup> L. Botton et al., J. Magn. Magn. Mat. **240**, 514 (2002).

sekből meghatároztuk a bilineáris és a bikvadratikus csatolás erősségét. Az egyik minta esetében remanencia közelében anomális vonalintenzitásokat figyeltünk meg, amit a bilineáris csatolás eloszlásával magyaráztunk [17]. A tömbi spin-flop átmenet kritikus tere a különböző minták esetében egymástól számottevően eltért, ami arra utal, hogy az átmenetben mintáról–mintára különböző mértékben játszik szerepet a doménfallozgatás és a homogén rotáció [17].

Epitaxiális  $\text{MgO}(001)/[^{57}\text{Fe}(2.6 \text{ nm})/\text{Cr}(1.3 \text{ nm})]_{20}$  multirétegen a doménérés utáni állapotban pontosan a nehéz mágnesezés irányában végzett lemágnesezés egy különleges, korábban csak hármásrétegen megfigyelt, komplex módon durvult doménállapotot<sup>15</sup> hoz létre; a jelenség egy lehetséges magyarázatát már korábban megadtuk.<sup>16</sup> A komplex durvult doménállapotot multirétegekben csak reflektometriai (PNR vagy SMR) mérésekkel lehet kimutatni. A minta nehéz mágnesezési tengelyét a mágneses térrel párhuzamosan a lineáris CEMS-polariméterben állítottuk be, ahol ez a rezonanciavonalak intenzitásainak alapján 1°-nál pontosabban lehetséges. A mintát ehhez képest néhány fokkal félreorientálva a polariméterben a mágneses tér függvényében nyomon követhető a rétegmágnesezettségek SSF-szerű reorientációja is. A pontosan nehéz irányban lemágnesezett mintán végzett SMR-méréseink kimutatták a komplex durvult doménállapotot, míg ugyanez PNR-mérésekkel nem volt megfigyelhető. Ez a megfigyelés azt mutatja, hogy az SSF-szerű, a minta mélységében középen a minta síkjával párhuzamos doménfalat tartalmazó SSF-állapot a komplex doméndurvulás során is létrejön. A nukleáris rezonanciaszórás nagy abszorpciója következtében az SMR csak a minta felső részét „látja”, ezért érzékeli a komplex durvult doménállapotot. A neutronok egyenletesen áthatolnak az egész mintán, a minta síkjával párhuzamos doménfal két oldalán viszont a doménszerkezet egymás tükörképe, és így a kioltás miatt a komplex durvult doménszerkezet nem figyelhető meg [20].

Kifejlesztettük a mágnesezett  $^{57}\text{Co}(\alpha\text{-Fe})$  forrással működő  $\alpha\text{-}^{57}\text{Fe}$  elliptikus Mössbauer-polarimetria kiértékelésének egy igen egyszerű, vékony minták esetén néhány fokos pontossággal működő módszerét. Ennek lényege, hogy a mért polarimetriai spektrumot négy, lineárisan független alapspektrumra (a lineáris polarimetria párhuzamos és merőleges, valamint a cirkuláris polarimetria párhuzamos és ellentett spektrumaira) dekomponáljuk; az így meghatározott együtthatókból igen egyszerű képletekkel határozhatók meg a mágneses tér irányának polárszögei a forrásban és a mintában, valamint e két irány azimutszögeinek különbsége [11].

A projekt keretében ugyancsak kifejlesztettük a világ első cirkuláris elliptikus CEMS-polariméterét is, amelynek legfontosabb részeit egy, az optikai tengellyel néhány fokos szöget bezáró, permanens mágnesekkel telítésbe mágnesezett  $^{57}\text{Co}(\alpha\text{-Fe})$  forrás, egy „mágikus elrendezésű”, mechanikusan vezérelhető permanens mágnesekből álló mágnesező, valamint egy, a mágnesezőben elhelyezhető, résszerű oldalablakkal rendelkező CEMS-detektor alkotják [12].

Az elliptikus CEMS-polarimetria a CEMS-ben ritkán alkalmazott, kisszögű beesésű geometriát alkalmazza. Megmutattuk, hogy ebben a geometriában nem teljesül az a – merőleges beesésű CEMS esetén jogos – feltevés, hogy a konverziós elektronok kilépési mélysége által meghatározott rezonáns vastagság elhanyagolható. Ezért az elliptikus polarimetriai mérések kiértékelése során figyelembe kell venni a polarizációfüggő „feketeség hatást” is. Kidolgoztuk ennek elméletét és azt beépítettük a FitSuite<sup>17</sup> kiértékelő programba [13].

<sup>15</sup> M. Rührig et al., Phys. Stat. Sol. A **125**, 63 (1991).

<sup>16</sup> M. Major, L. Bottyán, D.L. Nagy, Phys. Stat. Sol. (a) **189**, 995 (2002).

<sup>17</sup> <http://www.fs.kfki.hu/>

Az elliptikus CEMS-polariméteren az AF-csatolás emelkedő külső mágneses térben bekövetkező felszakítását demonstráltuk egy Cr(2,4 nm)/<sup>57</sup>Fe(5 nm)/Cr(1,2 nm)/Fe(20 nm)/MgO(001) epitaxiális aszimmetrikus hármusrétegen (a felső Cr-réteg csak fedő szerepet tölt be). Remanenciában az <sup>57</sup>Fe-réteg mágnesezettségét a későbbi mágneses térrel párhuzamosan helyeztük el. Ez a mágnesezettség 20 mT tér és az AF-csatolás hatására szembefordult a térrel, majd 100 mT-ban az AF-csatolás felszakadt, és az <sup>57</sup>Fe-réteg mágnesezettsége ismét a térrel párhuzamosan helyezkedett el, miközben közbenső terekben jól nyomon lehetett követni az <sup>57</sup>Fe-réteg mágnesezettségének folyamatos elfordulását [18]. Ezzel megmutattuk, hogy a laboratóriumi elliptikus CEMS-polariméterrel bizonyos esetekben pontosan azok az információk kaphatók meg egy csatolt multirétegről, mint a sokkal bonyolultabb és költségesebb szinkrotronos nukleáris magnetometriával<sup>12</sup> (szinkrotronos cirkuláris polarimetriával).

A projekt keretében fejlesztettük ki a szinkrotronos elliptikus polarimetria ferromágneses, telítésbe mágnesezett és síkjával az optikai tengely közelébe bedöntött rezonanciaszűrővel történő megvalósításának lehetőségét. Jóllehet a rezonanciaszűrőn és a mintán kialakuló koherens „nukleáris exciton” alakjának a mágnesezettségek relatív irányától való függése trivialis, az elliptikus polarimetria ilyen alapon történő megvalósítása komoly nehézségekbe ütközött, mivel a jelenséget könnyen elmossa a szűrő granularitása. A megoldást egy csillámlemezre növesztett, granularitásmentes <sup>57</sup>Fe-szűrő alkalmazása jelentette [14]. Megfelelő vastagságú rezonanciaszűrő alkalmazásával demonstráltuk, hogy ily módon megvalósítható a súroló beeséses nukleáris magnetometria is [14], ami a már korábban említett bonyolult megoldás<sup>12</sup> egyszerű alternatívája. A rezonanciaszűrő és a súroló beesés kombinált alkalmazása során mérhető spektrumok kiértékeléséhez azonban még további programfejlesztés szükséges.

Fenti módszert alkalmaztuk egy Gd(7 nm)/Fe(7 nm)/Gd(7 nm) hármusréteg csatolási tulajdonságainak vizsgálatára. Szobahőmérsékleten a Fe mágnessége domináns; a rendszer egyszerű ferromágnesként viselkedik. A rezonanciaszűrő és a súroló beesésben elhelyezett Gd/Fe/Gd minta nukleáris excitonjának kvantumlebegése a terek párhuzamos és ellentétes beállása esetén jól mutatják, hogy a Fe mágnesezettsége követi a külső teret. 100 K alatt azonban a Fe-hez AF-csatolt Gd mágnessége válik dominánssá. Ennek ellenére a kvantumlebegési görbék alig különböznek egymástól a terek párhuzamos és ellentétes beállása esetén. A további analízis azt mutatja, hogy a Fe mágnessége ilyenkor döntően a külső térre merőlegesen helyezkedik el, aminek oka az, hogy a külső tér mindkét Gd-réteg mágnességét saját irányába fordítja, a Gd/Fe határrétegnél a Gd-ban pedig egy-egy kicserélődési rugó alakul ki [22]. A kvantumlebegési görbék részletes analízisét ebben az esetben is csak az előző pontban említett programfejlesztés után tudjuk majd elvégezni.

Jelen pontban bemutatott eredmények egy megírás alatt álló PhD-értekezés [23] alapjául szolgálnak.

## II. Tudományos közlemények

Az alábbi táblázatban a publikációs tevékenység időbeli lefutását foglaltuk össze:

| <b>Publikáció</b>                       | <b>2004</b> | <b>2005</b> | <b>2006</b> | <b>2007</b> | <b>2008</b> | <b>2009</b> | <b>Összesen</b> |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| <b>SCI folyóiratcikk, könyvfejezet</b>  | 1           | 0           | 2           | 4           | 0           | 1           | <b>8</b>        |
| <b>konferenciaközlemény, egyéb cikk</b> | 1           | 0           | 2           | 0           | 0           | 0           | <b>3</b>        |
| <b>Összesen</b>                         | <b>2</b>    | <b>0</b>    | <b>4</b>    | <b>4</b>    | <b>0</b>    | <b>1</b>    | <b>11</b>       |

A 7, folyóiratban megjelent cikkünk összesített impaktfaktora 12,13. Közleményeinkre eddig 12 független hivatkozást kaptunk.

Az alábbi lista a T047049 projektszám feltüntetésével még készülöben lévő, illetve megírni tervezett további 11 cikket tartalmazza, a már megjelent cikkek számozását folytatva. Az összes cikk megírása és benyújtása folyamatosan 2010 végéig várható. A megjelenő cikkekről tájékoztatni fogjuk az OTKA Bizottságot.

- 12 F. Tanczikó, Sz. Sajti, W. Olszewski, K. Szymański, D.G. Merkel, L. Deák, G. Endróczy, D.L. Nagy, L. Bottyán: Electron proportional gas counter for linear and elliptical Mössbauer polarimetry. Közvetlenül beküldés előtt a Review of Scientific Instruments folyóirathoz.
- 13 Sz. Sajti, L. Deák, F. Tanczikó, D.L. Nagy, L. Bottyán: Angular dependence, blackness and polarization effects in integral conversion electron Mössbauer spectroscopy. Írása előrehaladott állapotban.
- 14 F. Tanczikó, L. Bottyán, A.I. Chumakov, B. Croonenborghs, L. Deák, J. Korecki, J. Meersschaut, D.G. Merkel, D.L. Nagy, N. Planckert, R. Rüffer, H.D. Rüter, C. Strohm, E. Szilágyi, K. Szymański, Á. Tunyogi, V. Vanhoof: Sign determination of the hyperfine magnetic field by elliptically polarized nuclear resonant synchrotron radiation. Írása folyamatban.
- 15 M. Major et al.: Ripening of antiferromagnetic domains in strongly-coupled Fe/Cr multilayers. Írása folyamatban.
- 16 D.L. Nagy, L. Bottyán, L. Deák, E. Harth, M. Major, D. Visontai: Monte Carlo simulation of domain ripening in strongly-coupled antiferromagnetic multilayers: the first-neighbour-interaction pixel model.
- 17 F. Tanczikó et al.: Interlayer coupling in epitaxial Fe/Cr multilayers: application of conversion electron Mössbauer polarimetry with a linearly polarized source.
- 18 F. Tanczikó et al.: Interlayer coupling in an asymmetric  $^{57}\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Fe}$  trilayer: application of conversion electron Mössbauer polarimetry with an elliptically polarized source.
- 19 E. Harth et al.: Weighted-wall-length cellular automaton of domain ripening.
- 20 F. Tanczikó et al.: Hard-axis demagnetization reorientation of an epitaxial Fe/Cr multilayer: twisted state and complex domain coarsening.
- 21 L. Deák et al., DWBA analysis of diffuse synchrotron Mössbauer reflectometry scatters of magnetic multilayers.
- 22 F. Tanczikó et al.: Exchange spring in Gd/Fe/Gd trilayers: nuclear resonant magnetometry using a resonant filter.
- 23 Tanczikó Ferenc: A mágnesezettség irányának meghatározása elliptikusan poláros rezonáns fotonokkal. PhD értekezés; benyújtása 2009 végére várható.

A projekt témaköréből 21 meghívott előadást tartottunk nemzetközi konferenciákon, és több mint 60 további szóbeli vagy poszter előadással szerepeltünk külföldi és hazai konfe-

renciákon és más tudományos rendezvényeken. A hazai vagy külföldi konferenciákon és iskolákon tartott meghívott előadások listája:

1. Bakonyi I., Péter L.: Recent progress on electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR) behaviour: 1993-2004; *8<sup>th</sup> Int. Symp. on Magnetic Materials, Processes and Devices, (206<sup>th</sup> Meeting of the Electrochemical Society)* Honolulu, Hawai, USA, 2004. október.
2. Nagy D.L.: Nuclear small-angle scattering; *Nuclear Resonance Scattering Symposium*, ESRF, Grenoble, Franciaország, 2005. szeptember.
3. Bakonyi I., Péter L.: Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR) behaviour; *Int. Workshop on Nanostructured Materials in Electroplating*, Szandanszki, Bulgária, 2006. március.
4. Nagy D.L., Bottyán L., Deák L., Major M., Szilágyi E, Tanczikó F.: Formation And Transformation Of Domains In Antiferromagnetically Coupled Multilayers; *Sixth International Workshop On Mössbauer Spectroscopy*, Seeheim, Németország, 2006. június.
5. Tanczikó F, Bottyán L, Deák L, Merkel D.G., Nagy D.L., Semenov V.G.: Magnetic Structure of Multilayers: Mössbauer Polarimetry with Laboratory Sources and at Synchrotrons; *X. International Conference „Mössbauer Spectroscopy and its Applications”*, Izsevszk, Oroszország, 2006. június.
6. Deák L.: Magnetic domains: theory and evaluation of diffuse resonant photon and neutron scattering *International Workshop on Nano-Scale Materials: Growth – Dynamics – Magnetism*, ESRF, Grenoble, Franciaország, 2007. február.
7. Nagy D.L.: Dynamics of magnetic domains; *International Workshop on Nano-Scale Materials: Growth – Dynamics – Magnetism*, ESRF, Grenoble, Franciaország, 2007. február.
8. Deák L.: Neutron Reflectometry I. Theoretical background; *4<sup>th</sup> Central European Training School on Neutron Scattering*, Budapest, Magyarország, 2007. április.
9. Bottyán L.: Neutron Reflectometry II. Experimental aspects and selected applications; *4<sup>th</sup> Central European Training School on Neutron Scattering*, Budapest, Magyarország, 2007. április.
10. Bottyán L.: Neutron- és Mössbauer-reflektometria a vékonyréteg-mágnességben; *Fizikus Vándorgyűlés*, Eger, Magyarország, 2007. augusztus.
11. Deák L.: Nuclear resonance scattering experiments on magnetic multilayers at European and Japanese synchrotrons; *3<sup>rd</sup> Japan-Hungary Joint Seminar on Physics in Modern Science and Technology (Progress in Science and Technology with Particle and Photon Beams)*, Debrecen–Szeged–Budapest, Magyarország, 2007. október.
12. Nagy D.L.: Formation and Transformation of Domains in Antiferromagnetically Coupled Multilayers; *Synchrotron Facilities for the Development of Science and Technology in Central and Eastern Europe*, Brno, Csehország, 2007. november.
13. Deák L.: Diffuse SMR theory and its application to AF domain transformation in Fe/Cr multilayers; *MDN–Dynamec Workshop*, Reichenau, Ausztria, 2008. május.
14. Nagy D.L., Bottyán L., Chumakov A.I., Deák L., Harth E., Khaidukov Yu.N., Major M., Nikitenko Yu.V., Petrenko A.V., Proglyado V.V., Rüffer R., Szilágyi E. Tanczikó F., Visontai D.: Domain formation and transformation in antiferromagnetically coupled multilayers: reflectometry and Monte Carlo simulation, *Moscow International Symposium on Magnetism*, Moszkva, Oroszország, 2008. június.
15. Bottyán L.: Applications of synchrotron Mössbauer reflectometry to thin film magnetism; *International Symposium on the Industrial Applications of the Mössbauer Effect, ISIAME'08*, Budapest, Magyarország, 2008. augusztus.
16. Nagy D.L.: Formation and transformation of magnetic domains in antiferromagnetically coupled multilayers; *Advanced Spectroscopies on Biomedical and Nanostructured Systems*, Cluj-Napoca, Románia, 2008. szeptember.
17. Nagy D.L.: Mössbauer effect in magnetic thin films: recent results and perspectives; *50 Years After – the Mössbauer effect today and in the future*, Technische Universität München, Garching, Németország, 2008. október.
18. Deák L.: A szinkrotronsugárzás nukleáris rezonanciaszórásának módszere és kísérleti alkalmazásai; „A szinkrotron- és szabadelektron-lézer sugárzás alkalmazásai” iskola, Debrecen, Magyarország, 2008. november.

19. Deák L.: Theory and evaluation of diffuse resonant photon and neutron scattering on magnetic nanostructures; *JINR days in Hungary*, Budapest, Magyarország, 2008. december.
20. Nagy D.L.: Domain structure and layer magnetisation direction in magnetic thin films and multilayers; *XLIV Zakopane School of Physics – Breaking Frontiers: Submicron Structures in Physics and Biology*, Zakopane, Lengyelország, 2009. május.
21. Nagy D.L., Bottyán L., Chumakov A.I., Deák L., Harth E., Major M., Ruffer R., Szilágyi E., Tanczikó F., Visontai D.: Formation and transformation of domains in antiferromagnetically coupled multilayers: experiment and cellular automaton model, *XI. International Conference „Mössbauer Spectroscopy and its Applications”*, Jekatyerinburg, Oroszország, 2009. június.

### **III. A szerződésben vállalt feladatoktól való esetleges eltérés okai**

Az eredetileg kiválasztott kutatási részfeladatok a projekt végrehajtása során módosultak. A feladatok nagyobb részét végrehajtottuk, míg egyeseket elhagytunk, illetve helyükbe más, időközben felmerült feladatokat foglalmaztunk meg. Feladatok elhagyását elsősorban az MBE-berendezés késedelmes üzembeállása és más mintakészítési problémák okozták. Az eredeti célokkal összhangban álló, de teljesen új eredmény a laboratóriumi és a szinkrotronos vékonyréteg-Mössbauer-polarimetria kifejlesztése.

A szerződésben szereplő kutatók valamennyien részt vettek a projekt végrehajtásában. Menet közben bevontunk olyan fiatal kutatókat (Sajti Szilárd), doktoranduszokat (Bogdán Csilla, Tanczikó Ferenc), egyetemi hallgatókat (Harth Etelka, Visontai Dávid, Simon Eszter, Bartók András, Tóth Bence), akik a szerződés megkötése után kerültek kapcsolatba kutatócsoportunkkal. Tóth József – betegsége miatt – főállású alkalmazás helyett egyéni kutatói megbízást kapott, majd helyette Pádár Józsefet bíztuk meg.

### **IV. Hivatkozások, szakértői vélemények**

A projekt keretében publikált cikkek nagy része elég friss, független hivatkozások száma még aránylag kevés; eddig összesen 12 független hivatkozást találtunk. Ugyanakkor a projekt igen pozitív nemzetközi fogadtatásának jele a projekt kezdete óta a témában kapott 21 meghívás konferenciaelőadások tartására, amelyek közül 8 igen rangos nemzetközi konferencia szervezőitől érkezett.

### **V. A kutatási téma további lehetséges irányai**

Jóllehet a projekt keretében többségükben megválasztottuk a kutatási tervben megfogalmazott kérdéseket, illetve megoldottuk az ott kitézített feladatokat, néhány közülük nyitva maradt, és a kutatás során több új probléma is felvetődött.

Továbbra is fontos cél annak elérése, hogy ellenőrzött és reprodukálható módon tudjunk elektrolitikus módszerrel is előállítani a kicserélődési kölcsönhatás által csatolt multirétegeket, mivel ez az eljárás az alkalmazások szempontjából lényegesen egyszerűbb és gazdaságosabb a különféle vákuumpárológatási módszereknél. Amennyiben ezt sikerülne elérni, akkor a csatolási és anizotrópiajelenségek vizsgálatára alkalmazni lehetne a Mössbauer-spektroszkópia emissziós változatát is, ezzel a polarimetria fegyvertárát is tovább bővítve.

A csatolt mágneses multirétegek doménszerkezetének vizsgálatát több irányban is szükségesnek látszik kiterjeszteni. Egyrészt még erősen csatolt rendszerek esetén is tisztázatlan a domének kialakulásának pontos mechanizmusa a mágneses telítéshez közeli területeken. Ebben a tartományban a domének mérete néhányszor 10 nm nagyságrendű lehet, ezért vizsgálatukra a diffúz reflektivitás szórású síkra merőleges komponensének mé-

rése (és elsősorban a neutronreflektometria használata) látszik alkalmasnak. Másrészt az erősen csatolt multirétegek doménszerkezetének és doménátalakulásainak megértése után a vizsgálatokat az alkalmazások szempontjából fontosabb, gyengén csatolt vékonyréteg-rendszerekre kell kiterjeszteni. Ezekben a domének jóval bonyolultabbak; a doménfalak nem feltétlenül merőlegesek a vékonyréteg síkjára. A reflektometriai mérések kiértékelésére a projekt során kifejlesztett általános DWBA-módszer továbbra is alkalmas, de a doménérés modellezésére a sejtautomata-modell továbbfejlesztése szükséges. Még az erős csatolású multirétegek esetén is előttünk álló feladat a doméndurulás mikroszkopikus modellezése.

A laboratóriumi CEMS-polarimetria elveit és kiértékelési módszereit lényegében kidolgoztuk. Előttünk álló feladat a polariméterek műszaki továbbfejlesztése. Ez a lineáris polariméter esetén az elérhető tartomány bővítését és a minta hőmérsékletének szabályozhatóságát jelenti. Az elliptikus CEMS-polarimétert oly módon célszerű továbbfejleszteni, hogy a permanens mágnesekből álló mágnesező rendszert elektromágnessel váltjuk ki, ami ugyancsak megnyitja az utat a változtatható hőmérsékletű mintakörnyezet megvalósítása irányába.

## **VI. Az elért eredmények hasznosításának lehetőségei**

Tekintettel a projekt alapkutatói jellegére, az eredmények közvetlen hasznosítása nem várható. Ugyanakkor valószínűsíthető, hogy publikált eredményeink áttételesen gazdasági hasznót is fognak hozni. A GMR-eszközök (olvasófejek, szenzorok) működőképességét befolyásolják a projekt keretében vizsgált alapjelenségek és tulajdonságok (mágneses domének képződése és átalakulásai, elektronszórás szuperparamágneses zárványokon, a réteg-réteg csatolás laterális eloszlása, a mágneses anizotrópia hatása, stb.). A projekt alapkutatói eredményei ezért közvetve alkalmasak lehetnek a GMR-eszközök minőségének javítására.

Ugyancsak vezethetnek gazdasági haszonra a projekt folyamán megvalósított metodikai és műszerfejlesztések. A projekt keretei között fejlesztettük ki a világ első lineáris és elliptikus CEMS-polarimétereit, de az utóbbi részét képező, kisszögű mérésekre is alkalmas kompakt CEMS-detektor, valamint a különleges mágnesező rendszer önmagában is értékesítésre alkalmas kutatási eszköz.

## **VII. A kutatáshoz felhasznált egyéb támogatások – a pénzügyi források feltüntetésével**

A projekt keretében végzett kutatásainknak – a jelen és a többi projekt részfeladatainak vonatkozásában általában jól szétválasztható módon – többször voltak más finanszírozó projektjei is. Ezek részint saját magunk, részint együttműködő partnereink projektjei voltak. A legjelentősebb társprojekt az Európai Bizottság 6. K+F Keretprogramjának NMP4-CT-2003-001516 sz. STREP projektje (DYNASYNC) volt. Cikkeinkre összesen 4 más OTKA projekt nyilvántartási száma került fel.