

Doktori értekezés tézisei

MAGNETIC PHASE AND DOMAIN EVOLUTION OF
ANTIFERROMAGNETICALLY COUPLED MULTILAYERS

Major Márton

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Anyagtudomány és szilárdtestfizika program

Doktori iskola vezetője: Dr. Horváth Zalán

Doktori program vezetője: Dr. Lendvai János

Témavezető: Dr. Nagy Dénes Lajos, a fizikai tudomány doktora, egyetemi tanár

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet

2006.

Bevezetés

A nanotechnológia nem véletlenül intenzíven kutatott tudományterület napjainkban. Az atomi skálán „tetszésünk szerint” alakítható anyagok mind az alap, mind az alkalmazott kutatásban új lehetőségek elképzelhetetlenül széles tárházát kínálják. Az anyagtudomány kísérleti eszköztárának gyors fejlődésének köszönhetően ma már nem gond többek között a kvázi két- és egydimenziós szerkezetek (vékonyrétegek, filmek, kvantumpöttyök) előállítása, vizsgálata és „mindennapi” alkalmazása.

A mágnesség kutatásában is jelentős szerepet kapnak a mesterségesen előállított nanostruktúrák, vékonyrétegek. Egyrészt segítenek megérteni az alapvető mágneses jelenségeket, másrészt ipari alkalmazásuk is jelentős. Példaként említhetjük a jelenleg még csak laboratóriumban vizsgált mágneses RAM-ot (MRAM), a nemrég a piaci terméké avanszált merőleges mágnesezettségű adathordozót vagy a már nagy karriert befutott óriás mágneses ellenálláson (giant magnetoresistance — GMR) alapuló szenzorokat. A GMR 1988-as felfedezése óta alig pár év telt el, amikor is megmutatták a GMR alapú olvasófej működőképességét, majd 1997-ben piacra került az első ilyen elven működő eszköz. Ma már az összes merevlemez GMR fejjel rendelkezik.

Az óriás mágneses ellenállás, illetve ellenállásváltozás alapja, hogy egy antiferromágnesesen (AF) csatolt multiréteg mágneses momentumait (spinjeit) külső térrel egymással párhuzamos beállításba kényszerítjük. A spinek relatív orientációjának megváltozásával változik a multiréteg elektromos ellenállása, ami lehetőséget ad mágneses szenzorként való alkalmazásra. A GMR-hoz nélkülözhetetlen vékonyréteg AF csatolást 1986-ban fedezték fel Fe/Cr/Fe hármásrétegen Grünberg és munkatársai. Azóta igen sok fémes rétegszerkezeten találtak AF mágneses csatolást. A króm által közvetített csatolás pontos mibenléte mind a mai napig tudományos vita tárgya, köszönhetően a Cr gazdag mágneses fázisdiagramjának.

Az AF csatolt mágneses multirétegek a doménszerkezetüket tekintve is különleges osztályt alkotnak. Az ellentétesen álló szomszédos ferromágneses rétegek szórt terei egymást nagymértékben kioltják, a mágneses erővonalak „rövidre záródnak”, így nem a ferromágneseknél megszokott ok vezérli a domének keletkezését. A minta paramétereinek (pl. csatolási állandó, mágneses réteg vastagsága) fluktuációira visszavezethető doméneket az irodalom jellegzetes mintázatuk alapján „foltos” (patch) doméneknek nevezi. Általános vélekedés szerint a foltos domének az előbb említett térkioltás miatt nem befolyásolhatók, így nem is nagyon foglalkoztak velük.

Munka célkitűzései

Célul tűztük ki, hogy

- koherens módon leírjuk az erősen AF csatolt multirétegek viselkedését mágneses térben a véges rétegszámból eredő jelenségek figyelembevételével, és hogy
- megértsük egy Fe/Cr multiréteg doménszerkezetének mágneses tértől való függését, többek között a csoportunk által megfigyelt doménérés, szupersaturáció és doméndorvulás jelenségét.

Alkalmazott módszerek

A véges mágneses rétegszámú multirétegek fenomenológikus leírásához saját kódot fejlesztettünk. A vizsgálandó vékonyrétegmintát szerkezeti és mágneses szempontból az általánosan elfogadott eljárásokkal (röntgenreflektometria, VSM[§], SQUID) illetve a felmerült rétegvastagság-bizonytalanság miatt alkalmazott magfizikai módszerekkel is (RBS, PIXE) minősítettük. Az alaposan minősített mintán az AF mágneses rend térfüggésének részletes vizsgálatát szinkrotron-Mössbauer-reflektometriával (SMR) és polarizált neutronreflektometriával (PNR) végeztük el. Az utóbbi két módszer előnye, hogy koherens szórási képet adnak, így különválaszthatók a szerkezeti és a mágneses információk. Utóbbi jelen esetben a szerkezetileg tiltott, ún. feles indexű mágneses Bragg-csúcsokon jelenik meg. SMR-rel és PNR-rel a multiréteg síkjára merőleges és síkbeli (laterális) szerkezetéről is nyerhetünk adatokat. Utóbbiról a nem-spekuláris (diffúz) szórás ad felvilágosítást.

A vizsgált minta egy erősen AF-csatolt Fe/Cr multiréteg, síkban négyfogású mágneses anizotrópiával. A film síkjában egymásra merőlegesen fekvő két könnyű irány lehetőséget ad az ún. tömbi spin-flop átmenet vizsgálatára. A Fe rétegek az SMR vizsgálatokat lehetővé tevő ⁵⁷Fe izotópból készültek.

Tézisek

1. Kifejlesztettem egy, a konjugált gradiens algoritmusán alapuló energiaminimalizáló programot [1], mellyel figyelembe vehető a multirétegek véges rétegszáma fenomenológikus monodomén közelítésben. A program segítségével megmutattam, hogy a véges rétegszámból adódó mágnesezettséggörbe a naívan várt $1/n$ -es (ahol n a mágneses rétegek száma) aránynál is rohamosabban csökken tisztán antiferromágnesesen (AF) csatolt

[§] VSM: Vibrating Sample Magnetometry, SQUID: Superconducting Quantum Interference Device, RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry, PIXE: Particle-Induced X-ray Emission, SMR: Synchrotron Mössbauer Reflectometry, PNR: Polarized Neutron Reflectometry

multirétegek esetében. Megmutattam továbbá, hogy a szabad végeknek köszönhetően új fázisok alakulhatnak ki.

2. Síkban négyfogású mágneses anizotrópiájú AF-csatolt multiréteg esetén a mért tömbi spin-flop (bulk spin-flop, BSF) átmenet [3] kritikus terére felső korlátot adtam a rétegparaméterek (mágneses momentum, anizotrópiaenergia, csatolási állandók) függvényében, figyelembe véve a véges rétegszám hatását [4]. Nehéz irányú mágnesezés esetére numerikusan vizsgáltam a keletkező fázisokat és megállapítottam, hogy a felületi spin-flophoz nagyon hasonló fázis alakulhat ki, illetve, hogy remanenciában a spinek beállása függhet a minta mágneses előéletétől. Telítésből leengedve a teret, a multiréteg két, a minta síkjával párhuzamosan elválasztott, merőleges beállású tartományra szakadhat; köztük egy néhány rétegből álló átmeneti tartomány alakul ki.
3. Erősen AF-csatolt Fe/Cr minta mágneses hiszterézisméréseit sikeresen írtam le egy Fourier-sor szerint kiterjesztett fenomenológikus bilineáris-bikvadratikus modellel. VSM mérésekkel meghatároztam a BSF átmenet terét szobahőmérsékleten és 20 K-en. A BSF tér nagyságának az elméletileg elérhető maximumhoz képesti alacsony voltából arra következtettünk, hogy az átmenet doménfalmazgással és nem koherens spinforgással valósul meg [4]. Globális optimalizációval értelmeztem a nehéz irányban felvett MOKE méréseket, a mágnesezettség ugrását a síkkal párhuzamos doménfal kialakulásának tulajdonítva.
4. Az ESRF-ben mért időintegrális SMR spektrumok kiértékelésével részletesen elemeztük a BSF átmenetet és részt vettem annak megállapításában, hogy az átalakulás egy szűk, 12–16 mT közötti tartományban következik be [2], amire az SMR és a PNR (ellentétben a tömbi mágnesezettséget mérő módszerekkel) közvetlen bizonyítékot szolgáltat.
5. Az AF domének keletkezésének egy egyszerű elméletét dolgoztuk ki a telítési tér véletlen fluktuációira és a doménfalak hosszának minimalizációjára alapozva. A mágneses rétegeket pixelekre osztva, elsőszomszéd spin-flop szabályok felírásával Monte Carlo szimulációt végeztem. Egy AF-csatolt hármarrétegen mért Kerr-mikroszkópos felvételt jó eredménnyel értelmeztem a szimulációval [5]. A modellt továbbfejlesztettük a doménérés és durvulás elméleti leírására [6, 7].
6. SMR és PNR módszerekkel vizsgáltuk az AF domének ki- és átalakulásait egy Fe/Cr multiréteg mintán. Részt vettem annak megállapításában, hogy:
 - a. A telítési értéket meghaladó ($\sim 1,3$ T) térből (bővebben a c. pontban) csökkentve a teret, a kezdetben kb. 370 nm nagyságú domének mérete egy viszonylag keskeny (0.2–0.1 T) sávban az anizotrópia irányítottságától függetlenül, irreverzibilis módon kb. egy nagyságrenddel nő (ún. doménérés, ripening) [8].

- b. Tovább csökkentve a teret, „nehéz” irányú anizotrópia esetén a domének remanenciában mind a négy, különböző irányú könnyű tengellyel párhuzamosan állnak (X-fázis, spinszétválás), de további doménérés nem következik be.
- c. A kezdeti kis doménes állapotot csak akkor kapjuk vissza, ha a mintát „túltelítjük” (minimum 1,3 T mágneses térben, szuperszaturáció). A szuperszaturáció alacsony hőmérsékleten (15 K) még szembeötlőbb. SMR mérésekből tudjuk, hogy a telítési tér ezen a hőmérsékleten 1,5 T, míg a szuperszaturációs tér 2,5 T és 4 T között van (pontosabb érték meghatározására a korlátozott mérési idő miatt eddig nem nyílt mód). 15 K-en elmarad a doménérés, remanenciában is a kezdeti kis doméneket találjuk.
- d. A BSF átmenethez doméndurvulás is kapcsolódik. A 90°-kal elfordult mágnesezésű új domének olyan nagyok, hogy sem az SMR-ben, sem a PNR-ben nem adnak diffúz szórást, így méretükre csak alsó határ (kb. 30 μm) adható meg [2].

Következtetések

Az AF csatolt multirétegeknél fontos effektusok társulnak a véges rétegszámhoz. A véges rétegszámú fenomenológikus kiterjesztett csatolási modell lehetővé teszi, hogy mágneses információt tartalmazó mérések eredményeit „megjósoljuk”. A foltos domének méreteloszlása is függhet a külső tértől és az irodalomban elfogadottal ellentétben, lehetőség van a doménméret jelentős növelésére és ezzel együtt a GMR zaj csökkentésére. Ez utóbbi ipari alkalmazásra is található.

Irodalomjegyzék

Tézisekhez kapcsolódó közlemények

- [1] M. Major, L. Bottyán, L. Deák, D. L. Nagy; „On magnetic multilayers of finite stacking”. in E.A. Görlich, A. Pedziwiatr, editors, *Condensed Matter Studies by Nuclear Methods*, Proc. XXXIV. Zakopane School of Physics, Zakopane, pages 165–168. Jagellonian University, Cracow, (1999).
- [2] D. L. Nagy, L. Bottyán, L. Deák, M. Major; „Synchrotron Mössbauer Reflectometry – Recent Applications in Multilayer Magnetism”. *Acta Physica Polonica A*, **100**, 669–678, (2001).
- [3] D. L. Nagy, L. Bottyán, B. Croonenborghs, L. Deák, B. Degroote, J. Dekoster, H. J. Lauter, V. Lauter-Pasyuk, O. Leupold, M. Major, J. Meersschaut, O. Nikonov, A. Petrenko, R. Ruffer,

- H. Spiering, and E. Szilágyi. “Coarsening of antiferromagnetic domains in multilayers: The key role of magnetocrystalline anisotropy.” *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 157202, (2002).
- [4] L. Bottyán, L. Deák, J. Dekoster, E. Kunnen, G. Langouche, J. Meersschaut, M. Major, D. L. Nagy, H. D. Rüter, E. Szilágyi, and K. Temst. “Observation of the bulk spin-flop in an Fe/Cr superlattice”. *J. Magn. Magn. Mat.*, **240**, 514–516, (2002).
- [5] M. Major, L. Bottyán, and D. L. Nagy. “Simulation of unsaturation domain formation in antiferromagnetic multilayers”. *Acta Physica Polonica A*, **101**, 301–305, (2002).
- [6] M. Major, L. Bottyán, and D. L. Nagy. “Simulation of antiferromagnetic domain formation history in magnetic multilayers”. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **189**, 995–999, (2002).
- [7] M. Major, L. Bottyán, and D. L. Nagy. “Simulation of domain formation and domain coarsening in antiferromagnetic multilayers”. *J. Magn. Magn. Mat.*, **240**, 469–471, (2002).
- [8] D. L. Nagy, L. Bottyán, L. Deák, B. Degroote, O. Leupold, M. Major, J. Meersschaut, R. Ruffer, E. Szilágyi, J. Swerts, K. Temst, A. Vantomme; „Specular and Off-Specular Synchrotron Mössbauer Reflectometry: Applications to Thin Film Magnetism”. *Phys. Stat. Sol. (a)*, **189**, 591–598, (2002).

További publikációk a dolgozat témájában

- [A] D. L. Nagy, L. Bottyán, L. Deák, B. Degroote, J. Dekoster, O. Leupold, M. Major, J. Meersschaut, R. Ruffer, E. Szilágyi, A. Vantomme. „Off-specular synchrotron Mössbauer reflectometry: A novel tool for studying the domain structure in antiferromagnetic multilayers”. *Hyperfine Interactions*, **141-142**, 459–464, (2002).
- [B] D. L. Nagy, L. Bottyán, L. Deák, B. Degroote, J. Dekoster, O. Leupold, M. Major, J. Meersschaut, R. Ruffer, E. Szilágyi, A. Vantomme; „Off-specular synchrotron Mössbauer reflectometry: A novel tool for studying the domain structure in antiferromagnetic multilayers”; *Hyperfine Interactions*, **141-142**, 459–464, (2002)
- [C] L. Deák, L. Bottyán, M. Major, D. L. Nagy, H. Spiering, E. Szilágyi, F. Tanczikó; „Recent Developments in Synchrotron Mössbauer Reflectometry”. *Hyperfine Interactions*, **144**, 45–52, (2002)
- [D] Nagy Dénes Lajos, Bottyán László, Deák László, Major Márton, Szilágyi Edit, Tanczikó Ferenc, „Domének keletkezése és átalakulásai antiferromágnesesen csatolt multirétegekben”, *Fizikai Szemle*, **LIV**, 368–372, (2004).