

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVIII. évfolyam

2. szám

2008. február

AZ ÓRIÁS MÁGNESES ELLENÁLLÁS FELFEDEZÉSE (1988)

– A SPINTRONIKA NYITÁNYA

– a 2007. évi fizikai Nobel-díj és háttere

Bakonyi Imre, Simon Eszter, Péter László
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Régóta közismert tény, hogy az elektromos töltés mellett az elektron spinnel is rendelkezik. A napjaink technikáját meghatározó *elektronika* iparág olyan eszközökön alapul, amelyekben csak az elektron töltését használják ki. Az utóbbi években azonban megjelentek újfajta, nanotechnológiával készített eszközök is, amelyek működési elvét az elektron kétféle spinbeállási lehetősége biztosítja, megteremtve ezáltal egy új, perspektivikus iparág, a *spinelektronika* (vagy röviden *spintronika*) alapjait. A 2007. évi fizikai Nobel-díjat [1] egy ilyen elven működő jelenség, nevezetesen az *óriás mágneses ellenállás* (angolul: giant magnetoresistance = GMR) felfedezéséért ítélték oda (1. *ábra*).

Az alábbiakban áttekintést adunk az óriás mágneses ellenállás felfedezéséhez vezető útról, valamint kitérünk a GMR felfedezésének gyakorlati jelentőségére és a spintronika kibontakozásában játszott szerepére. A *mágneses ellenállásról* (MR) itt csak annyit jegyünk meg, hogy az a vizsgált anyag elektromos ellenállásának külső alkalmazott H mágneses tér hatására bekövetkező megváltozása. Ilyen ellenállásváltozást különböző fizikai mechanizmusok idézhetnek elő. A mostani Nobel-díj szempontjából fontos mechanizmusokról bővebben egy későbbi dolgozatban írunk, amelyikben bemutatjuk majd az ezen a területen Magyarországon végzett tevékenységet is. A két dolgozat egybeszerkesztett változata részletes szakirodalmi hivatkozásokkal elérhető a következő honlapon: <http://www.szfi.hu/~bakonyi/GMR-Nobel-dij.pdf>.

Jelen munkát az OTKA a K 60821 pályázat keretében támogatta.

GMR-effektus: a nanotechnológiától a spintronikáig

Az elmúlt évtizedekben a vékonyréteg-technológiák gyors ütemű fejlődésével olyan nanométeres skálájú fémes rétegszerkezetek előállítása is lehetővé vált, amelyekben az elektrontranszport-tulajdonságok jelentősen megváltozhatnak a tömbi anyagokhoz képest. Ez akkor következik be, ha meg tudjuk valósítani, hogy az egyes alkotó rétegek vastagsága kisebb legyen a tömbi anyagokban az elektrontranszportra jellemző karakterisztikus távolságoknál (pl. elektron szabad úthossz). Amennyiben az egyik alkotó réteg ferromágneses (FM) és a mágnesezettség iránya ezen távolságoknál kisebb skálán változik, akkor a két

1. *ábra*. A 2007. évi fizikai Nobel-díj kitüntetettjei: Albert Fert és Peter Grünberg.



szomszédos FM-réteg közötti nemmágneses (NM) rétegen keresztül úgynevezett spinfüggő elektrontranszport-jelenségek is felléphetnek a vezetési elektronok spinpolarizációja miatt, és ez a tömbi anyagoknál nem ismert effektusokhoz vezethet. A Nobel-díjas *Feynman* egy 1959-es előadásában [2], melynek címe *Rengeteg lehetőség van odalent* (mármint az atomok világában), látványos módon megjósolta, hogy „ha majd az anyagok előállítását atomi szinten leszünk képesek manipulálni, akkor az anyagtulajdonságoknak az addig ismertnél jóval szélesebb skálája fog feltárulni előttünk és előre nem várt fizikai jelenségeket fedezhetünk fel”.

Egy ilyen esemény következett be, amikor 1988-ban a német *Peter Grünberg* jülich-i és a francia *Albert Fert* orsói kutatócsoportja – egymástól függetlenül – felfedezte az óriás mágneses ellenállás jelenségét nanoskálájú FM/NM típusú Fe/Cr rétegszerkezetekben. A mágneses nanoszerkezetekben megfigyelhető GMR-jelenség fizikai mechanizmusa jelentősen eltér a homogén FM-fémek és -ötvözetek mágneses ellenállásától (ez az anizotrop mágneses ellenállás = AMR), és bizonyos esetekben több mint egy nagyságrenddel felülmúlhatja az utóbbit (innen ered az „óriás” elnevezés). Ezen eredmény fontosságát elismerendő, Grünbergnek és Fertnek ítelték oda megosztva a 2007. évi fizikai Nobel-díjat. Az indoklás tömören csak annyi volt, hogy „az óriás mágneses ellenállás felfedezéséért”. Ez a megfogalmazás kihangsúlyozza és egyértelművé teszi, hogy egy kiemelkedő fontosságú alapvető kutatási eredményt ismernek el a döntéssel. Az odaítélés esedékességében nyilvánvalóan az a tény is közrejátszott, hogy a GMR-elven alapuló eszközök mára igen széles körben elterjedtek a gyakorlatban, például a számítógépek mágneses merevlemezeinek kiolvasófejében most már kizárólag ilyen eszközöket alkalmaznak.

Történeti visszapillantás: vékonyréteg-technológia → antiferromágneses csatolás → GMR

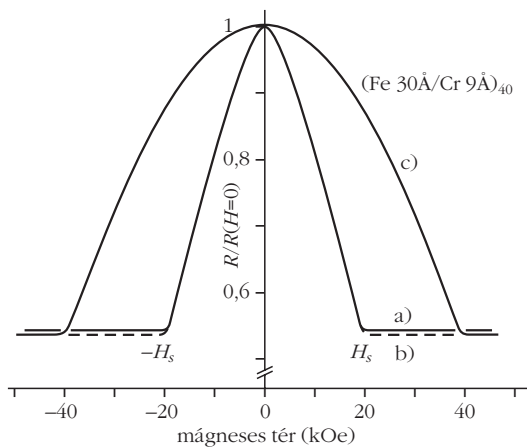
A vékonyréteg-technológiák közül különösen az epitaxiális rétegnövesztés terén elért haladás volt döntő jelentőségű, mert ezáltal valóban a Feynman által megjósolt, atomi rétegenkénti anyagkészítést lehetett megvalósítani. A kezdetben a félvezető-technológia számára kidolgozott *molekulasugaras epitaxia* (angolul: molecular beam epitaxy = MBE) segítségével az 1970-es évek végétől alkalmasan megválasztott egykristály-hordozóra már nagyon kevés hibahelyet tartalmazó fém vékonyrétegeket lehetett növeszteni nanométeres vastagságban. Itt vegyük figyelembe, hogy fémeknél az 1 nm-es rétegvastagság körülbelül 5 atomi rétegnek felel meg, ahol már valóban várható, hogy a fizikai tulajdonságok lényegesen megváltozhatnak a tömbi anyagokhoz képest. Ezen finom rétegnövesztési eljárások révén hamarosan lehetővé vált nanométeres rétegek felhasználásával *multirétegek*

is készíteni, amelyek például néhány atom vastagságú FM- és NM-rétegekből épülnek fel.

A nanoskálájú fém rétegszerkezetek mágneses tulajdonságainak tanulmányozása meglepő eredményre vezetett 1986-ban. *Majkrzak* és munkatársai Gd/Y multirétegekben, Grünberg és munkatársai pedig Fe/Cr/Fe hármarrétegek (szendvicsszerkezetek) esetén tapasztalták, hogy bizonyos Y-, illetve Cr-rétegvastagság esetén antiferromágneses (AF) csatolás jön létre a szomszédos mágneses rétegek között. Ilyen csatolás, amit a vezetési elektronok spinpolarizálhatósága révén kialakuló *közvetett kicserélődési kölcsönhatás* hoz létre, régóta ismert volt a nemmágneses fém mátrixba helyezett mágneses szennyezők lokalizált momentumai között. A meglepő az volt, hogy hasonló csatolást képesek létesíteni a rétegmágneszettség között az elválasztó fém NM-réteg vezetési elektronjai is.

Grünberg csoportja elkezdte tanulmányozni a Fe/Cr/Fe szendvicsek mágneses ellenállását is és 1988-ban szobahőmérsékleten azt tapasztalták, hogy 12 nm vastag Fe-rétegek és 1 nm vastag Cr-réteg esetén a mért ellenállás-változás ($\approx 1,5\%$) egy nagyságrenddel felülmúlta egy különálló 25 nm-es Fe-réteg mágneses ellenállását. További különlegesség volt, hogy a külső mágneses tér növelésével ellenállás-csökkenés következett be akár párhuzamos, akár egymásra merőleges volt a mérőáram és a külső mágneses tér iránya (ezt a két esetet longitudinális, illetve transzverzális konfigurációnak nevezzük). Ennek azért van jelentősége, mert homogén FM-fémeknél ebben a két konfigurációban az ellenállás-változás eltérő előjelű. Az ezen a mintán magnetooptikai Kerr-effektussal, valamint fényszórással végzett kísérletekből ugyanakkor tudták, hogy $H = 0$ esetén a szendvics két Fe-rétegének a mágneszettsége egymáshoz képest antiparallel (AP) áll. Így nyilvánvaló volt számukra, hogy a szendvics mágneses telítése során megfigyelt nagy ellenállás-változás (csökkenés) oka a külső tér nélküli AP-állapothoz tartozó nagy elektromos ellenállás. Ezt a Fermi-nívó körüli elektronok erős spinpolarizációjának tulajdonították, egyezésben a ma elfogadott magyarázattal. Olyan Fe/Cr/Fe/Cr/Fe szendvicsekben, amilyen a Fe-rétegek vastagsága 8 nm volt, a szobahőmérsékleten mért mágneses ellenállás értéke az előző háromréteges szendvicshöz képest megduplázódott, míg az ötréteges szendvicset 5 K-re lehűtve, 10%-os mágneses ellenállást mértek. Bár a költséges MBE-technikával készült Fe/Cr/Fe típusú szendvicseken csak a cseppfolyós He hőmérséklete közelében tudtak a gyakorlatban már bevált hagyományos, homogén FM-ötvözetekénél nagyobb mágneses ellenállást elérni, azonnal felismerték az újonnan felfedezett jelenség által előidézett nagy MR-változás szenzoralkalmazási lehetőségét, és Grünberg szabadalmaztatta is az ezen az elven működő mágneses térérzékelési módszert.

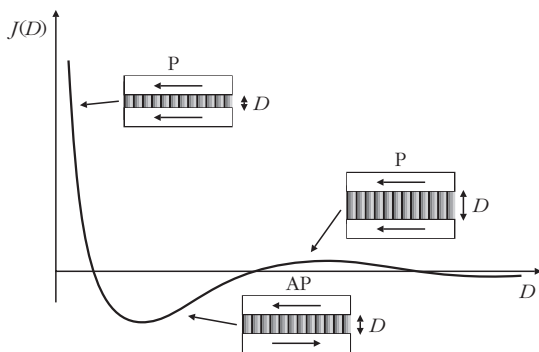
Még ugyanabban az évben Fert és csoportja arról számolt be, hogy MBE-vel növesztett egyes Fe/Cr multirétegekben 4,2 K hőmérsékleten csaknem 50%-os ellenállás-csökkenést tapasztaltak 20 kOe körüli



2. ábra. Egy MBE-módszerrel növesztett Fe/Cr multiréteg elektromos ellenállásának változása a mágneses térrel 4,2 K hőmérsékleten Fert és munkatársai nyomán. A mérőáram és a külső mágneses tér (H) a minta síkjában volt, kivéve a c) görbét, ahol H iránya merőleges volt a minta síkjára és itt a nagy lemágnesező tér miatt a H_s telítési tér kétszer akkora, mint a síkban alkalmazott térnél. Az a) görbe a mágneses ellenállás longitudinális (mérőáram és H iránya párhuzamos), a b) görbe pedig a transzverzális (mérőáram és H iránya egymásra merőleges) komponensét mutatja. Az ábrán az egyes rétegek vastagságának megadása angström (Å) egységben szerepel, ahol $10 \text{ Å} = 1 \text{ nm}$. A H mágneses térerősség itt használt mértékegysége kOe, melynek átszámítása: $1 \text{ kOe} = (10^3/4\pi) \text{ kA/m} \approx 80 \text{ kA/m}$.

telítési térrel (2. ábra). A mágneses tér hatására bekövetkező szokatlanul nagy ellenállás-csökkenést óriás mágneses ellenállásnak nevezték el, és szintén a spinfüggő elektrontranszporttal magyarázták. Grünbergék eredményéhez hasonlóan ők is azt kapták (ld. 2. ábra), hogy a longitudinális – a) görbe – és transzverzális – b) görbe – ellenállás-változás azonos előjelű (azaz csökkenés következik be). Az is látható, hogy adott külső térnél a kétféle ellenállás-változás értéke gyakorlatilag megegyezik, csupán a H_s telítő tér felett van közöttük kis különbség a Fe-rétegek tömbi FM-fémekre jellemző mágneses ellenállás-jároléka miatt. Itt hívjuk fel a figyelmet arra, hogy a GMR-effektust valójában nem a nagyon nagy mágneses ellenállással azonosítjuk, hanem az előidéző fizikai mechanizmussal, mégpedig a mágneses nanoszerkezetben végbemenő spinfüggő elektronszórással. A homogén ferromágnesek mágneses ellenállásával szemben ez a lon-

3. ábra. Az egymástól D vastagságú NM-fémréteggel elválasztott FM-rétegpár mágnesezettségei közötti kicserélődési csatolás $J(D)$ állandója D függvényében. Amennyiben $J(D) > 0$ (FM-csatolás), akkor P beállítás valósul meg, ha pedig $J(D) < 0$ (AF-csatolás), akkor AP beállítás lesz $H = 0$ külső mágneses térben.

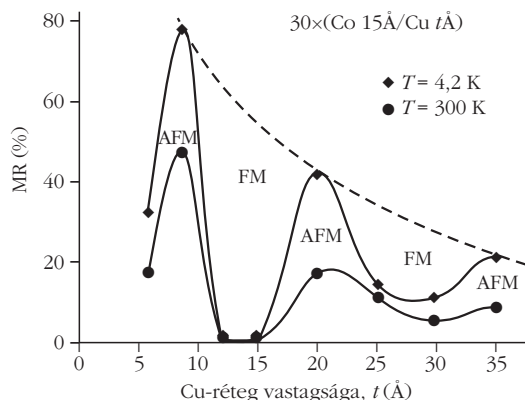


gitudinális és transzverzális komponensek azonos előjelében is megnyilvánul. Ebből következik, hogy ilyen esetben még akkor is GMR-effektussal van dolgunk, ha a mért ellenállás-változás csak 1% nagyságú, mint volt például Grünberg eredeti felfedezésénél a Fe/Cr/Fe szendvicstre. Természetesen a Fert és munkatársai által tapasztalt 50% körüli ellenállás-változás már valóban felcilllantotta a GMR lehetséges szenzoralkalmazásait, mint ahogy arra ők maguk is rámutattak, de a szükséges alacsony hőmérsékletek és nagy mágneses terek miatt még további kutatásokra volt szükség ahhoz, hogy erre sor kerülhessen.

Történeti visszpillantás: a GMR felfedezését követő további fontos eredmények

Az első komoly lépést ebben az irányban az jelentette, amikor 1990-ben *Parkin* és munkatársai (IBM, USA) arról számoltak be, hogy az MBE-módszernél jóval egyszerűbb és kevésbé költségigényes katódporlasztással készített Fe/Cr, Co/Cr és Co/Ru multirétegekben is megfigyelték a GMR-jelenséget. Ráadásul mind a GMR nagysága, mind a telítéshez szükséges mágneses tér szabályosan oszcilláló viselkedést mutatott a nemmágneses réteg (Cr és Ru) vastagságának függvényében. Nevezetesen, ahol a GMR nagysága maximális volt, ott maximuma volt a telítő térnek is, jelezve, hogy az elválasztó réteg ezen vastagságainál erős AF-csatolás dominál, míg ezen AF-maximumhelyek között a kis telítő térrel rendelkező FM-csatolás van, ami utóbbi tény miatt a GMR is gyakorlatilag eltűnik ezen NM-rétegvastagságoknál (a mért mágneses ellenállás ilyenkor az FM-rétegek anyagára jellemző tömbi elektronszórási folyamatoktól származik). Az NM-réteg vastagságának függvényében oszcilláló GMR tehát egy oszcilláló, váltakozva AF- és FM-jellegű csatolás eredménye, ami a mágneses rétegek közötti csatolásnak az elválasztó NM-réteg vastagságától való függését tükrözi. Ez látható sematikusán a 3. ábrán, ahol az egyes rétegek mágnesezettségének

4. ábra. A GMR telítési értékének (GMR_s) oszcillációja porlasztással előállított Co/Cu multirétegekben az elválasztó NM-rétegvastagságának függvényében 4,2 K-en és szobahőmérsékleten Fert és munkatársai nyomán. Az AFM-jelölés az antiferromágneses, az FM-jelölés pedig a ferromágneses csatolású állapotot jelöli.



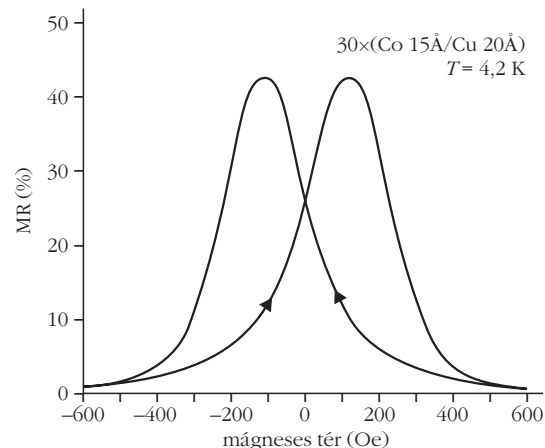
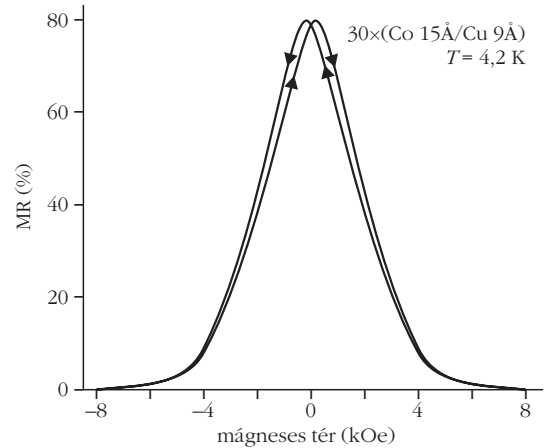
beállítását is feltüntettük. Mint már említettük, ez a csatolás rokon a nemmágneses fémes mátrixban elhelyezkedő lokalizált mágneses momentumok kölcsönhatásával, bár a csatolás rétegvastagságtól, illetve távolságtól való konkrét függvényalakja a két esetben egymástól eltérő [3].

A GMR felfedezése után az igazi áttörést az jelentette, amikor 1991-ben mind Fert, mind Parkin csoportja arról számolt be, hogy porlasztott Co/Cu multirétegekben még szobahőmérsékleten is közel 50% nagyságú GMR figyelhető meg. Ezt szemléltetjük a 4. ábrán a Fert-csoport mérésének bemutatásával, ahol a GMR oszcilláló jellege is jól látszik. Ezen utóbbi eredmények már valóban megnyitották az utat a GMR-jelenség gyakorlati felhasználása felé.

Magnetorezisztív érzékelők: az AMR és GMR gyakorlati felhasználása

Az a jelenség, hogy mágneses anyagok elektromos ellenállása jelentősen megváltozhat külső mágneses térben, felhasználható mágneses tér mérésére, illetve mágneses tér jelenlétének vagy hiányának megállapítására. Lágymágneses ötvözetekből (pl. $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ körüli összetételű permalloy ötvözetből) készített ilyen eszközök a magnetorezisztív (MR) szenzorok, amelyeket már régóta alkalmaznak a gyakorlatban. Ezeket a permalloy MR-érzékelőket használták például az 1970-es évek elején a buborékmemóriákban az információ kiolvasására, majd 1991-től a merevlemez tárolók kiolvasófejeiben jelentek meg az addigi indukciós kiolvasás helyett. Ezzel az információtárolási kapacitás (bitsűrűség) évenkénti növekedési ütemét erőteljesen meg lehetett növelni az indukciós kiolvasás által biztosított ütemhez képest [4]. Az egyre növekvő igény a még nagyobb merevlemez-tárolási sűrűség iránt egy idő után már nem volt kielégíthető az AMR kiolvasófejekkel sem, és ezért is volt nagy jelentősége a még nagyobb ellenállás-változást adó GMR-effektus felfedezésének.

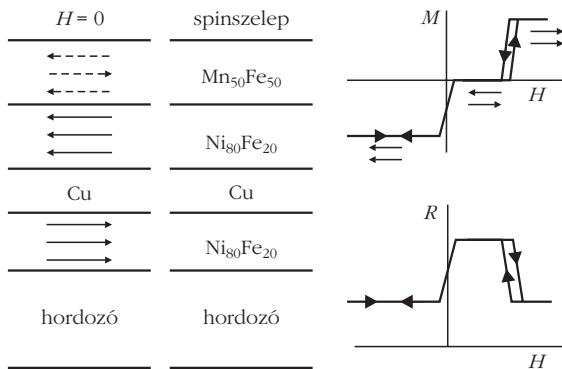
A GMR gyakorlati felhasználhatóságának bemutatásához érdemes visszatérni a 4. ábrához és tekintetbe venni a 5. ábrát is, ahonnan a GMR telítési terek (H_s) is leolvashatók. Megállapítható, hogy míg 300 K-en az első AF-maximumnál a GMR telítési értéke (GMR_s) körülbelül 50%, amihez mintegy 5 kOe telítő tér tartozik, addig a második AF-maximumnál ugyan a GMR csak 20%, de a telítési tér egy nagyságrenddel kisebb, mint az első AF-maximumnál (megjegyezzük, hogy H_s hőmérsékletfüggése nem jelentős 4,2 K és 300 K között). Mindez azt jelenti, hogy a második AF-maximumnál a térérzékenység (GMR_s/H_s) mintegy négyszeresére nő az első AF-maximumhoz képest. A második AF-maximum azzal a technológiai előnnyel is jár, hogy a körülbelül 2 nm-es Cu-réteg vastagságának állandóságát sokkal pontosabban lehet tartani az előállítás során, mint az első AF-maximumhoz tartozó 1 nm körüli Cu rétegvastagságot. Ezen paraméterek alapján a multirétegek GMR-effektusa a magnetorezisztív szenzorokban



5. ábra. A mágneses ellenállás térfüggése porlasztással előállított Co/Cu multirétegekben 4,2 K-en Fert és munkatársai nyomán. Felső görbe: multiréteg az első AF-maximumnál (9 Å = 0,9 nm rétegvastagságnál); alsó görbe: multiréteg a második AF-maximumnál (20 Å = 2,0 nm rétegvastagságnál). Szobahőmérsékleten a GMR nagysága kisebb (ld. 4. ábra), de a telítéshez szükséges tér gyakorlatilag változatlan.

való alkalmazások szempontjából felülmúlja mind az érzékenység, mind a viszonylag kis mágneses terek detektálhatósága tekintetében a korábban használt homogén FM-fémekben és ötvözetekben megfigyelhető mágneses ellenállás-változást.

A GMR-jelenség szenzorokban való sikeres alkalmazásához vezető úton az úgynevezett *spinszelep* szerkezet bevezetésével Parkin és munkatársai 1991-ben további lényeges javulást értek el az $\text{MR}(H)$ karakterisztikában. A 6. ábrán láthatunk egy spinszelep szerkezetet, valamint a mágnesezettség és a mágneses ellenállás változását vázlatosan a külső mágneses tér két telítő értéke között. A spinszelep úgy épül fel, hogy egy megfelelő NM-réteggel (rendszerint Cu) AF-módon csatolt FM-rétegpárból az egyik rétegre egy tömbi AF-viselkedést mutató vékonyréteget visznek fel (pl. Ni-Mn vagy Fe-Mn ötvözetből). Az FM- és AF-rétegek határfelületén kialakuló erős közvetlen kicserélődési kölcsönhatás miatt kicserélődési csatolás jön létre a két felső réteg között. Ezen kölcsönhatás következtében, melynek jellemzőit még ma is kiterjedten kutatják, az AF-réteggel csatolt FM-réteg mágnesezettsége a szobajöhethető mágneses terekben



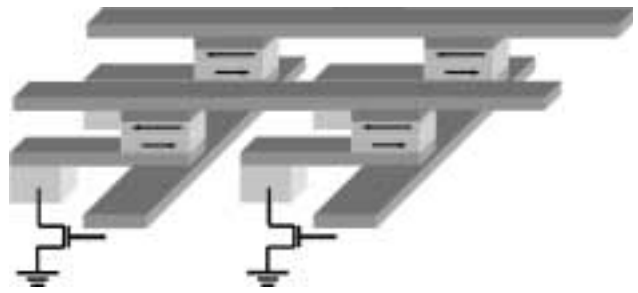
6. ábra. GMR spinszelepszervelet réteggkomponensei (középen) és az egyes rétegek mágneseztségeinek beállása külső tér nélkül (balra). A jobboldali rész mutatja vázlatosan az egész szerkezet M mágneseztségeinek (fent) és R elektromos ellenállásának (lent) változását a H külső mágneses tér függvényében, ahol a kis nyíl párok az alsó és a felső réteg mágneseztségeinek irányát adják meg az egyes rétegtartományokban. A két $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (permalloy) réteg mágneselesen lágy FM-ötvezet. A felső permalloyréteg mágneseztségségét az AF-ötvezetből ($\text{Mn}_{50}\text{Fe}_{50}$) készült legfelső réteg a határfelületükön kialakuló közvetlen kicserélődés révén balra vízszintesen mutató irányban tartja (előfeszíti) nem túl nagy külső terekig. A felső („rögzített”) és az alsó („szabad”) permalloyréteget külső tér hiányában a nem-mágneses Cu-réteg által közvetített AF-csatolás antiparallel állítja be egymáshoz képest.

mindig az AF-réteg által megszabott irányba mutat (ez az ún. „rögzített réteg”), míg a másik FM-réteget (ez az ún. „szabad réteg”) a detektálandó mágneses tér szabadon átmágnesezheti a rögzített réteggel való nem túl erős AF-csatolása ellenében. Az 6. ábráról látható, hogy ezzel az elrendezéssel egy $H = 0$ tér környékén közel lineáris és elég meredek (vagyis elegendően érzékeny) karakterisztikájú MR-eszközt kaptunk.

Mindezen fejlesztések eredményeképpen a merevlemezek kiolvasófejeiben 1997-ben megjelentek az első GMR spinszelepszerveletűk, és 2007-ben már minden újonnan piacra kerülő merevlemezben ezt használták kiolvasásra. Ennek a megfelelő érzékenysége még jó ideig ki fogja elégíteni a merevlemez-tárolókacapacitás jelenlegi erőteljes növekedési ütemét [4].

A spintronika jelene és jövője

Visszatekintve a GMR felfedezése óta eltelt közel húsz évre, megállapítható, hogy ez az eredmény jóval nagyobb hatással volt a mágneses nanoszerkezetek elektromos és mágneses tulajdonságainak kutatására, mint csupán a merevlemez-kiolvasófej érzékenységeinek jelentős megjavítása, ami persze azután a tárolási sűrűség korábban elképzelhetetlen mértékű megnövelését vonta maga után. Nyilvánvaló, hogy a GMR felfedezése katalizált sok egyéb, addig mintegy bűvópatakként folydogáló, ma már spintronikainak nevezett egyéb kutatást is, illetve teljesen új spintronikai kutatási területek is megjelentek. Az előbbiekre példa az *alagutazó mágneses ellenállás* (angolul: tunnelling magnetoresistance = TMR) vizsgálata FM-fém/szigetelő/FM-fém heterostrukturákban, a *spintranzisztor* kidolgozása, a *mágneses félvezetők* kutatása, utóbbiakra példa a GMR-szer-



7. ábra. Az MRAM elvi felépítése

kezetek és félvezetők kombinálásából álló *hibrid eszközök* létrehozása vagy az *áramindukálta átmágnesezési folyamatok* vizsgálata. Mindezek tulajdonképpen egy spintronikai iparág megalapozását jelentik, az alagutazó mágneses ellenállásra alapozott *mágneses* (vagy igazából inkább magnetorezisztív) *RAM-memóriák* (MRAM) fejlesztése például már nagy intenzitással folyik világszerte. Ez komoly kihívást jelent a hagyományos félvezető RAM-memóriák számára az MRAM-ok (7. ábra) jobbnak ígérkező paraméterei és kisebb energiaigénye miatt, ami egyúttal a miniatürizálhatóság irányában is komoly előrelépést biztosíthat.

Befejezés

Végezetül idézzünk egy mondatot a Nobel Alapítvány honlapjáról [1]: „A GMR-effektus története nagyon jó példája annak, amikor egy teljesen váratlan tudományos felfedezés vadonatúj technológiákhoz és ipari termékekhez vezet.” A GMR felfedezéséért most Nobel-díjjal jutalmazott kutatók annak idején kifejezetten alapkutatási célokra kaptak támogatást, bármiféle konkrét alkalmazási célkitűzés nélkül. Ez ráadásul igen költséges alapkutatás volt: drága minta-előállító berendezésre (MBE) volt szükség a hozzá tartozó különleges in-situ mintaminősítő eszközökkel és extrém körülmények között (alacsony hőmérsékleteken és nagy mágneses terekben) végzendő kísérletekkel. A jó felszereltség, párosulva a korábbi tapasztalatokra épülő gondos kísérleti munkával és megfelelő intellektuális teljesítménnyel végül nagy hatású eredményre vezetett ebben a konkrét esetben, de világos, hogy sok korábbi, szintén csak alapkutatási céllal végzett kutatómunka eredménye is hozzájárult ehhez a felfedezéshez. Ebből nyilvánvalóan azt a következtetést kell levonni, hogy a tiszta alapkutatás támogatása nem köthető közvetlenül alkalmazási elvárásokhoz, mert csak színvonalas alapkutatási eredmények alapján születhetnek a későbbiekben gyakorlati felhasználást eredményező felismerések.

Irodalom

1. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/index.html
2. <http://www.zyex.com/nanotech/feynman.html>
3. Simon Eszter: Óriás mágneses ellenállás és csatolások vizsgálata. Diplomamunka, ELTE TTK, Budapest, 2007, ld.: <http://www.szfi.hu/~bakonyi/SimonE-Diplmunka07.pdf>
4. http://colossalstorage.net/hdd_technology2003.pdf