

Magnetorezisztív jelenségek vizsgálata mágneses nanoszerkezetekben

Jól ismert, hogy az elektronok az elektromos töltés mellett spinnel is rendelkeznek, mely számos érdekes jelenséget, többek között bizonyos anyagok ferromágneses viselkedését eredményezi. A mindennapjainkat meghatározó elektronikai készülékek félvezető nanoszerkezetekből épülnek fel, melyek főleg az elektron töltését használják ki. Az utóbbi években azonban megjelentek újfajta, mágneses nanoszerkezetekből épülő eszközök is, melyek működési elve az elektronok kétféle spinbeállási lehetőségén alapul. Az elektronok spin szabadsági fokának használata a nanotechnológiai fejlesztések egyik legperspektívikusabb, dinamikusan fejlődő ága, melyet spin-elektronika, vagy röviden spintronika néven szoktak emlegetni. A spintronika fontosságát jellemzi, hogy a 2007. évi fizikai Nobel díjat egy ilyen elven működő jelenség, az úgynevezett *óriás mágneses ellenállás* (giant magnetoresistance, GMR) felfedezéséért ítélték oda. A GMR jelenségét Peter Grünberg német ill. Albert Fert francia kutatócsoportja 1988-ban egymástól függetlenül fedezték fel. Ez az alapvető felfedezés hamarosan komoly ipari felhasználást talált, a GMR jelenség tette lehetővé a merevlemezek tárolókapacitásának rohamos fejlődését a hagyományos, mágneses indukción alapuló olvasó fejet alkalmazó merevlemezekhez képest. Ezen kívül napjaink számos spintronikai fejlesztése, pl. az ún. mágneses RAM (MRAM) a GMR jelenségén alapul.

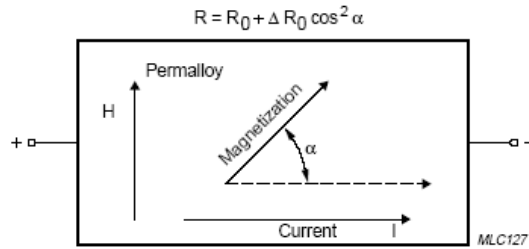
A mérési gyakorlaton két spintronikához kapcsolódó jelenséggel ismerkedünk meg, az ún. anizotróp mágneses ellenállás (anisotrope magnetoresistance, AMR) illetve a 2007-es Nobel díjhoz kapcsolódó óriás mágneses ellenállás (GMR) jelenségével. Az AMR jelenséget PHILIPS KMZ10A, KMZ10A1 típusú magnetorezisztív szenzorokon, még a GMR jelenséget a Közponi Fizikai Kutatóintézet Fémfizikai Csoportja Co-Cu rétegszerkezeteken tanulmányozzuk.

Anizotróp mágneses ellenállás elvén működő magnetorezisztív szenzorok

Egy mágneses anyagban a kristálytani irányok, illetve az anyag geometriája által kitüntetett irányok úgynevezett mágneses anizotrópiát okozhatnak, melynek hatására a mágneses momentumok az anizotrópia által kitüntetett, ún. könnyű mágnesezési irányba állnak be. A mérés során Phillips KMZ10A ill. KMZ10A1 típusú magnetorezisztív szenzorokat használunk. A szenzorok mágneses vékonyrétegekből készült keskeny mágneses csíkokból épülnek fel, melyekben a geometriai anizotrópia miatt zérus külső tér esetén a mágneses momentumok a csíkkal párhuzamosan szeretnek állni. Véges külső mágneses tér alkalmazásával a momentumokat elfordíthatjuk a kitüntetett irányhoz képest. A spin-pálya kölcsönhatáson alapuló bonyolult fizikai folyamatok miatt egy mágneses vékonyréteg ellenállása függ a mágneses momentumok és az áramirány által bezárt α szögtől, melyet anizotróp mágneses ellenállás (AMR) jelenségének nevezünk.

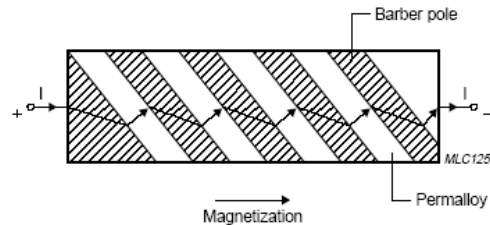
Egy egyszerű magnetorezisztív mintán az 1. ábra szerinti elrendezésben az ellenállás az $R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha$ képlettel közelíthető. Ha a könnyű mágnesezési irányra

merőleges mágneses teret alkalmazunk, a momentumok elfordulnak a mágneses anizotropia által kitüntetett irányból, így a vékonyréteg ellenállása megváltozik.



1. ábra

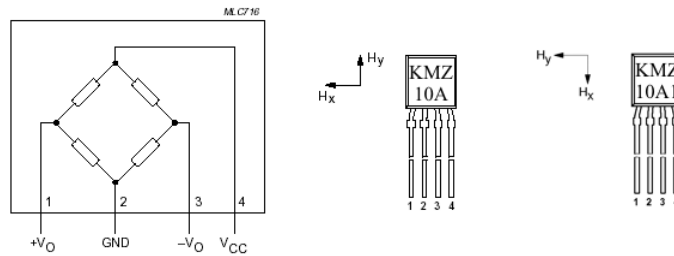
Ha az áram a preferált mágnesezettség irányába folyik, az ellenállás négyzetes függvénye lesz a mágnesezettségnek, hiszen $\cos \alpha$ arányos a külső térrel. Lineáris szenzorkarakterisztikát egy speciális elrendezéssel, az ún. Barber-pole segítségével érhetünk el (2. ábra). Ha a mágneses vékonyrétegből egy hosszú keskeny csíkot készítünk, a mágnesezettség a hosszirányba fog beállni. A csík két vége között folyó áram irányát a vékonyréteg tetejére ferde csíkokban felpárolgatott alumíniumrétegek segítségével forgatjuk el. Az alumíniumrétegek lényegesen jobban vezetnek az alattuk levő mágneses vékonyrétegnél, ezért az elektronok "próbálják minimalizálni a vékonyrétegben töltött időt", és így a vékonyrétegben az áramirány az alumínium csíkokra merőlegesen fog beállni.



2. ábra

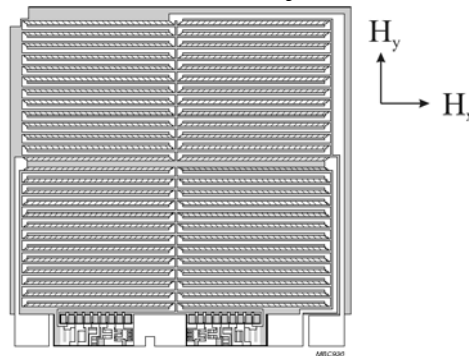
Az áramirányt 45° -al elforgatva a mágnesezettséghez képest lineáris szenzorkarakterisztikát kaphatunk, hiszen a $\cos^2 \alpha$ függvény lineáris szakaszát használjuk.

A hőmérsékleti drift elkerülése érdekében a szenzor 4 db, híd kapcsolásban elhelyezett magnetorezisztív vékonyrétegből áll (3. ábra). A híd két szemközi csúcsára 5V tápfeszültséget kötünk, és a másik két szemközi csúcs között mérjük a feszültséget. Zérus mágneses térben a híd kiegyenlített, így a kimeneten ideális esetben zérus feszültség látható. Véges mágneses térben a térrel arányos, tipikusan mV-os nagyságrendű jelet tapasztalunk. A szenzorokban a mágnesezettség az ábrán jelölt H_x irányban áll, így H_y irányú mágneses teret tudunk mérni. A KMZ10A és KMZ10A1 szenzorok közötti különbség, hogy a 10A szenzorban a preferált mágnesezési irány a forrasztólábakra merőleges irányú, míg a 10A1 szenzorban a forrasztólábakkal párhuzamos irányú. (Ennek megfelelően a 10A szenzor a lábakkal párhuzamos, míg a 10A1 szenzor a lábakra merőleges irányban méri a teret.)



3. ábra

A szenzor valóságos elrendezését a 4. ábrán látjuk.



4. ábra

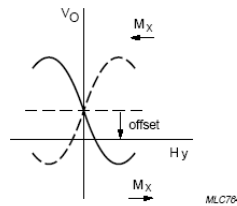
A vékonyrétegek meander formában helyezkednek el, a momentumok H_x irányban szeretnek beállni, és az áram a Wheatstone híd megfelelő karjaiban $\pm 45^\circ$ -os fokos szögben folyik.

A szenzor működésével kapcsolatban fontos megjegyezni az ún. átfordulás (flipping) jelenségét. A mágnesezettség a vékony csíkok iránya által kijelölt H_x iránnyal párhuzamosan szeretnek beállni, de ezen belül egyaránt állhatnak H_x és $-H_x$ irányban is. A szenzor megbízható működéséhez elengedhetetlen hogy a momentumok egységesen H_x vagy egységesen $-H_x$ irányban álljanak. Különböző irányban álló momentumok esetén a szenzort fel kell mágnesezni egy megfelelő nagyságú H_x irányú külső mágneses térrel. Egy H_x irányban mágnesezett szenzor momentumait átfordíthatjuk $-H_x$ irányba egy megfelelő nagyságú $-H_x$ irányú külső mágneses térrel, viszont ha az átfordításhoz nem használunk elegendő nagyságú teret, a momentumoknak csak egy része fordul át. (A momentumok részleges átfordulása túlzottan nagy H_y irányú külső tér hatására is előfordulhat.)

A mérés során a magnetorezisztív szenzorok karakterisztikáit LoggerPro számítógépes adatgyűjtő rendszer segítségével vizsgáljuk. A szenzorok egy kisméretű, függvénygenerátorral meghajtható tekercsben vannak elhelyezve, mely a 10A szenzor esetén az y , a 10A1 szenzor esetén az x irányú teret tudja változtatni. A kisméretű tekercset egy nagyobb, DC tápegységgel meghajtható tekercsbe helyezük, mely merőleges irányú teret biztosítja.

A szenzorkarakterisztikák meghatározásán kívül elektronikus iránytűt készítünk. A föld mágneses terének mérésekor a szenzort ún. flipping üzemmódban használjuk, azaz az egymást követő mérések között a szenzor mágnesezettségét átfordítjuk

váltakozó előjelű H_x irányú mágneses tér alkalmazásával. A mágnesezettség átfordításával a szenzor U_{ki} - H_y karakterisztikája az 5. ábra szerint változik meg.

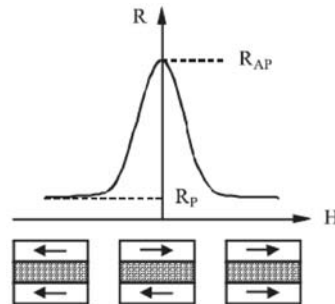


5. ábra

Ez lehetővé teszi az ofszet-feszültség kiküszöbölését, mivel a hasznos jel a két M_x iránnyal mért érték különbsége. Ezt a megoldást kis mágneses terek pontos érzékelésére lehet használni.

Óriás mágneses ellenállás jelensége

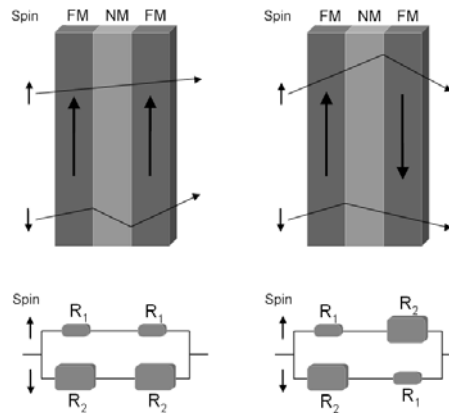
Az óriás mágneses ellenállás jelenségének megértéséhez képzeljük el a 6. ábrán feltüntetett elrendezést. Vegyünk két mágneses vékonyréteget, melyeket egy vékony nemmágneses réteg választ el.



6. ábra

A felhasznált anyagok és a nemmágneses réteg vastagságának megfelelő megválasztásával elérhető, hogy a két mágneses vékonyréteg között egy ún. antiferromágneses csatolás alakul ki, magyarul külső mágneses tér hiányában a két réteg mágnesezettsége egymással ellentétes irányú lesz. Erre az elrendezésre megfelelő nagyságú külső mágneses teret kapcsolva a két réteg mágnesezettségét beforgathatjuk egymással párhuzamos irányba. A mágnesezettség párhuzamos (parallel, P) állása esetén a 6. ábrán mutatott elrendezés ellenállása lényegesen kisebb, mint az ellentétes (antiparallel, AP) beállítás esetén, így külső mágneses tér alkalmazásával jelentős ellenálláscsökkenést tudunk elérni. Ezt a jelenséget hívjuk óriás mágneses ellenállásnak. A jelenséget a következő egyszerű modellel szemléltethetjük: Bontsuk fel az elektromos áramot fel illetve le spinű elektronokra. A le spinű elektronok egy felfelé álló mágnesezettségű rétegen lényegesen nehezebben haladnak át, mint egy lefelé álló mágnesezettségűn. Jelöljük egy mágneses réteg ellenállását egy bizonyos spinű elektronokra nézve R_1 -el ha a réteg mágnesezettségi iránya megegyezik az elektronok spinirányával, illetve R_2 -vel, ha a mágnesezettség iránya ellentétes az elektronok spinirányával. A fel és le spinű elektronokat független áramcsatornaként kezelve parallel és antiparallel

mágneszettségű rétegek eredő ellenállása a 7. ábrán szemléltetett helyettesítő képpel modellezhető.



7. ábra

Fejezzük ki a fenti két ellenállást $R_1=R+\Delta R$, $R_2=R-\Delta R$ alakban. Így a parallel és antiparallel beállítás esetén az ellenállás:

$$R_{AP} = \frac{R_1 + R_2}{2} = R, \quad R_P = \frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2} = R - \frac{\Delta R^2}{R} < R_{AP}$$

Azaz a P elrendezés ellenállása valóban kisebb mint az AP elrendezése.

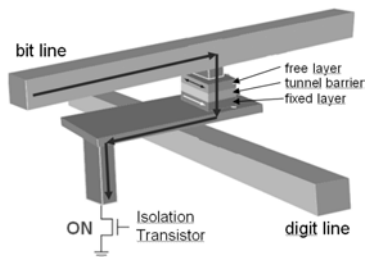
Peter Grünberg és Albert Fert kísérleti munkájukkal megmutatták, hogy a GMR jelenséggel jelentős ellenállásváltozást lehet elérni. Míg az anizotróp mágneses ellenállással elérhető ellenállás változás maximális értéke $\leq 1\%$, az óriás mágneses ellenállás jelenségével egy nagyságrenddel nagyobb ellenállásváltozást lehet elérni.

Az elektronikai iparban a mágneses ellenálláson alapuló technológiák első és máig is legjelentősebb felhasználása a merevlemezek olvasófejéhez kapcsolódik. Még az 1990-es évek elején is induktív olvasófejeket alkalmaztak: a merevlemezek olvasását a gyorsan forgó mágneses lemez által egy kis tekercsben indukált feszültség segítségével végezték. Az 1990-es évek közepén tértek át a magnetorezisztív technológiára, először anizotróp mágneses ellenálláson alapuló olvasófejeket alkalmaztak. Az AMR fejeknek köszönhetően jelentős tárolókapacitásnövekedést sikerült elérni, azonban előre látható volt hogy az AMR jelenség kis, pár százalékos nagysága a későbbiekben komoly korlátozó tényezővé válik. Az 1990-es évek vége óta a merevlemezekben GMR jelenségen alapuló olvasófejeket használnak.

A GMR olvasófejek az ún. spin-szelep elrendezést követik. A két mágneses rétegből az egyik rögzített, nehezen elfordítható irányú mágneszettséggel rendelkezik, míg a másik egy könnyen forgatható mágneszettségű réteg. Az utóbbi réteg mágneszettsége az olvasófej alatt forgó merevlemezen tárolt bitek mágnesezési irányának megfelelően áll be, így az információ a spinszelep ellenállásának mérésével egyszerűen kiolvasható.

A mágneses rétegek két lehetséges (P, AP) beállási irányának köszönhetően a spinszelep nem csak információ olvasására, de információ tárolására is használható. Ezt használja ki a jelenleg fejlesztés alatt álló memóriaegység, az ún. MRAM (Magnetic Random Access Memory). Az MRAM működését a 8 ábra szemlélteti. Minden egyes bit egy spin-szelep, melynek az állapotát az ún. bit-vonalon keresztül lehet kiolvasni. A bit írásához mind a bit-vonalon mind a digit-vonalon keresztül

nagy áramot folyatunk, így a két vezeték együttes szórt mágneses tere már át tudja fordítani a forgatható réteg mágnesezettségét. Ezzel a módszerrel a bit és digitvonal kereszteződésénél található bit külön írható a többi bit állapotának megváltoztatása nélkül.

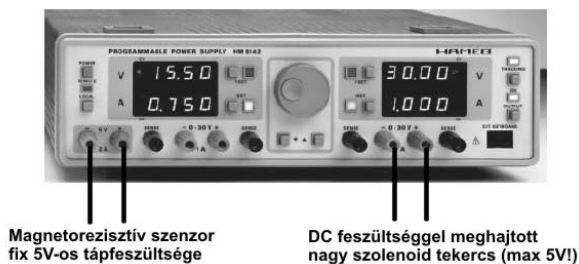


8. ábra

Mérési feladatok:

1. Feladat: Anizotróp mágnes ellenállás jelenségének vizsgálata KMZ10A magnetorezisztív szenzor segítségével.

-Állítsuk össze a mérési elrendezést. A DC jellel meghajtott nagy tekercset csatlakoztassuk a HAMEG 8142 tápegység egyik változtatható kimenetére, a magnetorezisztív szenzor tápfeszültségét pedig a HAMEG tápegység fix 5V-os kimenetéről szolgáltatassuk (6. ábra). A HAMEG függvénygenerátorral előállított háromszögjelet kössük a teljesítményerősítő doboz In1 bemenetére, és a teljesítményerősítő Out kimenetéről hajtsuk meg a kisméretű tekercset. (Figyelem! A tekercseket tilos közvetlenül a függvénygenerátorról meghajtani, ez a függvénygenerátor meghibásodását okozná!) A magnetorezisztív szenzor kimenetét kössük a LoggerPro interfészhez csatlakoztatható differenciális erősítőre, melyet $\pm 20\text{mV}$ -os vagy $\pm 200\text{mV}$ -os tartományban használjunk a mért jel nagyságától függően. (Az erősítő jelének méréséhez az interfész megfelelő bemenetét *Voltage (0V to 5V)* funkcióra állítsuk. Figyelem! A Vernier differenciális erősítő zérus bemenő feszültség esetén $\sim 1.7\text{V}$ -os offset feszültséget ad ki, az ehhez képesti változást kell mérnünk!) A kis tekercs meghajtásához használt háromszögjelet közvetlenül kössük az interfész egyik bemenetére *Voltage (-10V to 10V)* állásban. Az interfész mintavételezését érdemes *Repeat*-re állítani, illetve a LoggerPro szoftver ábrájára kattintva beállíthatjuk, hogy a háromszögjel függvényében ábrázoljuk a szenzor jelét, így egy oszcilloszkóp *X-Y* funkciójához hasonló mérést tudunk végezni.



Magnetorezisztív szenzor
fix 5V-os tápfeszültsége

DC feszültséggel meghajtott
nagy szolenoid tekercs (max 5V!)

6. ábra

-Mérjük meg a KMZ10A szenzor kimenő jelét a háromszögjellel meghajtott kis tekercs H_y terének függvényében (a kis tekercsre $\pm 10V$ -os feszültséget adjunk). Ismételjük meg a mérést különböző H_x irányú segédterek mellett (A H_x teret a nagy tekercsre adott DC feszültséggel szabályozzuk 0-5V tartományban). Értelmezzük a méréseinket! Hogyan függ az U_{ki} - H_y karakterisztika meredeksége, illetve linearitási tartománya a H_x segédter értékétől? Milyen furcsa jelenséget tapasztalunk kis H_x tereknél, és mi lehet ennek az oka? Kalibráljuk a kisméretű tekercs mágneses terét! (A szenzorok specifikáció szerinti tipikus érzékenysége zérus H_x segédter, ill. 5V-os tápfeszültség mellett 80 mV/(kA/m))

2. Feladat: Mágneses átfordulás jelenségének vizsgálata, hiszterézishurok mérése KMZ10A1 magnetorezisztív szenzor segítségével.

-Az 1. feladatban leírtaknak megfelelően állítsuk össze a mérési elrendezést KMZ10A1 szenzor segítségével. A kis tekercsre adott háromszögjel segítségével mérjük ki a szenzor U_{ki} - H_x karakterisztikáját, különböző H_y értékek mellett! (A kis tekercsre $\pm 10V$ -os feszültséget adjunk, a H_y teret a nagy tekercsre adott DC feszültséggel szabályozzuk 0-5V tartományban.) Értelmezzük a méréseinket! Hogyan függ a hiszterézishurok szélessége a H_y tér értékétől? Kalibráljuk a nagyméretű tekercs mágneses terét!

3. Feladat: elektromos iránytű készítése

Építsünk elektromos iránytűt a 2db. egymásra merőlegesen álló KMZ10A1 szenzorból és az átfordításhoz szükséges tekercsekből álló panel segítségével! A függvénygenerátorral állítsunk elő a nulla feszültség körül szimmetrikus négyszögjelet, melyet a teljesítményerősítőn keresztül kapcsoljunk az átfordításhoz használt tekercsekre. A négyszögjel amplitudóját úgy állítsuk be, hogy a tekercsek tere meghaladja az átfordításhoz szükséges tér nagyságát. A mágneses momentumok ismételt átfordításával kiküszöbölhetjük a zavaró offset feszültséget, így egészen kis mágneses tereket is ki tudunk mérni. Mérjük meg a két szenzor kimenő jelét a mérőpanel különböző szögbeállásai mellett, és ábrázoljuk az adatokat a szög függvényében! Mennyire pontosan tudjuk meghatározni a mérési adatokból a mérőpanel irányát? Ellenőrizzük méréseink helyességét egy hagyományos iránytű segítségével!

4. Óriás mágneses ellenállás mérése

A méréshez Co-Cu rétegszerkezetet használunk, melyben 3.6nm vastag kobalt és 3nm vastag réz rétegek vannak felváltva egymásra párolgatva összesen 120 rétegpárral. Mérjük meg a minta ellenállásának változását a mágneses tér függvényében. A mintát úgy helyezzük a mágneses teret szolgáltató elektromágnes vasmagjai közé, hogy a mágneses tér a minta síkjával párhuzamos, de a mintában folyó áramra merőleges legyen.