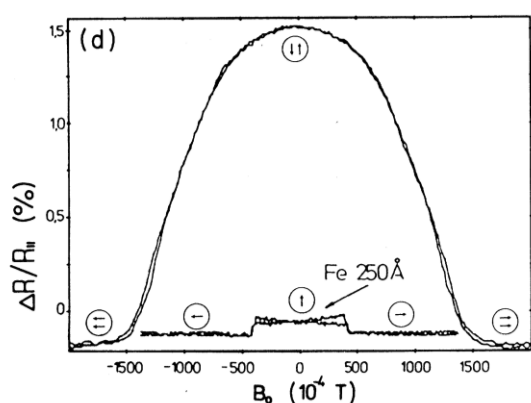
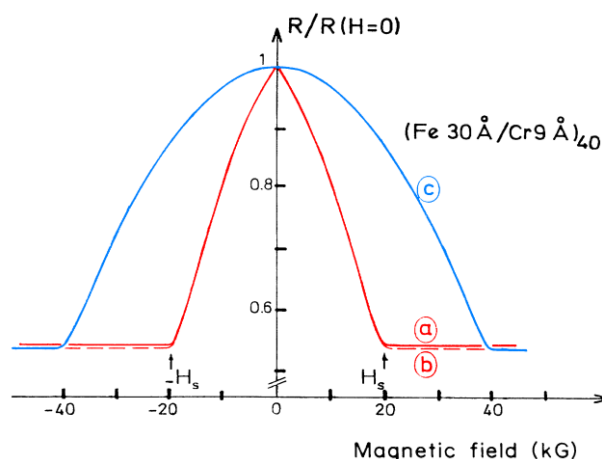


Gigantyczny magnetoopór

Odkrycie zjawiska gigantycznego magnetooporu (GMR) w 1988 roku [1,2] doprowadziło w krótkim czasie do miniaturyzacji czujników pola magnetycznego i znacznego zwiększenia gęstości zapisu informacji na twardych dyskach. Było to jednym z powodów przyznania nagrody Nobla dla kierowników 2 zespołów badawczych: Petera Grünberga z Julich [3] i Alberta Fert z Orsay [4]. Zjawisko GMR polega na zmianie oporu w układzie wielowarstw magnetycznych na skutek zmiany kierunku namagnesowania warstw.



Rys 1. Względna zmiana oporu dla dwóch warstw żelaza, sprzężonych antyferromagnetycznie (w zerowym polu) w zależności od pola magnetycznego. Strzałki w kółkach pokazują zwrot wektorów namagnesowania. W dolnej części rysunku anizotropowy magnetoopór dla żelaza. Z pracy [1].



Rys 2. Względna zmiana oporu w polu magnetycznym dla wielowarstw żelaza i chromu w polu magnetycznym w płaszczyźni warstw (krzywe czerwone) i płaszczyźni (krzywa niebieska). Z pracy [2].

Celem eksperymentu jest zbadanie zależności oporu od pola magnetycznego dla struktur warstwowych NiFe/Au/Co/Au, prześledzenie ewolucji namagnesowania w polu magnetycznym oraz - w zależności od geometrii próbki: oszacowanie koncentracji nośników lub zbadanie wpływu temperatury na ten efekt.

1. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

Ogólne własności ciał stałych, własności metali, w szczególności:

- Podstawowa wiedza z magnetyzmu: moment magnetyczny, namagnesowanie, oddziaływanie materii z polem magnetycznym: ferromagnetyzm, paramagnetyzm, materiały miękkie i twarde magnetycznie, oś łatwa namagnesowania, zależność $M(H)$ wzdłuż osi łatwej, trudnej.
- Budowa i struktura elektronowa metali (funkcja Blocha, pseudopęd, struktura pasmowa, gęstość stanów, zależność gęstości stanów od energii). Metale ferromagnetyczne.
- Transport elektryczny w modelu Drudego (przewodnictwo, ruchliwość, fonony, rozpraszanie nośników ładunku, średnia droga swobodna i czas życia nośnika). Zjawisko Halla.

Metoda pomiarowa:

- metoda czterech sond
- efekt Halla w obecności jednego rodzaju nośników prądu
- wyznaczanie współczynnika Halla i przewodnictwa elektrycznego - sposób eliminacji zjawisk pasożytniczych jak asymetria w próbce czy efekty termoelektryczne

2. Wprowadzenie:

2.1. Podstawowe własności magnetyczne

Materię ze względu na własności magnetyczne dzielimy na:

- a) diamagnetyki
- b) paramagnetyki
- c) ferromagnetyki

Do opisu własności magnetycznych używa się wielkości $\chi = dM/dH$, zwanej podatnością magnetyczną (gdzie M to namagnesowanie - moment magnetyczny μ na jednostkę objętości, a H natężenie pola magnetycznego). W ogólności indukcja pola magnetycznego B zależy od natężenia pola i namagnesowania $B = \mu_0(H+M)$. Gdy zależność $M(H)$ jest liniowa, $\chi = M/H$, otrzymujemy znaną zależność $B = \mu_0(1+\chi) H = \mu_0 \mu_r H$

Ad. a) diamagnetyzm jest najbardziej powszechnym typem oddziaływania na pole magnetyczne, choć słabym i często zanedbywanym. Pole magnetyczne indukuje moment magnetyczny, który powoduje osłabienie tego pola. Podatność magnetyczna jest ujemna i nie zależy od temperatury.

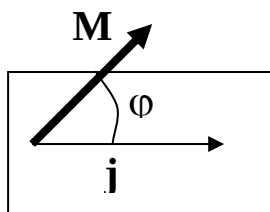
Ad. b) dla paramagnetyka podatność magnetyczna jest dodatnia, ale niewielka. Oznacza to, że momenty magnetyczne obecne wcześniej w materiale ustawiają się zgodnie z natężeniem pola magnetycznego. Podatność zależy od temperatury $\chi \sim 1/T$ (dla dużych temperatur, energia termiczna ($\sim kT$) staje się porównywalna z energią oddziaływania momentu magnetycznego z polem magnetycznym $E = -\mu \cdot B \cos(\phi)$).

Ad. c) Ferromagnetyk to taki materiał, w którym jony magnetyczne poniżej pewnej temperatury (zwanej temperaturą Curie – T_C) porządkują się w tym samym kierunku, dzięki tzw. oddziaływaniu wymiany. Wtedy materiał (co najmniej lokalnie, wewnątrz domeny magnetycznej) ma wypadkowe namagnesowanie $M \neq 0$, oraz wykazuje histerezę magnetyczną. Można pokazać, że dla ferromagnetyka $\chi \sim 1/(T-T_C)$.

2.2. Magnetoopór

Magnetoopór (MR) to względna zmiana oporu wywołana polem magnetycznym: $MR = \Delta R/R_0 = R(H) - R(H=0)/R(H=0)$. W badaniach materii skondensowanej odkryto bardzo wiele zjawisk prowadzących do zmiany oporu. Już nawet w najprostszym przypadku półprzewodników, gdy średni czas życia nośnika będzie zależał od energii, pojawi się (dodatni) magnetoopór. Ale magnetoopór może być świadectwem przewodnictwa wielokanałowego, interferencji kwantowych, oddziaływania spinów nośników z momentami orbitalnymi, lokalizacji nośników czy ich zmiany ich wymiarowości („skwantowania”) silnym polem magnetycznym. Zjawisko to jest wykorzystywane powszechnie do kodowania informacji, stan wysoko/nisko oporowy jest traktowany jako zero/jedynka w zapisie informacji. Magnetoopór może też być podstawą działania czujników pola magnetycznego.

Drugim ważnym pojęciem jest anizotropowy opór – zjawisko zmiany oporu w zależności od kierunku, w jakim jest mierzony. Obserwuje się go w kryształach, w których wyróżniona jest jakaś oś, czy to przez naprężenie, wbudowane pole elektryczne (materiały polarne), czy magnetyczne – na przykład poprzez istnienie wypadkowego namagnesowania. W tym ostatnim przypadku mówimy o anizotropowym magnetooporze. Zjawisko to zobrazowane jest na rys.3., gdzie i oznacza wektor prądu, a α oznacza kąt między wektorem prądu a wektorem namagnesowania M .



$$\rho = \rho_{\perp} + \Delta\rho \cdot \cos^2(\phi),$$

gdzie :

$$\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$$

$\rho_{\parallel}$ - opór właściwy dla prądu płynącego

zgodnie z kierunkiem namagnesowania ($\phi = 0^\circ$)

$\rho_{\perp}$ - opór właściwy ferromagnetyka dla prądu płynącego

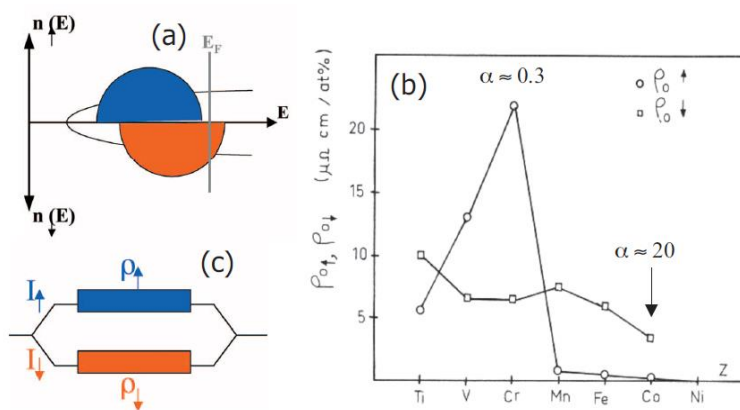
w kierunku prostopadłym do namagnesowania ($\phi = 90^\circ$)

Rys.3. Orientacja wektora namagnesowania względem prądu. Patrz: dolna krzywa na rys.1.

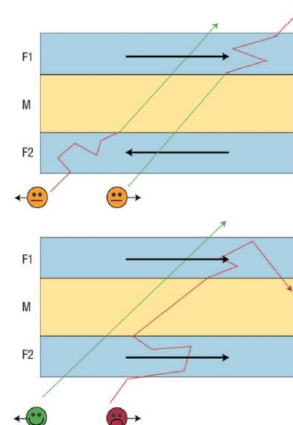
Efekt anizotropowego MR jest zwykle mały, sięga ułamków % w temperaturze pokojowej. Badania metali magnetycznych i postęp w technikach ich otrzymywania w postaci ultra-cienkich warstw doprowadził do odkrycia kolejnego zjawiska magnetoporowego, tzw. gigantycznego magnetooporu, które zostało uhonorowane nagrodą Nobla¹ [3,4].

Najprostsze rozumienie tego zjawiska uwzględnia spinowy stopień swobody elektronów i rozpraszanie od niego zależne. W metalu ferromagnetycznym gęstość stanów na poziomie Fermiego jest różna dla spinów $\uparrow$ i $\downarrow$ (rys. 4 a), co prowadzi do różnego rozpraszania nośników o danym spinie i różnych wartości oporności ρ . Rys.4 b pokazuje proporcje między $\rho_{\uparrow}$ i $\rho_{\downarrow}$ dla różnych metali ferromagnetycznych. Widać, że dysproporcja może być znaczna. Do opisu przewodnictwa elektronowego wprowadza się model dwuprądowy, który sprowadza się do dwóch niezależnych oporników połączonych równolegle (zaniedbane są procesy rozpraszania z odwróceniem spinu) - rys.4c.

Model dwuprądowy rozważamy dla pojedynczej ferromagnetycznej warstwy metalu o jakimś namagnesowaniu $\mathbf{M}$. Część nośników np. o spinie do góry ulega silnemu rozpraszaniu. Jeśli zmieni się zwrot wektora namagnesowania na $-\mathbf{M}$, sytuacja odwraca się i nośniki o spinie do dołu rozpraszają się silniej. Ciekawa sytuacja ma miejsce gdy połączymy ze sobą warstwy o różnych wektorach namagnesowania. Jeśli mają one przeciwne namagnesowania² (rys.5 a) raz jedno raz drugie nośniki będą silnie rozpraszane przechodząc przez układ warstw. W sytuacji, gdy namagnesowania są zgodne, jeden rodzaj nośników przechodzi przez obie warstwy rozpraszając się nieznacznie, czyli układ znajdzie się w stanie niskiego oporu (rys.5 b). Jeśli z zewnątrz mamy możliwość sterowania wzajemnym namagnesowaniem, pojawia się możliwość ustalenia stanu oporu na wysoki lub niski. Względna różnica oporów jest znacznie większa niż dla anizotropowego magnetooporu, sięga kilkudziesięciu procent, dlatego zjawisko nazwano gigantycznym magnetooporem (GMR). Wartość GMR zależy od cosinusa kąta między namagnesowaniem sąsiednich warstw. Stąd mierząc zależność $R(B)$ można pośrednio wyznaczyć ewolucję namagnesowania z zależności od pola.



Rys. 4. a) gęstość stanów w paśmie przewodnictwa dla spinów $\uparrow\downarrow$. Zależność pierwiastkowa pokazuje gęstość stanów pochodzącą od orbitali typu s, kolorowe półkola symbolizują orbitale typu d, rozszczepione na skutek oddziaływania wymiany), b) oporności $\rho_{\uparrow}$ i $\rho_{\downarrow}$ dla różnych metali, c) model dwuprądowy



Rys. 5. Schemat mechanizmu prowadzącego do GMR. Tu pokazano konfigurację COP (current out of plane), ale zjawisko też zachodzi gdy przepływ prądu odbywa się wzdłuż warstw

Rysunki pochodzą z wykładu noblowskiego A. Fert'a [4]

¹ Nagroda ma polski wątek, kluczową rolę w opracowaniu teorii i zrozumieniu zjawiska ma teoretyk prof. Józef Barnaś z UAM. Został wspomniany np. tu:

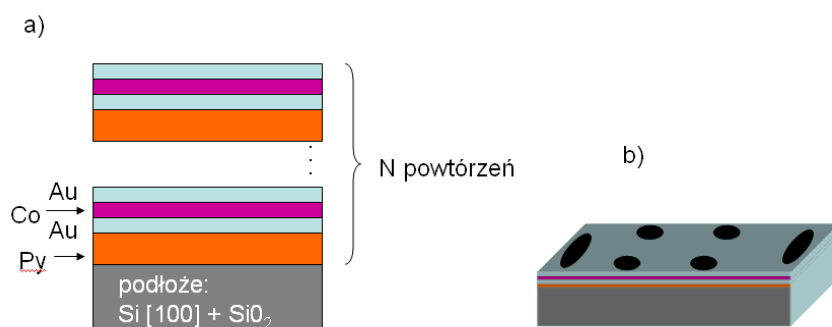
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/grunberg/biographical/>

² Zmieniając grubość warstwy niemagnetycznej można zmieniać znak oddziaływania między warstwami magnetycznymi.

3. Badane próbki

Są to wielokrotne, bardzo cienkie warstwy metali magnetycznych kobaltu (Co) i permaloju (80%Fe+20%Ni, oznaczanego Py), oddzielonych złotymi przekładkami. Próbkę została wytworzona w grupie prof. dr hab. Feliksa Stobieckiego w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN (Poznań). W otoczeniu cienkiej warstwy złota kobalt ma namagnesowanie prostopadłe do warstwy, permaloj zaś ma namagnesowanie w płaszczyźnie warstwy.

Mamy wiele próbek o strukturze: (Py-2nm/Au-2nm/Co-0.8nm/Au-2nm)_N, gdzie N=1...15. Na próbce przygotowano od góry kontakty elektryczne, które wykonano z indu (patrz rys.4).



Rys.6. a) schemat próbki z IFM PAN; b) rozmieszczenie kontaktów na próbce

4. Przebieg ćwiczenia

1) Zapoznanie się z układem pomiarowym.

- Elektromagnes. Natężenie pola magnetycznego H jest proporcjonalne do prądu płynącego przez elektromagnes (I_B). Prąd I_B mierzymy poprzez pomiar spadku napięcia na oporniku wzorcowym włączonym w obwód. Indukcję pola magnetycznego B mierzymy teslomierzem. Ponieważ mierzone $B = \mu_0(H+M)$, gdzie μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$, wkład do indukcji pola może pochodzić również od namagnesowania nabiegunków elektromagnesu.
- Woltomierz wielokanałowy Keithley 2000. Woltomierz został wyposażony w tzw. kartę skanera, która pozwala na pomiar 10 napięć. Ponieważ oprogramowanie identyfikuje napięcie na konkretnym kanale z daną wielkością, należy zapoznać się przyporządkowaniu kanałów do napięć.
- Zasilacz. Opanowanie używania zasilacza w trybie stabilizacji napięcia albo prądu.

2) Pomiary własności próbek GMR.

- pomiar oporu kabla – trening w metodzie 4 sond
- pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej w temperaturze pokojowej → wyznaczenie oporu próbki (jeśli zależność napięcia od natężenia jest liniowa) **Maksymalny prąd = 10mA**.
- magnetoopor: zbadanie zależności oporu próbki od pola magnetycznego w temperaturze pokojowej
- opcja I. Zbadanie ewolucji napięć poprzecznych – w przypadku próbki, w której płaszczyzna jest zorientowana prostopadłe do pola magnetycznego
lub
opcja II. Zbadanie oporu oraz ewolucji magnetooporu w temperaturze ciekłego azotu – dla obu konfiguracji próbek

5. Wymagana analiza danych.

Na podstawie charakterystyk prądowo-napięciowych należy wyznaczyć opór dla obu par kontaktów. Znając grubość warstwy przewodzącej należy oszacować wartość oporu właściwego i skomentować. Należy wyznaczyć wartość magnetooporu. Na podstawie zależności $R(B)$ ustalić ewolucję wektora namagnesowania i narysować zależność $M(B)$ – dla prostoty zakładając że zmienia się tylko namagnesowanie jednej z warstw. Dla opcji I, oszacować koncentrację nośników korzystając z przepisu w skrypcie do T3. Dla opcji II należy przeprowadzić analizę taką jak dla temperatury pokojowej, porównać wyniki i skomentować.

6. Wymagania dotyczące opisu.

Opis ma mieć formę publikacji naukowej; należy pamiętać o numeracji wzorów i rysunków. Przy korzystaniu z materiałów (teksty, rysunki, programy) pochodzących od innych autorów należy w tekście umieścić odnośnik, a na końcu podać spis cytowanych źródeł (autor, tytuł, adres strony itp.). Opis powinien składać się z następujących części:

1. Streszczenia w języku polskim oraz w języku angielskim
2. Wstępu teoretycznego (krótko, najważniejsze informacje o GMR)
3. Opisu metody pomiarowej, układu pomiarowego i próbki
4. Wyników i ich analizy
5. Podsumowania zawierającego wnioski

7. Literatura

GMR:

1. Binash, G., **P. Grünberg**, F. Saurenbach, and W. Zinn, 1989, Phys. Rev. B **39**, 4828
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.4828>
2. Baibich, M. N., J. M. Broto, **A. Fert**, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, 1988, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>
3. Wykład noblowski P. Grünberga (video)
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/grunberg/lecture/>
Rev. Mod. Phys. **80**, 1531 (2008) <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1531>
lub po polsku: Postępy Fizyki **60**, 55 (2009) <https://pf.ptf.net.pl/PF-2009-2/55.html>
4. Wykład noblowski A. Fert (video): <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/fert/lecture/>
Rev. Mod. Phys. **80**, 1517 <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1517>
lub po polsku: Postępy Fizyki **59**, 249 (2008) <https://pf.ptf.net.pl/PF-2008-6/249.html>
5. <http://www.research.ibm.com/research/gmr.html> + animacje

Ciało Stałe:

6. T. Stacewicz, A. Witowski, J. Ginter, Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego, Wydawnictwa UW, 2002
7. R. A. Smith, Półprzewodniki, PWN, ~1970
8. H. Ibach, H. Lüth, Fizyka ciała stałego, rozdziały VI, VII i XII, PWN, 1996
9. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, ~2000
10. P. S. Kirijew, Fizyka półprzewodników, PWN. ~1970
11. Z. Kleszczewski, Fizyka kwantowa, atomowa i ciała stałego, Wydawnictwo PŚ, 1997

Magnetyzm:

12. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, ~2000, str. 451-526
13. A. Twardowski, Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego, Wydawnictwa UW, 2002, roz.4.8

Literatura angielskojęzyczna:

14. J. Singleton, Band Theory And Electronic Properties Of Solids, Oxford University Press
15. S. Blundell, Magnetism in Condensed Matter, Oxford University Press

Publikacje naukowe dotyczące badanych próbek:

17. M. Urbaniak i in., "Magnetic and magnetoresistive properties of NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy of Co layers", Journal of Applied Physics 101, 013905 (2007); doi: 10.1063/1.2403972
18. F. Stobiecki i in., "Magnetic field induced transition from weak to strong ferromagnetic coupling in Ni Fe/Au/Co/ Au multilayers", Applied Physics Letters 92, 012511 (2008); doi: 10.1063/1.2831714

Technika pomiarowa (low resistance measurements)

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Four-terminal_sensing
2. http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/linki-low_level_handbook_nn551.pdf → rozdział 3.3