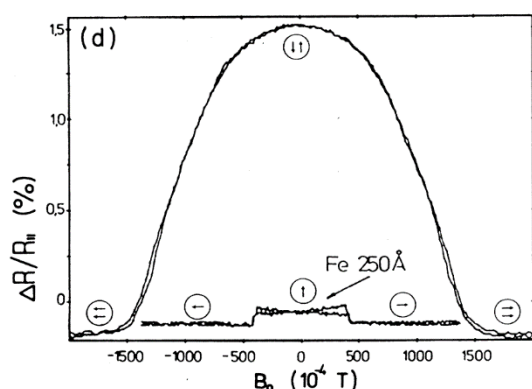
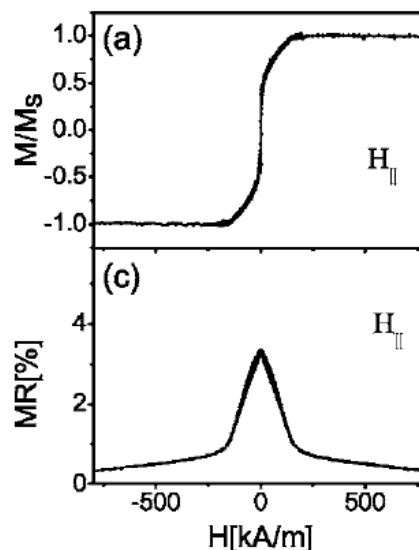


Gigantyczny magnetoopór

Odkrycie zjawiska gigantycznego magnetooporu (GMR) w 1989 roku [11,12] doprowadziło w krótkim czasie do miniaturyzacji czujników pola magnetycznego i znacznego zwiększenia gęstości zapisu informacji na twardych dyskach. Było to jednym z powodów przyznania w 2007 nagrody Nobla dla kierowników 2 zespołów badawczych: Petera Grünberga z Julich [7] i Alberta Fert z Orsay [8]. Kluczową rolę w opracowaniu teorii i zrozumieniu zjawiska miał polski teoretyk prof. Józef Barnas z UAM*.



Rys 1. Względna zmiana oporu w zależności od pola magnetycznego dla warstw Fe/Cr/Fe oraz dla samego Fe. Za [11].



Rys 2. Ewolucja namagnesowania oraz względna zmiana oporu w zależności od pola magnetycznego dla warstw NiFe/Au/Co/Au. Za [13].

Zjawisko GMR polega na zmianie oporu w układzie warstw ferromagnetycznych na skutek zmiany kierunków namagnesowania warstw. Ewolucja namagnesowania ma swoje odzwierciedlenie w oporze elektrycznym takiego układu warstw. Celem eksperymentu jest zbadanie zależności oporu od pola magnetycznego dla struktur $(\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au})_N$, gdzie namagnesowania NiFe i Co dla $B=0$ są wzajemnie prostopadłe (w płaszczyźnie warstwy i prostopadłe do warstwy, odpowiednio). Przyłożenie silnego pola magnetycznego w tych dwóch konfiguracjach $B_{\parallel}$ lub $B_{\perp}$ wymusi obrót wektora namagnesowania, raz w jednej, raz w drugiej warstwie, co przełoży się na zmianę oporu. Zakres ćwiczenia obejmuje pomiar dla pola w płaszczyźnie próbki oraz prostopadłego do płaszczyzny w temperaturze pokojowej oraz dla jednej konfiguracji w temperaturze ciekłego azotu. Dla kierunku fizyka indywidualna: analiza napięcia Halla.

1. Wprowadzenie:

1.1. Podstawowe własności magnetyczne

Materia może wykazywać różną odpowiedź na przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego. Najbardziej podstawową odpowiedzią, ponieważ związaną tylko z istnieniem elektronów i ich funkcji falowych jest (a) diamagnetyzm. Charakteryzuje się on wyidukowaniem słabego i często zaniedbywalnego momentu magnetycznego skierowanego przeciwnie niż pole magnetyczne. Bez zewnętrznego pola magnetycznego, diamagnetyk nie wykazuje momentu magnetycznego. Ponadto,

* wspomniany np. tu: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/grunberg/biographical/>

niektóre materiały, zwłaszcza metale bloku d i f z niesparowanymi elektronami wykazują odpowiedź (b) paramagnetyczną. Oznacza to, że pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, momenty magnetyczne (obecne w materiale również bez pola, ale w nieuporządkowany sposób) orientują się zgodnie z kierunkiem pola wytwarzając istotny, wypadkowy moment magnetyczny. Wreszcie, o (c) ferromagnetyzmie mówimy gdy momenty magnetyczne pozostają uporządkowane i zorientowane w pewnym kierunku nawet bez pola magnetycznego. Jest to związane z oddziaływaniem wymiennym (wypadkową odpychania Coulombowskiego i zakazu Pauliego).

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 $B = \mu_0(1+\chi) H = \mu_0 \mu_r H$. Rozróżnijmy jeszcze raz zachowania magnetyczne, tym razem korzystając z pojęcia podatności:

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

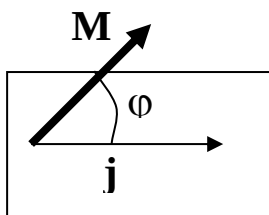
Ad. (b) dla paramagnetyka podatność magnetyczna jest dodatnia, ale niewielka. Oznacza to, że momenty magnetyczne obecne wcześniej w materiale ustawiają się zgodnie z natężeniem pola magnetycznego. Podatność zależy od temperatury $\chi \sim 1/T$ (dla dużych temperatur, energia termiczna ($\sim kT$) staje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

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 $\chi \sim 1/(T-T_C)$.

1.2. 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 $\mathbf{i}$ oznacza wektor prądu, a α oznacza kąt między wektorem prądu a wektorem namagnesowania $\mathbf{M}$.



Rys.3. Orientacja wektora namagnesowania względem wektora gęstości prądu.

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

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

$\rho_{\parallel}$ - opór właściwy dla prądu płynącego zgodnie z kierunkiem namagnesowania ($\varphi = 0^\circ$)

$\rho_{\perp}$ - opór właściwy ferromagnetyka dla prądu płynącego w kierunku prostopadłym do namagnesowania ($\varphi = 90^\circ$)

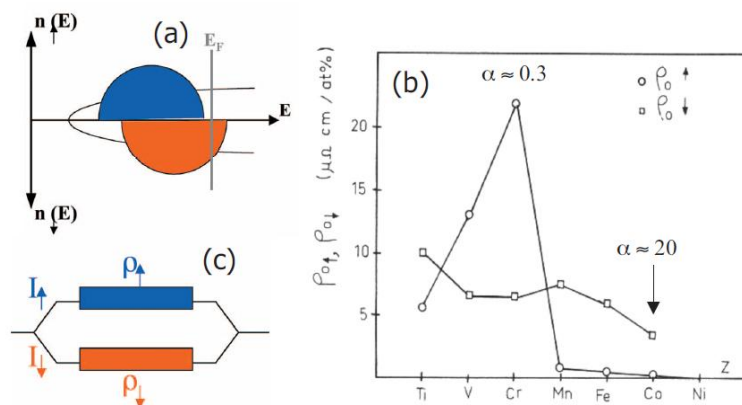
Efekt anizotropowego MR jest zwykle mały, sięga ułameków % w temperaturze pokojowej. Pokazano to na rys.1, gdzie obok danych dla warstw Fe i Cr, widać wynik dla warstwy żelaza.

Badania metali magnetycznych i postęp w technikach ich otrzymywania w postaci ultra-cienkich warstw doprowadził do odkrycia kolejnego zjawiska magnetoporowego, tzw. gigantycznego magnetooporu. 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 $\rho_{\uparrow}$ i $\rho_{\downarrow}$. 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.

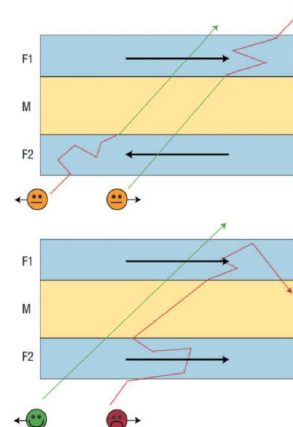
Ciekawa sytuacja ma miejsce gdy połączymy ze sobą warstwy o różnych wektorach namagnesowania. Jeśli mają one przeciwne namagnesowania[†] (rys.5 a) raz jedno raz drugie nośniki będą silnie rozpraszane przechodząc przez układ warstw. W sytuacji, gdy namagnesowania są zgodne, jeden rodzaj nośników przechodzi przez obie warstwy rozpraszając się nieznacznie, czyli układ znajdzie się w stanie niskiego oporu (rys.5 b). Jeśli mamy możliwość sterowania wzajemnym namagnesowaniem warstw, pojawia się możliwość ustalenia stanu oporu na wysoki lub niski. Względna różnica oporów jest znacznie większa niż dla anizotropowego magnetooporu, sięga nawet kilkudziesięciu procent, dlatego zjawisko nazwano gigantycznym magnetooporem (GMR).

Wartość GMR zależy od cosinusa kąta między namagnesowaniem sąsiednich warstw [13]. Stąd mierząc zależność $R(B)$ można pośrednio wyznaczyć ewolucję namagnesowania z zależności od pola.

[†] Zmieniając grubość warstwy niemagnetycznej można zmieniać znak oddziaływania między warstwami magnetycznymi.



Rys. 4. a) gęstość stanów w paśmie 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. z wykładu noblowskiego A. Fert'a [4]



Rys. 5. Uproszczony obrazek GMR. Pokazano konfigurację COP (current out of plane), ale zjawisko też zachodzi gdy przepływ prądu odbywa się wzdłuż warstw. Rys. z wykładu noblowskiego A. Fert'a [4]

2. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

2A. właściwości fizyczne metali: kwantowo-mechaniczny opis elektronu w potencjale periodycznym, zależność energii od wektora falowego, gęstość stanów, prawdopodobieństwo obsadzenia stanu, energia Fermiego. Przewodnictwo w metalach, mechanizmy rozpraszania i ich zależność od temperatury, zależność oporności od temperatury, podstawowe wielkości materiałowe: ruchliwość, koncentracja. Metale ferromagnetyczne – gęstość stanów zależna od spinu.

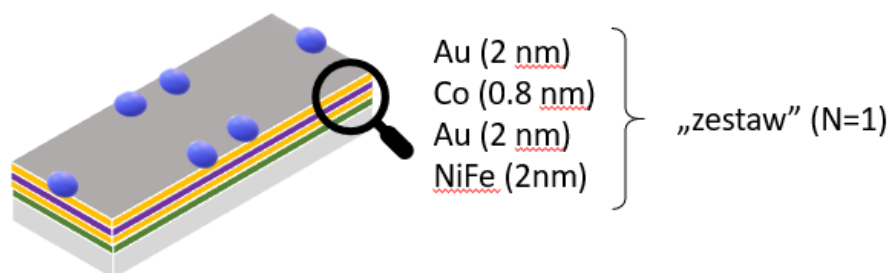
2B. podstawowa wiedza z magnetyzmu: moment magnetyczny, namagnesowanie, oddziaływanie materii z polem magnetycznym: ferromagnetyzm, paramagnetyzm, materiały miękkie i twarde magnetycznie.

2C. pomiary rezystancji próbek niskooporowych, efekt Halla w obecności jednego rodzaju nośników prądu (np. na podstawie instrukcji do T3)

3. Badane próbki

Są to wielowarstwy metaliczne $(\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au})_N$ gdzie N jest licznym powtórzeń, osadzone na nieprzewodzącym podłożu krzemowym. Próbki zostały wytworzone 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: $(\text{Py-2nm}/\text{Au-2nm}/\text{Co-0.8nm}/\text{Au-2nm})_N$, gdzie $N=1\ldots 15$. Na próbce przygotowano od góry kontakty elektryczne, z indu (9N), wygrzewanego przez 2' w $T=190^\circ\text{C}$. Zapewnia to dyfuzję indu w głąb warstw.



Rys.6. Schemat próbki z IFM PAN, niebieskie kulki oznaczają kontakty indowe.

4. Przebieg ćwiczenia

- 1) Zapoznanie się z układem pomiarowym.
 - a) Woltomierz wielokanałowy Keithley 2000. Woltomierz został wyposażony w tzw. kartę skanera, która pozwala na pomiar 10 napięć. Należy wybrać odpowiedni input: FRONT/REAR i potem odczytać napięcie na danym kanale przyciskiem: OPEN/CLOSE
 - b) Zasilacz. Opanowanie używania zasilacza w trybie stabilizacji napięcia albo prądu
- 2) Kalibracja elektromagnesu → wyznaczenie zależności między prądem płynącym przez cewki I_B , a polem magnetycznym (indukcją) B , mierzonym przez teslomierz. Natężenie pola magnetycznego H jest proporcjonalne do prądu płynącego przez elektromagnes. Prąd mierzymy poprzez pomiar spadku napięcia na oporniku wzorcowym szeregowo włączonym w obwód cewek. Indukcję pola magnetycznego B mierzymy teslomierzem. Ponieważ mierzone $B = \mu_0(H+M)^\dagger$, wkład do indukcji pola może pochodzić również od namagnesowania nabiegunków elektromagnesu (remanencja). Należy określić jak silny jest ten efekt.
Maksymalny prąd elektromagnesu $I_{Bmax} = 10 \text{ A}$.
- 3) Pomiary własności próbek GMR.
 - a) Sprawdzenie oporu próbek dwusondowo (kontakty 7-8, 1-2, 4-5, 2-5, 1-4)
 - b) Pomiar oporu kabla – trening w metodzie 4 sond
 - c) pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej próbek w temperaturze pokojowej.
Maksymalny prąd przez próbkę = 10mA. → wyznaczenie oporu próbki, oszacowanie oporności
 - d) zbadanie zależności oporu próbki od pola magnetycznego w temperaturze pokojowej dla próbki A → wyznaczenie magnetooporu, wyznaczenie ewolucji wektorów namagnesowania
 - e) zbadanie zależności oporu próbki od pola magnetycznego w temperaturze pokojowej dla próbki B → wyznaczenie magnetooporu (+ dla IND: analiza napięcia Halla), wyznaczenie ewolucji wektorów namagnesowania
 - f) zbadanie zależności oporu próbki od pola magnetycznego w 77 K dla próbki A albo B (dla IND: próbka B z analizą napięcia Halla)

5. Przygotowanie opisu

Opis powinien składać się z następujących części:

1. Streszczenie po polsku ORAZ abstract (in English)
2. Wstęp teoretyczny. Proszę się kierować wynikami i tak zbudować wstęp, aby dawał wprowadzenie do wyników, bez lania wody.
3. Opis metody pomiarowej, układu pomiarowego i próbki. To jest dobre miejsce na pokazanie i omówienie wyników kalibracji elektromagnesu, skomentowanie remanencji.
4. Wyniki i analiza danych – ważne jest klarowne przedstawienie i opisanie danych. Nie mniej ważne jest komentowanie uzyskanych wyników (tak, asystent widzi, tym niemniej).

[†] μ_0 – przenikalność magnetyczna, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$

5. Podsumowanie.

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.). Więcej informacji u asystenta lub np. na stronie pracowni wstępnej: http://pracownie1.fuw.edu.pl/pw/pliki/przyk%C5%82adowy_raport_brzeszczot_PW.pdf

6. Propozycja literatury:

Właściwości fizyczne metali

- [1]. B. N. Buszmanow, J. A. Chromow, „Fizyka ciała stałego”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1975, rozdział 3 i 4.
- [2]. Jerzy Ginter „Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego”, dla wyd.II popr, od str. 239
- [3]. John Singleton „Band Theory and Electronic Properties of Solids”, Oxford University Press, 2001
- [4]. Donald A. Neamen „Semiconductor Physics and Devices. Basic Principles”, McGrawHill, 2011

Magnetyzm:

- [5]. A. Twardowski, Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego, Wydawnictwa UW, 2002, rozdział 4.8
- [6]. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, ~2000, str. 451-526

GMR

- [7]. Wykład noblowski Petera Grünberga:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/grunberg/lecture/>
Rev. Mod. Phys. 80, 1531 (2008), DOI:10.1103/RevModPhys.80.1531
lub po polsku: Postępy Fizyki 60, 55 (2009) <https://pf.ptf.net.pl/PF-2009-2/55.html>
- [8]. Wykład noblowski Alberta Ferta:
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/fert/lecture/>,
Rev. Mod. Phys. 80, 1517 (2008), DOI: 10.1103/RevModPhys.80.1517,
lub po polsku: Postępy Fizyki 59, 249 (2008) <https://pf.ptf.net.pl/PF-2008-6/249.html>

Pomiary rezystancji próbek niskooporowych

- [9]. Low Level Measurement Handbook, sec.3.3, http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/linki-low_level_handbook_nn551.pdf
- [10]. A. Oleś “Metody doświadczalne fizyki ciała stałego” – rozdział 6.2.1-3, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 1998

Dla odważnych:

- [11]. Binash, G., P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, 1989, Phys. Rev. B 39, 4828 (1989)
DOI: 10.1103/PhysRevB.39.4828
- [12]. 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
DOI: 10.1103/PhysRevLett.61.2472
- [13]. M. Urbaniak, F. Stobiecki, and B. Szymański, A. Ehresmann, A. Maziewski and M. Tekielak, J. Appl. Phys. 101, 013905 (2007), DOI: [10.1063/1.2403972](https://doi.org/10.1063/1.2403972)