## Jakub Kir

Zjawisko gigantycznego magnetooporu

## i jego zastosowania

http://jkir.sdfeu.org

# Spis treści

Rozdzia	ał 1. Zjawisko magnetooporu	2
1.1.	Co nazywamy magnetooporem	2
1.2.	Magnetoopór: najprostsze wyjaśnienie zjawiska	2
1.3.	Różne rodzaje efektu magnetorezystancyjnego	3
Rozdzia	ał 2. Gigantyczny magnetoopór (GMR)	4
2.1.	Odkrycie zjawiska GMR	4
2.2.	Materiały wykazujące efekt GMR	6
2.3.	Jakościowe wyjaśnienie zjawiska GMR	6
2.4.	Geometrie CIP i CPP	7
2.5.	Zależność wielkości efektu od różnych czynników	8
Rozdzia	ał 3. Modele zjawiska GMR	10
3.1.	Rozważania jakościowe	10
3.2.	Model kwaziklasyczny	11
Rozdzia	ał 4. Zastosowania zjawiska GMR	14
4.1.	Głowice czytające w magnetycznych dyskach twardych	15
4.2.	Magnetyczne pamięci RAM	18
4.3.	Czujniki pola magnetycznego	20
4.4.	Inne zastosowania	20
Nagroda Nobla z fizyki 2007		23
Bibliografia		25
Spis rysunków		27

#### Rozdział 1

# Zjawisko magnetooporu

#### 1.1. Co nazywamy magnetooporem

Magnetoopór, zwany także zjawiskiem Gaussa, to zjawisko, w którym opór elektryczny (rezystancja) materiału zmienia się pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Efekt został odkryty w roku 1856 przez Lorda Kelvina. Uczony wykonał eksperymenty z żelazem: zauważył, że opór elektryczny kawałka żelaza zmienia się, gdy przyłożymy pole magnetyczne. Wykonał także eksperyment z próbką niklu i efekt był silniejszy [1].

### 1.2. Magnetoopór: najprostsze wyjaśnienie zjawiska

Przedstawię najprostsze jakościowe wyjaśnienie tego, dlaczego opór materiału zmienia się, gdy umieścimy materiał w polu magnetycznym. Zjawisko takie może zachodzić w materiałach przewodzących prąd niezależnie od ich właściwości magnetycznych i nazywa się zwyczajnym magnetooporem. Oporem elektrycznym R danej próbki materiału nazywamy iloraz napięcia U przyłożonego do próbki i prądu I, jaki przez próbkę pod wpływem tego napięcia przepływa:

$$R = \frac{U}{I}.$$
 (1.1)

Prąd elektryczny płynący przez próbkę od punktu A do punktu B składa się z dryfujących ładunków. Kiedy na próbkę podamy pole magnetyczne o indukcji  $\vec{B}$ , na każdy ładunek q działa siła Lorentza:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}.\tag{1.2}$$

Siła Lorentza nie zmienia wartości prędkości ładunku (nie wykonuje pracy), zakrzywia jednak tor ładunku. Ładunki poruszające się pomiędzy dwoma punktami A i B w polu magnetycznym poruszają się zatem po dłuższej drodze. Przy tej samej szybkości poruszania się ładunków, czas pokonywania drogi pomiędzy dwoma punktami jest dłuższy, zatem natężenie rejestrowanego prądu będzie maleć. Gdy we wzorze 1.1 natężenie prądu I maleje, opór elektryczny R rośnie. Jest to najprostsze wyjaśnienie zjawiska magnetooporu.

### 1.3. Różne rodzaje efektu magnetorezystancyjnego

Wśród różnego rodzaju efektów magnetorezystancyjnych, wyróżnia się:

- zwyczajny magnetoopór (OMR): zmiana oporu przewodnika pod wpływem pola magnetycznego, której mechanizm wyjaśniłem w (1.2).
- anizotropowy magnetoopór (AMR): własność ferromagnetycznych metali przejściowych. Opór elektryczny materiału zależy od kierunku prądu elektrycznego względem namagnesowania *M*. Jeżeli prąd płynie prostopadle do namagnesowania, to opór jest mniejszy niż w przypadku, gdy prąd płynie wzdłuż kierunku namagnesowania. Wielkość efektu może sięgać kilku procent w niektórych stopach [2]. Eksperymenty Lorda Kelwina, w których odkrył zjawisko magnetooporu (1.1), były przykładem zjawiska anizotropowego magnetooporu.
- gigantyczny magnetoopór (GMR): efekt magnetorezystancyjny obserwowany w cienkich warstwach pod wpływem zmiany konfiguracji magnetyzacji warstw. Temu zjawisku poświęcona jest ta praca.
- nadzwyczajny magnetoopór (EMR) to efekt magnetorezystancyjny odkryty w roku 2000. Pod wpływem pola magnetycznego zachodzi zmiana rodzaju przewodnictwa w półprzewodniku i znaczący wzrost oporu [3].
- tunelowy magnetoopór (TMR): efekt magnetorezystancyjny zachodzący w układzie warstw ferromagnetyka rozdzielonych izolatorem. Klasycznie, elektrony nie powinny przepływać przez izolator, jednak mechanika kwantowa dopuszcza zjawisko tunelowania i przez warstwę izolatora elektrony mogą przetunelować. Efekt został odkryty w roku 1975 i początkowo nie poświęcono mu zbyt wielkiej uwagi. W zależności od konfiguracji magnetycznej warstw, różne jest prawdopodobieństwo przetunelowania elektronów przez barierę izolatora, i zmienia się rezystancja. Obecnie stosowane głowice odczytujące w dyskach twardych wykorzystują zjawisko tunelowego magnetooporu [4].
- kolosalny magnetoopór (CMR): występuje w tlenkach o strukturze perowskitu, przede wszystkim w manganitach. Jest to efekt tysiące razy silniejszy, niż gigantyczny magnetoopór. Efekt ten wciąż nie jest do końca wyjaśniony. Trwają prace nad jego zastosowaniem w praktyce [5].

#### Rozdział 2

# Gigantyczny magnetoopór (GMR)

Gigantyczny magnetoopór (z angielskiego: giant magnetoresistance, GMR) to efekt magnetorezystancyjny obserwowany w cienkich warstwach złożonych z warstw ferromagnetycznych rozdzielonych warstwami niemagnetycznymi przewodzącymi prąd elektryczny. Zjawisko gigantycznego magnetooporu nazywam dalej zjawiskiem GMR lub efektem GMR.

Efekt jest obserwowany jako znaczący wzrost oporu warstw, gdy z równoległej konfiguracji ich magnetyzacji (przy tym samym zwrocie magnetyzacji) przejdą do konfiguracji antyrównoległej (przy przeciwnych zwrotach magnetyzacji). Takie przejście można osiągnąć przez modyfikację przyłożonego do warstw zewnętrznego pola magnetycznego.

Wielkość efektu jest zazwyczaj opisywana przez czynnik

$$\delta_H = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}},\tag{2.1}$$

gdzie  $R_{\uparrow\downarrow}$  oznacza opór materiału w konfiguracji antyrównoległej (przy braku zewnętrznego pola magnetycznego) natomiast  $R_{\uparrow\uparrow}$  oznacza opór w konfiguracji równoległej (przy włączonym polu magnetycznym). Termin "gigantyczny magnetoopór" wskazuje, że zmiana oporu  $\delta_H$  dla układów wielu warstw znacznie przekracza zmianę oporu w przypadku anizotropowej magnetyrezystancji, której typowa wartość wynosi kilka procent.

#### 2.1. Odkrycie zjawiska GMR

Efekt gigantycznego magnetooporu został odkryty w 1988 roku niezależnie przez grupy badawcze Alberta Ferta z Uniwersytetu Paris-Sud (Francja) i Petera Grünberga z Centrum Badań w Jülich (Niemcy).

Obydwaj uczeni badali ultracienkie warstwy magnetycznych metali przejściowych (np. żelaza) rozdzielone ultracienkimi warstwami niemagnetyczymi (np. chromu). Badania takich warstw były możliwe, ponieważ opracowano metody wytwarzania

ultracienkich warstw metali. Warstwy takie otrzymuje się metodami naparowania z wiązek molekularnych (MBE), albo metodami rozpylania katodowego [2]. Uczeni koncentrowali się głównie na poprawie jakości strukturalnej takich układów. Celem było też poszukiwanie materiałów o nowych i nieznanych właściwościach. W roku 1986 Grünberg badał strukturę Fe/Cr/Fe przy użyciu fal spinowych. Wykazał, że przy grubościach warstw chromu rzędu kilku płaszczyzn atomowych warstwy żelaza są sprzężone antyferromagnetycznie i w zerowym polu magnetycznym ich wektory magnetyzacji są skierowane w przeciwne strony.



Rysunek 2.1. Ultracienkie warstwy Fe/Cr/Fe, w których odkryto zjawisko GMR. Oddziaływanie antyferromagnetyczne sprawia, że w zerowym polu magnetycznym wektory magnetyzacji są skierowane w przeciwne strony. [6]

Oddziaływanie można zapisać przez hamiltonian typu Heisenberga,  $H = J\vec{M_1} \cdot \vec{M_2}/(M_1M_2)$  [2]. Parametr oddziaływania został wyznaczony później. Oddziaływanie antyferromagnetyczne w eksperymentach było źródłem antyrównoległej orientacji magnetyzacji, jednak samo w sobie nie ma decydującego wpływu na istnienie i wielkość efektu GMR. W przypadku dwóch warstw ferromagnetycznych rozdzielonych przewodnikiem, oddziaływanie antyferromagnetyczne powoduje, że w zerowym zewnętrznym polu magnetycznym wektory magnetyzacji zwrócone są w przeciwne strony. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego ustawia obie magnetyzacje wzdłuż kierunku pola. Odkrywcy efektu wykazali, że przy przejściu od konfiguracji antyrównoległej do konfiguracji równoległej opór układu maleje. Dzieje się tak zarówno, gdy prąd płynie w płaszczyźnie warstw, jak i gdy płynie prostopadle do nich.

Zespół Grungerga badał dwie warstwy żelaza rozdzielone jedną warstwą chromu (Fe/Cr/Fe), natomiast zespół Ferta badał większą liczbę warstw żelaza rozdzielonych chromem, dokładnie (Fe/CR)<sub>40</sub>. W polu nasycenia (czyli polu, przy którym ustala się konfiguracja równoległa i ustala się wartość oporu elektrycznego) rzędu 0.1 T Grünberg zaobserwował spadek oporu 2-3%, natomiast Fert w polu nasycenia o indukcji kilku tesli zaobserwował spadek oporu 50%.

Fizyczny mechanizm powodujący efekt GMR został wyjaśniony później. Odkrywcy zasugerowali, że efekt ma związek z rozpraszaniem elektronów. Kwantowy model zjawiska został stworzony przez Camleya i Barnasia. Obydwaj byli teoretykami, współpracującymi od wielu lat z Grünbergiem w zakresie fal spinowych [7] (prof. dr hab. Józef Barnaś - polski fizyk teoretyk pracujący na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu).

### 2.2. Materiały wykazujące efekt GMR

Wiele kombinacji materiałów ferromagnetyk-przewodnik wykazuje efekt GMR, najczęściej wymieniane [8] to:

— FeCr

— Co<sub>10</sub>Cu<sub>90</sub>:  $\delta_H = 40\%$  w temperaturze pokojowej

— [110]Co<sub>95</sub>Fe<sub>5</sub>/Cu:  $\delta_H = 110\%$  w temperaturze pokojowej

### 2.3. Jakościowe wyjaśnienie zjawiska GMR

Fizycznym źródłem zjawiska GMR jest zależne od spinu i magnetyzacji warstw rozpraszanie elektronów przewodnictwa. Dzięki silnemu polu wymiennemu spin elektronu jest skwantowany, a procesy rozproszenia ze zmianą spinu są rzadkie. Spin względem wektora lokalnej magnetyzacji może przyjmować tylko orientację równoległą (zgodną z magnetyzacją) lub antyrównoległą (przeciwną do magnetyzacji). Istnieją dwa niezależne spinowe kanały przewodnictwa elektrycznego. W orientacji równoległej magnetyzacji warstw, elektrony o jednej orientacji spinu mają dużą ruchliwość w całej strukturze, natomiast elektrony o przeciwnej orientacji spinu mają małą ruchliwość. Po przejściu do orientacji antyrównoległej, każda z orientacji spinu elektronów w jednej strukturze rozprasza się silniej i ma mniejszą ruchliwość. To elektrony o dużej ruchliwości wyznaczają przewodność układui w konfiguracji równoległej warstw opór jest mniejszy, zaś w konfiguracji antyrównoległej wcale nie ma elektronów o dużej ruchliwości w całej strukturze i opór jest większy.



Rysunek 2.2. Rysunek przedstawiający mechanizm powstawania efektu GMR. Przyczyną jest zależne od spinu rozpraszanie elektronów. [2]

### 2.4. Geometrie CIP i CPP

Przez ultracienkie warstwy prąd może płynąć na dwa sposoby: w płaszczyźnie warstw, czyli w geometrii CIP (current in plane) oraz prostopadle do warstw, czyli w geometrii CPP (current perpendicular to plane). W przypadku przepływu prądu w płaszczyźnie warstwy charakterystycznym parametrem jest droga swobodna elektronu, natomiast w przypadku przepływu prądu prostopadle do warstw jest nim droga dyfuzji spinu [2, 8].

W geometrii CPP efekt jest większy, niż w geometrii CIP, jednak ze względu na to, że geometrię CIP znacznie łatwiej technologicznie wytworzyć, w praktycznych aplikacjach stosuje się geometrię CIP [8].



Rysunek 2.3. Dwa kierunki przepływu prądu przez ultracienkie warstwy. Jako v oznaczono napięcie przyłożone do elektrod (oznaczonych na czerwono). [8]

#### 2.5. Zależność wielkości efektu od różnych czynników

Aby efekt GMR nastąpił, grubość warstw ferromagnetyka i warstwy rozdzielającej musi być dostatecznie mała, porównywalna z drogą swobodną elektronu. Kolejno, omawiam wpływ różnych czynników na wielkość zmiany oporu opisywaną przez  $\delta_H$  (2.1).

Geometria: wielkość efektu w geometrii CPP jest około dwukrotnie większa, niż w geometrii CIP [8].

**Liczba warstw**: wraz ze zwiększaniem liczby warstw,  $\delta_H$  rośnie, jednak dla znacznej liczby warstw wielkość efektu nasyca się [2]. Było to widoczne przy odkryciu efektu GMR- grupa badawcza Ferta, eksperymentując z większą liczbą warstw, osiągnęła znacznie większą zmianę oporu, niż grupa badawcza Grünberga.

**Temperatura**: wraz ze zwiększaniem temperatury próbki, wielkość efektu maleje, jednak nawet w temperaturze pokojowej efekt jest znaczny [2]. Przykładowo, kiedy ultracienkie warstwy Co(1.2 nm)/Cu(1.1 nm) ogrzeje się od około 0 K do temperatury pokojowej,  $\delta_H$  zmniejsza się od 40 do 20% w geometrii CIP i od 100 do 50% w geometrii CPP [8]. Wraz ze zwiększaniem się temperatury, rośnie rozpraszanie elektronów na coraz silniej drgających atomach sieci krystalicznej, w obydwóch konfiguracjach magnetycznych rośnie opór i maleje  $\delta_H$ .

**Grubość warstwy rozdzielającej**: zmiana oporu  $\delta_H$  maleje wraz ze zwiększaniem grubości warstwy rozdzielającej. W geometrii CIP efekt spada ekspotencjalnie wraz z grubością niemagnetycznej warstwy [6]. W idealnym przypadku, gdy chcemy osiągnąć jak największą zmianę oporu, grubość tej warstwy powinna być możliwie mała.

**Grubość warstw ferromagnetyka**: zależność od grubości warstw magnetycznych jest bardziej złożona, dla pewnej grubości warstwy występuje maksimum efektu [2].



Rysunek 2.4. Magnetoopór warstw wielokrotnych typu Fe/Cr zmierzony w temperaturze 4.2 K. Widać, że wraz ze zmniejszaniem grubości warstwy rozdzielającej, wielkość efektu rośnie. [9]

### Rozdział 3

## Modele zjawiska GMR

### 3.1. Rozważania jakościowe

Przedstawię jakościowy opis zjawiska gigantycznego magnetooporu w geometrii CIP. Mamy do czynienia z układem dwóch warstw ferromagnetycznych rozdzielonych przewodnikiem, których magnetyzacje są zorientowane antyrównolegle albo równolegle. Zjawisko może być opisane przez model dwóch prądów stworzony przez Campbella i Ferta. Model wykorzystuje fakt, że przewodnictwo elektronowe w ferromagnetykach pochodzi od dwóch kanałów spinowych: jednego o spinie ustawionym zgodnie z kierunkiem magnetyzacji warstwy, drugiego kanału o spinie ustawionym przeciwnie do magnetyzacji warstwy. W niskich temperaturach nie ma procesów rozproszenia z odwróceniem spinu. W pierwszym przybliżeniu, oba kanały przewodnictwa mogą być rozważane niezależnie.

W granicy makroskopowej, grubość warstw jest znacznie większa niż średnie drogi swobodne elektronów o dwóch orientacjach spinu. Elektrony przewodnictwa pomiędzy aktami rozpraszania nie przemieszczają się pomiędzy warstwami, zatem podwójna warstwa może być zastąpiona dwiema niestykającymi się warstwami, czyli dwoma rezystorami połączonymi równolegle. W przypadku niezależnych kanałów spinowych, całkowity opór równoległej i antyrównoległej konfiguracji warstw jest równy rezystancji sieci rezystorowej przedstawionej na kolejnym rysunku.

Jest oczywiste, że opory obydwóch konfiguracji (równoległej i antyrównoległej) są sobie równe. Dlatego, nie ma efektu GMR w granicy makroskopowej (dla grubości warstw znacznie większej od średniej drogi swobodnej elektronu).

Powyższe rozumowanie nie stosuje się do przypadku, gdy grubości warstw są porównywalne do średniej drogi swobodnej elektronu. Kiedy elektrony przewodzące prąd przemieszczają się pomiędzy warstwami, w konfiguracji równoległej elektrony o jednej orientacji spinu rozpraszają się silnie w całej warstwie, natomiast elektrony o przeciwnej orientacji spinu rozpraszają się słabo. Zatem w konfiguracji równoległej istnieją elektrony "szybkie". W konfiguracji antyrównoległej, każda orientacja spinu



Rysunek 3.1. Opory warstw w geometrii CIP dla konfiguracji równoległej i antyrównoległej dla granicy makroskopowej jako oporniki połączone równolegle [10]

jest szybka w którejść warstwie, natomiast jest silnie rozpraszana w drugiej warstwie. Dlatego, nie ma elektronów szybkich w konfiguracji antyrównoległej. Opór konfiguracji równoległej jest zatem mniejszy. Rozważania nie uwzględniają procesów z odwróceniem spinu, które zmniejszają wielkość efektu GMR [10].



Rysunek 3.2. Schemat przewodnictwa elektronów w konfiguracjach równoległej i antyrównoległej. Elektrony szybkie istnieją tylko w konfiguracji równoległej [10]

#### 3.2. Model kwaziklasyczny

Półklasyczna teoria zjawiska GMR jest oparta na równaniu kinetycznym Boltzmanna [10, 11]. Równanie kinetyczne Boltzmanna umożliwia znalezienie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa położeń i pędów cząstek w sytuacji, gdy pewną dużą ilość cząstek, w przypadku modeli zjawiska GMR elektronów przewodnictwa, poddaje się działaniu siły zewnętrznej (np. pola elektrycznego wymuszającego przepływ prądu). Równanie kinetyczne Boltzmanna umożliwia uwzględnienie dyfuzji cząstek oraz zderzeń między cząstkami. Ilość cząstek w zadanym obszarze objętości i w zadanym przedziale pędów otrzymuje się, całkując funkcję rozkładu po tym obszarze objętości i po tym przedziale pędów. Równanie kinetyczne Boltzmanna w postaci ogólnej ma postać:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{force}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{diff}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{coll}},\tag{3.1}$$

gdzie kolejno trzy człony po prawej stronie równania to człon 'force' związany z działaniem zewnętrznej siły na cząstki, człon 'diff' związany z dyfuzją cząstek oraz człon 'coll' związany ze zderzeniami cząstek. Gdy pomijamy zderzenia cząstek, człon 'coll' wynosi 0. Kinetyczne równanie Boltzmanna z pominięciem zderzeń nazywa się często równaniem Vlasowa. Ponadto, gdy mamy do czynienia ze stacjonarnym przepływem prądu,  $\frac{\partial f}{\partial t} = 0$ . Równanie kinetyczne Boltzmanna redukue się do:

$$\vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{scat}},$$
(3.2)

gdzie  $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Użytecznym stosowanym przybliżeniem jest przybliżenie czasu relaksacji[11]. Przybliżenie to mówi, że człon związany z rozpraszaniem jest proporcjonalny do odchylenia od rozkładu Fermiego-Diraca, ze stałą proporcjonalności będącą odwrotnością czasu relaksacji  $\tau$ :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{scat}} = -\frac{f - f^0}{\tau} = -\frac{g}{\tau}.$$
(3.3)

 $f^0$  oznacza tutaj rozkład Fermiego-Diraca w stanie równowagi:

$$f^{0} = \frac{1}{\exp(\frac{E-\mu}{kT}) + 1},$$
(3.4)

gdzie  $E = \frac{1}{2}mv^2$  to energia kinetyczna elektronu i  $g \ll f^0$ . Zakładając, że pole elektryczne  $\vec{E}$  jest skierowane w kierunku osi x do próbki, której rozmiary są ograniczone w kierunku osi z (w kierunku osi y próbka jest nieskończona), uzwzględniając równania (3.2) i (3.3), otrzymujemy:

$$\frac{\partial g}{\partial z} + \frac{g}{v_z \tau} = \frac{eE}{mv_z} \frac{\partial f^0}{\partial v_x}.$$
(3.5)

Równanie mówi, że zaburzenie spowodowane działaniem siły elektrycznej na cząstki rozkłada się na procesy rozpraszania i dyfuzję. Dla jednorodnej próbki g(z) = C (*C*-stała), i tym samym  $\frac{\partial g}{\partial z} = 0$ . Otrzymujemy rozwiązanie:  $g = \frac{eE\tau}{m} \frac{\partial f^0}{\partial v_x}$ . Dla cienkich warstw o skończonej grubości, ogólne rozwiązanie równania (3.5) ma postać:

$$g(z, \vec{v}) = g_b(\vec{v}) \left[ 1 + \Lambda(\vec{v}) \exp\left(-\frac{z}{\tau v_z}\right) \right].$$
(3.6)

 $\Lambda(\vec{v})$  to stała całkowania zależna od warunków brzegowych dla rozważanej sytuacji. Gęstość prądu może być obliczona bezpośrednio jako  $\vec{j} = \sigma \vec{E}, j = \int ev_x g(z, \vec{v}) d^3v dz$ . Znając gęstość prądu, można obliczyć całkowity prąd płynący przez warstwy (przez całkę po przekroju poprzecznym). Umożliwia to znalezienie oporu układu dla konfiguracji równoległej i antyrównoległej, oraz zmiany oporu  $\delta_H$ .

### Rozdział 4

# Zastosowania zjawiska GMR

Znanych jest obecnie wiele efektów magnetooporowych, w których zmiana oporu jest znacznie większa, niż w efekcie GMR. Zjawisko gigantycznego magnetooporu odkryto w warstwach ferromagnetycznych rozdzielonych substancją niemagnetyczną, pomiędzy którymi zachodzi oddziaływanie wymienne. W zerowym polu magnetycznym warstwy ferromagnetyczne są namagnesowane antyrównolegle, czyli w przeciwnych kierunkach. Żeby sprowadzić je do uporządkowania równoległego (wektory magnetyzacji w tym samym kierunku), należy zadziałać silnym polem magnetycznym, rzędu tesli. Następuje wtedy zmiana rezystacji układu. Ponieważ pole do przemagnesowania musi być silne, z praktycznego punktu widzenia takie struktury są mało przydatne. Jednak efekt GMR zachodzi niezależnie od oddziaływania wymiennego i może zachodzić również w strukturach bez międzywarstwowych oddziaływań wymiennych.

Sukces odkrycia polega na tym, że udało się wytworzyć struktury zwane zaworami spinowymi, w których również zachodzi efekt GMR. W najprostszym przypadku, zawór spinowy składa się z dwóch warstw magnetycznych rozdzielonych materiałem przewodzącym prąd. Kierunek magnetyzacji jednej warstwy jest trwale umocowany do podłoża dzięki anizotropii wymiennej i skierowany w jednym kierunku, natomiast magnetyzacja drugiej warstwy jest swobodna i może się obracać pod wpływem pola magnetycznego. Kiedy przyłożymy pole magnetyczne, możemy zmienić kierunek magnetyzacji. Okazuje się, że można wytworzyć strukturę zaworu spinowego, w której zmiana magnetyzacji warstwy miękkiej zachodzi w bardzo słabych polach magnetycznych, rzędu gaussa. Jest to siła pola magnetycznego porównywalna z tymi wytwarzanymi przez komórki pamięci w pamięciach magnetycznych. Otworzyło to możliwość stosowania zjawiska do odczytu informacji w dyskach twardych. Zainteresowanie, jakim cieszy się zjawisko GMR, wynika głównie ze znaczenia efektu dla pamięci magnetycznych [7].

### 4.1. Głowice czytające w magnetycznych dyskach twardych

Głównym i najważniejszym polem zastosowania zjawiska gigantycznego magnetooporu są głowice czytające w dyskach twardych. Dysk twardy jest pamięcią masową, służy do przechowywania informacji. Jest pamięcią trwałą, czyli informacja zapisana w nim jest trwała i pozostaje obecna po odłączeniu dysku od zasilania. Dysk twardy składa się z zamkniętego w obudowie zespołu wirujących talerzy. Talerze są pokryte nośnikiem magnetycznym, w warstwie którego przechowywana jest informacja. Na każdy talerz przypada jedna głowica elektromagnetyczna, która przemieszcza się bezpośrednio nad powierzchnią dysku, dokonując zapisu i odczytu danych [13].



Rysunek 4.1. Współczesny 2.5 calowy dysk twardy SATA ze zdjętą obudową. Widoczny talerz i głowica [13]

Na nośniku magnetycznym znajdują się domeny magnetyczne, czyli elementarne obszary, w których kierunek namagnesowania jest skierowany w tym samym kierunku. Kierunek magnetyzacji domeny może być skierowany w jednym kierunku, bądź przeciwnie. Obydwa stany namagnesowania w temperaturze pokojowej oddziela dość wysoka bariera energetyczna, która sprawia, że w temperaturze pokojowej stany namagnesowania są trwałe [2].

Domeny magnetyczne są wykorzystywane do zapisu informacji- domeny są pogrupowane w komórki, w których magnetyzacja jest skierowana w jedną stronę, bądź przeciwnie. Jeden kierunek magnetyzacji komórki oznacza bit 0, przeciwny bit 1. Głowica elektromagnetyczna przesuwa się nad powierzchnią talerza i domen, odczytując kierunek magnetyzacji komórki, ewentualnie zmieniając stan magnetyzacji (dokonując zapisu).

Pierwszy dysk twardy został skonstruowany przez firmę IBM w roku 1956. Był to dysk RAMAC 250 o pojemności 5 MB. Dysk był przy tym dość duży. Dyski twarde obecnie dostępne na rynku mają pojemności rzędu terabajta ( $10^{12}$  bajtów, tysiąca gigabajtów) przy niewielkich rozmiarach. Postęp technologiczny pozwolił na budowę dysków twardych o tak gigantycznych pojemnościach. Ciągłe doskonalenie się



Rysunek 4.2. Domeny magnetyczne w ferromagnetyku [14]

technologii wyraża prawo Moore'a [15]. Prawo Moore'a mówi, że podstawowe parametry komputerów, jak szybkość obliczeniowa czy też pojemność pamięci, powinny co pewien czas, właściwy dla danego komponentu, podwajać się. Co decyduje o zwiększaniu gęstości zapisu na dyskach twardych?

Pierwsze dyski twarde wykorzystywały jako głowicę odczytującą cewkę indukcyjną. Cewka indukcyjna przesuwała się nad obracającym się talerzem. Domeny magnetyczne na powierzchni talerza składające się na bit wytwarzają w obszarze nad sobą pole magnetyczne tym silniejsze, im więcej domen składa się na bit. W cewce przesuwającej się nad kolejną domenę pod wpływem zmiany pola magnetycznego indukowało się napięcie (i tym samym prąd elektryczny) zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej Faraday'a  $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Przez obecność napięcia indukcji, lub jego brak, cewka dawała informację, czy bit zmienił się na przeciwny (zmiana strumienia pola magnetycznego, spowodowana zamianą pola magnetycznego na pole o przeciwnym kierunku, napięcie na cewce) czy też bit pozostał ten sam (brak zmiany pola, brak napięcia na cewce). Do zaindukowania napięcia w cewce wymagane jest dość silne pole, pochodzące od wielu domen. Ponadto, cewka indukcyjna, jako obiekt wykonany z drutu, sama w sobie ma dość duże rozmiary. W rozwiązaniu z cewką indukcyjną jako głowicą odczytującą, wielka ilość domen pod cewką była niejako "marnotrawiona" na przechowanie pojedynczego bitu.

W latach dziewięćdziesiątych stosowano w dyskach twardych głowice odczytujące oparte na anizotropowym magnetooporze (AMR). Głowice oparte na efekcie AMR zastąpiły stosowane poprzednio głowice indukcyjne. Głowica odczytująca składała się z kostki materiału wykazującego efekt AMR. W efekcie AMR, opór materiału zależy od orientacji namagnesowania materiału i przepływającego przez materiał prądu. Kostka w głowicy unosiła się nad bitami, jej magnetyzacja orientowała się zgodnie z kierunkiem pola wytwarzanego przez bit. Poprzez rejestrację oporu głowicy odczytywało się wartość bitu. Efekt zmiany oporu w AMR jest jednak dość słaby i daje granicę pewnego minimalnego rozmiaru kostki czytającej oraz komórki pamięci, przy których możliwe jest rozróżnienie bitów. Dolna granica rozmiaru bitu ograniczała gęstość zapisu. Było to widoczne na wykresie gęstości zapisu od czasu jako zbliżanie się do pewnej granicy, której nie dało się przekroczyć.

W roku 1997, koncern IBM wprowadził głowicę odczytującą wykorzystującą zjawisko gigantycznego magnetooporu. Wprowadzenie nowych głowic odczytujących umożliwiło dalsze zmniejszanie rozmiaru komórki bitu oraz rozmiarów detektora. Pozwoliło to na znaczące zwiększenie gęstości zapisu na talerzu. Zastosowanie efektu GMR doprowadziło do wzrostu gęstości zapisu od ok. 1 gigabita na cal kwadratowy do ok. 600 gigabitów na cal kwadratowy w roku 2007. Tendencja zgodna z prawem Moore'a została przywrócona.



Rysunek 4.3. Głowice odczytujące oparte na efekcie GMR umożliwiły dalsze zwiększanie gęstości zapisu danych na dyskach twardych [17]

Od roku 2006, w głowicach odczytujących dysków twardych zaczęły pojawiać się głowice oparte o tunelowy magnetoopór (TMR). Zaletą tego zjawiska jest, że zmiana oporu jest jeszcze większa, niż w efekcie GMR, i efekt nie maleje tak silnie ze wzrostem temperatury, jak GMR.

W komputerze, na którym piszę tą pracę, mam pamięć trwałą typu SSD (solid-state drive). Jest to pamięć składająca się z elementów półprzewodnikowych, dysk SSD jest pozbawiony części ruchomych. Jeżeli jednak ktoś ma w komputerze klasyczny magnetyczny dysk twardy, który ma bardzo dużą pojemność, i jednocześnie cena za jednostkę pamięci jest niewielka, to zbudowanie takiego dysku było możliwe właśnie dzięki istnieniu różnych efektów magnetooporowych. Obecnie w dziedzinie komputerów osobistych stosuje się coraz szybsze przechodzenie na pamięci trwałe półprzewodnikowe. Wciąż jednak dyski SSD pozostają względnie drogie, gdy chodzi o przechowanie znacznie większej ilości informacji. Wiele usług internetowych przechowujących w



Rysunek 4.4. Głowica GMR w twardym dysku [16]

swoich bazach danych gigantyczne ilości informacji wciąż korzysta z bardzo wielu klasycznych dysków twardych sprzężonych ze sobą w tzw. macierze dyskowe. W wielu zastosowaniach, wielkie ilości informacji wciąż przechowuje się na macierzach dyskowych (zwanych dawniej "gangami dysków").

Zbudowanie dysku twardego o pojemności 50 TB wciąż jest możliwe, a ogromny wkład w pracy nad tym mają fizycy i inżynierowie.

#### 4.2. Magnetyczne pamięci RAM

Magnetyczne pamięci RAM (MRAM- magnetoresistive random-access memory) to nieulotne pamięci o swobodnym dostępie, mogące pełnić w komputerach rolę pamięci roboczej.

Inaczej niż w technologii konwencjonalnych pamięci RAM, informacja w MRAM nie jest przechowywana jako ładunek elektryczny czy przepływ prądu, tylko przez stan magnetyzacji komórki. Komórka pamięci ma strukturę podobną do zaworu spinowego. Składa się z dwóch płytek ferromagnetyka, rozdzielonych cienką warstwą izolatora. Kierunek magnetyzacji dolnej warstwy jest trwały i przymocowany do podłoża, natomiast kierunek magnetyzacji górnej, "miękkiej" warstwy może się zmieniać pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Jest to struktura znana jako zawór spinowy.

Cała pamięć jest zbudowana z siatki takich komórek. Najprostsza metoda odczytania stanu bitu polega na pomiarze oporu komórki. W zależności od tego, czy konfiguracja warstw jest antyrównoległa, czy równoległa, mamy do czynienia z większym lub mniejszym oporem. Mniejszy opór jest uznawany za logiczne 0 lub 1. Pierwsze magnetyczne RAM-y wykorzystywały w swojej pracy zjawisko gigantycznego magnetooporu, jednak znacznie lepsze okazały się pamięci oparte na tunelowym



Rysunek 4.5. Elementarna komórka (bit) MRAM ma strukturę typu zawór spinowy [8]

magnetooporze i to on jest obecnie stosowany. Na zasadzie magnetycznego efektu tunelowego, którego mechanizm jest bardzo podobny do mechanizmu efektu GMR, przy uporządkowaniu równoległym, większe jest prawdopodobieństwo przetunelowania elektronów przez barierę, większy prąd, i tym samym mniejszy opór. Przy uporządkowaniu antyrównoległym, prawdopodobieństwo przetunelowania jest mniejsze, i opór większy.

Komórki połączone są poprzez szyny z półprzewodnikowymi układami scalonymi, które sterują zapisem i odczytem. Odczyt komórki polega na pomiarze oporu między szynami wskazującymi na daną komórkę. Zapis odbywa się poprzez przepuszczenie silnego impulsu prądu przez szyny wskazujące na daną komórkę. Powoduje to oczywiście powstanie pola magnetycznego na wszystkich komórkach wzdłuż szyn, jednak tylko na przecięciu szyn, na danej komórce, natężenie pola magnetycznego wskutek superpozycji pól pochodzących od obu szyn jest dostatecznie silne, aby przeorientować kierunek magnetyzacji warstwy miękkiej komórki.



Rysunek 4.6. Schemat MRAM. Stan komórki o niższym oporze i o wyższym [18]

Pamięci tego typu są rozwijane od lat 90. Zalety pamięci MRAM są liczne w porównaniu do konwencjonalnych pamięci RAM. MRAM mogą działać przy niższym napięciu, mają praktycznie nieograniczoną żywotność, bardzo krótkie (rzędu nanosekund) czasy odczytu i zapisu. Ponieważ kondensatory używane w konwencjonalnych pamięciach RAM (DRAM) tracą przechowywany ładunek z czasem, koniecznie jest odświeżanie wszystkich komórek około 20 razy na sekundę, czyli ich odczyt i ponowny zapis. Kiedy zmniejszamy rozmiary komórek DRAM, odświeżanie musi zachodzić jeszcze częściej, co skutkuje większym poborem mocy. Z drugiej strony, MRAM wymaga większej mocy do zapisu. W praktyce różnica w poborze mocy przez pamięci konwencjonalne i MRAM jest bliska zeru.



Rysunek 4.7. Układ MRAM wyprodukowany przez firmę Everspin Technologies [19]

Do dzisiaj magnetyczne pamięci RAM pełnią na rynku niszową rolę, jednak ich entuzjaści wierzą, że MRAM stanie się w przyszłości pamięcią uniwersalną dla wszystkich typów pamięci.

### 4.3. Czujniki pola magnetycznego

Czujniki pola magnetycznego [20] wykorzystywane są do pomiaru wielkości lub kierunku nieznanego pola magnetycznego, na przykład jako elektroniczny kompas. W innych zastosowaniach, mogą być wykorzystywane do pomiaru zmian znanego pola magnetycznego, na przykład do bezkontaktowego pomiaru położenia, prędkości i przyspieszenia, oraz do badania materiałów magnetycznych. Czujniki w swojej pracy opierają się na rozmaitych zjawiskach fizycznych, w tym na gigantycznym magetooporze.

Firma Nonvolatile Electronics jest liderem w wykorzystywaniu zjawiska GMR.

#### 4.4. Inne zastosowania

Inne zastosowania zjawiska gigantycznego magnetooporu, jakie można wymienić [20], to:

1. MEMS (and. Micro Electro-Mechanical System)- mikrosystemy, miniaturowe układy elektro-mechaniczne, których co najmniej jeden wymiar jest w skali mikro. Przy tak miniaturowych rozmiarach ludzka intuicja nie nadaje się do wyobrażania sobie działania tych urządzeń, które zachowują się wręcz nieintuicyjnie [22]. Przykład



Rysunek 4.8. Czujnik GMR wykorzystywany do pomiaru prędkości obrotowej. Pomiędzy kołem zębatym a trwałym magnesem umieszczony jest czujnik GMR. Obrót kół zębatych powoduje zmianę rozkładu pola magnetycznego, co objawia się poprzez zmianę oporu czujnika. Umożliwia to pomiar prędkości obrotowej [20]

aplikacji GMR w tym urządzeniach to miniaturowe czujniki wibracji, w których skład wchodzi zawór spinowy.

- Bioczujniki magnetyczne, w których zawór spinowy wykrywa DNA lub białko, mierząc pole magnetyczne od cząsteczek wchodzących w skład DNA lub białka [20].
- 3. Systemy oddzielenia galwanicznego: zmiana rezystancji czujnika wywoływana jest przez zmianę prądu w cienkowarstwowej cewce. Takie układy produkowane przez firmę NVE mogą służyć do cyfrowej transmisji danych. Ich szybkości transmisji są porównywalne z układami optycznymi przy mniejszych rozmiarach. Są łatwiejsze do zintegrowania z elektroniką półprzewodnikową. Mogą być stosowane w układach analogowych jako oddzielenie galwaniczne.



Rysunek 4.9. Czujnik pola magnetycznego firmy NVE i jego charakterystyka przetwarzania [21]



Rysunek 4.10. Czujnik GMR w układzie oddzielenia galwanicznego [21]

# Nagroda Nobla z fizyki 2007

Nagrodę Nobla z fizyki w roku 2007 przyznano Albertowi Fertowi z Uniwersytetu Paris-Sud (Francja) i Peterowi A. Grünbergowi z Centrum Badań w Jülich (Niemcy) za odkrycie gigantycznego magnetooporu (GMR) w wielowarstwowych strukturach magnetycznych. Podstawą przyznania nagrody były wyniki opublikowane w pracach "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices" oraz "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange".



Rysunek 4.11. Laureaci Nagrody Nobla z fizyki w roku 2007, fizycy Peter Grünberg i Albert Fert [24]

Główne czynniki, które zdecydowały, że Grünberg i Fert otrzymali Nagrodę Nobla:

- Wyniki opublikowali w Physical Review B
- Zmierzyli wielkość efektu nie tylko w niskich temperaturach, ale także w temperaturze pokojowej
- Zasugerowali możliwe praktyczne zastosowania efektu GMR
- Koncent IBM zainteresował się zjawiskiem GMR i skonstruowano głowice czytające do dysków twardych wykorzystujące to zjawisko

Najważniejszym czynnikiem była możliwość zastosowania efektu GMR do odczytu informacji w dyskach twardych o olbrzymiej pojemności, szybkie skonstruowanie głowic

odczytujących i wprowadzenie ich do powszechnego użytku. W dzisiajszych czasach niezwykle ważne jest, abyśmy mogli niskim kosztem przechowywać olbrzymie ilości informacji. Możliwość taką zapewnił efekt GMR i skonstruowanie zaworów spinowych.

Sukces odkrycia GMR doprowadził do rozwoju badań naukowych w zakresie zjawisk spinowych w transporcie elektronowym w układach nanoskopowych. Konsekwencją było wyłonienie się nowego działu elektroniki i fizyki nanoukładów, nazywanego elektroniką spinową lub krótko spintroniką. W klasycznych układach elektronicznych, najważniejszym elementem jest ładunek elektronu, natomiast rola spinu jest drugorzędna, zazwyczaj liczy się on jedynie jako ewentualne źródło ferromagnetyzmu. W nowo powstałej, znajdującej się wciąż na wczesnym etapie rozwoju spintronice spin elektronu jest aktywnym elementem na równi z ładunkiem i wpływa na przepływ prądu. Pojawiła się mozliwość konstrukcji układów elektronicznych z zaplanowaną strukturą spinową.

Sukces efektu GMR zapoczątkował również intensywne prace nad ferromagnetycznymi złączami tunelowymi, w których prąd płynie w wyniku kwantowego efektu tunelowego. Zjawisko to nosi nazwę tunelowego magnetooporu. Po raz pierwszy zjawisko to zaobserwował M. Juliere w roku 1975. Dalszą konsekwencją tego odkrycia było wyłonienie się spintroniki półprzewodnikowej.

Nie ulega więc wątpliwości, że wkład Alberta Ferta i Petera Grünberga do rozwoju nauki i technologii przyszłości jest ogromny.

# Bibliografia

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistance
- [2] Józef Barnaś, Spin w elektronice Postępy Fizyki, tom dodatkowy 53D, 2002
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Extraordinary\_magnetoresistance
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel\_magnetoresistance
- [5] Janice Nickel, Magnetoresistance Overview, 1995
- [6] Józef Barnaś, Gigantyczny magnetoopór: Nagroda Nobla 2007, prezentacja w formacie pdf
- [7] Peter Grünberg, *Od fal spinowych do gigantycznego magnetooporu (GMR) i dalej*, Wykład noblowski wygłoszony 8 grudnia 2007
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Giant\_magnetoresistance
- [9] http://pl.wikipedia.org/Gigantyczny\_magnetoopor
- [10] Józef Barnaś, *Transport in magnetic layered structures: giant magnetoresistance*, Acta Physica Polonica A, Vol. 85 (1994)
- [11] S.K.J. Lenczowski, Giant Magnetoresistance of Magnetic Multilayers
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann\_equation
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Hard\_disk\_\_drive
- [14] David J. Griffitsh, Podstawy elektrodynamiki, Wydawnictwo Naukowe PWN
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's\_law
- [16] Albert Fert, *Geneza, rozwój i przyszłość spintroniki*, Wykład noblowski wygłoszony 8 grudnia 2007
- [17] http://www.physicscentral.com/explore/action/ magnetoresistance.cfm
- [18] http://www.ece.nus.edu.sg/isml/MRAM.jpg
- [19] http://www.mram-info.com
- [20] Reinder Coehoorn, Novel Magnetoelectronic Materials and Deviced, 2003
- [21] prof. dr hab. inż. Sławomir Tumański, *GMR gigantyczny magnetoopór*, Przegląd Elektrotechniczny
- [22] http://pl.wikipedia.org/wiki/Micro\_Electro-Mechanical\_ Systems
- [23] Józef Barnaś, Nobel z fizyki za gigantyczny magetoopór, Postępy Fizyki, tom 59 zeszyt 1, 2008

[24] http://cadenaser.com/ser/2007/10/09/sociedad/1191896008\_ 850215.html

# Spis rysunków

2.1.	Ultracienkie warstwy Fe/Cr/Fe, w których odkryto zjawisko GMR. Oddziaływanie	
	antyferromagnetyczne sprawia, że w zerowym polu magnetycznym wektory	
	magnetyzacji są skierowane w przeciwne strony. [6]	5
2.2.	Rysunek przedstawiający mechanizm powstawania efektu GMR. Przyczyną jest	
	zależne od spinu rozpraszanie elektronów. [2]	7
2.3.	Dwa kierunki przepływu prądu przez ultracienkie warstwy. Jako v oznaczono	
	napięcie przyłożone do elektrod (oznaczonych na czerwono). [8]	7
2.4.	Magnetoopór warstw wielokrotnych typu Fe/Cr zmierzony w temperaturze 4.2 K.	
	Widać, że wraz ze zmniejszaniem grubości warstwy rozdzielającej, wielkość efektu	
	rośnie. [9]	9
3.1.	Opory warstw w geometrii CIP dla konfiguracji równoległej i antyrównoległej dla	
	granicy makroskopowej jako oporniki połączone równolegle [10]	11
3.2.	Schemat przewodnictwa elektronów w konfiguracjach równoległej i antyrównoległej.	
	Elektrony szybkie istnieją tylko w konfiguracji równoległej [10]	11
4.1.	Współczesny 2.5 calowy dysk twardy SATA ze zdjętą obudową. Widoczny talerz i	
	głowica [13]	15
4.2.	Domeny magnetyczne w ferromagnetyku [14]	16
4.3.	Głowice odczytujące oparte na efekcie GMR umożliwiły dalsze zwiększanie gęstości	
	zapisu danych na dyskach twardych [17]	17
4.4.	Głowica GMR w twardym dysku [16]	18
4.5.	Elementarna komórka (bit) MRAM ma strukturę typu zawór spinowy [8]	19
4.6.	Schemat MRAM. Stan komórki o niższym oporze i o wyższym [18]	19
4.7.	Układ MRAM wyprodukowany przez firmę Everspin Technologies [19]	20
4.8.	Czujnik GMR wykorzystywany do pomiaru prędkości obrotowej. Pomiędzy kołem	
	zębatym a trwałym magnesem umieszczony jest czujnik GMR. Obrót kół zębatych	
	powoduje zmianę rozkładu pola magnetycznego, co objawia się poprzez zmianę	
	oporu czujnika. Umożliwia to pomiar prędkości obrotowej [20]	21
4.9.	Czujnik pola magnetycznego firmy NVE i jego charakterystyka przetwarzania [21] $$ .	22
4.10.	Czujnik GMR w układzie oddzielenia galwanicznego [21]	22

4.11. Laureaci Nagrody Nobla z fizyki w roku 2007, fizycy Peter Grünberg i Albert Fert [24] 23