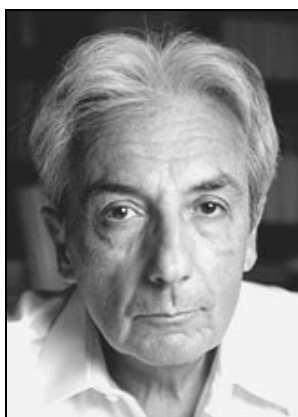


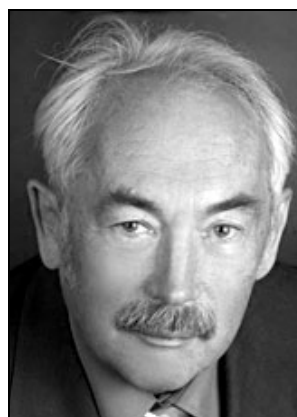
Nagroda Nobla z fizyki 2007 dla Alberta Ferta i Petera Grünberga

*Michał Rams, Krzysztof Tomala
Instytut Fizyki UJ*

Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za 2007 rok otrzymali prof. Albert Fert (Francja) i prof. Peter Grünberg (Niemcy) za odkrycie zjawiska gigantycznego magnetooporu (GMR – Giant MagnetoResistance). Zjawisko to zostało odkryte niezależnie przez obydwu fizyków w 1988 roku. W układach wykazujących gigantyczny magnetoopór bardzo małe zmiany pola magnetycznego prowadzą do bardzo dużych zmian oporu elektrycznego, co umożliwiło budowę małych i bardzo czułych sensorów pola magnetycznego. Czujniki takie znalazły zastosowanie do odczytywania informacji z nośników magnetycznych, np. w twardej dyskach stanowiących niezbędny element praktycznie każdego komputera.



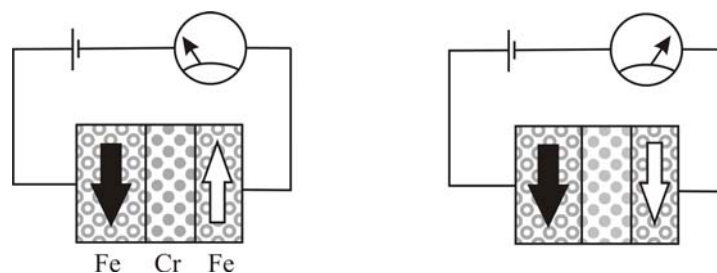
Albert Fert



Peter Grünberg

Zjawisko magnetooporu, tzn. zależność oporu elektrycznego przewodnika od przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego, zostało zaobserwowane po raz pierwszy przez Lorda Kelyvina w połowie XIX wieku. Lord Kelvin odkrył, że oporność przewodnika z żelaza rośnie, kiedy kierunki pola magnetycznego i prądu elektrycznego są równoległe oraz maleje, kiedy są prostopadłe względem siebie. Efekt był bardzo mały i obserwowalne zmiany oporu wymagały stosowania silnych pól magnetycznych, co uniemożliwiało budowanie czułych sensorów pola magnetycznego opartych na tym zjawisku i nie znalazło szerszego zastosowania.

Odkrycie zjawiska gigantycznego magnetooporu jest nieodłącznie związane z układami warstw metalicznych o nanometrowej grubości, a więc zawierających kilka warstw atomowych. Zjawisko GMR występuje w układach składających się co najmniej z trzech takich warstw, z których dwie skrajne są ferromagnetykami, natomiast warstwa środkowa jest niemagnetyczna. W swoich oryginalnych badaniach P. Grünberg zastosował układ Fe/Cr/Fe (rys. 1) zaś A. Fert, dla wzmocnienia efektu GMR, stosował układ złożony z bardzo wielu naprzemiennie naparowanych cienkich warstw żelaza i chromu $(\text{Fe/Cr})_n$ z wartością n dochodzącą do 60. Jedną z przyczyn wykorzystania układów wielowarstwowych o takim składzie jest łatwość wytwarzania w układzie Fe i Cr cienkich warstw o dobrze określonych granicach międzywarstwowych, co wynika z faktu, że żelazo i chrom krystalizują w takiej samej strukturze krystalicznej (struktura regularna przestrzennie centrowana) o bardzo zbliżonych wartościach stałych sieci: 0,388 nm dla Cr i 0,387 nm dla Fe. Okazuje się, że opór takiego układu zależy bardzo silnie od kierunku wzajemnego namagnesowania obydwu warstw ferromagnetycznych. Stosując bardzo prosty model transportu elektronowego w materiałach magnetycznie uporządkowanych i zakładając, że w trakcie przepływu prądu przez układ przedstawiony na rysunku 1 nie nastąpi zmiana kierunku spinu elektronów przewodnictwa, można wykazać, że opór elektryczny takiego układu jest zawsze mniejszy, gdy obydwie warstwy ferromagnetyczne są namagnesowane równoległe, zaś rośnie, gdy momenty magnetyczne obydwu warstw są antyrównoległe. Duże zmiany oporu elektrycznego występują w słabych polach potrzebnych w tym przypadku jedynie do przemagnesowania cienkiej warstwy ferromagnetyka.

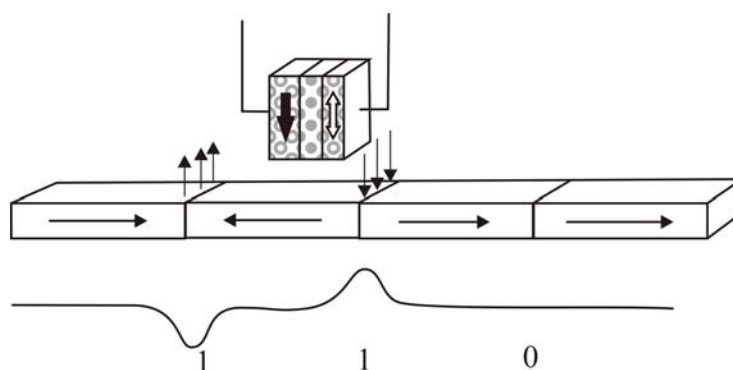


Rys. 1. Przepływ prądu elektrycznego przez układ trzech cienkich warstw z zaznaczeniem kierunku namagnesowania warstw ferromagnetycznych. Natężenie prądu elektrycznego zależy od względnej orientacji momentów magnetycznych obydwu warstw. Czarną strzałką zaznaczono kierunek magnetyzacji warstwy żelaza, którą jest trudno przemagnesować (patrz tekst)

Odkryte zjawisko znalazło bardzo szybko zastosowanie, przede wszystkim w konstrukcji miniaturowych głowic używanych do odczytu informacji zapisanych w formie magnetycznej na takich nośnikach jak twarde dyski. Zastosowanie czujników typu GMR pozwoliło w 1998 roku przekroczyć gęstość zapisu 10 GB na cal kwadratowy.

Aby przedstawiony na poprzednich rysunkach element mógł być stosowany do tego celu, musi istnieć możliwość zmiany w stosunkowo słabych polach magnetycznych wzajemnego ustawienia kierunków magnetyzacji obydwu warstw ferromagnetycznych. Służy do tego celu zarówno niemagnetyczna warstwa chromu, której grubość jest precyzyjnie dobrana tak, aby sprzężenie magnetyczne pomiędzy warstwami żelaza było minimalne, jak i sposób przygotowania warstw ferromagnetycznych. Jedna z nich powinna być spreparowana tak, aby łatwo ją było przemagnesować (materiał powinien wykazywać bardzo wąską pętlę histerezy), druga zaś do wymuszenia zmiany kierunku namagnesowania powinna wymagać znacznie większych pól zewnętrznych. Posiadający takie własności element został nazwany zaworem spinowym (spin valve).

Informacja na twardym dysku jest zapisana jako sekwencja małych obszarów zwanych domenami, namagnesowanych w dwóch kierunkach (rys. 2). Jeden z kierunków może oznaczać zapis „0”, zaś drugi „1”. Występujące w odpowiedniej sekwencji bieguny magnetyczne wytwarzają na granicach domen pole magnetyczne, które jest skierowane prostopadle do płaszczyzny dysku, a jego zwrot zależy od rodzaju spotykających się biegunów magnetycznych. Pokazany na rysunku czujnik GMR jest skonstruowany tak, że namagnesowanie warstwy trudnej do przemagnesowania jest skierowane prostopadle do płaszczyzny dysku, zaś moment magnetyczny warstwy łatwej do przemagnesowania znajduje się w płaszczyźnie dysku. Przemieszczanie się czujnika nad dyskiem powoduje zmiany ustawienia kierunku magnetyzacji do prostopadłej ze zwrotem „do” albo „od” płaszczyzny dysku, co powoduje wzajemnie równoległe lub antyrównoległe ustawienie magnetyzacji obydwu ferromagnetycznych warstw czujnika. Informacja ta jest odczytywana poprzez przepływający przez zawór spinowy prąd. Pokazana na rysunkach prostopadła do kierunku przepływu prądu orientacja warstw, nie jest stosowana w praktyce ze względu na bardzo mały opór. W praktyce wykorzystuje się wykazujący także efekt GMR prąd przepuszczany w płaszczyźnie warstw.



Rys. 2. Zastosowanie elementu GMR do odczytu informacji zapisanej na twardym dysku magnetycznym. Szczegółowe objaśnienia zamieszczono w tekście

Odkrycie efektu GMR w warstwach metalicznych stymulowało prace nad innego typu układem, w którym niemagnetyczna warstwa Cr (rys. 1) została zastąpiona izolatorem. Warstwa izolatora musi wtedy być na tyle cienka, aby umożliwić przepływ prądu tunelującego pomiędzy obydwooma ferromagnetykami. Układy tego typu, zwane tunelującymi złączami magnetycznymi (TMJ – Tunneling Magnetic Junction), wykazują znacznie większy magnetoopór aniżeli klasyczne układy GMR. Ponadto, zastosowana warstwa izolatora umożliwia pracę tego układu w geometrii z prądem prostopadłym do powierzchni warstw. Doprowadziło to do budowy trwałych pamięci magnetycznych MRAM (Magnetic Random Access Memory). Wykorzystanie czujników TMJ pozwoliło w 2007 roku osiągnąć gęstość zapisu ponad 500 GB na cal kwadratowy.

Odkrycie efektu GMR przez A. Fertę i P. Grünberga stanowiło bardzo silny impuls do dalszych prac nad budową układów półprzewodnikowych wykorzystujących spinowo zależny transport elektronowy. Powstała nowa dziedzina nauki zwana magnetoelektroniką lub spintroniką. Prowadzone badania koncentrują się na stworzeniu elektroniki opartej na manipulowaniu spinowymi stopniami swobody elektronu i obejmują takie zagadnienia jak: poszukiwania ferromagnetycznych półprzewodników z wysoką temperaturą Curie, wprowadzanie spinowo spolaryzowanych elektronów z metalu do półprzewodnika i ich transport w półprzewodnikach bez efektu depolaryzacji oraz przełączanie kierunku momentów magnetycznych przez spinowo spolaryzowane prądy. Panuje ogólne przekonanie, że magnetoelektronika jest w chwili obecnej najbardziej obiecującym kierunkiem rozwoju elektroniki.

Więcej informacji na temat układów GMR można znaleźć na stronach:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/ (skąd pochodzą zamieszczone przez nas zdjęcia Noblistów)
<http://www.research.ibm.com/research/demos/gmr/>