

Pamięci magnetyczne

# Gigantyczny magnetoopór



Prof. Barnaś, laureat Nagrody Naukowej im. Marii Skłodowskiej-Curie jest prodziekanem Wydziału Fizyki UAM. Prof. Barnaś przez półtora roku pracował w laboratorium prof. Alberta Fertę oraz prawie dwa lata w zespole prof. Petera Grünberga

**JÓZEF BARNAŚ**

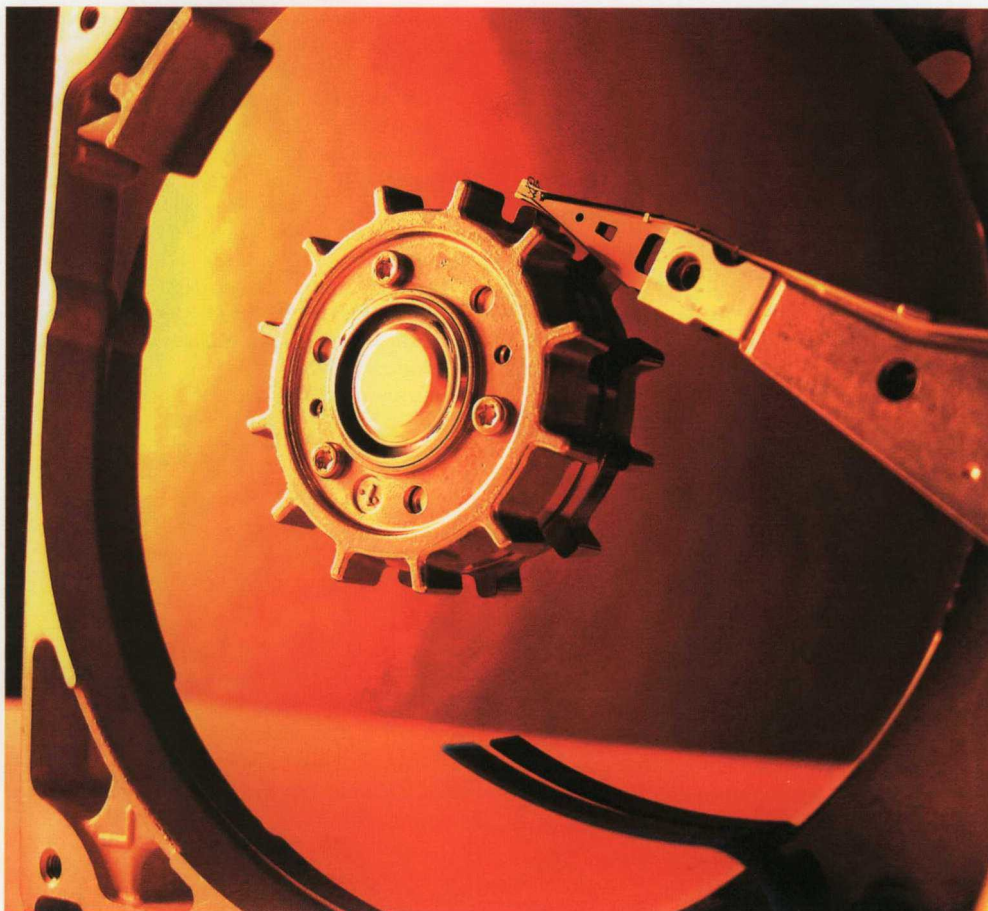
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
Instytut Fizyki Molekularnej, Poznań  
Polska Akademia Nauk  
barnas@amu.edu.pl

**Gęstość zapisu informacji na twardech dyskach rośnie eksponencjalnie w czasie i w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat podwaja się średnio co około półtora roku**

Prawidłowość ta znana jest jako empiryczne prawo Moore'a. Gęstość zapisu wyznaczona jest głównie przez dwa czynniki; pierwszy z nich to możliwości technologiczne wytwarzania dysków o coraz mniejszych komórkach pamięci, drugi to technologiczne możli-

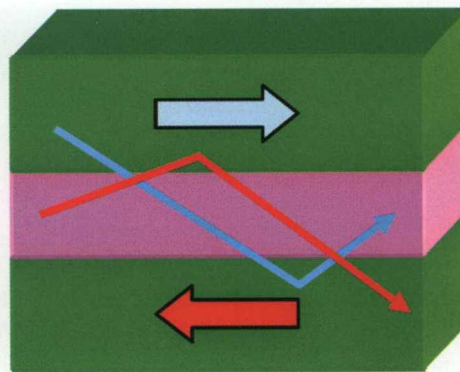
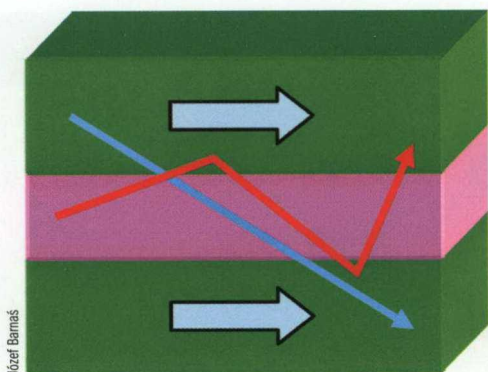
wości zapisu i odczytu informacji. Najwięcej problemów stwarza jednak problem odczytu zapisanej informacji. Działanie stosowanych w latach 90. ubiegłego stulecia głowic odczytujących oparte było na tzw. anizotropowym magnetooporze, którego istotą jest zależność oporu elektrycznego metali ferromagnetycznych od wzajemnej orientacji kierunku przepływu prądu i kierunku namagnesowania. Odczyt informacji polega na wykorzystaniu zmian oporu elektrycznego elementu magnetooporowego głowicy w polu magnetycznym pochodzącym od komórek pamięci magnetycznej. Chociaż znanych jest wiele zjawisk fizycznych prowadzących do magnetooporu, to jednak niewiele z nich nadaje się do detekcji tak słabych pól magnetycznych, jakimi są pola generowane przez komórki pa-

50 Gb, a może 100 czy 500? Kupując nowy komputer, możemy swobodnie wybierać wielkość jego twardego dysku. W tej dziedzinie w ostatnich latach nastąpił prawdziwy przełom. Dzisiejsze dyski mieszczą kilkadziesiąt razy więcej danych niż te same urządzenia z roku np. 1997



Mario Alberto Magallanes Trejo





Fizyczny mechanizm GMR. W konfiguracji równoległej (po lewej) opór elektryczny jest znacznie mniejszy aniżeli w konfiguracji antyrównoległej (po prawej)

mięci. Warunki takie spełniał anizotropowy magnetoopór. Efekt ten jest jednak stosunkowo słaby i możliwości głowic odczytujących opartych na tym efekcie ograniczały dalsze zwiększanie gęstości zapisu.

### Przełomowe odkrycie

Nowe możliwości pojawiły się po odkryciu efektu gigantycznego magnetooporu (GMR) w magnetycznych strukturach wielowarstwowych przez zespół kierowany przez Alberta Fertę z Uniwersytetu Paris-Sud (Francja) i zespół Petera Grünberga z Centrum Badań w Jülich (Niemcy), za które to odkrycie Albertowi Fertowi i Peterowi Grünbergowi przyznana została w 2007 roku Nagroda Nobla z dziedziny fizyki. Obydwaj laureaci w latach 80. poprzedniego stulecia pracowali nad technologią ultracienkich struktur wielowarstwowych złożonych z warstw magnetycznych metali przejściowych (np. żelaza, Fe) przedzielonych warstwami niemagnetycznymi (np. chromu, Cr). Główny nacisk w tym okresie położony był na poprawę jakości strukturalnej takich układów i znalezienie optymalnych warunków ich wytwarzania. Istotnym krokiem w rozwoju badań nad magnetycznymi strukturami wielowarstwowymi było odkrycie przez Petera Grünberga w roku 1986 antyferromagnetycznego międzywarstwowego oddziaływania wymiennego w strukturach Fe/Cr/Fe. Przy grubościach warstw chromu rzędu kilku płaszczyzn atomowych warstwy żelaza sprzężone są antyferromagnetycznie i w stanie podstawowym bez zewnętrznego pola magnetycznego ich magnetyzacje zwrócone są w przeciwne strony.

W układach z antyferromagnetycznym oddziaływaniem wymiennym między warstwami Fe, badanych w zespołach Fertę i Grünberga, magnetyzacje sąsiednich warstw (bez

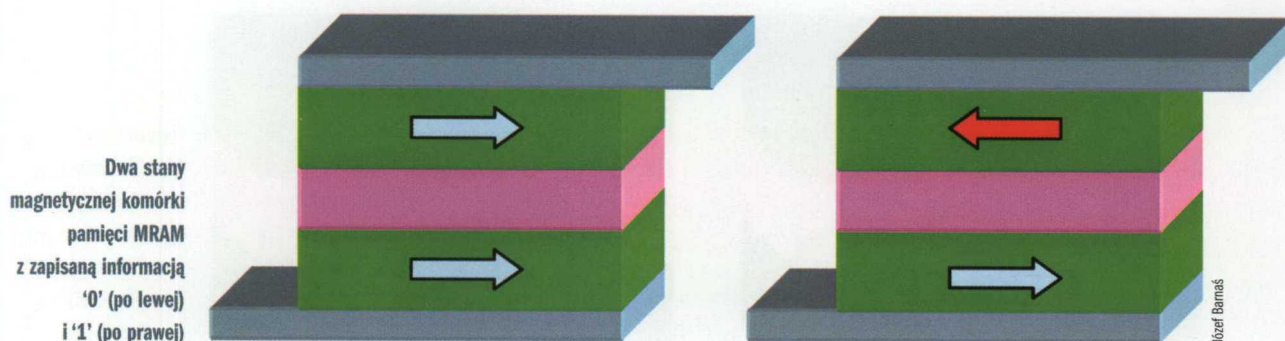
zewnętrznego pola magnetycznego) zwrócone są w przeciwne strony, jednakże pozostają w płaszczyźnie warstw. Zewnętrzne pole magnetyczne wymusza ustawienie się magnetyzacji w kierunku pola. Istotą odkrycia gigantycznego magnetooporu było pokazanie, że prąd elektryczny płynący w płaszczyźnie warstw przy stałym napięciu różnie (opór elektryczny maleje) podczas zmiany konfiguracji z antyrównoległej bez pola magnetycznego do równoległej w polu magnetycznym, niezależnie od tego, czy pole magnetyczne zwrócone jest prostopadle do płaszczyzny warstw, czy też leży w ich płaszczyźnie i zwrócone jest wzdłuż kierunku przepływu prądu lub do niego prostopadle. Innymi słowy, pod wpływem zmian zewnętrznego pola magnetycznego zachodzą znaczne, dochodzące do nawet 50% zmiany oporu badanych struktur. Struktury badane w zespole Petera Grünberga złożone były z dwóch warstw Fe przedzielonych jedną warstwą Cr (Fe/Cr/Fe), natomiast układy badane w zespole Alberta Fertę złożone były ze znacznie większej liczby warstw Fe i Cr, ściślej (Fe/Cr)<sub>40</sub>. Spadek oporu w strukturach Fe/Cr/Fe był rzędu kilku procent w polu nasycenia rzędu 0.1 tesli, natomiast w układach (Fe/Cr)<sub>40</sub> był on znacznie większy i sięgał 50% w polu nasycenia rzędu kilku tesli. Ta zmiana oporu elektrycznego znana jest właśnie jako efekt GMR.

### Spin rządzi oporem

Fizyczny mechanizm prowadzący do efektu GMR został wyjaśniony w późniejszych pracach. Płynący prąd to strumień poruszających się elektronów, które oprócz ładunku elektrycznego mają również spin. Można je sobie wyobrazić jako elementarne magnesy, które w metalach ferromagnetycznych ustawione są zgodnie z kierunkiem magnetyzacji



## Pamięci magnetyczne



albo przeciwnie do tego kierunku. Opór metalu wiąże się z tym, że w trakcie ruchu elektrony rozpraszają się na niedoskonałościach struktury. W metalach ferromagnetycznych opór, jakiemu podlegają elektrony, zależy od ustawienia ich spinu względem kierunku magnetyzacji. Zmiana konfiguracji magnetycznej z antyrównoległej na równoległą związana jest właśnie ze zmianą tego wzajemnego ustawienia, co w konsekwencji prowadzi do większego oporu w konfiguracji antyrównoległej aniżeli w równoległej. Tak więc efekt GMR wiąże się ściśle ze spinem elektronów. Istota sukcesu efektu GMR polega na tym, że udało się skonstruować takie struktury (nazywane zaworami spinowymi), w których zmiana konfiguracji magnetycznej, a tym samym i skok oporu elektrycznego zachodzi w bardzo małych polach magnetycznych. W pierwotnie badanych strukturach z antyferromagnetycznym oddziaływaniem wymiennym pole magnetyczne potrzebne do zmiany konfiguracji było duże ze względu na konieczność „pokonania” pola wymiennego. Struktury takie są niezbyt przydatne z praktycznego punktu widzenia. Bardziej obiecujące są struktury bez międzywarstwowych oddziaływań wymiennych.

Istotą zaworu spinowego jest to, że moment magnetyczny jednej warstwy jest umocowany do antyferromagnetycznego podłoża dzięki anizotropii wymiennej, natomiast moment drugiej warstwy może swobodnie obracać się w słabym polu magnetycznym. Ponieważ pole magnetyczne wymagane do zmiany magnetycznej konfiguracji w zaworach spinowych jest porównywalne z polem magnetycznym wytwarzanym przez komórki pamięci, zawory spinowe okazały się doskonałym elementem do zastosowania w głowicach odczytujących informacje zapisane na twardych dyskach i zastąpiły głowice oparte na anizotropowym magnetooporze.

Informacja na twardym dysku jest przedstawiona w postaci zakodowanych zer i jedynek. Są nimi obszary o odmiennym kierunku namagnesowania. Tak zapisaną informację odczytuje głowica dysku. Im dokładniej umie odróżnić obszary o różnych kierunkach namagnesowania, tym mniejszą mogą mieć one powierzchnię i tym więcej danych można zapisać na dysku. Dzięki oparciu mechanizmu odczytu dysku na zjawisku GMR gęstość zapisu informacji mogła znacznie wzrosnąć, a dzisiejsze dyski twarde mieszczą kilkadziesiąt razy więcej danych niż te same urządzenia z roku np. 1997.

Dalsze prace eksperymentalne pokazały, że efekt GMR występuje również, gdy prąd elektryczny płynie prostopadle do płaszczyzny warstw. Co więcej, efekt w takiej konfiguracji jest z reguły większy aniżeli w konfiguracji z prądem płynącym w płaszczyźnie warstw. To pozwoliło dalej zredukować rozmiary zaworów spinowych. Pokazano też, że w niektórych strukturach mamy do czynienia z efektem odwrotnym, tzn. opór struktury jest większy w konfiguracji równoległej aniżeli w antyrównoległej. Sukces efektu GMR zainicjował również intensywne prace nad ferromagnetycznymi złączami tunelowymi, w których prąd płynie w wyniku kwantowego efektu tunelowego. Odpowiedni efekt znany jest jako tunelowy magnetoopór (TMR) i po raz pierwszy zaobserwowany był już w 1975 roku.

### Magnetyczne pamięci

Zawór spinowy złożony z dwóch warstw magnetycznych przedzielonych warstwą niemagnetyczną można wykorzystać również jako element pamięci. Konfiguracja równoległa odpowiada wówczas zapisanej informacji '0', a konfiguracja antyrównoległa odpowiada informacji '1'. Zapis informacji polega wówczas na ustawieniu polem magnetycz-



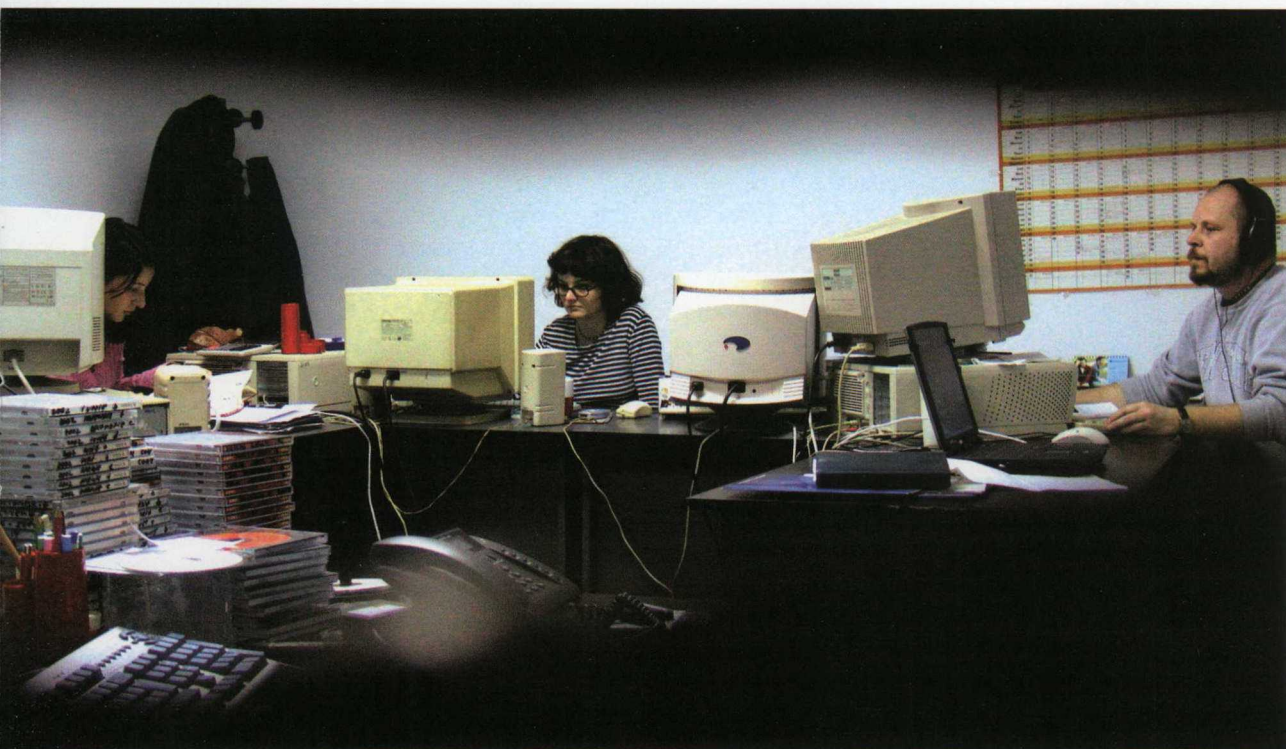
nym odpowiedniej konfiguracji magnetycznej. Z kolei do odczytu zapisanej informacji można wykorzystać efekt GMR. Komórki pamięci oparte na strukturach warstwowych z metaliczną przekładką zostały zaproponowane do konstrukcji magnetycznych pamięci typu RAM (tzw. MRAM). Ważną cechą takich pamięci jest ich nieulotność, tzn. zapisana informacja jest trwała i nie ginie po wyłączeniu napięcia, w przeciwieństwie do pamięci RAM opartych na technologii półprzewodnikowej. Jednakże parametry takich pamięci nie spełniły niezbędnych warunków i nie znalazły istotnego zastosowania. Znacznie lepsze parametry posiadają pamięci MRAM oparte na magnetycznych złączach tunelowych.

Magnetyczne zawory spinowe stwarzają jeszcze inne możliwości. Okazało się, że spinowo spolaryzowany prąd elektryczny może wywierać wpływ na konfigurację magnetyczną struktury i jeśli jest on odpowiednio duży, może generować przełączanie między stanami o konfiguracji równoległej i antyrównoległej. Jeśli prąd elektryczny płynący w jednym kierunku przełącza układ do konfiguracji np. równoległej, wówczas prąd płynący w przeciwną stronę przełącza układ do konfiguracji antyrównoległej. Efekt ten jest w pewnym sensie efektem odwrotnym do efektu GMR i jest z nim skorelowany. Zainteresowanie

tym efektem wynika z możliwości zapisu informacji w komórkach pamięci MRAM za pomocą impulsu elektrycznego zamiast pola magnetycznego generowanego przez prąd płynący w dodatkowych liniach. Jednakże prąd krytyczny do takiego przełączenia jest stosunkowo duży, zwłaszcza w strukturach metalicznych. W złączach tunelowych jest on znacznie mniejszy, co daje nadzieję na jego praktyczne wykorzystanie. Inne możliwości praktycznego wykorzystania takich układów, np. w telekomunikacji, wynikają z faktu, że w niektórych strukturach prąd elektryczny może być wykorzystany do generacji mikrofal bez konieczności stosowania zewnętrznego pola magnetycznego. ■

#### Chcesz wiedzieć więcej?

- Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. (1988). *Phys. Rev. Lett.*, 61, 2472.
- Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W. (1989). *Phys. Rev. B*, 39, 4828.
- Camley R.E., Barnaś J. (1989). *Phys. Rev. Lett.*, 63, 664.
- Barnaś J., Fuss A., Camley R.E., Grünberg P., Zinn W. (1990). *Phys. Rev. B*, 42, 8110.
- Barnaś J., Fert A., Gmitra M., Weymann I., Dugaev V.K. (2005). *Phys. Rev. B*, 72, 426.
- Boulle O., Cros V., Grollier J., Pereira L.G., Deranlot C., Petroff F., Faini G., Barnaś J., Fert A. (2007). *Nature Physics*, 3, 492.



Lehel Mor

**Stery płytek DVD czy duży twardy dysk? Możliwość wyboru nośnika to niejedyna korzyść z odkrycia zjawiska gigantycznego magnetooporu. Rozważa się też jego wykorzystanie w telekomunikacji, a nawet do wytworzenia trwałych magnetycznych pamięci typu RAM**