

## Gigantyczna magnetorezystancja

Według testamentu Alfreda Nobla ustanowiona przez niego nagroda powinna być przyznawana za osiągnięcie, które najlepiej służy ludzkości. Komitet przyznający tę nagrodę zwykł podchodzić do woli fundatora w sposób elastyczny, uznając, że większy pożytek mamy z pogłębiania naszej wiedzy niż z praktycznych jej zastosowań. Dotyczy to zwłaszcza Nagrody Nobla z Fizyki. Zdarza się jednak, że nagradzane osiągnięcie nie tylko jest przełomowe z naukowego punktu widzenia, ale również ma zaskakująco użyteczne zastosowanie. Sytuację taką mamy w tym roku, bo nagrodę przyznano Albertowi Feretowi z Francji oraz Peterowi Grünbergowi z Niemiec za odkrycie gigantycznej magnetorezystancji.

Jest to kolejne zjawisko kwantowe, którego praktyczna realizacja służy prawie każdemu. Praktycznie wszystkie produkowane w XXI wieku twarde dyski używają głowic wykorzystujących to zjawisko. Dzięki temu wymiary tych urządzeń mogły ulec znacznemu zmniejszeniu pomimo jednoczesnego zwiększenia pojemności.

Informacja na twarde dyski jest zapisywana za pomocą zmiany magnetyzacji obszaru odpowiadającego jednemu bitowi. Zwiększanie pojemności dysków może wiązać się ze zwiększaniem powierzchni dostępnej zapisowi, czyli w praktyce zwiększaniem liczby tarcz w jednym urządzeniu. Po wyczerpaniu takiej możliwości dalszy wzrost jest możliwy tylko dzięki zmniejszeniu obszaru przeznaczonego na zapisywanie pojedynczej informacji. Ta druga możliwość wiąże się jednak ze zmniejszeniem sygnału, który może być użyty do odczytu informacji. Potrzebne są coraz czulsze sensory będące sercem (głową?) głowic.

Sama magnetorezystancja, zmiana oporu elektrycznego przewodnika magnetycznego pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, jest zjawiskiem znanym od 150 lat. Różnica wartości konduktancji jest jednak zbyt mała, żeby zjawisko to można było zastosować do produkcji głowic.

Dla materiałów ferromagnetycznych dodatkowo opór zależy od wzajemnej konfiguracji magnetyzacji i przepływu prądu. Okazuje się, że jest to związane z zależnością oporu od spinu elektronów przewodnictwa. Jeżeli spin jest zgodny z kierunkiem magnetyzacji, to opór jest mniejszy niż w przeciwnym przypadku.

Opór przewodnika ma dwa źródła. Po pierwsze – jest on związany z drganiem cieplnymi, po drugie – z domieszkami i innymi defektami sieci krystalicznej. Defekty takie są ekranowane przez elektrony przewodnictwa, powodując periodyczne zaburzenie gęstości stanów w zależności od odległości od defektu. W przypadku materiałów ferromagnetycznych analogiczne zjawisko prowadzi do sprzężenia między sąsiednimi domieszkami, które to sprzężenie, w zależności od odległości, powoduje tendencję do zgodnego albo przeciwnego magnesowania się sąsiednich obszarów. Efekty te są istotne tylko dla odległości rzędu kilku stałych siatki, więc w zwykłych materiałach uśredniają się.

Sytuacja uległa zmianie w latach osiemdziesiątych, gdy dzięki rozwinięciu technik epitaksjalnych możliwe stało się wytwarzanie kilkuatomowych warstw. Okazało się, że w przekładanicy ferromagnetyk-metal-ferromagnetyk

możliwe jest takie dobranie grubości zwykłego metalu, żeby magnetyzacja warstw ferromagnetycznych była przeciwna. Wtedy przyszedł czas, żeby zadać pytanie, co się stanie, jeżeli do tak przygotowanej kanapki przyłożymy zewnętrzne pole magnetyczne. W zasadzie odpowiedź była znana, a przynajmniej łatwa do przewidzenia. W odpowiednio silnym polu magnetycznym obie warstwy, pomimo sprzężenia między nimi, zostaną namagnesowane identycznie.

Jak wtedy zmieni się opór elektryczny kanapki? Przed przyłożeniem pola opór dla elektronów o spinie zgodnym z magnetyzacją pierwszej warstwy był sumą oporów warstw i wynosił  $r + R$  ( $r < R$ ), a dla elektronów o spinie przeciwnym  $R + r$ , więc opór zastępczy, który można obliczyć, przyjmując model równoległego połączenia oporów, wynosił  $\mathcal{R}_0 = (R + r)/2$ .

Po przyłożeniu zewnętrznego pola jeden kierunek spinu elektronów stanie się uprzywilejowany i opór dla niego wyniesie  $2r$ , a dla polaryzacji przeciwniej  $2R$ , a więc opór zastępczy będzie równy  $\mathcal{R}_H = 2rR/(R + r)$ . Łatwo sprawdzić, że odpowiada to obniżeniu oporu o  $\Delta\mathcal{R} = \mathcal{R}_0 - \mathcal{R}_H = (R - r)^2/2(R + r)$ .

Okazuje się, że wystarczyło 20 lat temu to sprawdzić, żeby jeszcze w bieżącym roku odebrać Nagrodę Nobla.

Jeden z nagrodzonych sporządzał multikanapki (z około sześćdziesięciu warstw), które wkładał do (ciekłohelej) lodówki, gdzie zaobserwował spadek oporu aż o 50%. Drugi zadowolili się najprostszą możliwą kanapką trzymaną w pokoju (tzn. w temperaturze pokojowej), uzyskując mniejszy, ale nadal „gigantyczny” spadek oporu o 10%.

Wystarczyło poczekać dekadę, żeby technika produkcji takich kanapek została doprowadzona do takiej perfekcji z jednej, a obniżenia kosztów z drugiej strony, żeby każdy mógł sobie kilka takich kanapek, umieszczonych w jednym „twardzieliu”, za jedyne kilkaset złotych kupić, a następnie cieszyć się zewnętrzną pamięcią o pojemności dochodzącej już do terabajtów.

Należy jednak podkreślić, że sam postęp technologiczny nie wystarczyłby do utrzymania obserwowanego wzrostu pojemności dysków komputerowych. Utrzymanie go będzie wymagało zastosowania następnych efektów kwantowych. Jednym z nich jest zjawisko tunelowania, które można obserwować w podobnej kanapce z przekładką z izolatora. Bardzo bliskie komercjalizacji jest użycie takich kanapek do produkcji magnetycznej pamięci operacyjnej MRAM, która powinna być równie szybka, ale w której informacja nie ginie po wyłączeniu zasilania.

Ale to jeszcze nie wszystko. Prace tegorocznych noblistów zapoczątkowały nową dziedzinę zwaną spintroniką, której praktyczny aspekt polega na wykorzystywaniu do przesyłania i przetwarzania informacji nie tylko ładunku, lecz również spinu nośników prądu.

W każdym razie dobrze sobie co jakiś czas uzmysłwić, że bez badań podstawowych, które w zasadzie służą jedynie zaspokajaniu naszej ciekawości, nawet do technologii kamienia łupanego byśmy nie doszli.

Piotr ZALEWSKI