

Spintronika

TOMASZ DIETL

Instytut Fizyki

Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski

dietl@ifpan.edu.pl

Czy da się osiągnąć stały rozwój elektroniki poprzez proste zmniejszanie rozmiarów tranzystorów w mikroprocesorach oraz komórek pamięci ferromagnetycznych twardych dysków i optycznych na płytach DVD? Źródłem przełomu w nanotechnologii może stać się spintronika

Rewolucja informacyjna, w której uczestniczymy już od kilku dziesięcioleci, zachodzi dzięki systematycznemu zwiększaniu się – zgodnie z wykładniczym prawem Moore’a – ilości informacji, która może być przetwarzana, przechowywana i przesyłana przez jednostkę powierzchni odpowiednio mikroprocesorów, pamięci i światłowodów. Nowoczesny układ scalony zawiera obecnie blisko miliard tranzystorów, każdy z nich o rozmiarze poniżej $100 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$, tysiąc razy mniej niż grubość włosa. Przekroczenie symbolicznej granicy 100 nm oznacza, że z początkiem XXI wieku wkroczyliśmy w erę nanotechnologii. Wraz ze zmniejszaniem rozmiarów tranzystorów rośnie ich szybkość działania i spada cena – koszt produkcji jednego tranzystora jest dzisiaj znacznie niższy niż wydrukowania jednej litery.

Czy nieustanny postęp da się jednak osiągnąć dzięki samej miniaturyzacji? Pomimo 40-letnich sukcesów laboratoriów przemysłowych na drodze pokonywania kolejnych barier technicznych i fizycznych panuje przekonanie, że w niedługiej przyszłości nastąpi *jakościowa* zmiana w metodach przetwarzania, przechowywania, szyfrowania i przesyłania informacji. Z tego względu rządy wielu krajów finansują międzydziedzinowe ambitne programy naukowe, których celem jest aktywny udział w tworzeniu nanotechnologii przyszłości.

Obiecujący kierunek

Wśród wielu propozycji ważne miejsce zajmuje spintronika. Jej celem jest poznanie zjawisk fizycznych związanych ze spinem elektronu oraz zaproponowanie, zaprojektowanie i wykonanie przyrządów, które by zjawiska te wykorzystywały. U podstaw nadziei związanych ze spintroniką leży dobrze znany fakt, że ze względu na nieistnienie monopoli magnetycznych przypadkowe pola magnetyczne są znacznie

słabsze niż pola elektryczne. Z tych względów pamięci magnetyczne są trwałe, natomiast pamięci wykorzystujące nagromadzony ładunek elektryczny (DRAM) wymagają częstego odświeżania.

Jednym z ambitniejszych celów spintroniki jest skonstruowanie magnetycznej pamięci o dowolnym dostępie – MRAM. Urządzenie to łączyłoby zalety pamięci magnetycznej i DRAM. Wymaga to opracowania takich metod namagnesowywania oraz odczytu kierunku namagnesowania, które byłyby całkowicie niezależne od układów mechanicznych. Ważnym krokiem na tej drodze byłoby opanowanie umiejętności kontroli namagnesowania izotermicznie – światłem lub polem elektrycznym, podobnie jak w pamięciach półprzewodnikowych DRAM, w których zapis informacji sterowany jest przyłożeniem napięcia do bramki odpowiedniego tranzystora typu MOSFET. W obecnych urządzeniach sterowanie namagnesowaniem (zapis informacji) wymaga stosunkowo dużych energii, gdyż wykorzystuje pole magnetyczne wywołane przez prąd elektryczny.

Opanowanie „inteligentniejszych” metod sterowania namagnesowaniem pozwoliłoby także na skonstruowanie tranzystorów spinowych, urządzeń zbudowanych z dwóch warstw przewodników ferromagnetycznych przedzielonych materiałem niemagnetycznym. Proste rozważania prowa-

Opanowanie „inteligentniejszych” metod sterowania namagnesowaniem pozwoliłoby także na skonstruowanie tranzystorów spinowych, urządzeń zbudowanych z dwóch warstw przewodników ferromagnetycznych przedzielonych materiałem niemagnetycznym

dzą do wniosku, że jeśli wstrzyknięte do warstwy niemagnetycznej nośniki zachowują kierunek spinu, to przewodnictwo elektryczne zależy od względnego kierunku wektorów namagnesowania w warstwach ferromagnetycznych. Stanowić to może energooszczędne i szybkie urządzenie przełączające, gdyż sterowanie prądem nie wymaga w nim zmiany koncentracji nośników. Oczywistym warunkiem pracy takiego tranzystora jest wydajne wstrzykiwanie spolaryzowanych spinowo nośników z materiału ferromagnetycznego do obszaru niemagnetycznego i brak procesów niszczących polaryzację spinową. Równocześnie poszukuje się metod wytwarzania i wykrywania prądów spinowych w przekonaniu, że ruch elektronów o przeciwnych spinach i kierunkach odbywa się bezstratnie, a może przenosić

EBS News



Dziś nowe perspektywy elektroniki otwiera wykorzystanie nie ładunku lecz spinu (wewnętrznego momentu pędu) elektronów

informację. Stanowiłoby to podstawę budowy urządzeń o znacznie zmniejszonym wydzieleniu się ciepła.

Bodaj najważniejszym wyzwaniem intelektualnym elektroniki spinowej jest stworzenie tzw. informatyki kwantowej. W światowych wysiłkach budowy podstaw teoretycznych tej nowej dziedziny wiedzy aktywnie uczestniczy m.in. rodzina Horodeckich z Gdańska. Zgodnie z pracami doświadczalnymi grupy Davida Awschaloma, szczególne znaczenie spinowych stopni swobody wynika z faktu, że zachowują one znacznie dłuższą spójność fazową niż orbitalne stopnie swobody. Spin elektronu nadaje się więc znacznie lepiej niż jego ładunek do praktycznej realizacji współczesnych idei dotyczących obliczeń numerycznych przy wykorzystaniu zasady superpozycji stanów kwantowych. Nanostruktury spinowe mogą więc zmienić nie tylko podstawy budowy elementów elektronicznych, ale także zasady obowiązującej od półwiecza architektury komputerowej. Warto zauważyć, że już pojawiły się na rynku i są instalowane urządzenia do szyfrowania kwantowego. W urządzeniach tych przesyłana informacja jest zako-

ńczona w polaryzacji światła, a jej niezauważone przejście i odczytanie przez intruza jest, jak się wydaje, niemożliwe.

Półprzewodniki ferromagnetyczne

Dzisiejsze badania w dziedzinie spintroniki dotyczą praktycznie wszystkich grup materiałów. Sądzi się jednak, że szczególnie ważne dla rozwoju spintroniki będą półprzewodniki ferromagnetyczne, gdyż łączą one uzupełniające się zalety materiałów półprzewodnikowych i metali ferromagnetycznych. Zasadniczym problemem badawczym jest tutaj stwierdzenie, w jakim stopniu metody z takim powodzeniem stosowane do kontroli gęstości i stopnia polaryzacji spinowej nośników w strukturach półprzewodnikowych mogłyby służyć do sterowania wielkością i kierunkiem namagnesowania. Inne ważne zagadnienie wiąże się z opracowaniem metod wstrzykiwania spinowo spolaryzowanych nośników do półprzewodników. Poza możliwościami budowy omawianych już czujników magnetooporowych oraz tranzystorów spinowych, wstrzykiwanie spolaryzowanych

Ku miniaturowym superkomputerom

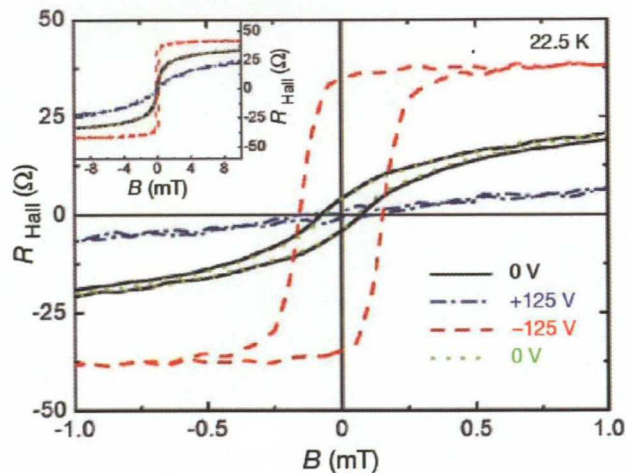
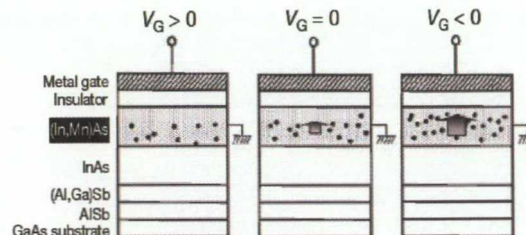
nośników stanowiąc może metodę szybkiej modulacji laserów półprzewodnikowych oraz pozwoliłoby na jednorodną pracę laserów o emisji powierzchniowej.

Ponieważ technologia struktur półprzewodnikowych jest najlepiej opanowana dla związków półprzewodnikowych z III-V i II-VI grupy układu okresowego, przełomowym osiągnięciem było wykrycie przez Hideo Ohno i współpracowników wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ i $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. W tych materiałach dwuwartościowe jony manganu wprowadzają zlokalizowane spiny i stanowią centra akceptorowe, które dostarczają dziur. W innej ważnej technologicznie grupie półprzewodników, w związkach II-VI grupy zawierających jony magnetyczne, gęstości spinów i nośników można zmieniać niezależnie, podobnie jak w materiałach z grupy IV-VI, w których kontrolowany przez dziury ferromagnetyzm został wykryty w Instytucie Fizyki PAN przez Tomasza Storego i Roberta R. Gałążkę już w latach 80. Badania rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych stanowią od końca lat 70. specjalność warszawskiej szkoły stworzonej przez Leonarda Sosnowskiego, a obecnie rozwijanej przez kilkunastu jego uczniów, dzisiaj profesorów.

We współpracy laboratoriów w Grenoble i Warszawie, kierowanych przez Yvesa Merle d'Aubigné i autora tego artykułu, podjęto kompleksowe badania wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w materiałach grupy II-VI zawierających mangan. Wykonane prace technologiczne i doświadczalne doprowadziły do wykrycia metodami magnetoopiecznymi przewidzianego teoretycznie przez autora ferromagnetyzmu w układzie dwuwymiarowym, tj. w modulacyjnie domieszkowanych studniach kwantowych $\text{Cd}_{x-1}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y-z}\text{Mg}_y\text{Zn}_z\text{Te:N}$, które otrzymano metodą epitaksji z wiązek molekularnych. Spodziewane korelacje ferromagnetyczne wykryto także w trójwymiarowym $\text{p-Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ i $\text{p-Be}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$.

Biorąc pod uwagę wyniki doświadczalne, autor tego artykułu opracował model teoretyczny ferromagnetyzmu indukowanego dziurami w półprzewodnikach grupy III-V i II-VI zawierających mangan. Pomimo złożonej sytuacji fizycznej, rozwinięty model teoretyczny pozwolił autorowi, a także Allanowi H. MacDonaldu i współpracownikom z Uniwersytetu Teksańskiego, na opis bez dobiealnych parametrów własności termodynamicznych, mikromagnetycznych, optycznych i transportowych szerokiej klasy rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych, a także sfalsyfikować konkurencyjne propozycje teoretyczne. Wyraża się często opinię, że w wyniku tych prac $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ stał się najlepiej rozumianym ferromagnetykiem. Materiał ten stanowi obecnie poligon do testowania różnych metod numerycznych obliczania własności nieuporządkowanych układów magnetycznych z pierwszych zasad.

Zrozumienie własności rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych pozwoliło autorowi i współpracownikom na zaproponowanie i wykazanie doświadczalnie istnienia nowych zjawisk, pozwalających na sterowanie namagnesowaniem naprężeniami, światłem, prądem i polem elektrycznym.



Jedno z nowych zjawisk, które pozwalają na sterowanie namagnesowaniem naprężeniami, światłem, prądem i polem elektrycznym. Zmiana własności ferromagnetycznej próbki $(\text{In,Mn})\text{As}$ przez pole elektryczne. W zależności od napięcia bramki pętla histerezy pojawia się lub znika

trycznym. Zjawiska te nie występują w innych ferromagnetykach. Otwiera to możliwość konstrukcji nowych urządzeń technologii informatycznych. Poszukiwanie nowych półprzewodników ferromagnetycznych o punkcie Curie powyżej temperatury pokojowej, zapoczątkowane sugestiami teoretycznymi autora, stanowi jedną z aktywniej rozwijających się gałęzi fizyki materiałowej.

Śledzeniem i przewidywaniem rozwoju technologii informacyjno-komunikacyjnych zajmuje się przedsiębiorstwo doradcze *International Technology Roadmap for Semiconductors*, współfinansowane przez wszystkie światowe potęgi przemysłowe w dziedzinie elektroniki półprzewodnikowej. W związku z ogromnym postępem badań w dziedzinie spintroniki półprzewodnikowej, w najnowszej ekspertyzie tej firmy *2004 Update - Emerging Research Devices* opisano po raz pierwszy tranzystory spinowe sugerując, że mogą one zastąpić stosowane z takim sukcesem od lat 60. unipolarne tranzystory krzemowe.

Chcesz wiedzieć więcej?

- Żutić I., Fabian J., Das Sarma S. (2004). Spintronics: Fundamentals and applications, *Rev. Mod. Phys.* 76, 323.
- Dietl T., Ohno H. (2003). Ferromagnetic III-V and II-VI Semiconductors, *MRS Bulletin*, str. 714.
- Dietl T. (2003). *Ferromagnetic semiconductor heterostructures*, *Europhysics News* 34 216.
- Wolf S.A., in. (2001). Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future, *Science* 294, 1488.