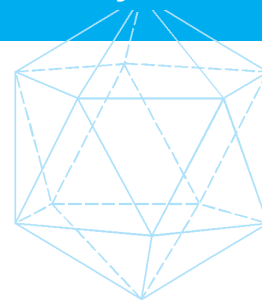




Osiągnięcia Nauki i Techniki Kierunki Rozwoju i Metody

KONWERSATORIUM POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Wkładka nr 6 do Miesięcznika Politechniki Warszawskiej nr 3/2006

Redaktor merytoryczny — Stanisław Janeczko



Nanospintronika

Na podstawie odczytu wygłoszonego w dniu XX 2005 roku

Tomasz Dietl

Instytut Fizyki PAN
i Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego
e-mail: dietl@ifpan.edu.pl

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, a każdy z nich ma rozmiar mniejszy od $100 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$, czyli jest kilkaset razy mniejszy od promienia 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 od kosztu wydrukowania jednej litery.

Czy jednak dalszy postęp przez proste zmniejszanie rozmiarów tranzystorów w mikroprocesorach oraz komórek pamięci ferromagnetycznych twardych dysków i optycznych na płytach DVD jest możliwy? Pomimo czterdziestoletnich sukcesów laboratoriów przemysłowych na drodze pokonywania kolejnych barier technicznych i fizycznych panuje przekonanie, że w **niedługoj przyszłości nastąpi jakościowa zmiana metod przetwarzania, przechowywania, szyfrowania i przesyłania informacji**. Z tego względu rządy wielu krajów finansują międzydziedzinowe ambitne progra-

my naukowe, których celem jest aktywny udział w tworzeniu nanotechnologii przyszłości.

Wśród wielu propozycji ważne miejsce zajmuje **spintronika**. Jej celem jest poznanie zjawisk fizycznych związanych ze spinem elektronu oraz zaproponowanie, zaprojektowanie i wykonanie przyrządów, które mogłyby wykorzystywać te zjawiska. 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.

Można zdefiniować kilka konkretnych problemów cząstkowych, które stoją przed **nanospintroniką** — nanotechnologią wykorzystującą własności spinowe. Intensywne prace badawcze i rozwojowe prowadzone w ostatnich latach doprowadziły do opracowania miniaturowego czujnika pola magnetycznego do odczytu informacji na twardym dysku. Działanie tego już stosowanego we wszystkich komputerach urządzenia spintronicznego wykorzystuje gigantyczny magnetoopór (GMR) naprzemiennych warstw zbudowanych z metali ferromagnetycznych, antyferromagnetycznych i paramagnetycznych. Zjawisko GMR zostało równolegle wykryte przez dwie grupy naukowców — zespół Alberta Ferta

z Orsay i zespół Petera Grünberga z Jülich. Zgodnie z teorią rozwinętą przez Józefa Barnasia z Poznania wynika ono ze wzrostu przewodnictwa elektrycznego w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, które porządkuje kierunek namagnesowania sąsiednich warstw. Obecnie prowadzone prace mają na celu zwiększenie magnetooporu przez wykorzystanie zjawiska tunelowania przez warstwę izolatora między metalami ferromagnetycznymi (TMR).

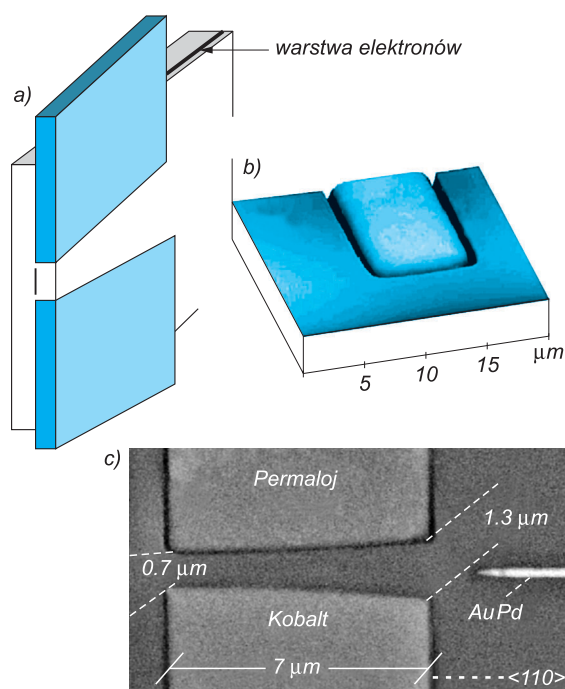
Znacznym ambitniejszym celem spintroniki jest skonstruowanie magnetycznej pamięci o dowolnym dostępie — MRAM. Urządzenie to łączyłoby zalety pamięci magnetycznej i DRAM. Wymaga to opracowania takich metod namagnesowywania oraz odczytu kierunku namagnesowania, które byłyby całkowicie niezależne od układów mechanicznych. Ważnym krokiem na tej drodze byłoby opanowanie umiejętności kontroli namagnesowania przy zastosowaniu metod izotermicznych — światłem lub prądem bądź 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 prowadzą do wniosku, że jeśli wstrzyknięte do warstwy niemagnetycznej nośniki zachowują kierunek spinu, to przewodnictwo elektryczne zależy od względnego kierunku wektorów namagnesowania w warstwach ferromagnetycznych. Wykorzystując to zjawisko można stworzyć 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 oraz 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 informację. Stanowiłoby to podstawę budowy urządzeń o znacznie zmniejszonym wydzielaniu 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 znacznie dłużej zachowują one spójność fazową niż orbitalne stopnie swobody. Spin elektronu nadaje się więc znacznie lepiej niż jego ładunek do prak-

tycznej realizacji współczesnych idei dotyczących obliczeń numerycznych przy wykorzystaniu zasady superpozycji stanów kwantowych. Nanostruktury spinowe, w tym wytworzony i badany w Warszawie nanofiltr spinowy Sterna-Gerlacha przedstawiony na rysunku 1, 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 zakodowana w polaryzacji światła, a jej niezauważone przejście i odczytanie przez intruza jest, jak się wydaje, niemożliwe.

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 struk-



Rysunek 1. Nanofiltr spinowy Sterna-Gerlacha z modułacyjnie domieszkowanej heterostruktury GaAs/AlGaAs otrzymany litografią elektronową. Gradient pola magnetycznego wytwarzają namagnesowane w przeciwnych kierunkach mikromagnesy z warstw kobaltu i permaloju (zaznaczone na niebiesko w a). Mikromagnesy umieszczone są w wytrawionych kanałach tak, aby ich środki znajdowały się w płaszczyźnie dwuwymiarowej warstwy elektronów (a i b — obraz z mikroskopu sił atomowych). W obecności gradientu pola magnetycznego prąd elektryczny w górnej i dolnej części nanostruktury (c — obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego) przenoszony jest przez elektrony o przeciwnych kierunkach spinów.

Źródło: J. Wróbel i in., Phys. Rev. Lett. 93, 246601 (2004)

turach 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 nośników stanowić może metodę szybkiej modulacji laserów półprzewodnikowych. Mogłoby także pozwolić na jednomodową pracę laserów o emisji powierzchniowej.

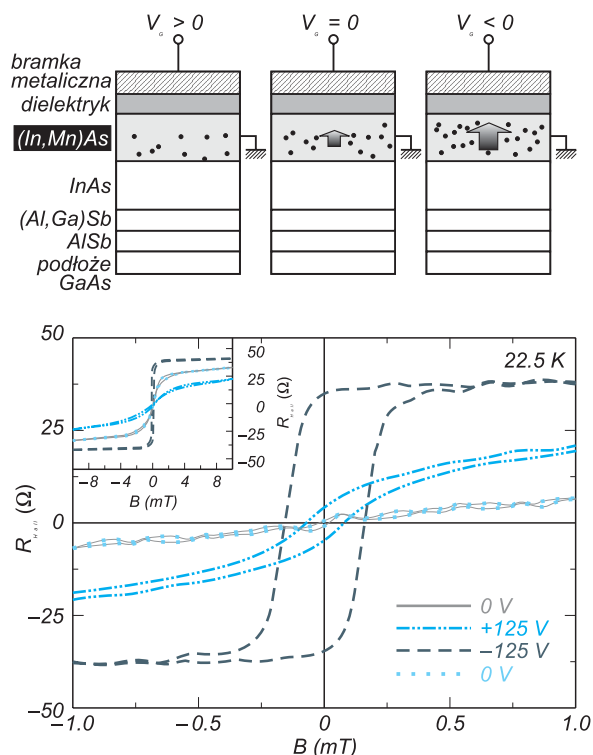
Ponieważ technologia struktur półprzewodnikowych jest najlepiej opanowana dla związków półprzewodnikowych grupy III–V i II–VI, przełomowym osiągnięciem było wykrycie przez Hideo Ohno i współpracowników ferromagnetyzmu wywołanego nośnikami w $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ i $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. W przypadku tych materiałów dwuwartościowe jony Mn wprowadzają zlokalizowane spiny i stanowią centra akceptorowe, które dostarczają dziury. Z kolei w innej ważnej technologicznie grupie półprzewodników, w związkach II–VI 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. Gałązkę już w latach osiemdziesiątych. Badania rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych stanowiły od końca lat siedemdziesiątych specjalność warszawskiej szkoły półprzewodników stworzonej przez Leonarda Sosnowskiego, a obecnie rozwijanej przez kilkunastu jego uczniów, dzisiaj profesorów.

W ramach współpracy między laboratoriami w Grenoble i w Warszawie, kierowanymi przez Yvesa Merle d'Aubigné i autora tego artykułu, podjęto kompleksowe badania ferromagnetyzmu wywołanego nośnikami w materiałach grupy II–VI zawierających Mn. Wykonane prace technologiczne i doświadczalne doprowadziły do wykrycia metodami magnetooptrycznymi przewidzianego teoretycznie przez autora ferromagnetyzmu w układzie dwuwymiarowym, czyli w modulacyjnie domieszkowanych studniach kwantowych $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y-z}\text{Mg}_y\text{Zn}_z\text{Te:N}$, 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 Mn. Przeprowadzone prace dowodzą, że rozcieńczone półprzewodniki ferromagnetyczne typu p łączą problemy fizyki domieszkowanych izolatorów magnetycznych z przeniesieniem ładunku i silnie skorelowanych nieuporządkowanych metali z zagadnieniami defektów i stanów elektronowych wysoko domieszkowanych półprzewodników. Pomimo tej złożonej sytuacji fizycznej, rozwinięty model teoretyczny pozwolił autorowi, a także Allanowi H. MacDonaldowi i współpracownikom z Uniwersytetu Teksańskiego, na opis bez dobieralnych parametrów własności termody-

namicznych, mikromagnetycznych, optycznych i transportowych szerokiej klasy rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych. Umożliwił także wykazanie niesłuszności konkurencyjnych propozycji teoretycznych. 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 służy obecnie do testowania różnych metod numerycznych obliczania własności nieuporządkowanych układów magnetycznych z pierwszych zasad.

Zrozumienie własności rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych umożliwiło autorowi i współpracownikom zaproponowanie i doświadczalne wykazanie istnienia wielu nowych zjawisk, które pozwalają na sterowanie namagnesowaniem za pomocą naprężeń, światła, prądu i pola elektrycznego, co przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Zjawiska te nie występują w innych ferromagnetykach, co otwiera możliwość konstrukcji nieznanych dotychczas urządzeń technologii informatycznych. W związku z tym poszukiwanie nowych półprzewodników ferromagnetycznych o punkcie Curie powyżej temperatury pokojowej, zapoczątkowane sugestiami teoretycznymi autora, zilustrowanymi na rysunku 4, stanowi jedną z aktywniej rozwijających się gałęzi fizyki materiałowej.

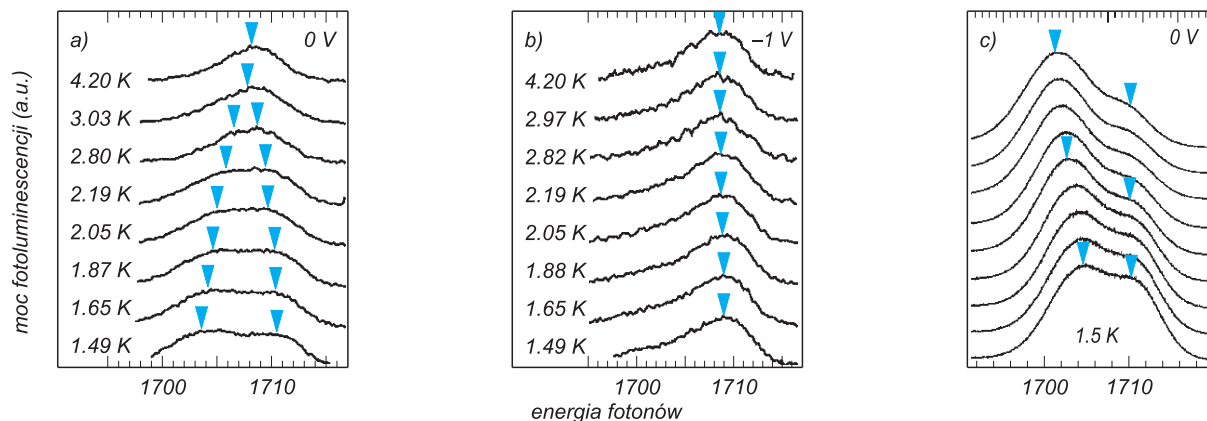
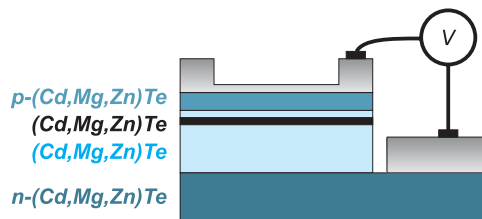


Rysunek 2. Tranzystor polowy z izolowaną bramką z kanałem typu p z $(\text{In,Mn})\text{As}$. W zależności od napięcia bramki, a więc koncentracji dziur, zależność od pola magnetycznego oporności Halla (która ze względu na anomalne zjawisko Halla jest proporcjonalna do namagnesowania) ma charakter liniowy odpowiadający fazie paramagnetycznej lub pętli histerezy odpowiadającej fazie ferromagnetycznej. Wstawka przedstawia oporność Halla w szerszym zakresie pól magnetycznych.

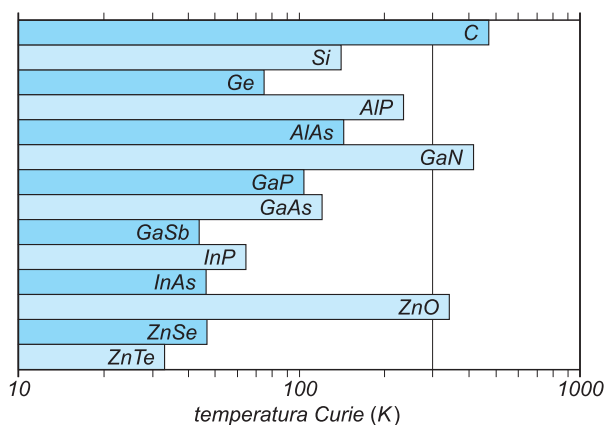
Źródło: H. Ohno i in., Nature 408, 944 (2000)

Rysunek 3. Widma fotoluminescencji (energia fotonów w meV) w obecności zewnętrznego pola magnetycznego struktury diody świecącej p-i-n zawierającej studnię kwantową $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Rozszczepienie linii (a) dowodzi uporządkowania ferromagnetycznego spinów Mn. Uporządkowanie znika, gdy przyłożone napięcie opróżnia studnię kwantową z dziur (b), a jest wzmacnione (c), gdy koncentracja dziur jest zwiększona przy pomocy dodatkowego oświetlenia.

Źródło: H. Boukari i in., Phys. Rev. Lett. 88, 207204 (2002)



Od lat śledzeniem i przewidywaniem rozwoju technologii informacyjno-komunikacyjnych zajmuje się wpływowe 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 ciągu ostatnich kilku lat, w najnowszej ekspertyzie tej firmy *2004 Update — Emerging Research Devices* po raz pierwszy opisano tranzystory spinowe sugerując, że mogą one zastąpić stosowane z takim sukcesem od lat 60. unipolarne tranzystory krzemowe.



Rysunek 4. Przewidywana teoretycznie temperatura uporządkowania ferromagnetycznego różnych półprzewodników typu p, w których podstawiono 5% Mn w miesza kationowe i w których jest $3,5 \cdot 10^{20}$ dziur w cm^3 .

Źródło: T. Dietl i in., Science 287, 1019 (2000); Phys. Rev. B 63, 195205 (2001)

Źródła rysunków

- [1] J. Wróbel, T. Dietl, A. Łusakowski, G. Grabecki, K. Fronc, R. Hey, K.H. Ploog, H. Shtrikman, *Spin Filtering in a Hybrid Ferromagnetic-Semiconductor Microstructure*, Phys. Rev. Lett. **93**, 246601 (2004).
- [2] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani, *Electric-Field Control of Ferromagnetism*, Nature **408**, 944 (2000).
- [3] H. Boukari, P. Kossacki, M. Bertolini, J. Cibert, S. Tatarenko, D. Ferrand, A. Wasiela, J.A. Gaj, T. Dietl, *Light and Electric Field Control of Ferromagnetism in Magnetic Quantum Structures*, Phys. Rev. Lett. **88**, 207204 (2002).
- [4] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, *Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors*, Science **287**, 1019 (2000); T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, *Hole-Mediated Ferromagnetism in Tetrahedrally Coordinated Semiconductors*, Phys. Rev. B **63**, 195205 (2001).

Literatura uzupełniająca

- [1] I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma, *Spintronics: Fundamentals and Applications*, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
- [2] T. Dietl, H. Ohno, *Ferromagnetic III-V and II-VI Semiconductors*, MRS Bulletin, Oct. 2003, p. 714.
- [3] T. Dietl, *Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures*, Europhysics News **34**, 216 (2003).
- [4] S.A. Wolf, D.D. Awschalom, R.A. Buhrman, J.M. Daughton, S. von Molnár, M.L. Roukes, A.Y. Chtchelkanova, D.M. Treger, *Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future*, Science **294**, 1488 (2001).

Angielska wersja tego artykułu ukazała się w czasopiśmie *Akademia*, no 3, 28 (2005).