

ELEKTRONIKA XXI WIEKU

Nowoczesny układ scalony zawiera obecnie blisko miliard tranzystorów, każdy o rozmiarze mniejszym niż 100 nm. Wraz z przekroczeniem tej symbolicznej granicy z początkiem XXI wieku wkroczyliśmy w erę nanotechnologii. Czy do dalszego utrzymania prawa Moore'a wystarczy proste zmniejszanie tranzystorów?

➤ TOMASZ DIETL

MIMO 40 LAT SUKCESÓW w pokonywaniu kolejnych barier technicznych i fizycznych panuje przekonanie, że w niedługiej przyszłości będzie musiała nastąpić jakościowa zmiana w metodach przetwarzania, przechowywania, szyfrowania i przesyłania informacji. Rządy wielu krajów finansują ambitne interdyscyplinarne programy naukowe. Wśród wielu propozycji ważne miejsce zajmuje spintronika, zajmująca się zjawiskami fizycznymi związanymi ze spinem elektronu oraz projektowaniem przyrządów, które by je wykorzystywały. Jej potencjalna atrakcyjność wynika z faktu, że ze względu na nieistnienie monopolu magnetycznych przypadkowe pola magnetyczne są znacznie słabsze od elektrycznych. To właśnie dlatego pamięci magnetyczne są trwalsze od wymagających częstego odświeżania pamięci DRAM (Dynamic Random Access Memory), które wykorzystują nagromadzony ładunek elektryczny.

Prace badawcze i rozwojowe ostatnich lat doprowadziły już do opracowania miniaturowego czujnika pola magnetycznego do odczytu informacji na twardym dysku. Czujnik wykorzystuje zjawisko gigantycznego magnetooporu (GMR) naprzemiennych warstw metali ferromagnetycznych, antyferromagnetycznych i paramagnetycznych, odkryte przez Alberta Fertę z Orsay i Petera Grünberga z Jülich, wyróżnionych w 2007 roku Nagrodą Nobla.

Zgodnie z teorią rozwiniętą przez prof. Józefa Barnasia z Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, GMR powstaje na skutek wzrostu przewodnictwa elektrycznego w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, które porządkuje kierunek namagnesowania sąsiednich warstw. Obecnie trwają prace nad zwiększeniem magne-

Fe. XXXXXXXXXX

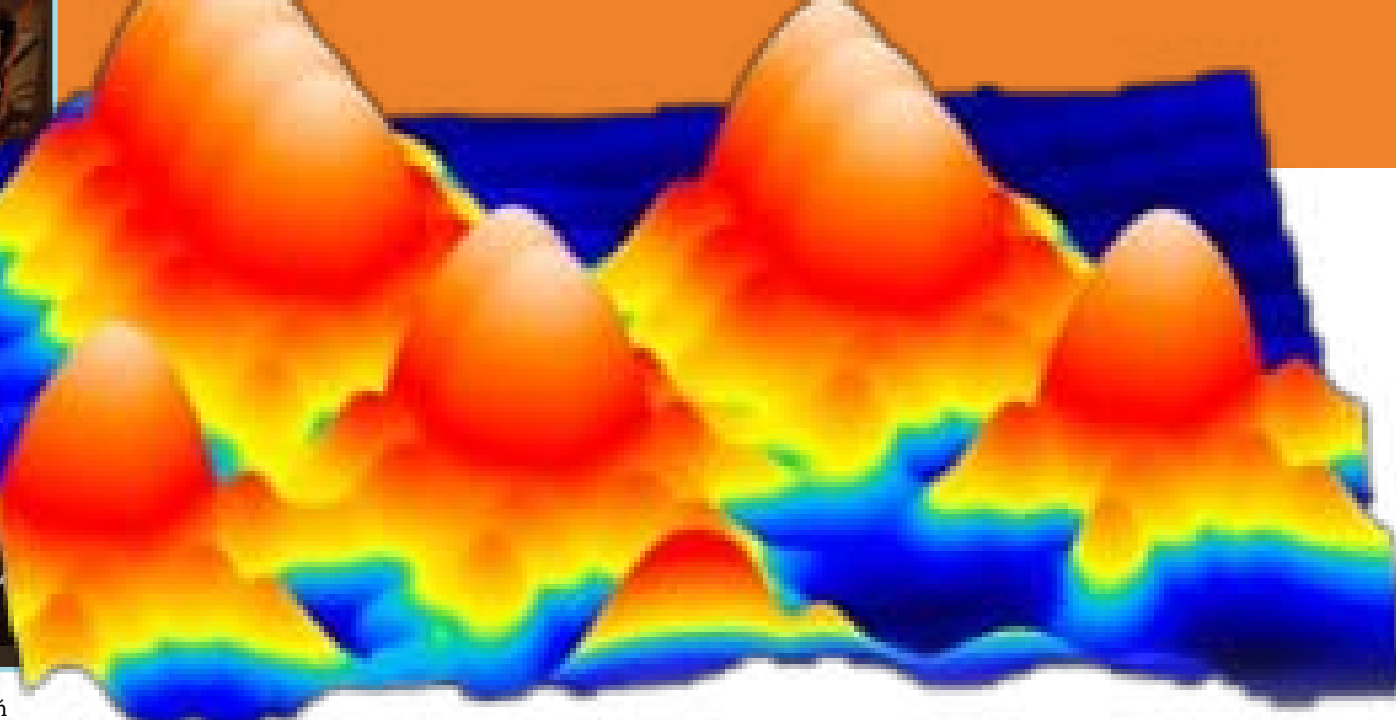


tooporu przez wykorzystanie zjawiska tunelowania przez warstwę izolatora między metalami ferromagnetycznymi (TMR). Są już pierwsze sukcesy. Zespół naukowców z prestiżowego japońskiego Uniwersytetu Tohoku i laboratoriów Hitachi, kierowany przez Hideo Ohno otrzymał struktury FeCo/MgO/FeCo, w których opór elektryczny rośnie dziesięciokrotnie, gdy kierunki namagnesowania okładek ze stopu FeCo stają się antyrównoległe. Pozwoliło to na skonstruowanie magnetycznej pamięci o dowolnym dostępie – MRAM. Tego rodzaju pamięć pozwala na zachowanie zawartości nawet po odłączeniu zasilania, a jednocześnie charakteryzuje się bardzo krótkim czasem dostępu i niemal nieograniczoną liczbą cykli zapisu i odczytu. Jest więc urządzeniem, które łączy zalety pamięci magnetycznej i DRAM.

Zbudowanie uniwersalnej pamięci wymaga opracowania metod namagnesowywania oraz odczytu kierunku namagnesowania, całkowicie niezależnych od układów mechanicznych. Ważnym krokiem byłoby opanowanie izotermicznej kontroli namagnesowania – światłem lub polem elektrycznym, podobnie jak w pamięciach półprzewodnikowych DRAM, w których zapis informacji jest sterowany przez przyłożenie napięcia do bramki odpowiedniego tranzystora typu MOSFET. W dostępnych już urządzeniach sterowanie namagnesowaniem (zapis informacji) wymaga stosunkowo dużych energii, ponieważ wykorzystuje pole magnetyczne wywołane przez prąd elektryczny. W wielu laboratoriach prowadzi się więc prace nad pamięciami magnetycznymi, w których do zapisu informacji wykorzystuje się prawo zachowania orbitalnego momentu pędu: w strukturze TMR o różnych kierunkach namagnesowania dwóch okładek zmiana namagnesowania w jednej z nich następuje w wyniku zmiany kierunku polaryzacji spinowej prądu elektrycznego płynącego w drugiej. Zespół Tohoku-Hitachi zbudował już prototypową 32 M-bitową pamięć ST-MRAM (spin torque MRAM) i wykazał, że hybrydowy układ scalony służący do dodawania liczb – zbudowany z kilkudziesięciu tranzystorów typu MOSFET i kilku elementów pamięci typu ST-TMR – działa szybciej i zużywa mniej energii niż sumator wykonany w tradycyjnej technologii krzemowej.

Opanowanie „inteligentniejszych” metod sterowania namagnesowaniem pozwoliłoby także na skonstruowanie tranzystorów spinowych – urządzeń zbudowanych z dwóch warstw przewodników ferromagnetycznych przedzielonych materiałem niemagnetycznym. Z prostych rozważań wynika, że jeśli wstrzyknięte do warstwy niemagnetycznej nośniki zachowują kierunek spinu, to przewodnictwo elektryczne zależy od względnego kierunku wektorów namagnesowania w warstwach ferromagnetycznych. Tranzystor spinowy byłby więc energooszczędnym i szybkim urządzeniem przełączającym, ponieważ sterowanie prądem nie wymagałoby w nim zmiany koncentracji nośników. Oczywistym warunkiem pracy takiego tranzystora jest jednak 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 prze-

Powoli kończy się czas klasycznych urządzeń elektronicznych, wykorzystujących procesy wynikające z przepływu ładunku elektrycznego. Zaczyna się era spintroniki, bazującej na zjawiskach fizycznych związanych ze spinem elektronu.



Urządzenia do epitaksji z wiązek molekularnych są wykorzystywane do wzrostu struktur składających się z kilku lub kilkadziesiąt warstw atomowych poszczególnych substancji.

Struktury budowane na potrzeby spintroniki mają niekiedy grubość kilku-kilkudziesięciu warstw atomowych. Nic więc dziwnego, że do ich obrazowania wykorzystuje się zdjęcia ze skaningowego mikroskopu tunelowego. Tu obraz ze skaningowego mikroskopu tunelowego pokazujący oddziaływania ferromagnetyczne pomiędzy chmurami elektronowymi atomów magnezu (czerwony i żółty) w arsenku galu (niebieski). Takie struktury umożliwią z czasem stworzenie nowoczesnych pamięci magnetycznych.

➤ nosić informację. Umożliwiłyby to budowę urządzeń o znacznie zmniejszonym wydzieleniu ciepła.

Informacja zapisana w spinie

Bodaj najważniejszym wyzwaniem intelektualnym elektroniki spinowej jest stworzenie tzw. informatyki kwantowej. W światowych wysiłkach budowy podstaw teoretycznych tej nowej dziedziny wiedzy aktywnie uczestniczy rodzina Horodeckich z Gdańska – fizycy ojciec i dwóch synów. Zgodnie z wynikami prac doświadczalnych grupy Davida Awschaloma z University of California w Santa Barbara, szczególne znaczenie spinowych stopni swobody wynika stąd, że zachowują one znacznie dłuższą spójność fazową niż orbitalne stopnie swobody. Urządzenia spinowe byłyby więc, z punktu widzenia konstruktorów urządzeń, trwalsze od elektronicznych. Spin elektronu nadaje się więc znacznie lepiej niż jego ładunek do praktycznej realizacji współczesnych idei obliczeń numerycznych z wykorzystaniem zasady superpozycji stanów kwantowych. Nanostruktury spinowe mogą zmienić nie tylko podstawy budowy elementów elektronicznych, ale także obowiązujące od półwiecza zasady architektury komputerowej. Warto zauważyć, że pojawiły się już na rynku urządzenia do szyfrowania kwantowego. Przesyłana w nich informacja jest zakodowana w polaryzacji światła, a jej niezauważone przechwycenie i odczytanie przez intruza jest, jak się wydaje, niemożliwe.

Dzisiejsze badania w dziedzinie spintroniki dotyczą praktycznie wszystkich grup materiałów. Duże zainteresowanie budzą półprzewodniki ferromagnetyczne, ponieważ łączą zalety materiałów półprzewodnikowych i metali ferromagnetycznych. Istotne jest w tym przypadku, 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. Inny problem wymagający rozwiązania to opracowanie sposobu wstrzykiwania spinowo polaryzowanych nośników do półprzewodników, który umożliwiłoby nie tylko budowę wspomnianych czujników magnetooporowych oraz tranzystorów spinowych, ale także mogłoby posłużyć do szybkiej modulacji laserów półprzewodnikowych oraz pozwolić na jednorodną pracę laserów o emisji powierzchniowej.

Ponieważ technologię struktur półprzewodnikowych najlepiej opanowano dla związków półprzewodnikowych grup III-V i II-VI układu okresowego, przełomowym osiągnięciem było wykrycie przez Hideo Ohno i współpracowników wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w związkach $In_{1-x}Mn_xAs$ i $Ga_{1-x}Mn_xAs$. W przypadku tych materiałów dwuwartościowe jony manganu wprowadzają zlokalizowane spiny i stanowią centra akceptorowe, dostarczające dziury. Z kolei w innej ważnej technologicznie grupie półprzewodników, w związkach grupy II-VI zawierających jony magnetyczne, gęstości spinów i nośników można zmieniać niezależnie. Podobnie dzieje się w materiałach z grupy IV-VI, w których kontrolowany przez dziury ferromagnetyzm wykryli już w latach 80. Tomasz Story i Robert R. Gałązka z Instytutu Fizyki PAN. Badania rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych stanowią od końca lat 70. specjalność warszawskiej szkoły półprzewodników stworzonej przez Leonarda Sosnowskiego, a obecnie rozwijanej przez kilkunastu jego uczniów, dzisiaj profesorów.

Ferromagnetyk najlepiej poznany

Naukowcy ze współpracujących ze sobą laboratoriów w Grenoble i Warszawie, kierowanych przez Yvesa Merle d'Aubigné i autora tego artykułu, zbadali wywołany nośnikami ferromagnetyzm w materiałach grupy II-VI zawierających mangan. Wspomniane prace doprowadziły do wykrycia metodami magnetoopcyjnymi przewidzianego teoretycznie przez autora ferromagnetyzmu w układzie dwuwymiarowym, tj. w modulacyjnie domieszkowanych studniach kwantowych $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-yz}Mg_zZn_zTe:N$, które otrzymano metodą epitaksji z wiązek molekularnych. Spodziewane korelacje ferromagnetyczne wykryto także w trójwymiarowym $p-Zn_{1-x}Mn_xTe$ i $p-Be_{1-x}Mn_xTe$.

Na podstawie wyników doświadczalnych autor tego artykułu opracował model teoretyczny ferromagnetyzmu indukowanego dziurami w półprzewodnikach grupy III-V i II-VI zawierających mangan. Okazało się, że w przypadku rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych typu p występują zarówno problemy fizyki domieszkowanych izolatorów magnetycznych z przeniesieniem ładunku, silnie sko-

relowanych nieuporządkowanych metali, jak i zagadnienia defektów i stanów elektronowych wysoko domieszkowanych półprzewodników. Mimo tej złożonej sytuacji fizycznej rozwinięty model teoretyczny pozwolił autorowi, a także Allanowi H. MacDonaldu i współpracownikom z Uniwersytetu Teksańskiego, na opis własności termodynamicznych, mikromagnetycznych, optycznych i transportowych szerokiej klasy rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych, a także na falsyfikację konkurencyjnych propozycji teoretycznych. Mówi się nawet często, że w wyniku tych prac $Ga_{1-x}Mn_xAs$ stał się najlepiej rozumianym ferromagnetykiem.

Zrozumienie własności rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych pozwoliło autorowi i współpracownikom na doświadczalne wykazanie istnienia nowych zjawisk, które pozwalają sterować namagnesowaniem za pomocą naprężeń, światła, prądu i pola elektrycznego. Wiele z tych efektów nie występuje w innych ferromagnetykach, co umożliwia konstrukcję nieznanych dotychczas informatyce urządzeń. W konsekwencji jedną z najintensywniej rozwijających się dziedzin fizyki materiałowej jest obecnie poszukiwanie nowych półprzewodników ferromagnetycznych o punkcie Curie powyżej temperatury pokojowej. Ponadto wiele zespołów, zainspirowanych wynikami otrzymanymi dla półprzewodników ferromagnetycznych, poszukuje metod zmiany kierunku namagnesowania w metalach ferromagnetycznych przez wpływ pola elektrycznego na anizotropię magnetyczną cienkich warstw metalicznych.

O tym, że spintronika ma przyszłość, świadczą też dobitnie najnowsze ekspertyzy International Technology Roadmap for Semiconductors – firmy doradczej od lat specjalizującej się w śledzeniu i przewidywaniu rozwoju technologii informacyjno-komunikacyjnych, współfinansowanej przez wszystkie światowe potęgi przemysłowe w dziedzinie elektroniki półprzewodnikowej. Po raz pierwszy opisała w swych raportach tranzystory spinowe – sugerując, że mogą one zastąpić stosowane z takim sukcesem od lat 60. krzemowe tranzystory unipolarne. ❏

➤ PROF. DR HAB. TOMASZ DIETL, Instytut Fizyki PAN, Instytut Fizyki Teoretycznej UW

EPITAKSJA Z WIĄZEK MOLEKULARNYCH – technika tworzenia supercienkich kanapek – struktur składających się z kilku lub kilkadziesiąt warstw poszczególnych substancji. Każda warstwa ma grubość zaledwie kilku atomów. W tak mikroskopowych strukturach można odkryć efekty nieobserwowane w większej skali.

PÓŁPRZEWODNIKI MAGNETYCZNE – półprzewodniki w których część atomów ma własności magnetyczne. Jeżeli takie własności ma tylko niewielka część atomów półprzewodnika, nazywamy go rozcieńczonym półprzewodnikiem magnetycznym.

SPIN – własność cząstek mikroświata, ich własny moment pędu. W dużym przybliżeniu elektrony można sobie wyobrazić jako wirujące miniaturowe magnesy różniące się między sobą spinem, czyli kierunkiem ustawienia w przestrzeni

MONOPOLE MAGNETYCZNE – hipotetyczne cząstki, nośniki pojedynczego ładunku magnetycznego: północnego lub południowego.

GIGANTYCZNY MAGNETOOPÓR – płynący w metalach prąd to strumień poruszających się elektronów. Opór metalu wiąże się z tym, że droga elektronów nie jest idealnie gładka – w trakcie ruchu „objają” się one o niedoskonałości struktury metalu. W szczególnym rodzaju materiałów zwanych magnetycznymi, np. w żelazie, znaczenie ma też fakt, że spin elektronów może być ustawiony równolegle lub przeciwnie do kierunku namagnesowania danego materiału. Opór, jakiemu podlegają elektrony, zależy od tego ustawienia. Urządzenie zbudowane z dwóch warstw materiałów magnetycznych przedzielonych materiałem niemagnetycznym (niewrażliwym na działanie pola magnetycznego) pozwala na odczytanie informacji niesłyszalnie gęsto zapisanych na dysku. Można więc na nim zapisywać olbrzymie ilości danych.

MATERIAŁY FERROMAGNETYCZNE – substancje wykazujące własne, spontaniczne namagnesowanie. Można je sobie wyobrazić jako zbudowane z maleńkich igiełek magnetycznych, które samodzielnie ustawiają się tym samym kierunkiem. Typowymi ferromagnetykami są żelazo i nikiel.

MATERIAŁY ANTYFERROMAGNETYCZNE – substancje o budowie podobnej do ferromagnetyków. Jednak poszczególne atomy ustawiają się w nich antyrównolegle, tzn. przeciwnie do siebie. Typowym antyferromagnetykiem jest mangan.

PUNKT CURIE – temperatura, powyżej której dana substancja traci swoje właściwości ferromagnetyczne.

MATERIAŁY PARAMAGNETYCZNE – substancje słabo przyciągane przez magnesy. Zwykle zmieniają się w nie ferromagnetyki, podgrzane powyżej temperatury Curie.

TUNELOWANIE – zjawisko kwantowe, podczas którego cząstka przechodzi przez barierę potencjału o wysokości większej niż jej energia. Innymi słowy, podczas tunelowania cząstka kwantowa może pokonać przeszkody pozornie nie do pokonania.

STUDNIA KWANTOWA – studnia potencjału powodująca ograniczenie przestrzenne cząstek (np. elektronów) w pewnym obszarze (np. warstwie półprzewodnika).