
Dlaczego półprzewodniki ferromagnetyczne?

Tomasz Dietl

Instytut Fizyki PAN oraz Szkoła Nauk Ścisłych, Warszawa

1. Wstęp

Rewolucja informacyjna, której jesteśmy świadkami w kilku ostatnich dekadach, dokonała się głównie dzięki ogromnemu postępowi w sposobach przetwarzania, przechowywania i przesyłania informacji. Nie dziwi więc, że Komitet Noblowski postanowił w 2000 r. nagrodzić odkrycia, które legły u podstaw rozwoju elektroniki i fotoniki, a których dzisiejsze możliwości przekraczają wizjonerskie oczekiwania Richarda P. Feynmana [1]. Jack S. Kilby był jednym z twórców idei układów scalonych [2], które zawierają obecnie setki milionów elementów o rozmiarach submikrometrowych, a mimo to procesory i pamięci półprzewodnikowe są bardzo tanie i niezawodne. Z kolei Herbert Kroemer i Žores I. Al'fiorow zauważyli [3,4], że urządzenia zbudowane z połączonych warstw różnych półprzewodników umożliwiają otrzymanie szybszych tranzystorów i wydajniejszych laserów niż wytwarzane z homostruktur złączowych. Heterostruktuury są teraz powszechnie używane w telefonach komórkowych oraz w komunikacji satelitarnej i światłowodowej.

Można więc tę Nagrodę Nobla widzieć jako uhonorowanie dotychczasowych osiągnięć ery informacyjnej, a może nawet jako zamknięcie pewnej epoki. Sądzi się bowiem powszechnie, że dotychczasowa droga rozwoju elektroniki klasycznej, polegająca na miniaturyzacji tranzystorów i komórek pamięci, wyczerpuje swoje możliwości.

Pierwsza część artykułu, oparta na wcześniejszych pracach autora [5,6], poświęcona jest opisowi barier, które mogą spowolnić trwający od 40 lat wykładniczy wzrost wydajności urządzeń informatycznych. Przedstawione zostaną także różne sugestie dotyczące przyszłości nanotechnologii [6]. W możliwych scenariuszach ważne miejsce zajmuje elektronika spinowa (spintronika), której celem jest opracowanie nowych przyrządów, wykorzystujących w równym stopniu ładunek, co i spin elektronu. Po wyliczeniu zadań stojących przed spintroniką scharakteryzowane zostaną najbardziej obiecujące grupy materiałów. Szczególnie duże nadzieje wiązane są z półprzewodnikami ferromagnetycznymi, których własnościom poświęcony jest ostatni rozdział artykułu.

2. O przeszłości nanotechnologii

Mimo że – jak ktoś zauważył – przewidywanie nie jest trudne, chyba że dotyczy przyszłości, spróbujmy zastanowić się nad możliwymi scenariuszami rozwoju mikroelektroniki. Jeden z nich jest podobny do zrealizowanego w przypadku podróży przez oceany – jak wiemy, prędkość pasażerskich samolotów transkontynentalnych nie zmienia się od ponad 20 lat. Także w mikroelektronice bariera finansowa (koszt budowy fabryki mikroprocesorów sięga 2 mld dolarów), psychologiczna (opór przed nowościami oraz brak motywacji dla zwiększania potencjału informatycznego), prawna (ochrona praw autorskich, zapobieganie rozpowszechnianiu się terroryzmu i pornografii przez Internet) itp. mogą spowodować załamanie się prawa Moore'a, zgodnie z którym liczba elementów w jednym układzie scalonym podwaja się co 18 miesięcy.

Uważa się jednak dość powszechnie, że budowanie coraz lepszych systemów informatycznych będzie jeszcze przez długi czas uzasadnione. Sądzi się bowiem, że np. przejście od obecnych obliczeń gigaflopowych (10^9 operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) do penta-flopowych otworzy zupełnie nowe możliwości zarówno w świecie rozrywki wirtualnej, jak i np. w symulacjach procesów chemicznych i biologicznych oraz – ze względu na szybkie rozpoznawanie kształtów – w dziedzinie sterowania „na żywo”. Chociaż rozwój możliwości obliczeniowych jest imponujący, warto przypomnieć, że obecnie potrafimy opisywać na podstawie pierwszych zasad ewolucję jedynie w czasie krótszym niż 10 ps, i to układów, które zawierają nie więcej niż sto atomów.

Czy jednak dalszy postęp przez proste zmniejszanie rozmiarów tranzystorów krzemowych z izolowaną bramką (MOSFET-ów) oraz komórek pamięci ferromagnetycznych i optycznych jest możliwy? Słysz się opinie, że dzisiejsza technologia i jej rozwój wg wykładniczego prawa Moore'a będzie trwał nie dłużej niż 5 do 10 lat. Wiąże się to z wieloma trudnościami technicznymi, często dość prozaicznymi, np. mniejszym problemem jest dzisiaj przyspieszenie pracy procesora niż zlikwidowanie opóźnień przenoszenia sygnałów przez jego obudowę... Są też oczywiście bariery o charakterze bardziej podstawowym – dyfrakcyjne ograniczenie rozdzielczości w litografii, rosnące prawdo-

podobieństwo błędu, ziarnistość materii i ładunku elektrycznego, zjawiska kwantowe, np. tunelowanie elektronów przez izolator lub tunelowanie namagnesowania pomiędzy dwoma stanami pamięci ferromagnetycznych, czy wreszcie problem minimalnej energii potrzebnej do wykonania jednej operacji i wydzielania się jej w postaci ciepła.

W tej sytuacji wiele laboratoriów przemysłowych, państwowych i uniwersyteckich prowadzi badania w dziedzinie nanostruktur lub, szerzej, nanotechnologii. Nie jest jednak ciągle jasne, jaka technologia będzie dominowała w przyszłości. Wiadomo jedynie, że scalaniu elementów coraz częściej będzie towarzyszyło łączenie funkcji: procesorów, pamięci, czujników, aktywatorów itp. Elementy elektroniczne i fotonowe będą więc scalane z podzespołami magnetycznymi i nanomechanicznymi. Wydaje się przy tym, że litografia w coraz większym stopniu będzie zastępowana syntezą elementów, a technologia planarna – trójwymiarową. Wykorzystywać się tu będzie samorganizujący się wzrost w metodach epitaksjalnych, ale także syntezę organiczną i biologiczną oraz nowe metody manipulacji pojedynczymi cząsteczkami i atomami. Zbliżyć to nas może do praktycznej realizacji idei elektroniki molekularnej. Ze względu na profilaktykę i medycynę przyszłości szczególnie ważna będzie umiejętność bezpośredniego scalania tkanek w żywych organizmach z nanoelementami elektronicznymi i mechanicznymi.

Znacznym zmianom mogą też ulec nośniki informacji. Dzisiaj do przetwarzania informacji służy ładunek elektronu, a jego wewnętrzny moment pędu (spin) – do jej przechowywania. Uważa się, że będzie zwiększała się rola fotonów, które już obecnie wykorzystywane są do przenoszenia, kodowania i zapisywania informacji. Poza elektronami i fotonami wiele grup badawczych nadzieje wiąże np. z wirami prądu w nadprzewodnikach II rodzaju (wirami Abrikosowa) i strumieniami pola magnetycznego w nanocewkach nadprzewodzących.

Jeśli spojrzeć na przyszłość nanotechnologii od strony materiałów, to widać zainteresowanie heterostrukturami krzemu z germanem i węglem. Pozwalają one nie tylko przyspieszyć szybkość tranzystorów, ale także umożliwią – jak się sądzi – rozciągnięcie dominacji krzemu na obszar fotoniki i optoelektroniki, gdzie dzisiaj królują związki pierwiastków z grupy III i V, np. GaAs.

Ze względu na możliwość działania w wysokiej temperaturze oraz generacji światła w szerokim zakresie widmowym znaczną rolę mogą odegrać związki SiC i GaN, a także... diament. Rosnące znaczenie może przypaść nieprzeliczalnie bogatej rodzinie związków organicznych, z takim powodzeniem wykorzystywanych przez mózg. Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych skierowało uwagę ku tlenkom. Materiały te są nie tylko nadprzewodnikami, ale wykazują niezwykle własności magnetyczne, tak że coraz częściej słyży się o elektronice tlenkowej.

Obok zmian zasad działania poszczególnych elementów, które zapewne będą wykorzystywały to, co dzisiaj przeszkadza – tunelowanie, interferencję, ziarnistość materii – można oczekiwać nowych odkryć w dziedzinie architektury komputerowej. Wydaje się np., że zjawiska w układach nieuporządkowanych, chaotycznych, chemicznych i biologicznych, które mozolnie symulujemy przy użyciu dzisiejszych komputerów, będą służyły do szybkiego wykonywania obliczeń wg algorytmu narzuconego przez charakter danego zjawiska. Szczególnie ważny i płodny pomysł, także Feynmana [7], wiąże się z wykorzystaniem do obliczeń ewolucji kwantowej układów fizycznych. Może się też okazać, że połączenia w obwodach scalonych będą tworzone w sposób przypadkowy, a zamiast dzisiejszego odrzucania procesorów z błędami, przeznaczenie poszczególnych egzemplarzy będzie określone dopiero po ich wykonaniu.

3. Spintronika

Elektronika spinowa (spintronika) stanowi bardzo młodą, interdyscyplinarną dziedzinę wiedzy. Jej rozwój, podobnie jak i dziedzin konkurencyjnych – elektroniki molekularnej, bioelektroniki, elektroniki polimerów itp. – wynika ze wspomnianego już przekonania, że dotychczasowa droga rozwoju elektroniki klasycznej, polegająca na miniaturyzacji elementów czynnych (komórek pamięci i tranzystorów), mimo ogromnego postępu technologicznego, który przyniosła, zbliża się już do granic swoich możliwości.

Głównym zadaniem elektroniki spinowej jest poznanie zjawisk fizycznych związanych ze spinem elektronu oraz zaproponowanie, zaprojektowanie i wykonanie przyrządów je wykorzystujących. U podstaw nadziei związanych z elektroniką

spinową leży dobrze znany fakt, że w otaczającym nas świecie 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.

Już obecnie można zdefiniować kilka konkretnych problemów cząstkowych, które stoją przed elektroniką spinową. Jednym z nich jest konstrukcja wydajnych miniaturowych czujników pola magnetycznego, które mogłyby zastąpić cewkę magnetyczną przy odczycie informacji. Jest bowiem oczywiste, że zwiększanie rozdzielczości przestrzennej wymaga zmniejszania cewki, co jednak obniża jej czułość. Intensywne prace badawcze i rozwojowe prowadzone w ciągu ostatnich kilku lat doprowadziły do opracowania układu, który znacznie polepsza odczyt informacji magnetycznej. Jego działanie wykorzystuje silny („gigantyczny”) magnetoopór (GMR) naprzemiennych warstw zbudowanych z metali ferromagnetycznych, antyferromagnetycznych i paramagnetycznych [8,9]. Zjawisko GMR wynika ze wzrostu przewodnictwa elektrycznego w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, które porządkuje kierunek namagnesowania sąsiednich warstw. W przeciwieństwie do tradycyjnych czujników hallowskich, GMR jest zjawiskiem zależnym od spinu elektronu, a nie od ładunku, tj. od siły Lorentza. Obecnie prowadzone prace mają na celu zwiększenie magnetooporu dzięki wykorzystaniu zjawiska tunelowania przez warstwę izolatora między metalami ferromagnetycznymi (TMR) [10], a także zbadanie roli blokady kulombowskiej, która pojawia się wraz ze zmniejszaniem rozmiarów złącza [11]. Dużą wartość magnetooporu (200% w temperaturze pokojowej) można uzyskać wykorzystując tranzystory spinowe [12]. Należy przy tym oczekiwać, że spodziewane parametry czujników TMR umożliwią ich zastosowanie nie tylko do odczytu pamięci, ale także jako detektorów położenia, np. w silnikach elektrycznych i spalinowych z miniaturowym magnezem na wale, gdzie dotychczas dominują sondy wykorzystujące zjawisko Halla (np. [13]). Warto tu podkreślić mało znany fakt, że już zastosowanie hallowskich czujników pola magnetycznego w przemyśle motoryzacyjnym spowodowało ogromne unowocześnienie dzisiejszych konstrukcji samochodowych,

czego najlepszymi przykładami są powszechnie już stosowane układy zapłonu bezstykowego oraz nieblokujących się hamulców (ABS).

Znacznie ambitniejszym celem elektroniki spinowej jest skonstruowanie magnetycznej pamięci o dowolnym dostępie – MRAM [14]. 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. Jest to przykład dziedziny, której postęp wymaga sprzężenia nauki o materiałach, nanotechnologii, fizyki mezoskopowej i wiedzy o oddziaływaniach spinowo-orbitalnych. Ważnym krokiem na tej drodze byłoby opanowanie umiejętności izotermicznego sterowania namagnesowaniem – za pomocą światła lub pola elektrycznego, podobnie jak w pamięciach półprzewodnikowych DRAM, w których zapis informacji jest sterowany przyłożeniem napięcia do bramki odpowiedniego tranzystora typu MOSFET. W obecnych urządzeniach sterowanie namagnesowaniem (zapis informacji) wymaga stosunkowo dużego poboru energii, gdyż wykorzystuje pole magnetyczne wywołane bądź przez prąd (prawo Oersted), bądź przez ogrzanie do temperatury Curie punktową wiązką lasera, co umożliwia obrót oświetlonej domeny za pomocą stosunkowo słabego pola magnetycznego.

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. Stanowić to może energooszczędne i szybkie urządzenie przełączające, gdyż sterowanie prądem nie wymaga w nim zmiany koncentracji nośników. Oczywiście warunkiem pracy takiego tranzystora jest wydajne wstrzykiwanie spolaryzowanych spinowo nośników z materiału ferromagnetycznego do obszaru niemagnetycznego oraz brak procesów niszczących polaryzację spinową.

Bodaj najważniejszym wyzwaniem intelektualnym elektroniki spinowej jest stworzenie tzw. in-

formatyki kwantowej (np. [15]). Szczególne znaczenie spinowych stopni swobody wynika stąd, że zachowują one znacznie dłuższą spójność fazową niż stopnie orbitalne. Spin elektronu nadaje się więc znacznie lepiej niż jego ładunek do praktycznej realizacji współczesnych i – należy to podkreślić – rewolucyjnych idei dotyczących obliczeń, kryptografii i teleportacji przy wykorzystaniu zasady superpozycji stanów kwantowych [16]. Nanostruktury spinowe [17] mogą zatem zmienić nie tylko podstawy budowy elementów elektronicznych, ale także zasady obowiązującej od półwiecza architektury komputerowej. Chociaż wykazano doświadczalnie, że czas życia spinowej polaryzacji elektronów w domieszkowanych półprzewodnikach może być o wiele rzędów wielkości dłuższy niż czas relaksacji pędowej [18], część badaczy sugeruje, że najbardziej obiecującym nośnikiem informacji kwantowej byłyby spiny jąder ^{31}P w izotopowo czystym ^{28}Si [19], gdzie czasy spójności fazowej mogą sięgać godzin. Należy tu podkreślić, że prace z dziedziny informatyki kwantowej mają dotychczas przede wszystkim charakter teoretyczny. Każde osiągnięcie doświadczalne, niezależnie od materiału czy warunków doświadczalnych, stanowiłoby przełom.

4. Półprzewodniki ferromagnetyczne

Dzisiejsze badania w dziedzinie spintroniki dotyczą praktycznie wszystkich grup materiałów, przy czym najbardziej zaawansowane są prace nad metalicznymi wielowarstwami ferromagnetycznymi, w których zjawiska zależnego od spinu rozpraszania i tunelowania elektronów wykorzystuje się do budowy miniaturowych czytników twardych dysków oraz do konstruowania wspomnianych już pamięci magnetycznych o dowolnym dostępie (MRAM). 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 zmiany 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 wstrzyki-

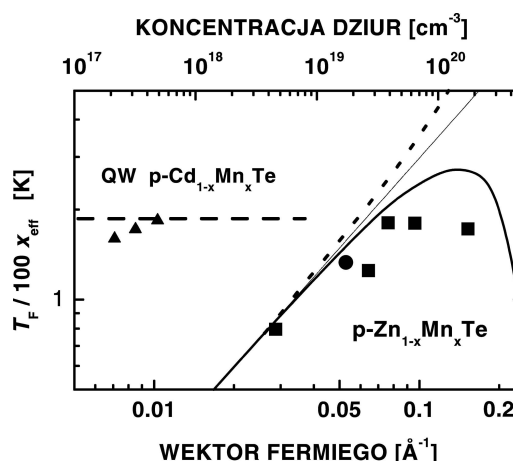
wania do półprzewodników spinowo spolaryzowanych nośników. Poza możliwościami budowy omawianych już czujników magnetooporowych oraz tranzystorów spinowych, wstrzykiwanie spolaryzowanych nośników stanowiąc może metodę szybkiej modulacji laserów półprzewodnikowych.

Ponieważ technologia struktur półprzewodnikowych jest najlepiej opanowana dla związków półprzewodnikowych grupy III–V, przełomowym osiągnięciem było wykrycie wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ i $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, odpowiednio w laboratoriach IBM-u [20] i na Uniwersytecie Tohoku [21]. W przypadku tych materiałów dwuwartościowe jony Mn wprowadzają zlokalizowane spiny i stanowią centra akceptorowe, dostarczające dziur. Z kolei w innej ważnej technologicznie grupie półprzewodników, związkach II–VI zawierających jony magnetyczne, gęstości spinów i nośników można zmieniać niezależnie, podobnie jak w materiałach z grupy IV–VI, w których sterowany przez dziury ferromagnetyzm został wykryty w Instytucie Fizyki PAN już w latach osiemdziesiątych [22].

We współpracy laboratoriów z Warszawy i Grenoble podjęto kompleksowe badania wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w materiałach II–VI [23–29]. Wykonane prace technologiczne i doświadczalne doprowadziły do wykrycia metodami magnetoopiecznymi przewidzianego teoretycznie [23] ferromagnetyzmu w układzie dwuwymiarowym – w modulacyjnie domieszkowanych studniach kwantowych $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y-z}\text{Mg}_y\text{Zn}_z\text{Te}:\text{N}$ [24,25]. Otrzymane wyniki dowiodły, że w strukturach kwantowych z półprzewodników ferromagnetycznych możliwe będzie sterowanie własnościami magnetycznymi przy wykorzystaniu opanowanych już wcześniej metod, które umożliwiają zmianę koncentracji nośników, np. za pomocą potencjału elektrostatycznego bramek lub światła [24]. Ostatnio otrzymano domieszkowane warstwy $\text{p-Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}:\text{N}$ o koncentracji dziur przewyższającej 10^{20} cm^{-3} . Dzięki pomiarom zjawisk magnetycznych i transportowych wykryto ferromagnetyzm w tym trójwymiarowym układzie [26,27], potwierdzając także oczekiwania teoretyczne [23]. Korelacje ferromagnetyczne widoczne są także w $\text{Be}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}:\text{N}$ [28] oraz w kryształach objętościowych $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}:\text{P}$ [27]. Jednocześnie, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi,

ferromagnetyzm nie występuje powyżej 1 K w $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}:\text{Al}$ silnie domieszkowanym na typ n [27]. Różnica własności magnetycznych materiałów typu p i n wynika z dużej gęstości stanów pasma walencyjnego i silnego mieszania się pasm walencyjnych typu p ze stanami d atomów Mn. Przenoszone przez dziury sprzężenie ferromagnetyczne między jonami magnetycznymi jest wskutek tego tak silne, że kompensuje samoistne oddziaływanie antyferromagnetyczne.

Podjęte równocześnie badania we współpracy z Uniwersytetem Tohoku doprowadziły do powstania modelu teoretycznego własności termodynamicznych, magnetosprężystych i optycznych półprzewodników ferromagnetycznych grupy III–V i II–VI [26,29,30]. Wykazano, że model ten opisuje ilościowo i bez dopasowywanych parametrów wartości temperatury Curie, zależność namagnesowania od temperatury i pola magnetycznego, energię anizotropii magnetycznej w $\text{p-Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, a także magnetyczny dichroizm kołowy, który jest intensywnie badany na Uniwersytecie Warszawskim [31]. Przedstawiono także, we współpracy z Uniwersytetem Teksańskim, model teoretyczny struktury domenowej w półprzewodnikach ferromagnetycznych z grupy III–V, a w szczególności obliczono szerokość ścian domenowych oraz wyznaczono krytyczny rozmiar warstw, przy którym następuje przejście do struktury jednodomenowej [32]. Jak pokazano na rys. 1, dobrą zgodność wyników

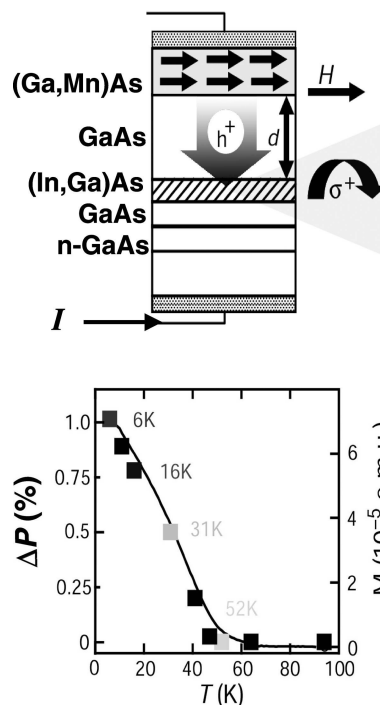


Rys. 1. Unormowane przez efektywną zawartość Mn (x_{eff} , w procentach) wartości doświadczalne (symbole) i teoretyczne (linie) temperatury ferromagnetycznej T_F , tj. sumy temperatury Curie i temperatury charakteryzującej oddziaływanie antyferromagnetyczne, w materiale objętościowym i studni kwantowej (QW) (wg [25–27]).

teoretycznych i doświadczalnych otrzymano także dla $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y-z}\text{Mg}_y\text{Zn}_z\text{Te:N}$ [25] i $\text{p-Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [26]. Wykonane prace umożliwiły ilościowy opis podstawowych mechanizmów odpowiedzialnych za ferromagnetyzm badanych materiałów, zbadanie roli wymiarowości przestrzeni, oddziaływań spinowo-orbitalnych i międzypasmowych oraz zrozumienie różnic własności fizycznych półprzewodników ferromagnetycznych z grupy III–V i II–VI. Wykazano także, że materiały te dają cenną możliwość testowania współczesnych idei fizyki wielu ciał i układów nieuporządkowanych, dotyczących wpływu oddziaływań i lokalizacji nośników na przenoszone przez nie sprzężenia wymienne między jonami magnetycznymi.

Równocześnie nastąpił znaczny postęp w oparowaniu metod doświadczalnych, które umożliwiają manipulowanie namagnesowaniem. Zade-monstrowano np., że można wpływać na kierunek tzw. łatwej osi i strukturę domenową poprzez „inżynierię naprężeń”, tj. dobór podłoża do epitaksji o odpowiedniej stałej sieci [30,32]. Ogromne zainteresowanie wywołało wykazanie możliwości wstrzykiwania nośników o zadanym kierunku spinu w półprzewodnikowych diodach elektroluminescencyjnych typu p–i–n, które zawierały magnetyczny filtr [33] lub ferromagnetyczny emiter [34]. Na rysunku 2 przedstawiono dane doświadczalne dotyczące wstrzykiwania nośników do studni niemagnetycznej (In,Ga)As z ferromagnetycznego (Ga,Mn)As typu p i GaAs typu n [34]. Jak widać, polaryzacja kołowa emitowanego światła, która niesie informacje o polaryzacji spinowej, jest różna od zera nawet w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego, jeśli tylko temperatura jest poniżej punktu Curie. Ważnym krokiem na drodze scalania funkcji mikroprocesora i pamięci trwałej jest wykazanie możliwości sterowania namagnesowaniem za pomocą pola elektrycznego w tranzystorze polowym z izolowaną bramką [35]. Przedstawione na rys. 3 wyniki pokazują, jak zmiana koncentracji dziur wywołana zmianą napięcia bramki umożliwia izotermiczne i odwracalne przechodzenie między fazą ferro- i paramagnetyczną. Podobny efekt uzyskano ostatnio w diodzie p–i–n ze studnią kwantową p-(Cd,Mn)Te [36]. Zaobserwowano również, że własności magnetyczne można zmieniać światłem przez zmianę koncentracji swo-

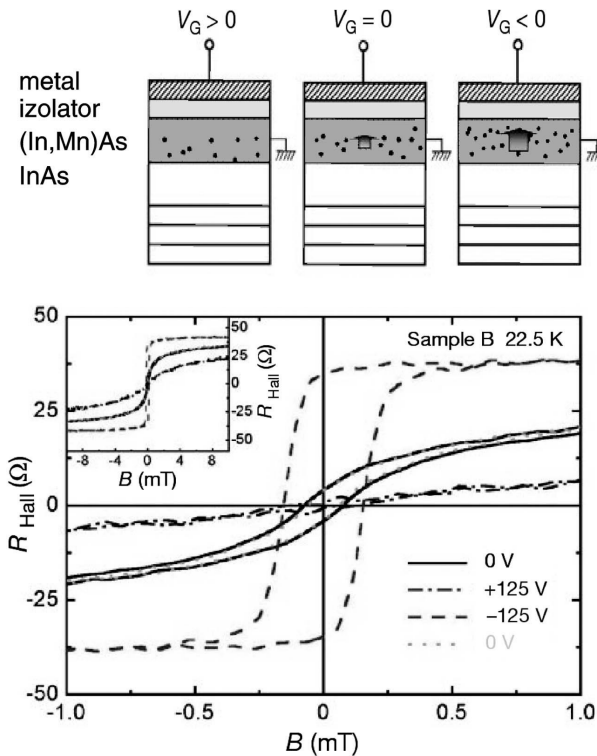
bodnych dziur, przenoszących oddziaływania wymienne [24,25,37].



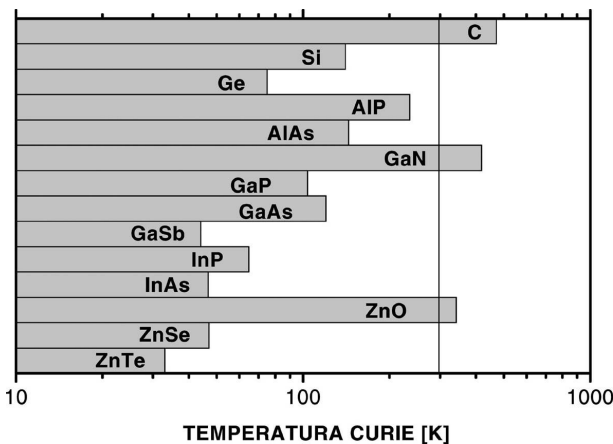
Rys. 2. U góry: dioda elektroluminescencyjna z obszarem typu p, z (Ga,Mn)As, emitująca w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego kołowo spolaryzowane światło. U dołu: stopień polaryzacji (symbole, lewa skala) zależy od temperatury tak jak spontaniczne namagnesowanie wyznaczone magnetometrem (linia ciągła, prawa skala) (wg [34], reprodukowane za zgodą ©1999 Macmillan Magazines Ltd).

Należy tu podkreślić, że opisane wyniki otrzymano dotychczas dla półprzewodników ferromagnetycznych, w których najwyższa temperatura Curie sięga zaledwie 110 K [21]. Z tego względu podjęto prace teoretyczne, które miały na celu określenie spodziewanych wartości temperatury Curie w różnych półprzewodnikach III–V i II–VI, a także w półprzewodnikach jednoskładnikowych (elementarnych) grupy IV [29,30]. Przedstawione na rys. 4 wyniki wykazują, że w półprzewodnikach składających się z lekkich pierwiastków temperatura krytyczna może przekroczyć 300 K. Zachęciło to wiele grup do prób syntezy nowych materiałów, np. GaN i ZnO z Mn lub z innymi metalami przejściowymi. Należy zwrócić uwagę, że mimo wielu testów strukturalnych nie można wykluczyć, iż w niektórych przypadkach ferromagnetyzm obserwowany w półprzewodnikach w wysokiej temperaturze ma źródło w wytrąceniach lub zanie-

czyszczeniach przez metale ferromagnetyczne lub związki ferrimagnetyczne.



Rys. 3. U góry: tranzystor polowy z izolowaną bramką i kanałem typu p, wykonanym z (In,Mn)As. U dołu: dla różnych wartości napięcia bramki, a tym samym koncentracji dziur, zależność oporu Halla (w anomalnym zjawisku Halla proporcjonalnego do namagnesowania) od indukcji pola magnetycznego w stałej temperaturze 22,5 K ma charakter para- lub ferromagnetyczny. Wstawka pokazuje przebieg oporu Halla w szerszym zakresie indukcji magnetycznej (wg [35]).



Rys. 4. Przewidywane wartości temperatury Curie w różnych półprzewodnikach ferromagnetycznych typu p zawierających 5% Mn i $3,5 \cdot 10^{20}$ dziur na cm^3 (wg [29,30]).

Wśród ciekawych wyników warto wymienić wykrycie ferromagnetyzmu w (Ge,Mn) [38] i obserwacje uporządkowania ferromagnetycznego powyżej 300 K w (Cd,Mn,Ge)P₂ [39], (Zn,Co)O [40], (Ti,Co)O₂ [41] oraz (Ga,Mn)N [42]. W przypadku (Ga,Mn)N ekstrapolowana temperatura Curie T_C wynosi 940 K przy zawartości Mn ok. 9%, co sugeruje, że oddziaływania ferromagnetyczne są silniejsze niż w Co, który ma najwyższy znany punkt Curie, $T_C = 1400$ K. Dowodzi to obecności niezwykle silnych oddziaływań między momentami magnetycznymi, które można wiązać z silną hybrydyzacją p-d [43]. Niezwykle interesującą rodzinę stanowią ostatnio wykryte materiały, które nie zawierają pierwiastków magnetycznych, ale wykazują spontaniczne namagnesowanie, znikające w temperaturze znacznie powyżej 300 K. Należy do nich (Ca,La)B₆ [44] oraz polimeryzowany C₆₀ [45].

Nie ulega wątpliwości, że ze względu na nadzieje poznawcze i nadzieje na zastosowania, związane z elektroniką spinową, poszukiwanie wysokotemperaturowych półprzewodników ferromagnetycznych stało się obecnie jednym z podstawowych wyzwań badań materiałowych.

Prace autora w dziedzinie półprzewodników ferromagnetycznych powstały przy współpracy z kolegami z Instytutu Fizyki PAN i Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego oraz Uniwersytetu Fouriera w Grenoble (grupa śp. prof. Y. Merle d'Aubigné i prof. J. Ciberta), Uniwersytetu Tohoku w Sendai (grupa prof. H. Ohno) i Uniwersytetu Teksasńskiego (grupa prof. A.H. MacDonald). Badania finansowane są przez KBN (projekt nr 2-PB03B-02417), program „Subsydia dla uczonych” Fundacji na rzecz Nauki Polskiej i projekt FENIKS V Programu Ramowego Komisji Europejskiej, a współpraca polsko-francuska – przez międzyrządowy program „Polonium”.

Literatura

- [1] R.P. Feynman, w: *Miniaturization*, red. H.D. Gilbert (Reynhold, New York 1960), s. 282.
- [2] J.S. Kilby, wykład noblowski, *Postępy Fizyki* **52**, 293 (2001).
- [3] H. Kroemer, wykład noblowski, *Postępy Fizyki* **53**, 1 (2002).
- [4] M. Bugajski, *Postępy Fizyki* **52**, 100 (2001).
- [5] T. Dietl, „At the Limit of Device Miniaturization”, w: *From Quantum Mechanics to Technology*, red. Z. Petrou i in. (Springer, Berlin 1996), s. 75.
- [6] T. Dietl, *Delta*, zesz. 10 (305), 12 (1999).
- [7] R.P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).

- [8] K.-M.H. Lenssen, A.E.T. Kuiper, F. Roozenboom, *J. Appl. Phys.* **85**, 5531 (1999).
- [9] I.K. Schuller, S. Kim, C. Leighton, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 571 (1999).
- [10] J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong, R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3273 (1995); J.S. Moodera, G. Mathon, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 248 (1999).
- [11] A. Fert, J. Barnaś, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1058 (1998).
- [12] P.S. Anil Kumar, R. Jansen, O.M.J. van't Erve, R. Vlutters, P. De Haab, J.C. Lodder, *J. Magn. Magn. Mater.* **214**, L1 (2000).
- [13] G.A. Prinz, *Science* **282**, 1660 (1998); *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 57 (1999).
- [14] J.-G. Zhu, Y. Zheng, G.A. Prinz, *J. Appl. Phys.* **87**, 6668 (2000).
- [15] A. Stean, *Rep. Prog. Phys.* **6**, 117 (1998); C.H. Bennett, D.P. DiVincenzo, *Nature* **404**, 247 (2000).
- [16] G. Burkard, D. Loss, D.P. DiVincenzo, *Phys. Rev. B* **59**, 2070 (1999).
- [17] D.P. DiVincenzo, *J. Appl. Phys.* **85**, 4785 (1999).
- [18] J.M. Kikkawa, D.D. Awschalom, *Nature* **397**, 141 (1999).
- [19] B.E. Kane, *Nature* **393**, 133 (1998).
- [20] H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnár, L.L. Chang, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2664 (1992); H. Ohno, *Science* **281**, 951 (1998).
- [21] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 363 (1996).
- [22] T. Story, R.R. Gałazka, R.B. Frankel, P.A. Wolff, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 777 (1986).
- [23] T. Dietl, A. Haury, Y. Merle d'Aubigné, *Phys. Rev. B* **55**, R3347 (1997).
- [24] A. Haury, A. Wasiela, A. Arnoult, J. Cibert, S. Tatarenko, T. Dietl, Y. Merle d'Aubigné, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 511 (1997).
- [25] P. Kossacki, D. Ferrand, A. Arnoult, J. Cibert, Y. Merle d'Aubigné, A. Wasiela, S. Tatarenko, J.-L. Staehli, T. Dietl, w: *Optical Properties of Semiconductor Nanostructures*, red. M.L. Sadowski, M. Potemski, M. Grynberg (Kluwer, Dordrecht 2000), s. 225; P. Kossacki, D. Ferrand, A. Arnoult, J. Cibert, S. Tatarenko, A. Wasiela, Y. Merle d'Aubigné, J.-L. Staehli, J.-D. Ganiere, W. Bardyszewski, K. Świątek, M. Sawicki, J. Wróbel, T. Dietl, *Physica E* **6**, 709 (2000).
- [26] D. Ferrand, J. Cibert, A. Wasiela, C. Bourgognon, S. Tatarenko, G. Fishman, T. Andrearczyk, J. Jaroszyński, S. Koleśnik, T. Dietl, B. Barbara, D. Dufeu, *Phys. Rev. B* **63**, 085201 (2001).
- [27] T. Andrearczyk, J. Jaroszyński, M. Sawicki, Le Van Khoi, T. Dietl, D. Ferrand, C. Bourgognon, J. Cibert, S. Tatarenko, T. Fukumura, Z. Jin, H. Koinuma, M. Kawasaki, w: *Proceedings 25th Intl. Conf. on Physics of Semiconductors, Osaka, Japan, 2000*, red. N. Miura, T. Ando (Springer, Berlin 2001), s. 235.
- [28] M. Sawicki, L. Hansen, D. Ferrand, L.W. Molenkamp, A. Waag, Le Van Khoi, T. Dietl, *phys. stat. sol. (b)*, w druku.
- [29] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, *Science* **287**, 1019 (2000).
- [30] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, *Phys. Rev. B* **63**, 195205 (2001).
- [31] J. Szczytko, W. Mac, A. Twardowski, F. Matsukura, H. Ohno, *Phys. Rev. B* **59**, 12935 (1999); J. Szczytko, W. Bardyszewski, A. Twardowski, *Phys. Rev. B* **64**, 075306 (2001).
- [32] T. Dietl, J. König, A.H. MacDonald, *Phys. Rev. B* **64**, R241201 (2001).
- [33] R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag, L.W. Molenkamp, *Nature* **402**, 787 (1999).
- [34] Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, D.D. Awschalom, *Nature* **402**, 790 (1999).
- [35] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani, *Nature* **408**, 944 (2000).
- [36] H. Boukari, M. Bertolini, J. Cibert, S. Tatarenko, D. Ferrand, A. Wasiela, P. Kossacki, T. Dietl, nieopublikowane.
- [37] S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi, H. Munekata, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4617 (1997).
- [38] Y. Matsumoto, M. Murakami, T. Shono, T. Hasegawa, T. Fukumura, M. Kawasaki, P. Ahmet, T. Chikyow, S. Koshihara, H. Koinuma, *Science* **291**, 854 (2001).
- [39] Y.D. Park, A. Wilson, A.T. Hanbicki, J.E. Mattson, T. Ambrose, G. Spanos, B.T. Jonker, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 016118 (2001).
- [40] G.A. Medvedkin, T. Ishibashi, T. Nishi, K. Hayata, Y. Hasegawa, K. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L949 (2000).
- [41] K. Ueda, H. Tabata, T. Kawai, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 988 (2001).
- [42] S. Sonoda, S. Shimizu, T. Sasaki, Y. Yamamoto, H. Hori, preprint: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0108159>.
- [43] T. Dietl, F. Matsukura, H. Ohno, preprint: <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0109245>.
- [44] D.P. Young, D. Hall, M.E. Torelli, Z. Fisk, J.L. Sarrao, J.D. Thompson, H.-R. Ott, S.B. Oseroff, R.G. Goodrich, R. Zysler, *Nature* **397**, 412 (1999).
- [45] T.L. Makarova, B. Sundqvist, R. Höhne, P. Esquinazi, Y. Kapelevich, P. Scharff, V.A. Davydov, L.S. Kashevarova, A.V. Rakhmanina, *Nature* **413**, 716 (2001).