

Tomasz DIETL Polska Akademia Umiejętności, Prace Komisji Zagrożeń Cywilizacyjnych, t. 7, s. 15-28 (2006)

Laboratorium Kriogeniki i Spintroniki
Instytut Fizyki PAN;
Katedra Fizyki Materii Skondensowanej
Instytut Fizyki Teoretycznej, UW

<dietyl@ifpan.edu.pl>

NANOTECHNOLOGIE PRZYSZŁOŚCI

WSTĘP I WNIOSKI

Rewolucja informacyjna, w której uczestniczymy już od kilku dziesięcioleci, zachodzi dzięki systematycznemu zwiększaniu się – zgodnie z wykładniczym prawem Moora – 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 mniejszym niż $100 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$. Przekroczenie symbolicznej granicy 100 nm oznacza, że z początkiem XXI wieku wkroczyliśmy w erę nanotechnologii. Wraz ze zmniejszaniem rozmiarów tranzystorów rośnie ich szybkość i spada cena – koszt produkcji jednego tranzystora jest dzisiaj znacznie niższy niż wydrukowania jednej litery.

W artykule tym, wykorzystującym wcześniejsze prace autora [1-3], a także opracowanie komisji brytyjskich Towarzystw Królewskich [4], przypomnimy definicje nanonauki i nanotechnologii oraz przedstawimy przyczyny ogromnego zainteresowania badaniami w tej dziedzinie wiodących ośrodków naukowych. Opiszemy także różne możliwe scenariusze rozwoju nanotechnologii. Jako przykład technologii nieciągłej przedstawimy nadzieje związane ze spintroniką i półprzewodnikami ferromagnetycznymi.

Tezy artykułu można sformułować następująco. Wydaje się, że dotychczasowa droga rozwoju elektroniki klasycznej, która polega na nieustannej miniaturyzacji tranzystorów i

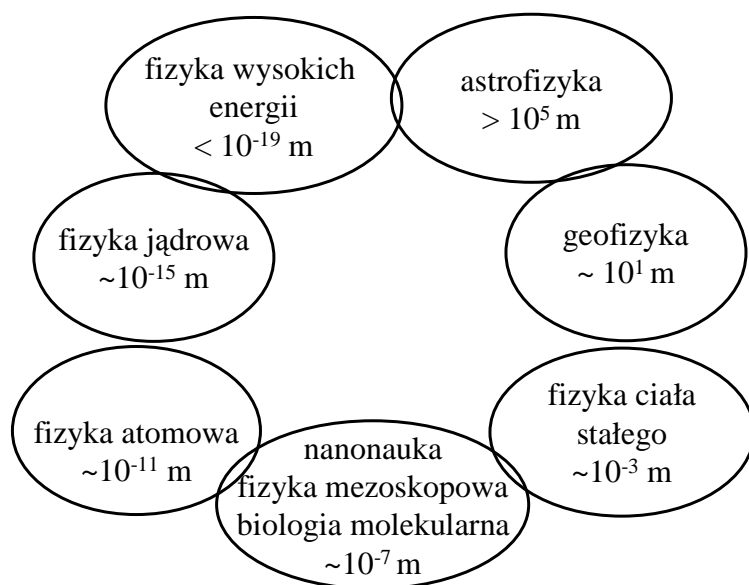
komórek pamięci, zaczyna wyczerpywać swoje możliwości, zarówno ze względów na trudności techniczne jak i ograniczenia fizyczne związane z ujawnianiem się nowych zjawisk w skali nanometrowej, np. efektów kwantowych. Równocześnie bardzo jasno widać korzyści w praktycznie wszystkich dziedzinach życia, które wynikałyby z utrzymania dotychczasowego wykładniczego rozwoju technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT). Rysuje się więc jasno sprzeczność między dzisiejszymi możliwościami a potrzebami jutra. W związku z tym wiele rządów podejmuje decyzje o hojnym finansowaniu ze środków publicznych badań podstawowych i stosowanych w dziedzinie nanonauki i nanotechnologii. Dofinansowanie te stale rośnie, i w r. 2003 w skali świata osiągnęło ok. 3.5 mld. euro [5]. Szczególne nadzieje wiąże z tzw. nanotechnologiami nieciągłymi, tj. z innowacyjnym wykorzystaniem różnych zjawisk fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących w nanoskali w celu otrzymania materiałów, przyrządów i systemów nowej generacji, o nowatorskich własnościach i zasadach działania. Sądzi się, że dzięki takim odkryciom wykładniczy postęp technologiczny zostanie utrzymany, a może nawet przyspieszony oraz że żaden kraj pretendujący do miana rozwiniętego ekonomicznie nie może zrezygnować z udziału w spodziewanej rewolucji technicznej.

Z powyższych rozważań wynikają istotne, jak sądzę, wnioski dla środowiska naukowego w Polsce. Po pierwsze, przy odpowiednim zmodyfikowaniu profilu badań i kształcenia studentów uczestniczenie w światowych badaniach w dziedzinie nanotechnologii otwiera szanse aktywnego udziału w ambitnym wyzwaniu współczesności. Po drugie, poprzez udział w międzynarodowych projektach naukowych badania w tej dziedzinie mogą stanowić istotne źródło dofinansowania nauki polskiej z zewnątrz. Po trzecie, na badania naukowe przeznaczają się obecnie blisko 200 mld. euro rocznie, a więc produkcja wyspecjalizowanej aparatury, odczynników itp. stanowi ogromną szansę rynkową dla małych polskich firm wysokiej technologii. Firmy takie powinny wyrastać z uczelni i instytutów naukowych oraz stanowić pociągającą opcję kariery zawodowej młodzieży decydującej się studiować nauki ścisłe i techniczne.

CO TO JEST NANONAUKA I NANOTECHNOLOGIA?

Mówiąc ogólnie nanonauka zajmuje się badaniami zjawisk i manipulowaniem materiałami w skali atomowej, cząsteczkowej i makrocząsteczkowej. Z kolei zadaniem nanotechnologii jest projektowanie, charakteryzowanie, wytwarzanie i stosowanie struktur, przyrządów, układów, których własności można kontrolować kształtem i rozmiarem w skali

nanometrowej ($< 100 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$). Przypomnijmy tutaj, że wirus grypy ma też rozmiar ok. 100 nm, a średnica włosa ludzkiego jest ok. 500 razy większa, rzędu 50 μm . Ważnym pojęciem w nanotechnologii jest skalowanie – umiejętność scalania wielu nanoobjektów w układ, w którym każdy z nich może być kontrolowany i manipulowany niezależnie, tak jak to ma miejsce we współczesnych mikroprocesorach i pamięciach.



Rys. 1. Skale długości obiektów stanowiących zainteresowanie różnych dziedzin nauk fizycznych.

Rysunek 1 przedstawia umiejscowienie skali długości odpowiadającej nanonauce w porównaniu z innymi dziedzinami nauk fizycznych. Jak wynika z przedstawionych definicji i skal długości nanonauka ma charakter międzydziedzinowy: łączy fizykę atomową, cząsteczkową, makrocząsteczkowo z fizyką ciała stałego oraz z chemią i biologią molekularną. Istnieje też wiele podobieństw między metodami teoretycznymi opisu jąder atomowych i nanoobjektów, w związku z czym wielu fizyków jądrowych odgrywa ważną rolę przy analizie własności gron (klastrow) atomowych i cząsteczkowych.

istnieją dwie podstawowe przyczyny unikatowych własności nanoobjektów: Po pierwsze, wraz ze zmniejszaniem rozmiarów rośnie względna liczba atomów znajdujących się na powierzchni, która przy średnicy 20 nm sięga 10%. Powoduje to zwiększoną aktywność chemiczną nanomateriałów, co jest m.in. wykorzystywane przy katalizie oraz w ogniwoch elektrycznych i paliwowych. Po drugie, w skali nanometrowej silniej ujawniają się zjawiska

kwantowe, w tym kwantyzacja wymiarowa widma kwazicząstek. W jakimś sensie te własności nanobiektów były już wykorzystywane od wielu wieków – wiadomo np. od dawna, że energia wybuchu prochu jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości ziaren. Podobnie, mikronowe i submikronowe kulki ze złota i srebra służyły do barwienia witraży, przy czym kolor, ze względu na wymiarową kwantyzację widma plazmonów (rezonans Mie'go), zależy od rozmiaru kulek.

Za twórców koncepcji nanotechnologii uważa się R.P. Feynmana, który w czasie, gdy J.S. Kilby patentował pomysł układu scalonego zadał w 1959 r. wizjonerskie pytanie: „czemu by nie zapisać wszystkich 24. tomów *Encyclopaedia Britannica* na główce od szpilki?” [6], N. Taniguchi'ego, który w 1974 r. rozważał umiejętność precyzyjnej obróbki materiałów w skali nanometrowej [7] oraz K.E. Drexlera, który we wpływowej książce z 1986 r. *Engines Of Creation. The Coming Era of Nanotechnology* przewidywał, że stanie się możliwe dokładne kontrolowanie poszczególnych atomów [8].

BARIERY I SIŁY NAPĘDOWE ROZWOJU NANOTECHNOLOGII

Mimo że -- jak ktoś zauważył -- przewidywanie nie jest trudne, chyba że dotyczy przyszłości, spróbujmy zastanowić się nad możliwymi scenariuszami rozwoju mikroelektroniki. Jednym z nich to ten, który zaszedł w przypadku podróży przez oceany – jak wiemy od ponad 20. lat prędkość pasażerskich samolotów transkontynentalnych nie zmienia się. Także w przypadku mikroelektroniki bariera finansowa (koszt budowy fabryki mikroprocesorów przekracza 2 mld. euro), psychologiczna (opór przed nowościami oraz brak uzasadnienia dla zwiększania potencjału informatycznego i nieustannej wymiany sprzętu i oprogramowania), prawna (ochrona praw autorskich, zapobieganie rozpowszechnianiu się terroryzmu i pornografii przez sieć), ..., mogą spowodować załamanie się prawa Moora zgodnie, z którym liczba elementów w jednym układzie scalonym podwaja się co osiemnaście miesięcy. Pojawiają się też obawy, że coraz szersze stosowanie nanomateriałów niesie z sobą zwielokrotnione zagrożenie dla zdrowia, w stosunku do np. znanych problemów wywołanych przez submikronowe włókna azbestowe. W związku z tym wyraża się pogląd, że rozwój nanotechnologii należy zatrzymać do momentu oceniania wpływu nanomateriałów i nanotechnologii na środowisko naturalne i zdrowie ludzkie.

Uważa się jednak dość powszechnie, że ewentualne zagrożenia będą z nawiązką kompensowane, w tym oszczędnością energii i surowców, którą zawdzięczany rozwojowi systemów informatycznych i wykorzystywaniu ich do np. sterowania pracą silników w samochodach. Sądzi się także, że przejście od obecnych obliczeń gigaflopowych (10^9 operacji

zmiennoprzecinkowych na sekundę) do pentaflapowych otworzy zupełnie nowe możliwości w świecie rozrywki wirtualnej. Warto w tym miejscu podkreślić, że jesteśmy w tym niezwyklej chwili rozwoju ludzkości, w którym szeroko pojęte potrzeby przemysłu rozrywkowego stanowią główną siłę napędową rozwoju technologicznego. W tej chwili najsilniejsze procesory montowane są w konsolach gier komputerowych, a w najbliższym sezonie narciarskim pojawią się skafandry do jazdy na desce ze scalonym odtwarzaczem płyt kompaktowym, co stanowi początek ery „ubrań elektronicznych”. Obliczenia pentaflapowe umożliwią także szybkie rozpoznawanie kształtów, a więc np. automatyczne sterowanie samochodami na autostradzie, a także mogą doprowadzić do przełomu w symulacjach procesów chemicznych, biologicznych i geofizycznych. Chociaż już dzisiaj możliwości obliczeniowe wydają się imponujące, należy przypomnieć, że obecnie potrafimy opisywać z pierwszych zasad jedynie ewolucje w czasie krótszym niż 10 ps układów, które zawierają nie więcej niż kilkaset atomów.

Czy jednak dalszy postęp poprzez proste zmniejszanie rozmiarów tranzystorów krzemowych z izolowaną bramką (MOSFET) oraz komórek pamięci ferromagnetycznych i optycznych jest możliwy? Uważa się, że dzisiejsza technologia i jej rozwój wg wykładniczego prawa Moora będzie trwał nie dłużej niż 5 do 10 lat. Wiąże się to z wieloma trudnościami technicznymi, często niezbyt spektakularnymi – dla przykładu mniejszym problemem jest dzisiaj przyspieszenie pracy procesora niż zlikwidowanie opóźnień związanych z przenoszenia sygnałów przez doprowadzenia. Są też oczywiście bariery o charakterze bardziej podstawowym – dyfrakcyjne ograniczenie rozdzielczości w litografii, rosnące prawdopodobieństwo 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.

Dotychczas laboratoria przemysłowe znajdowały metody pokonywania kolejnych barier. Dla przykładu, obecnie opracowywana jest technologia wytwarzania polimeru o bardzo małej stałej dielektrycznej, na który nakładałoby się miedziane doprowadzenia. Umożliwiłoby to zmniejszenie iloczynu pojemności i oporu elektrycznego, a więc ograniczenie opóźnień związanych z przenoszeniem sygnału przez doprowadzenia. Z kolei tlenek krzemu w tranzystorze MOSFET zastępowany jest tlenkami cyrkonu i hafnu, które mają prawie dziesięciokrotnie większą stałą dielektryczną. Pozwala to podniesienie grubości izolatora tak, że przy danym napięciu bramki gęstość indukowanego ładunku w kanale tranzystora zostaje niezmienną natomiast prąd tunelowania (upływność) ulega wykładniczemu zmniejszeniu.

Równocześnie w pamięciach magnetycznych wprowadza się materiały, w których wektor namagnesowania jest prostopadły do powierzchni dysku, co pozwala na dalsze kilkakrotne zmniejszenie rozmiaru komórki pamięci.

NANOTECHNOLOGIE JUTRA

Mimo 40. letnich sukcesów laboratoriów przemysłowych na drodze pokonywania kolejnych barier technicznych i fizycznych poprzez ciągłe, krok po kroku, modyfikowanie poszczególnych elementów istniejących technologii, panuje przekonanie, że w niedługiej przyszłości nastąpi *jakościowa* zmiana w technikach przetwarzania, przechowywania, szyfrowania i przesyłania informacji. Z tego względu rządy wielu krajów finansują międzydziedzinowe ambitne programy naukowe. Nie jest jednak ciągle jasne, jaka technologia będzie dominowała w przyszłości. Powoduje to, że badania w dziedzinie nanotechnologii są intelektualnie bardzo atrakcyjne i przyciągają zdolną młodzież. Wiadomo jedynie, że scalaniu elementów coraz częściej będzie towarzyszyło łączenie funkcji: procesorów, pamięci, czujników, aktywatorów, 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 samoorganizujący się wzrost w metodach epitaksjalnych, ale także syntezę organiczną i biologiczną oraz nowe metody manipulacji pojedynczymi cząsteczkami i atomami. Zbliżyć to nas może to 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 do stałego nadzoru i automatycznego miejscowego dozowania leków.

Znacznym zmianom mogą też ulec nośniki informacji. Dzisiaj do przetwarzania informacji służy ładunek elektronu, a wewnętrzny moment pędu (spin) do jej przechowywania. Uważa się, że będzie rosła rola fotonów, które już obecnie wykorzystywane są do przenoszenia, szyfrowania i zapisywania informacji. Poza elektronami i fotonami wiele grup badawczych nadzieje wiąże się np. z wirami prądu w nadprzewodnikach II rodzaju (wiry Abrikosowa) i strumieniami pola magnetycznego w nanocewkach nadprzewodzących. Spoglądając na przyszłość nanotechnologii od strony materiałów 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 (optoelektroniki), gdzie dzisiaj królują związki pierwiastków z grupy III i V, np. GaAs. Ze względu na możliwość pracy w wysokich temperaturach oraz możliwość generacji światła w szerokim obszarze widmowym znaczną rolę mogą odegrać związki SiC i GaN, a także ... diament. Ze względu na niezwykle własności mechaniczne oraz świetne przewodnictwo elektryczne szczególnie obiecujące są nanorurki węglowe jako elementy czynne tranzystorów oraz połączenia. Rosnące znaczenie może przypadać 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 słyszy się o elektronice tlenkowej.

Obok zmian zasad działania poszczególnych elementów, które zapewne będą wykorzystywały to, co dzisiaj przeszkadza – tunelowanie, interferencje, 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 zjawiska. Szczególnie ważny i płodny pomysł, także Feynmana [9], wiąże się z wykorzystaniem do obliczeń ewolucji kwantowej układów fizycznych.

SPINTRONIKA I PÓLRZEWODNIKI FERROMAGNETYCZNE

Elektronika spinowa (spintronika) stanowi bardzo młodą, interdyscyplinarną dziedzinę wiedzy. Jej rozwój, podobnie jak rozwój dziedzin konkurencyjnych – elektroniki molekularnej, bioelektroniki, elektroniki polimerów, ... – wynika z wspomnianego już przekonania, że dotychczasowa droga rozwoju elektroniki klasycznej polegająca na miniaturyzacji elementów czynnych (komórek pamięci i tranzystorów), mimo ogromnego postępu technologicznego, który jej towarzyszy, wyczerpuje obecnie swoje możliwości. Głównym zadaniem elektroniki spinowej jest poznanie zjawisk fizycznych związanych ze spinem elektronu oraz zaproponowanie, zaprojektowanie i wykonanie przyrządów, które by zjawiska te wykorzystywały. U podstaw nadziei związanych z elektroniką spinową leży dobrze znany fakt, że ze względu na nieistnienie monopoli magnetycznych 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.

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 magnetoopór (GMR) naprzemiennych warstw zbudowanych z metali ferromagnetycznych, antyferromagnetycznych i paramagnetycznych [10]. 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 poprzez wykorzystanie zjawiska tunelowania przez warstwę izolatora między metalami ferromagnetycznymi (TMR), a także zbadanie roli zjawiska blokady kulombowskiej, które pojawia się wraz ze zmniejszaniem rozmiarów złącza [10]. Należy przy tym oczekiwać, że spodziewane parametry czujników TMR pozwolą na zastosowanie ich nie tylko do odczytu pamięci, ale także jako detektorów położenia, np. w silnikach elektrycznych i spalinowych z miniaturowym magnesem na wale, gdzie dotychczas stosowane są sondy wykorzystujące zjawisko Halla. 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 nie blokujących się hamulców (ABS).

Znacznie ambitniejszym celem elektroniki spinowej jest skonstruowanie magnetycznej pamięci o dowolnym dostępie – MRAM [10]. 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 oddziaływań spinowo-orbitalnych. 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 bądź przez prąd (prawo Oersteda), bądź przez ogrzanie do temperatury Curie punktową wiązką lasera, co pozwala na obrót oświetlonej domeny stosunkowo słabym polem magnetycznym.

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. Stanowiąc 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 oraz brak procesów niszczących polaryzację spinową.

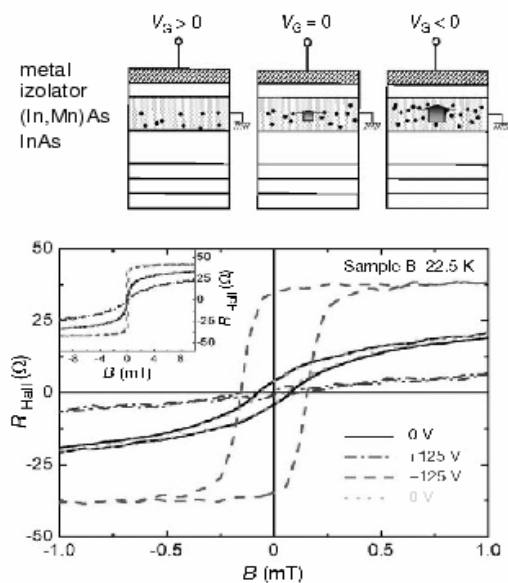
Bodaj najważniejszym wyzwaniem intelektualnym elektroniki spinowej jest stworzenie tzw. informatyki kwantowej [11]. Szczególne znaczenie spinowych stopni swobody wynika z faktu, że zachowują one znacznie dłuższą spójność fazową niż orbitalne stopnie swobody. Spin elektronu nadaje się więc znacznie lepiej niż jego ładunek do praktycznej realizacji współczesnych i – należy to podkreślić – rewolucyjnych idei dotyczących obliczeń, kryptografii i teleportacji 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. Chociaż wykazano doświadczalnie, że czas życia spinowej polaryzacji elektronów w domieszkowanych półprzewodnikach może być wiele rzędów wielkości dłuższy niż czas relaksacji pędowej, część badaczy sugeruje, że najbardziej obiecującym nośnikiem informacji kwantowej byłyby spiny jąder ^{31}P w izotopowo czystym ^{28}Si , 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.

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 [3,12]. 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 zagadnieniem 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 oraz pozwoliłoby 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 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 [13] na Uniwersytecie Tohoku [14] 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 już w latach osiemdziesiątych [15].

We współpracy laboratoriów w Warszawie i Grenoble podjęto kompleksowe badania wywołanego nośnikami ferromagnetyzmu w materiałach II-VI [16-20]. Wykonane prace technologiczne i doświadczalne doprowadziły do wykrycia metodami magnetoptycznymi przewidzianego teoretycznie [16] ferromagnetyzmu w układzie dwuwymiarowym, tj. 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 [17,18]. Spodziewane korelacje ferromagnetyczne wykryto także w trójwymiarowym p- $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [19,20].



Rys. 2. Tranzystor polowy z izolowaną bramką z kanałem typu p z (In,Mn)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 histeryzy odpowiadającej fazie ferromagnetycznej. Wstawka przedstawia oporność Halla w szerszym zakresie pól magnetycznych (wg. [25]).

Przeprowadzone badania rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych dowodzą, że materiały te łączą problemy fizyki izolatorów z przeniesieniem ładunku i silnie skorelowanych metali z zagadnieniami defektów i stanów elektronowych wysoko domieszkowanych półprzewodników. Pomimo tej złożonej sytuacji fizycznej, opracowany model ilościowy [12,21-23] pozwolił na opis bez dobieralnych parametrów właściwości termodynamicznych, mikromagnetycznych, transportowych i optycznych szerokiej klasy półprzewodników ferromagnetycznych (III,Mn)V i (II,Mn)VI. Wyraża się często opinię, że w wyniku tych prac (Ga,Mn)As stał się najlepiej rozumianym materiałem ferromagnetycznym. Jednocześnie wykazano doświadczalnie istnienie wielu nowych zjawisk, które pozwalają na sterowanie namagnesowaniem światłem [17,18], prądem [24] i polem elektrycznym [18,25,26], jak pokazano na rys. 2. 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 [21], stanowi jedną z aktywniej rozwijających się gałęzi fizyki materiałowej.

UWAGI PODSUMOWUJĄCE

W artykule tym naszkicowaliśmy kilka scenariuszy rozwoju technologii informatyczno-komunikacyjnych, ale chociażby najnowsza historia Internetu i telefonii komórkowej pokazuje, że postęp techniczny następuje w nieprzewidywalnych wcześniej kierunkach. Niezależnie jednak od technologii przyszłości opanowywanie metod niezależnej kontroli pojedynczych cząsteczek, atomów i elektronów stanowi naturalną drogę postępu metod doświadczalnych fizyki. Nanotechnologia łączy więc ciekawe wyzwania intelektualne z powszechnie rozumianymi zadaniami społecznymi nauki. W związku z tym dziedzina ta jest coraz lepiej finansowana, także w ramach projektów międzynarodowych. Dobrym przykładem są tutaj badania naszego zespołu w dziedzinie spintroniki i półprzewodników ferromagnetycznych. Prace nasze były lub są finansowane przez projekty badawcze i zamawiane KBN, w tym PBZ „Elektronika spinowa” oraz subsydlum profesorskie 1999-2002 Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Te finansowanie krajowe miało efekt mnożnikowy – wśród otrzymanego z zagranicy dofinansowania naszego zespołu można wymienić projekty FENIKS, AMORE i SPINOSA V Programu Ramowego Unii Europejskiej; projekt ERATO „Spintronika półprzewodnikowa” Japońskiej Agencji Nauki i Technologii, nagrodę naukową Fundacji A. von Humboldta oraz program „Okno na Naukę” Londyńskiego Biura Sił Powietrznych USA. Równocześnie prowadzone badania przyciągają uwagę społeczności naukowej, czego przejawem są zaproszenia do wygłaszania odczytów plenarnych na wiodących konferencjach międzynarodowych fizyki materii skondensowanej. Z kolei kierowana przez prof. Andrzeja Mycielskiego firma „Puremat” przy Instytucie Fizyki PAN, która sprzedaje czysty mangan wszystkim znanym mi na świecie laboratoriom wytwarzającym półprzewodniki zawierające ten pierwiastek, stanowi przykład realności udziału polskich wyspecjalizowanych przedsiębiorstw w rynku światowych badań naukowych.

Piśmiennictwo

1. T. Dietl, *At the Limit of Device Miniaturization*, w: *From Quantum Mechanics to Technology*, red. Z. Petrou i inni (Springer, Berlin 1996) str. 75.
2. T. Dietl, *Delta* No 10 (305) 12 (1999).
3. T. Dietl, *Postępy Fizyki* 53D, 14 (2002).

4. *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004, dostępne przez www.royalsoc.ac.uk/policy.
5. Commission of the European Communities, *Towards a European strategy for nanotechnology*, dostępne przez www.cordis.lu/nanotechnology/src/communication.
6. R.P. Feynman, w: *Miniaturization*, red. H.D. Gilbert (Reynhold, New York 1960) str. 282.
7. N. Taniguchi, *On the Basic Concept of 'Nano-Technology'*, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.
8. K.E. Drexler, *Engines Of Creation. The Coming Era of Nanotechnology* (Anchor Books, 1986).
9. R.P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* 21, 467 (1982).
10. zobacz, J. Barnaś, *Postępy Fizyki* 53D, 78 (2002).
11. zobacz, A. Stean, *Rep. Prog. Phys.* 6, 117 (1998); C.H. Bennett, D.P. DiVincenzo, *Nature* 404, 247 (2000).
12. zobacz, T. Dietl, *Semicond. Sci. Technol.* 17, 377 (2002); T. Dietl, H. Ohno, *MRS Bulletin*, Oct. 2003, str. 714., i prace tam cytowane.
13. H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnár, L.L. Chang, *Phys. Rev. Lett.* 68, 2664 (1992); H. Ohno, *Science* 281, 951 (1998).
14. H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye, *Appl. Phys. Lett.* 69, 363 (1996).
15. T. Story, R.R. Gałazka, R.B. Frankel, P.A. Wolff, *Phys. Rev. Lett.* 56, 777 (1986).
16. T. Dietl, A. Haury, Y. Merle d'Aubigné, *Phys. Rev. B* 55, R3347 (1997).
. Haury, A. Wasiela, A. Arnoult, J. Cibert, S. Tatarenko, T. Dietl, Y. Merle d'Aubigné, *Phys. Rev. Lett.* 79, 511 (1997).
17. H. Boukari, P. Kossacki, M. Bertolini, J. Cibert, S. Tatarenko, D. Ferrand, A. Wasiela, J.A. Gaj, T. Dietl, *Phys. Rev. Lett.* 88, 207204 (2002).
18. 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).
19. H. Kępa, Le Van Khoi, C.M. Brown, M. Sawicki, J.K. Furdyna, T.M. Giebułtowicz, T. Dietl, *Phys. Rev. Lett.* 91, 087205 (2003).
20. T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, *Science* 287, 1019 (2000).
21. T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, *Phys. Rev. B* 63, 195205 (2001).
22. T. Jungwirth, J. König, T. Sinova, J., Kučera, A.H. MacDonald, *Phys. Rev. B* 66, 012402 (2002).
23. M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, H. Ohno, *Nature* 428, 539 (2004).
24. H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani, *Nature* 408, 944 (2000).
25. D. Chiba, M. Yamanouchi, F. Matsukura, H. Ohno, *Science* 301, 943 (2003).