

---

# Spin w elektronice

Józef Barnaś

Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań  
oraz Instytut Fizyki Molekularnej PAN, Poznań

---

## 1. Wstęp

W konwencjonalnych układach elektronicznych aktywnym elementem jest na ogół ładunek elektronu, i chociaż w niektórych przypadkach spin elektronu odgrywa pewną rolę jako źródło ferromagnetyzmu, to jednak rola ta jest drugorzędna. Nowe perspektywy stworzyło dopiero pojawienie się możliwości konstrukcji elementów elektronicznych z zaplanowaną strukturą spinową (inżynieria spinowa). Powstała elektronika spinowa (występująca często w literaturze pod nazwą spintroniki lub magnetroniki), w której spin elektronu jest aktywnym elementem na równi z jego ładunkiem [1,2]. W nieco szerszym znaczeniu spintronika obejmuje dzisiaj również dziedzinę informatyki kwantowej i problemy związane z kwantowymi obliczeniami wykorzystującymi spin elektronu [3]. Spintronika jako nowa gałąź elektroniki mezoskopowej wyłoniła się stosunkowo niedawno i jest właściwie w fazie początkowej swojego rozwoju. Zanim omówione zostaną tutaj jej główne aspekty, warto się zastanowić, jak wyglądała sytuacja przed jej powstaniem.

Nie ulega wątpliwości, że ferromagnetyzm (a tym samym i spin elektronu) znalazł najistotniejsze zastosowanie w technikach informatycznych. To właśnie ich rozwój stał się główną siłą

napędową, która doprowadziła do powstania spintroniki. Dlatego też ograniczymy się tutaj głównie do tych zastosowań. Dwie własności ferromagnetycznych metali okazały się tutaj szczególnie przydatne. Weźmy pod uwagę jednodomenowy układ ferromagnetyczny. Stan podstawowy takiego układu jest na ogół podwójnie zdegenerowany. Obydwa stany oddziela stosunkowo wysoka bariera energetyczna, która powoduje, że stan magnetyczny w temperaturze pokojowej jest trwały. Daje to możliwość wykorzystania takiego układu do zapisu jednego bitu informacji – stan z jedną orientacją magnetyzacji odpowiada zeru, a z magnetyzacją przeciwną – jedynce. Układ można przełączać z jednego stanu do drugiego (czyli zapisywać informację) za pomocą odpowiedniego pola magnetycznego.

Druga istotna własność metali ferromagnetycznych (zwłaszcza przejściowych) to tzw. magnetoopór anizotropowy (AMR). Ich opór elektryczny zależy mianowicie od kierunku prądu elektrycznego względem kierunku namagnesowania  $M$ . Jeżeli płynie on prostopadle do wektora  $M$ , to opór elektryczny jest mniejszy niż w przypadku, gdy płynie on wzdłuż kierunku namagnesowania. Różnica ta może sięgać kilku procent w warstwach niektórych stopów magnetycznych. Własność tę wykorzystano w głowi-

cach do odczytu informacji zapisanej w komórkach pamięci, np. na twardych dyskach. Pole magnetyczne zorientowanych domen magnetycznych (w których zapisana jest informacja) przełącza kierunek namagnesowania układu magnetooporo-wego i wystarczy analizować tylko zmiany oporu, aby uzyskać informacje o stanie magnetycznym danej komórki. Głowice odczytujące oparte na AMR-ze zastąpiły stosowane wcześniej głowice indukcyjne.

Co się tyczy zastosowań magnetyzmu w technikach informatycznych, warto również wspomnieć o próbach wykorzystania magnetyzmu w pamięciach łatwo dostępnych (RAM). Pierwsze pamięci tego typu były oparte na pierścieniach ferrytowych. Ich nowsza generacja wykorzystywała magnetoopór anizotropowy. Magnetyczne pamięci RAM (MRAM) cechują się tym, że są trwałe, tzn. zapisana informacja nie ginie po odłączeniu napięcia [4]. Jednakże parametry tych pamięci okazały się znacznie gorsze od parametrów pamięci RAM opartych na technologii półprzewodnikowej (CMOS).

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój technik informatycznych, podlegający mniej lub bardziej ściśle empirycznemu prawu Moore'a, zgodnie z którym zdolność obliczeniowa komputerów podwaja się co pewien czas (co ok. 1,5 roku). Podobne prawo dotyczy również gęstości zapisu informacji na twardych dyskach. Obecne dyski zbliżają się już do zakresu terabitowego. Rosnąca gęstość zapisu wymaga opracowywania coraz to nowych metod zapisu i odczytu informacji. Problemy stwarza zwłaszcza odczyt nieniszczący. Gdzie jest granica, poniżej której nie da się już zejść? Jak daleko jest do tej granicy? Kiedy załamie się prawo Moore'a? Są to pytania, na które odpowiedź – przynajmniej na niektóre z nich – przyniosą najbliższe lata. Niewątpliwie granicę tę narzuca sama przyroda. Tendencja do miniaturyzacji elektroniki, w szczególności związanej z technikami informatycznymi, doprowadziła do tego, że poszczególne elementy lub ich części są układami mezoskopowymi, czyli układami, których rozmiary są porównywalne lub znacznie mniejsze od odpowiedniej drogi swobodnej elektronu. W układach takich elektron „widzi” cały układ, co prowadzi do wielu kwantowych efektów interferencyjnych. Układy mezoskopowe mają rozmiary w zakresie nanometrów.

## 2. Odkrycie zjawiska GMR i nowe perspektywy wykorzystania spinu elektronu

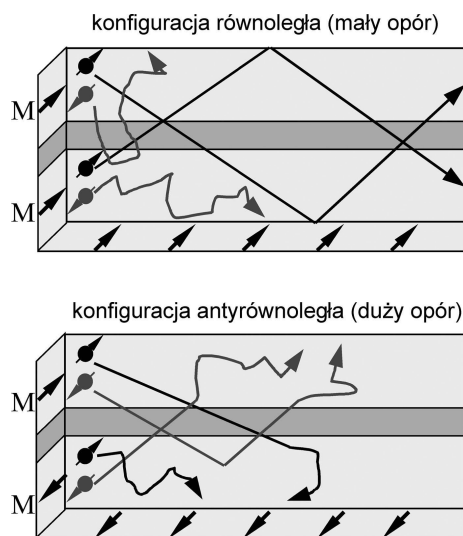
Nowe możliwości wykorzystania spinu elektronu w elementach elektroniki mezoskopowej, zwłaszcza w technikach informatycznych, pojawiły się wraz z odkryciem efektu gigantycznego magnetooporu w wielowarstwowych magnetycznych układach metalicznych [5,6]. Począwszy od lat 80. w wielu czołowych laboratoriach naukowych prowadzono intensywne prace technologiczne, mające na celu wytworzenie sztucznych układów warstwowych o nowych własnościach magnetycznych i elektrycznych. Układy takie otrzymuje się albo metodami naparowania z wiązek molekularnych (MBE), albo metodami rozpylania katodowego. Pierwszym sukcesem było otrzymanie struktur złożonych z warstw żelaza przedzielonych warstwą chromu (Fe/Cr/Fe), w których zaobserwowano antyrównoległe uporządkowanie momentów magnetycznych warstw Fe [7]. Źródłem takiego uporządkowania było antyferromagnetyczne oddziaływanie wymienne między warstwami Fe poprzez warstwę Cr. Później okazało się, że oddziaływanie wymienne występuje też w innych układach i jest właściwie cechą wszystkich magnetycznych układów warstwowych, w których warstwy ferromagnetyczne przedzielone są niemagnetycznymi warstwami metalicznymi. Charakter tego oddziaływania jest podobny do oddziaływania wymiennego typu RKKY między dwiema magnetycznymi domieszkami w metalu. Można je zapisać w postaci hamiltonianu typu Heisenberga,  $H = JM_1 \cdot M_2 / (M_1 M_2)$ , gdzie  $M_1$  i  $M_2$  oznaczają namagnesowanie obu warstw magnetycznych, a  $J$  jest efektywnym parametrem oddziaływania wymiennego. Parametr ten silnie zależy od grubości warstw niemagnetycznych, a znacznie słabiej od grubości warstw magnetycznych [8]. Jego znak oscyluje wraz z grubością warstwy niemagnetycznej, najczęściej z dwoma okresami, z których mniejszy odpowiada w przybliżeniu dwu płaszczyznom atomowym, a większy – kilku-kilkunastu płaszczyznom [9]. W niektórych przypadkach istnieje również oddziaływanie wyższego rzędu („bikwadratowe”), dające się opisać hamiltonianem  $H = J_b (M_1 \cdot M_2)^2 / (M_1 M_2)^2$ , gdzie  $J_b$  jest odpowiednim parametrem. Oddziaływanie to często

proceedzi do niewspółliniowego (najczęściej prostopadłego) ustawienia się wektorów namagnesowania warstw [10].

Prawdziwego znaczenia struktury te nabrały dopiero dzięki odkryciu w nich zjawisku gigantycznego magnetooporu (GMR). Okazało się bowiem, że zmianie konfiguracji magnetycznej z ustawienia antyrównoległego na równoległe towarzyszy spadek oporu elektrycznego (w niektórych przypadkach może to być również wzrost) od kilku do kilkudziesięciu procent. W pierwszych eksperymentach [5,6] konfigurację antyrównoległą osiągnięto dzięki istnieniu antyferromagnetycznego międzywarstwowego oddziaływania wymiennego. W przypadku trójwarstw typu Fe/Cr/Fe zmiana oporu wynosiła kilka procent, ale już w warstwach wielokrotnych sięgała ok. 50%. Struktury z oddziaływaniem wymiennym wymagają stosunkowo silnych pól magnetycznych, aby namagnesowanie warstw sprowadzić do ustawienia równoległego. W przypadku tym należy bowiem pokonać oddziaływanie wymienne. Rezultaty prac doświadczalnych prowadzonych w ostatniej dekadzie wskazują, że GMR występuje zarówno wówczas, gdy prąd płynie w płaszczyźnie warstw, jak i prostopadle do nich. Względna zmiana oporu maleje z temperaturą, jednakże nawet w temperaturze pokojowej efekt jest znaczny. Jest on ponadto tym większy, im większa jest liczba warstw magnetycznych w strukturze (jednakże nasyca się dla dużej liczby warstw) oraz im cieńsze są warstwy niemagnetyczne.

Źródłem fizycznym GMR-u jest istnienie dwóch słabo oddziałujących kanałów spinowych przewodnictwa elektronowego w metalach przejściowych 3d. Jest to możliwe dzięki silnemu polu wymiennemu w tego typu układach, które powoduje, że spin elektronu jest skwantowany, a procesy rozproszenia ze zmianą spinu – rzadkie. Droga swobodna elektronu dla procesów zachowujących spin elektronu jest dużo mniejsza niż analogiczna droga dla procesów zachodzących z odwróceniem spinu. Ponadto – co jest tutaj bardzo istotne – oba kanały spinowe charakteryzują się różnymi parametrami, wynikającymi z zależnej od spinu struktury elektronowej metali 3d. W układach z przewodnictwem balistycznym dominują efekty związane ze strukturą pasmową, np. spinowa asymetria takich parametrów, jak gęstość elektronów w danym kanale spinowym czy pręd-

kość elektronów na poziomie Fermiego. W zakresie przewodnictwa dyfuzyjnego podstawowym parametrem jest droga swobodna. Zależy ona od kierunku spinu elektronu ze względu na zależność od niego potencjału rozpraszającego (zarówno pochodzącego od niejednorodności granic jak i od domieszek) i gęstości stanów, do których elektrony mogą zostać rozproszone. W wyniku tego jeden z kanałów przewodzi dobrze, a drugi słabo, co prowadzi do zjawiska GMR. W strukturze wielowarstwowej z konfiguracją antyrównoległą elektrony o danej orientacji spinu w jednej warstwie mają dużą ruchliwość, a w drugiej – małą. Przy przejściu do konfiguracji równoległej elektrony z jedną orientacją spinu są ruchliwe we wszystkich warstwach, z drugą orientacją spinu są zaś mało ruchliwe w całej strukturze. Jest oczywiste, że to właśnie elektrony o dużej ruchliwości wyznaczają przewodność układu i w konfiguracji równoległej opór będzie mniejszy [11]. Pokazano to schematycznie na rys. 1. Jest też oczywiste, że procesy mieszające kanały spinowe prowadzą do zmniejszenia asymetrii spinowej, a tym samym do zmniejszenia GMR-u [12]. Efekt ginie, jeśli grubość warstwy niemagnetycznej oddzielającej warstwy magnetyczne jest duża. Ścisłej, w przypadku przewodnictwa w płaszczyźnie warstwy charakterystycznym parametrem jest droga swobodna elektronu, natomiast dla przewodnictwa prostopadłego do warstw jest nim droga dyfuzji spinu.



Rys. 1. Schemat ideowy pokazujący fizyczną przyczynę występowania GMR-u w strukturach metalicznych z dwiema warstwami magnetycznymi przedzielonymi warstwą niemagnetyczną.

Widać więc, że międzywarstwowe oddziaływanie wymienne nie jest warunkiem koniecznym występowania GMR-u. W pierwszych pracach doświadczalnych było ono jedynie źródłem konfiguracji antyrównoległej. Zjawisko występuje również w strukturach bez tego typu oddziaływań. Ważne jest, aby uzyskać konfigurację antyrównoległą. W przypadku warstw potrójnych można to zrobić, jeśli obie warstwy magnetyczne mają różne pola koercji (jedna jest magnetycznie twardsza od drugiej). Wówczas konfigurację antyrównoległą można uzyskać w zakresie pól magnetycznych mieszczących się między polami koercji obu warstw [11]. Inną możliwością jest „przymocowanie” namagnesowania jednej z warstw do podłoża. Jeśli druga warstwa jest magnetycznie miękka i nie ma oddziaływania wymiennego między warstwami, to namagnesowanie tej warstwy ustawia się zawsze wzdłuż pola magnetycznego w płaszczyźnie warstwy. Zmieniając kierunek tego pola, można w sposób ciągły zmieniać konfigurację, a tym samym opór elektryczny. Struktury tego typu nazywane są zaworami spinowymi [13,14].

Z praktycznego punktu widzenia istotna jest nie tyle wartość zmiany oporu elektrycznego przy zmianie konfiguracji, ile czułość efektu, tj. względna zmiana oporu przypadająca na jednostkową zmianę pola magnetycznego. Ponieważ w elektronice mezoskopowej i w elementach pamięci o wysokiej gęstości zapisu pola magnetyczne są słabe, istotne jest, aby do zmiany oporu wystarczyły małe pola. Dzięki zaworom spinowym udało się wytworzyć układy, w których zmiana oporu elektrycznego o kilkanaście-kilkadziesiąt procent zachodzi w bardzo słabych polach magnetycznych, o natężeniu kilku Oe. Właśnie takie struktury nadają się idealnie do czujników słabych pól magnetycznych, w szczególności do głowic odczytujących informację zapisaną na twardym dysku. Ze względu na coraz mniejszy rozmiar elementarnej komórki pamięci, a tym samym i coraz słabsze pole magnetyczne wytwarzane przez taką komórkę, należy stosować coraz subtelniejsze metody odczytu. Umożliwił to właśnie GMR – ze względu na nanoskopowe rozmiary zaworów spinowych, ich czułość na bardzo słabe pola magnetyczne i odpowiednio duży impuls powstający przy zmianie magnetycznej konfiguracji.

Dzięki GMR-owi odżyły nadzieje na skonstruowanie magnetycznych pamięci RAM, które

mogłyby być konkurencyjne wobec aktualnie stosowanych, opartych na technologii półprzewodnikowej. Jeden z prototypów takiej komórki pamięci wykorzystuje strukturę złożoną z dwóch warstw magnetycznych, z których jedna jest magnetycznie miękka, a druga magnetycznie twarda, i między którymi występuje antyferromagnetyczne oddziaływanie wymienne. Do zapisu informacji służy warstwa magnetycznie twarda, natomiast druga warstwa magnetyczna jest wykorzystywana do nieniszczącego odczytu informacji [4].

Jednym z ważniejszych ostatnio odkrytych efektów jest zjawisko magnetycznego przełączania prądem elektrycznym. Polega ono na tym, że w ultracienkich strukturach warstwowych wykazujących GMR spinowo spolaryzowany prąd elektryczny może w pewnych warunkach odwrócić kierunek momentu magnetycznego jednej z warstw [15]. Efekt ten stwarza możliwość zastosowania w różnego typu przełącznikach oraz, a może przede wszystkim, do bezpośredniego adresowania komórek pamięci magnetycznych.

Sukces zastosowania GMR-u w czujnikach pola magnetycznego, głowicach odczytujących i nadzieje na skonstruowanie efektywnych pamięci MRAM spowodował ogromne zainteresowanie spinowo spolaryzowanym przewodnictwem elektronowym, i to nie tylko w układach metalicznych, ale praktycznie we wszystkich układach przewodzących. Znaczenie elementów elektronicznych wykorzystujących spinowo spolaryzowane przewodnictwo elektronowe wynika m.in. stąd, że można nimi sterować za pomocą słabych pól magnetycznych; mają one przez to istotne znaczenie w technice informatycznej, gdzie nośnikami informacji są przede wszystkim układy magnetyczne. Ponieważ współczesna elektronika (w tym również procesory i obecnie wykorzystywane pamięci RAM) wykorzystuje głównie technologię półprzewodnikową, doprowadziło to do koncepcji zintegrowania własności magnetycznych i półprzewodnikowych w ramach tego samego elementu mikroelektronicznego. Do tego spełnione muszą być dwa warunki. Pierwszy to uzyskanie spinowo spolaryzowanego prądu elektrycznego w sposób w pełni kontrolowany. Drugi to odpowiednio długa droga koherencji spinowej, porównywalna z rozmiarami układu. Koncepcje nowych elementów elektronicznych rozwijają się w trzech kierunkach: 1) po-

szukiwanie nowych efektów fizycznych w metalicznych układach ferromagnetycznych, 2) uzyskanie półprzewodników o własnościach ferromagnetycznych w temperaturze pokojowej, 3) wykorzystanie w jednym elemencie jednocześnie magnetycznych własności metali i elektrycznych własności półprzewodników (struktury hybrydowe).

### 3. Magnetoopór tunelowy

Sukces GMR-u wywołał zainteresowanie analogicznym efektem występującym w magnetycznych złączach tunelowych. Już w roku 1975 Julierre zaobserwował, że opór elektryczny złącza tunelowego, w którym elektrodami są metale ferromagnetyczne, zależy od jego konfiguracji magnetycznej [16]. Przy jej zmianie z antyrównoległej na równoległą uzyskał zmianę oporu o 14%. Jest to tzw. magnetoopór tunelowy (TMR). Trudności natury technologicznej w uzyskaniu złączy o powtarzalnych charakterystykach i kontrolowanych parametrach spowodowały brak większego zainteresowania tym efektem. Dopiero poprawa technologii w latach 90. zaowocowała opracowaniem metod wytwarzania złączy tunelowych o powtarzalnych i trwałych charakterystykach. Wyniki prac doświadczalnych prowadzonych aktualnie w wielu laboratoriach pozwalają stwierdzić, że w układach z ferromagnetycznymi elektrodami typu metali przejściowych 3d wartość TMR-u może sięgać kilkudziesięciu procent. Efekt ten jest znacznie większy, jeśli elektrody zastąpić układem półmetalicznym, w którym na poziomie Fermiego elektrony są całkowicie spolaryzowane spinowo (tzn. gęstość stanów na poziomie Fermiego jest zerowa dla jednej orientacji spinu). Istnieją też inne możliwości uzyskania stosunkowo dużego TMR-u. Jedną z nich jest zastąpienie niemagnetycznej bariery przez barierę ferromagnetyczną (np. EuS). Do uzyskania TMR-u wystarczy wówczas jedna elektroda ferromagnetyczna (druga może być niemagnetyczna) [17]. Można również wykorzystać złącza podwójne z dwiema ferromagnetycznymi barierami i niemagnetycznymi elektrodami [18].

Mechanizm fizyczny prowadzący do TMR-u jest jakościowo podobny do mechanizmu odpowiedzialnego za GMR w zakresie przewodnictwa balistycznego. Zależność struktury elektronowej (a zwłaszcza gęstość stanów na poziomie Fermiego) od spinu w ferromagnetycznych elek-

trodach powoduje, że w konfiguracji równoległej elektrony w jednym kanale spinowym tunelują znacznie łatwiej aniżeli elektrony z drugą orientacją spinu. W konfiguracji antyrównoległej oba kanały spinowe przewodzą znacznie słabiej i nie ma zwarcia, typowego dla konfiguracji równoległej. U podstaw tego mechanizmu leży fakt, że procesy tunelowe są z reguły procesami zachowującymi orientację spinu. Spinowo spolaryzowane przewodnictwo elektronowe w złączach tunelowych ma charakterystyki podobne do GMR. Są jednak istotne różnice. Na przykład, TMR zależy w sposób istotny od napięcia – najczęściej spada z jego wzrostem. Zależność ta jest m.in. konsekwencją tego, że wraz z rosnącym napięciem zmienia się gęstość stanów, do których mogą tunelować elektrony.

Magnetoopór tunelowy spełnia warunek istotny dla praktycznych zastosowań, zwłaszcza w technikach informatycznych, aby ciepło Joule'a wydzielane w elementach nanoelektronicznych w trakcie pracy było małe. W szczególności okazuje się, że parametry pamięci MRAM wykorzystujących TMR są znacznie lepsze od parametrów pamięci opartych na GMR-ze. I właśnie MRAM-y oparte na TMR-ze mają realną szansę praktycznego zastosowania w komputerach nowej generacji [19].

### 4. Struktury hybrydowe

Jedną z najnowszych i – jak się wydaje – najbardziej obiecujących koncepcji w spintronice jest idea wykorzystania w jednym układzie własności elektrycznych półprzewodników i własności magnetycznych metali. Podstawową sprawą jest tutaj problem wstrzykiwania spinowo spolaryzowanego prądu z metalu ferromagnetycznego do półprzewodnika i uzyskania oraz utrzymania odpowiedniego stopnia polaryzacji prądu w półprzewodniku [20]. Problem ten stwarzał pewne trudności, ale w ostatnim roku udało się osiągnąć znaczny postęp w tej dziedzinie.

Przykładem tego typu struktur może być tranzystor, w którym emiter i kolektor tworzą układ półprzewodnikowy, a bazą jest metaliczna struktura wielowarstwowa wykazująca efekt GMR [21]. Zasada działania takiego tranzystora, który może służyć do zmiany stopnia polaryzacji prądu i uzyskiwania dużego magnetooporu, opiera

się na fakcie, że na granicach emitera i kolektora z bazą tworzy się bariera Schottky’ego. Po przyłożeniu odpowiedniego napięcia elektrony wstrzykiwane są ponad barierą do bazy i poruszają się balistycznie w kierunku kolektora. Jeśli jednak ulegną niesprężystemu rozproszeniu w bazie, to tracą część energii i nie będą w stanie pokonać bariery na granicy baza–kolektor. Jeśli baza jest w równoległej konfiguracji magnetycznej, to istnieje duża różnica dróg swobodnych dla elektronów o różnych orientacjach spinu. W takiej sytuacji do kolektora będą docierać w zdecydowanej większości elektrony z tylko jedną orientacją spinu. Daje to wysoki stopień polaryzacji spinowej prądu w obwodzie kolektora. Jeśli natomiast baza jest w konfiguracji antyrównoległej, to droga swobodna elektronów w bazie jest praktycznie niezależna od kierunku spinu i prąd w obwodzie kolektora nie jest spinowo spolaryzowany. Zmiana konfiguracji z antyrównoległej na równoległą jest więc związana z dużym magnetooporem.

Innym przykładem możliwości struktur hybrydowych jest koncepcja spinowego tranzystora polowego, w którym do dwuwymiarowego gazu elektronowego wytworzonego w heterostrukturach półprzewodnikowych wstrzykiwany jest z ferromagnetycznych elektrod prąd spinowo spolaryzowany [22]. Jeśli droga dyfuzji spinu w gazie dwuwymiarowym jest większa niż odległość między elektrodami, to natężenie prądu w takim układzie zależy od wzajemnej orientacji momentu magnetycznego elektrody, z której wstrzykiwane są elektrony (polaryzatora), i elektrody, do której elektrony wpływają opuszczając gaz dwuwymiarowy (analyzera). W strukturach tych występuje dodatkowo silne sprzężenie spin–orbita, które powoduje obrót spinu o pewien kąt w trakcie jego wędrówki przez układ. Maksymalny prąd w układzie płynie wówczas, gdy moment magnetyczny analyzera jest obrócony o ten właśnie kąt w stosunku do kierunku momentu magnetycznego polaryzatora.

## 5. Tranzystor jednoelektronowy

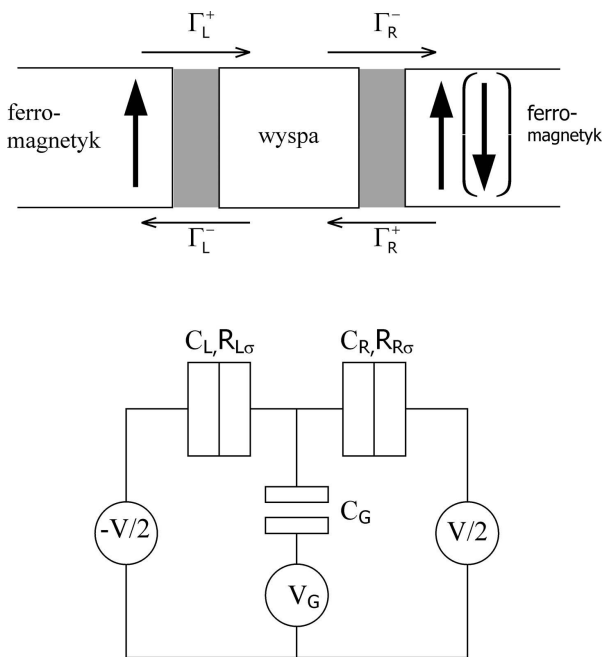
Miniaturyzacja elementów elektronicznych jest ograniczona barierami narzuconymi przez samą Przyrodę. Jak daleko można zejść z rozmiarami tranzystora polowego (FET), aby jego istota nie została zmieniona? Z pewnością poniżej pew-

nych granic nie będzie to już tranzystor polowy. Jeśli rozmiary układu stają się coraz mniejsze, to istotne stają się efekty związane z energią elektrostatycznego ładowania. Doprowadziło to do koncepcji tranzystora jednoelektronowego (SET). Ze względu na postępującą miniaturyzację elementów elektronicznych w konwencjonalnych komputerach wydaje się możliwe przejście od technologii opartej na FET-ach do technologii opartej na SET-ach.

Tranzystor jednoelektronowy jest podwójnym złączem tunelowym z elektrodą centralną tak małą, że energia elektrostatyczna związana ze znajdującym się na niej elektronem nadmiarowym jest większa od energii termicznej i powoduje zablokowanie przepływu prądu [23]. Dopiero przyłożenie pewnego napięcia (bramkującego) do elektrody centralnej (nazywanej często wyspą) powoduje odblokowanie układu. W fazie odblokowanej prąd płynie na zasadzie sekwencyjnego przepuszczania pojedynczych elektronów. Jeśli elektrody zewnętrzne są ferromagnetykami, to wstrzykiwane elektrony są spolaryzowane spinowo, a prąd elektryczny zależy od magnetycznej konfiguracji układu [24]. Tę konfigurację można zmieniać za pomocą słabego pola magnetycznego, a tym samym sterować prądem elektrycznym. Jest to idea ferromagnetycznego tranzystora jednoelektronowego, pokazanego schematycznie na rys. 2.

Charakterystyki prądowo-napięciowe układu zawierają „schody kulombowskie”, odzwierciedlające pojawianie się nowych kanałów tunelowych związanych z możliwością przebywania na elektrodzie centralnej kolejnych dodatkowych elektronów. W obszarze blokady wyłączony są procesy tunelowania sekwencyjnego, jednakże mogą zachodzić procesy tunelowania wyższego rzędu, podczas których jeden elektron tuneluje w sposób zsynchronizowany ze źródła na elektrodę centralną, a drugi opuszcza elektrodę centralną przez drugą barierę. Tego typu procesy nie zmieniają stanu ładunkowego elektrody centralnej, więc nie są zablokowane przez energię elektrostatyczną. Najważniejsze w przypadku ferromagnetycznego tranzystora jednoelektronowego jest to, że zależne od spinu procesy tunelowe – zarówno w obszarze tunelowania sekwencyjnego jak i procesów wyższego rzędu – prowadzą do nierównowagowego stanu magnetycznego elektrody central-

nej (akumulacji spinowej), jeśli procesy rozproszeniowe z odwróceniem spinu są słabe. Zmiana konfiguracji magnetycznej układu zmienia również akumulację spinową, a tym samym i charakterystyki przewodnictwa. Jeśli natomiast sama elektroda centralna jest układem ferromagnetycznym, to warunek długiego czasu relaksacji spinowej na niej nie jest konieczny, a możliwość sterowania tranzystorem za pomocą pola magnetycznego istnieje również w przypadku szybkich procesów relaksacji spinowej.



Rys. 2. Ferromagnetyczny tranzystor jednoelektronowy: podwójne złącza tunelowe (część górna) i schemat ideowy (część dolna).  $\Gamma_{L(R)}$  oznaczają amplitudy tunelowania przez poszczególne złącza na wyspę (+) i z wyspy (-),  $C_{L(R)}$  i  $C_G$  są pojemnościami odpowiednio lewego i prawego złącza tunelowego oraz bramki, natomiast  $R_{L(R)\sigma}$  oznaczają zależne od spinu opory obu złączy.

Praca jest finansowana w ramach grantu Komitetu Badań Naukowych nr 5 P03B 091 20.

### Literatura

- [1] G.A. Prinz, *Science* **282**, 1660 (1998).
- [2] J. Gregg i in., *J. Magn. Magn. Mater.* **175**, 1 (1997).
- [3] D.P. DiVincenzo, D. Loss, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 202 (1999).
- [4] J.M. Daughton, *J. Magn. Magn. Mater.* **192**, 334 (1999).
- [5] M.N. Baibich i in., *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [6] G. Binasch i in., *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [7] P. Grunberg i in., *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- [8] P. Bruno, C. Chapert, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 1602 (1991); J. Barnaś, *J. Magn. Magn. Mater.* **111**, L215 (1992).
- [9] J.A. Wolf i in., *J. Magn. Magn. Mater.* **121**, 253 (1993).
- [10] M. Ruhrig i in., *phys. stat. sol. (a)* **125**, 635 (1991).
- [11] J. Barnaś i in., *Phys. Rev. B* **42**, 8110 (1990); R.E. Camley, J. Barnaś, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 664 (1989).
- [12] J. Barnaś i in., *J. Phys. E: Cond. Matter* **7**, 6437 (1995).
- [13] J. Barnaś i in., *Vacuum* **41**, 1241 (1990).
- [14] B. Dieny i in., *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).
- [15] E.B. Myers, *Science* **285**, 867 (1999).
- [16] M. Julliere, *Phys. Lett.* **54A**, 225 (1975).
- [17] P. Le Clair i in., *8cond-mat/0107571*.
- [18] M. Wilczyński, J. Barnaś, *Sensors and Actuators A* **91**, 188 (2001).
- [19] J.M. Daughton, *J. Appl. Phys.* **81**, 3758 (1997).
- [20] Y. Ohno i in., *Nature* **402**, 790 (1999); H.J. Zhu i in., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 16601 (2001).
- [21] D.J. Monsma i in., *Science* **281**, 407 (1998).
- [22] B. Datta, S. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990); D. Grundler, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 1058 (2001).
- [23] *Single Charge Tunneling Phenomena*, red. H. Grabert, M.H. Devoret, NATO ASI Series t. 294 (Plenum, New York 1992).
- [24] J. Barnaś, A. Fert, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1058 (1998); *Europhys. Lett.* **44**, 85 (1998); J. Martinek i in., *J. Magn. Magn. Mater.* **207**, L1 (1999).