

prof. dr hab. Witold Bardyszewski  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Hoża 69  
00-681 Warszawa

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**mgr Piotra Sankowskiego**  
**pt.: “ Theory of Spin-Dependent Phenomena in Layered Structures Based on**  
**(Ga,Mn)As”**

Magister Piotr Sankowski przedstawił w swojej pracy doktorskiej wyniki analizy teoretycznej problemu transportu spolaryzowanych spinowo elektronów przez wielowarstwowe heterostruktury półprzewodnikowe. Temat pracy mieści się w szerokim spektrum badań nad wykorzystaniem spinu cząstek w urządzeniach mikroelektronicznych, a więc dotyczy dynamicznie rozwijającej się w ostatnich latach spintroniki. Podstawowym mechanizmem umożliwiającym działanie urządzeń spintronicznych jest sprzężenie zjawisk magnetycznych i elektrycznych, tak jak to ma miejsce na przykład w przypadku gigantycznego magnetooporu czy też wymuszonego polem elektrycznym ferromagnetyzmu. Sprzężenie tego typu może być realizowane w złączach zawierających naprzemiennie warstwy magnetyczne i niemagnetyczne. Podstawowym parametrem determinującym sprawność takiego urządzenia jest wydajności wstrzykiwania spinowo spolaryzowanych nośników w obszar złącza oraz możliwość kontroli i pomiaru stopnia polaryzacji spinowej. Szczególnie przydatne są tutaj złącza półprzewodnikowe zawierające półprzewodniki ferromagnetyczne typu III-V z manganem takie jak (Ga,Mn)As czy też (In,Mn)As, które dzięki zaawansowanej technologii wytwarzania pozwalają na dokładną kontrolę własności międzypowierzchni oraz barier potencjałów w strukturach wielowarstwowych. Za pomocą struktur z ferromagnetycznymi kontaktami wykonanymi z (Ga,Mn)As udało się ostatnio uzyskać bardzo wysoką polaryzację spinową wstrzykiwanego prądu oraz zaobserwowano silny efekt magnetooporu. Zrozumienie zjawisk zachodzących w urządzeniach półprzewodnikowych wymaga dokładnego modelowania ich struktury elektronowej z uwzględnieniem oddziaływań spinowych oraz zrozumienia mechanizmów przewodzenia prądu. Autor pracy koncentruje swoją uwagę przede wszystkim na zjawisku sprzężenia wymiennego między półprzewodnikowymi warstwami magnetycznymi oraz na efektach tunelowania spolaryzowanych nośników z magnetycznej warstwy (Ga,Mn)As przez cienkie warstwy półprzewodnikowe.

Praca jest napisana w języku angielskim i zawiera 8 rozdziałów oraz listę publikacji jako rozdział 9. Rozprawa liczy 90 stron. Większość uzyskanych wyników została opublikowana w ostatnich latach w jedenastu spośród szesnastu publikacji autora (wg spisu w rozprawie). Artykuły te ukazały się w prestiżowych czasopismach międzynarodowych takich jak *Physical Review*, *Journal of Applied Physics*, *Physica Status Solidi* itp..

Wstęp zawiera krótki przegląd “klasycznych” materiałów i układów w których występuje zjawisko magnetooporu. Autor wskazuje trzy główne grupy zagadnień, których dotyczy rozprawa:

- 1) Badanie sprzężenia wymiennego między warstwami wykonanymi z półprzewodnika magnetycznego rozdzielonymi półprzewodnikiem niemagnetycznym
- 2) Analiza tunelowania spinowo spolaryzowanych nośników z p-(Ga,Mn)As do warstwy półprzewodnika niemagnetycznego w diodzie Zenera-Esakiiego
- 3) Magnetoopór tunelowy półprzewodnikowych struktur trójwarstwowych z uwzględnieniem anizotropii.

Wymienione wyżej zagadnienia są badane w ramach jednolitego modelu ciasnego wiązania zwięźle opisanego w rozdziale 2 rozprawy. Model ten, w odróżnieniu od stosowanego w literaturze przybliżenia  $k \cdot p$  pozwala na uwzględnienie istotnych czynników takich jak struktura atomowa międzypowierzchni, deformacja sieci, wpływ członów Rashby i Dresselhaus'a oraz udział stanów z dużymi poprzecznymi wektorami falowymi w procesie tunelowania. Autor wprowadza dodatkowe elementy związane z występowaniem oddziaływania wymiennego sp-d między jonami Mn i nośnikami w (Ga,Mn)As w duchu przybliżenia pola średniego i przybliżenia kryształu wirtualnego oraz bierze pod uwagę sprzężenie spin-orbita. Wydaje się, że poczynione założenia przy całej swojej prostocie niezbędnej z punktu widzenia obliczeń numerycznych obejmują niezbędną fizykę badanych problemów. Prezentacja modelu dokonana w rozdziale 2 jest bardzo precyzyjna. Jedyne zastrzeżenie budzi brak definicji operatora  $\hat{T}_R$  przed równaniem (2.4) choć oczywiście można się łatwo domyślić jego znaczenia.

Następne rozdziały omawiają kolejno trzy grupy zjawisk zaanonsowane we wstępie. W rozdziale 3 przedstawiono wyniki obliczeń sprzężenia wymiennego między warstwami magnetycznymi (Ga, Mn)As rozdzielonymi warstwą półprzewodnika niemagnetycznego. Sprzężenie to otrzymuje się w wyniku porównania energii dziur w paśmie walencyjnym w supersieci złożonej z warstw magnetycznych i niemagnetycznych dla równoległej (“ferromagnetycznej”) i antyrównoległej (“antyferromagnetycznej”) orientacji warstw magnetycznych. Wyniki symulacji wskazują na potwierdzone doświadczalnie szybkie zanikanie sprzężenia wymiennego między warstwami magnetycznymi z szerokością przekładki niemagnetycznej. Okazuje się również, że sprzężenia maleje wraz z rosnącą barierą energetyczną między w przekładką i warstwą magnetyczną. W zgodzie z danymi doświadczalnymi przeważa tendencja sprzężenia

ferromagnetycznego między sąsiednimi warstwami (Ga, Mn)As. Najciekawszym wynikiem tego rozdziału jest wykazanie, że manipulując odpowiednio koncentracją dziur i grubością przekładki niemagnetycznej można zmienić charakter wymiany międzywarstwowej na antyferromagnetyczny. Otwiera to nowe możliwości zastosowań takich struktur.

Kolejny rozdział 4 wprowadza formalizm Landauera-Büttkera w zastosowaniu do wyznaczenia spinowo spolaryzowanego prądu tunelowego. Autor posługuje się techniką macierzy przejścia w sformułowaniu pochodzącym z prac A. Di Carlo i współpracowników (odnośniki [12] i [17]). Oprócz podstawowych wzorów wiążących prąd tunelowania z macierzą transmisji pojawia się w tym rozdziale definicja prądu spinowo spolaryzowanego. Niestety autor nie wyjaśnia dlaczego akurat taka definicja wydaje się bardziej fizyczna niż inne. Odwołanie się do pracy [9] nic nie pomaga, bowiem jest ona równie lapidarna w tej mierze. Autor omawia też metodę obliczeń samouzgodnionych biorących pod uwagę efekty długozasięgowego oddziaływania kulombowskiego między elektronami. Wydaje się, że ta część pracy zyskałaby gdyby autor zamieścił pełniejszy opis metody w dodatku.

Rozdział 5 zawiera szczegółowe omówienie i dyskusję wyników symulacji tunelowania w diodzie Zenera-Esakiego p-(Ga,Mn)As/n-GaAs. Pełny rachunek samouzgodniony jest niezwykle czasochłonny nawet w bardzo okrojonej wersji modelu złącza. Dlatego bardzo interesująca jest próba ominięcia tej trudności przez wprowadzenie prostszych modeli takich jak przybliżenie płaskich pasm czy też model trójwarstwowy złącza. Do najważniejszych wyników tego rozdziału należy wyjaśnienie znanej z doświadczenia “anomalii napięciowej” wyrażającej się szybkim zanikiem polaryzacji prądu z przyłożonym napięciem. Autor przedstawia mechanizm odpowiedzialny za to zjawisko wynikający z roli jaką w tunelowaniu odgrywają nośniki “mniejszościowe” (z punktu widzenia polaryzacji spinowej). Przedstawiona argumentacja poparta wynikami symulacji jest bardzo przekonująca. Zrozumienie mechanizmu odpowiedzialnego za “anomalię” pozwala na jej przeciwdziałanie poprzez na przykład odpowiedni dobór parametrów materiałowych takich jak koncentracja Mn czy koncentracja dziur w emiterze. Wyniki symulacji potwierdziły również spodziewaną anizotropię prądu i jego polaryzacji spinowej zgodnie z symetrią  $C_{2v}$  złącza. Z kolei analiza poprzecznej anizotropii prądu tunelowania dla magnetyzacji kontaktu równoległej i prostopadłej do płaszczyzny złącza wykazują jedynie jakościową zgodność z doświadczeniem. Jest to usprawiedliwione faktem, że symulacja dotyczy tylko prądu tunelowania.

Kolejny rozdział dotyczy tunelowania między dwiema spolaryzowanymi elektrodami z p-(Ga,Mn)As rozdzielonymi niemagnetyczną przekładką półprzewodnikową. Jest to sytuacja diametralnie różna od złącza Zenera-Esakiego w tym sensie, że tunelowanie zachodzi jedynie w paśmie walencyjnym, a wygięcie pasm nie powinno odgrywać praktycznie żadnej roli. Mimo tej zasadniczej różnicy występuje silna “anomalia napięciowa” magnetooporu.

Przedstawiona staranna analiza wpływu parametrów materiałowych na to zjawisko wskazuje na kluczową korelację pomiędzy wysokością bariery potencjału między przekładką a kontaktem: im wyższa bariera tym większe napięcie odcięcia dla magnetooporu. Wydaje się, że jest to jeden z najważniejszych wyników tej pracy w odniesieniu do struktur trójwarstwowych. Autor bada też wpływ tego co nazywa "interface roughness" na magnetoopór i ze zdumieniem odkrywa, że efekt ten prowadzi do zwiększenia magnetooporu. Jeśli jednak dobrze zrozumiałem sposób w jaki chropowatość międzypowierzchni została zaimplementowana w programie numerycznym, to właściwszy byłby tu termin "interface broadening" i w związku z tym być może zwiększenie magnetooporu nie jest tak zaskakujące. Tunelowy magnetoopór struktury trójwarstwowej zgodnie z oczekiwaniami wykazuje anizotropię zgodną z symetrią  $D_{2d}$ . Najbardziej interesującym wnioskiem płynącym z analizy mechanizmu tej anizotropii jest wykazanie, że wynika ona głównie z anizotropii prądu przy antyrównoległej orientacji polaryzacji kontaktów i rośnie dla małych koncentracji dziur. Podobna zależność od koncentracji dziur ma również miejsce dla magnetooporu przy orientacji polaryzacji kontaktów prostopadłej i równoległej do płaszczyzny złącza. Otrzymane wyniki są zgodne co do rzędu wielkości z doświadczeniem. Obok symulacji numerycznych autor prezentuje w rozdziale 7 prosty model tunelowania swobodnych dziur między kontaktami spolaryzowanymi spinowo. Analityczna postać macierzy przejścia pozwala na szczegółową dyskusję wpływu różnych parametrów na efekt tunelowania. Model ten w zasadzie odtwarza jakościowo wyniki uzyskane w ramach przybliżenia ciasnego wiązania oraz pozwala na zbudowanie pomostu między "klasyczną" teorią Jullière'a łączącą magnetopór bezpośrednio z polaryzacją spinową kontaktów. Ten bardzo dydaktycznie napisany rozdział pozwala zrozumieć jakie czynniki determinują własności złącza.

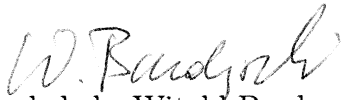
Oceniając rozprawę pracę należy podkreślić, że dotyczy ona zagadnień bardzo intensywnie badanych w ostatnich latach. Podstawowym walorem modelu prezentowanego w rozprawie jest nie tylko zdolność odtwarzania znanych wyników eksperymentalnych, ale też możliwość optymalizowania półprzewodnikowych struktur wielowarstwowych zawierających warstwy magnetyczne. Przeprowadzona analiza trzech typów zjawisk w takich układach jest staranna i kompleksowa. Z całą pewnością można stwierdzić, że wyniki osiągnięte przez mgr Piotra Sankowskiego są na światowym poziomie. Układ pracy doktorskiej jest bardzo logiczny, a styl zwięzły. Strona edytorska pracy jest poza drobnymi usterkami, praktycznie bez zarzutu. Przymuszczałnie za zastąpienie w kilku miejscach słowa "electron" przez "election" można obwinić automatyczny korektor błędów. Nie wiem kogo winić za to, że odnośniki bibliograficzne nie są przywoływane po kolei, co trochę utrudnia czytanie i nie leży w zgodzie z przyjętym zwyczajem.

Podsumowując uważam, że z uwagi na oryginalność i wagę osiągniętych wyników roz-

prawa doktorska mgr Piotra Sankowskiego zasługuje na wyróżnienie za stworzenie kompleksowego modelu zjawiska tunelowania w półprzewodnikowych strukturach spintronicznych.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska mgr Piotra Sankowskiego spełnia wszelkie warunki niezbędne do dopuszczenia do publicznej obrony.

Warszawa, 15 kwietnia 2009 r.

  
prof. dr hab. Witold Bardyszewski