

Dr hab. Wojciech Rudziński  
Zakład Fizyki Mezoskopowej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
ul. Umultowska 85  
61-214 Poznań

Poznań, dnia 17 maja 2017 r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Szczepańskiego  
pod tytułem**

**"Transport ładunku i spinu oraz akumulacja spinowa w magnetycznych  
złączach tunelowych",**

**napisanej pod kierunkiem naukowym**

**prof. dra hab. Vitalija Dugaeva**

### **I. Uwagi dotyczące zawartości merytorycznej rozprawy**

Rozprawa doktorska mgra Tomasza Szczepańskiego lokuje się tematycznie w obszarze badań teoretycznych nad własnościami transportowymi spinowo-spolaryzowanych ładunków w warstwowych strukturach półprzewodnikowych, zawierających bariery potencjału oraz w mezoskopowych złączach tunelowych opartych na dwupoziomowych kropkach kwantowych. Z jednej strony, niektóre układy tego typu są już obecnie integrowane z układami komercyjnych urządzeń mikroelektronicznych, a z drugiej wciąż są przedmiotem zainteresowania na poziomie badań podstawowych. Rozprawa analizuje własności transportowe prądów ładunkowych i spinowych w rezonansowej diodzie tunelowej (RTD), zbudowanej z odpowiedniej kombinacji warstw półprzewodnikowych magnetycznych i niemagnetycznych oraz w złączu tunelowym opartym na dwupoziomowej kropce kwantowej. W pracy widoczny jest wyraźny podział na trzy tematyczne części.

Pierwsza część, obejmująca rozdziały 1 i 2, zajmuje się problemem spinowo-spolaryzowanego transportu w RTD z dyskusją warunków powstawania i zmiany stanów zlokalizowanych w studni potencjału diody w wyniku zmiany rozmiarów barier, szerokości studni, zmian napięcia transportowego oraz w zależności od wielkości pola magnetycznego polaryzującego momenty magnetyczne domieszkowanych półprzewodników magnetycznych, pełniących funkcję elektrod zewnętrznych w układzie. Rozdziały 1 i 2 mają w większości charakter przeglądowy i zawierają opis własności warstwowych struktur półprzewodnikowych, w szczególności układu rezonansowej diody tunelowej. Parametry opisujące własności transportowe warstwowego złącza tunelowego wyznaczono za pomocą standardowej metody rozwiązania układu warunków ciągłości dla funkcji falowych i ich pierwszych pochodnych, zdefiniowanych odpowiednio dla poszczególnych części układu. W rezultacie przebadano numerycznie warunki tworzenia się dyskretnych i quasi-

dyskretnych stanów zlokalizowanych w studni potencjału warstwy niemagnetycznego półprzewodnika przyłączonego do domieszkowanego półprzewodnika magnetycznego DMS. Dla układu w stanie równowagi wyznaczono zależność położenia poziomów rezonansowych studni potencjału od namagnesowania elektrody zewnętrznej DMS oraz od szerokości bariery tunelowej.

Rozszczepienie poziomów rezonansowych studni indukowane magnetyzacją elektrody DMS przedyskutowano również w sytuacji nierównowagowej i wyznaczono zależność między gęstością prądu a energią poziomu rezonansowego. Fakt, że akumulacja spinowa generowana różnicą prawdopodobieństw transportu elektronów spinowo spolaryzowanych w dwóch przeciwnych kierunkach prowadzi do wypadkowej magnetyzacji studni potencjału wykorzystano do analizy zmiany tej magnetyzacji w zależności od napięcia transportowego i dla wybranych grubości bariery tunelowej.

Teoretyczna dyskusja zawarta w dwóch pierwszych rozdziałach wyjaśnia mechanizm, który prowadzi do rozszczepienia poziomów rezonansowych studni potencjału, obserwowanego wcześniej w eksperymentalnych charakterystykach prądowo-napięciowych oraz w spektrach fotoluminescencyjnych uzyskanych dla warstwowych struktur RTD. Szkoda moim zdaniem, że to bezpośrednie nawiązanie do eksperymentów nie zostało mocniej zaznaczone w rozprawie, bowiem szersza dyskusja wyników pracy w kontekście badań doświadczalnych nad własnościami mezoskopowych filtrów spinowych podniosłoby z pewnością jej walor poznawczy.

Część druga, obejmująca rozdziały 3 i 4, rozszerza zakres badań nad własnościami tunelowej diody rezonansowej koncentrując się na sposobach detekcji szumu śrutowego w RTD poprzez manipulowanie stanami magnetycznymi złącza, poprzez modyfikację rozmiarów jego barier tunelowych, uwzględniając ponadto kluczowy wpływ procesów spin-flip studni potencjału na zgodność wyniku pomiaru numerycznego z eksperymentalnym. Przeanalizowano wpływ różnych konfiguracji momentów magnetycznych poszczególnych warstw układu na wielkość takich wielkości jak czynnik Fano i magnetoopór tunelowy złącza.

Analiza szumów opiera się na statystyce pełnego zliczania z wykorzystaniem równania master oraz obliczeniu pierwszych i drugich kumulantów niezbędnych do wyznaczenia czynników Fano. W wyniku teoretycznej analizy własności spinowo-spolaryzowanego transportu w warstwowych złączach tunelowych zaprezentowano w rozprawie nowe możliwości kontrolowania szumu śrutowego przez manipulowanie stanami magnetycznymi złącza, a także przez modyfikację asymetrii barier tunelowych. Wyznaczono w ten sposób zmiany współczynnika Fano w zależności od stosunku wysokości barier tunelowych, dla kilku kolinearnych konfiguracji momentów magnetycznych warstw układu oraz dla wybranych asymetrii spinowych w barierach złącza. To, czego mi zabrakło w komentarzu Autora w tej części rozprawy, to podjęcia nieco głębszej dyskusji nad mechanizmami prowadzącymi do zmian czynnika Fano dla konfiguracji magnetycznych P, AP1 i AP2 układu. W szczególności, mam tu na myśli podanie fizycznego mechanizmu odpowiedzialnego za redukcję czynnika Fano wraz ze wzrostem symetrii rezystancji obu złącz układu,

przesunięcia minimum czynnika Fano dla konfiguracji AP1 i AP2 względem minimum obserwowanego dla konfiguracji P, czy podanie przyczyny pojawienia się drugiego minimum dla konfiguracji AP2.

Kluczowym elementem teorii jest odkrycie zależności szumu śrutowego od gęstości fluktuacji spinu. W konsekwencji, najlepsze dopasowanie wyników teoretycznych z eksperymentem uzyskano dla układu, w którym uwzględniona zostały procesy relaksacji spinu nośników w elektrodzie centralnej. Taki wynik pozwolił z kolei na wskazanie nowej metody wyznaczania czasu spinowej relaksacji na elektrodzie centralnej, wykorzystując do tego celu pomiar szumu śrutowego.

Analiza efektów związanych z szumem śrutowym rozszerzona została w trzeciej części pracy na złącza tunelowe oparte na dwupoziomowej kropce kwantowej przyłączonej do magnetycznych elektrod zewnętrznych. Pretekstem do podjęcia tego nurtu badań były wcześniejsze publikacje, w których doktorant zajmował się wyjaśnieniem mechanizmu powstawania superpoissonowskiego szumu dla prądu ładunkowego w wielowarstwowych złączach tunelowych z barierami tunelowymi, zbudowanymi na bazie organicznego związku z grupy bezwodników kwasowych, peryleno-terakarboksylo-dwuhydratu (PTCDA). Dyskusja nad własnościami transportowymi magnetycznego złącza tunelowego z dwupoziomą kropką kwantową poszerzona została ponadto o prezentację charakterystyki magnetooporu tunelowego oraz spinowego czynnika Fano pozwalającego opisać własności szumu prądu spinowego. Dopasowanie wyniku teoretycznego do eksperymentalnych wartości TMR oraz współczynnika Fano odpowiadającego superpoissonowskiej statystyce dla złącza z warstwą PTCDA, uzyskano dzięki manipulowaniu wartością napięcia transportowego, grubością warstwy PTCDA oraz rezystancją złącza dla obu konfiguracji magnetycznych elektrod zewnętrznych: równoległej i antyrównoległej.

Ze statystycznego punktu widzenia, rozprawa opiera się na 7 artykułach opublikowanych w specjalistycznych czasopismach fizycznych, w tym w 6 zaliczających się wg bazy Journal Citation Reports (JCR) do kategorii czasopism o wysokim współczynniku wpływu (tzw. Impact Factor). W 3 ze wspomnianych wyżej 7 prac doktorant był pierwszym autorem, w pozostałych ulokowany został jako 2, 4, 5 i 6 współautor publikacji. Zgodnie z informacją podaną w rozdziale 6.4, wyniki badań Autora, prezentowane były w latach 2008-2016 na 12 konferencjach naukowych, tematycznie związanych z przedmiotem rozprawy.

*Podsumowując, tematyka podjęta przez doktoranta wpisuje się w nurt ważnych zagadnień fizyki mezoskopowej. Obszar tematyczny rozprawy należy uznać za aktualny, a postawiony w niej problem badawczy za istotny dla teorii i eksperymentu. Zarówno motywacja jak i cel podjętych przez doktoranta badań przyczyniły się do wniesienia wymiernego wkładu w rozwój i poszerzenie wiedzy na temat transportowych własności układów spintronicznych pełniących rolę diod spinowych i filtrów spinowych.*

## II. Uwagi dotyczące formy prezentacji rozprawy doktorskiej

Doktorant opisał swoje osiągnięcia w 106- stronicowej rozprawie. Maszynopis zawiera przejrzystą strukturę rozdziałów i podrozdziałów. Tytuł rozprawy został sformułowany poprawnie, jasno precyzując zakres tematyczny i przedmiot prowadzonych badań. W rozdziale 1.1 na stronie 6 Autor sprecyzował, że celem jego badań i przedstawionej rozprawy jest:

- wyznaczenie podstawowych własności elektrycznego i spinowego przewodnictwa w strukturach półprzewodnikowych, wykorzystujących zjawisko efektu tunelowego;
- poznanie szczegółowych własności układów wykorzystujących zjawisko przepływu i kontrolowania prądów spinowych płynących przez wielowarstwowe struktury.
- teoretyczne przetestowanie modelu manipulowania spinem w układach nanoskopowych.
- zbadanie najważniejszych własności szumów śrutowych pojawiających się w systemach z niewielką liczbą cząstek.

Odpowiadając na postawione w ten sposób cele, doktorant przeprowadził szerokie studia literaturowe oparte na materiałach bibliograficznych obejmujących 106 pozycji, których referencje zebrane zostały w rozdziale 6.4 rozprawy.

Mimo ogólnej pozytywnej oceny pracy nie jest ona wolna od pewnych błędów i niedociągnięć. Polegają one z jednej strony na drobnych uchybieniach edycyjnych jak literówki, np. na stronie 20 w wierszu 26, na stronie 44 w wierszu 17 i na stronie 75 w wierszu 29, brak pełnego opisu symboli niektórych formuł, jak w przypadku symbolu  $I_{bg}$  we wzorze 2.1, opisującego jak się domyślam spinowy prąd otoczenia, czy nie do końca poprawny i przejrzysty, wg norm przyjętych w publikacjach, sposób prezentowania wzorów- tu mam na myśli prezentację funkcji falowych 2.18-2.22. Pomyłką redakcyjną Autora, jak sądzę, jest sformułowanie zawarte w podsumowującym zdaniu na stronie 64: „Ponadto zbadany został efekt **tunelowania** magnetooporu...”, które powinno brzmieć: „Ponadto zbadany został efekt **tunelowego** magnetooporu ...”. Ponadto, na stronie 71, w rozdziale 5.3 błędnie podana została referencja [87] zamiast artykułu [93].

Czytanie rozprawy nieco utrudnia też brak w tekście rozprawy odsyłaczy do ośmiu rysunków: 2.2, 2.3, 2.7, 2.8 i 5.7-5.10. W opisie zachowania się magnetyzacji w zależności od zmiany napięcia transportowego nie skomentowano faktu, że indukowana magnetyzacja wykazuje znaczącą zależność od zmian grubości bariery tunelowej, co przecież zostało zilustrowane graficznie na rysunkach 2.7 i 2.8. Ponadto, na stronie 85 błędnie podane są numeracje rysunków. Zamiast nawiązania komentarza do rysunków 4.7a i 4.7b, których w pracy w ogóle nie ma, powinny być odsyłacze do rysunków 5.11a i 5.11b.

Z drugiej strony, niektóre fragmenty rozprawy mają układ nieco chaotyczny. Miejscami nie jest oczywiste, co jest oryginalnym osiągnięciem autora, a co stanowi element przeglądu literatury. Warto byłoby np. podać referencje publikacji, w których prezentowane były zarówno formuły analityczne, jak i graficzne ilustracje wyników

numerycznych, pokazując w ten sposób, że są to oryginalne rezultaty Autora. Na stronie 20 brak referencji do pracy eksperymentalnej (wykonanej w zespole Molenkampa), która była inspiracją do podjęcia przez Autora badań nad własnościami rezonansowych złącz tunelowych. Domyślam się, że prawdopodobnie chodzi tu o bibliograficzną pozycję [97], jednak wydaje mi się, że praca kluczowa dla dyskusji prezentowanej w rozprawie powinna zostać w wyraźny sposób wyróżniona przez podanie dokładnego odnośnika literaturowego. W rozprawie jest też pewna niespójność logiczna. Zdanie podsumowujące rozdział 3 (str. 54, rozdział 3.6) „W rezultacie nasza praca wskazuje na nową metodę badania czasu relaksacji spinowej dla centralnej elektrody poprzez wykorzystanie szumów śrutowych.” odnosi się do sytuacji opisaną dopiero w rozdziale następnym i powinno znaleźć się w podsumowaniu rozdziału czwartego, w którym opisano własności szumu śrutowego w złączu tunelowym, w obecności procesów relaksacji spinowej.

*Podsumowując, mimo kilku niedociągnięć opisanych przeze mnie z recenzenckiego obowiązku, mankamenty te nie zacierają dobrego wrażenia, jakie mam po przeczytaniu pracy, przede wszystkim ze względu na jej wartościową merytoryczną zawartość.*

### **III. Konkluzja końcowa**

Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia warunki określone w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2015, poz. 1842) i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka. Wnoszę zatem do Rady Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

W. Rudziński