

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr. Tomasza Szczepańskiego
pt. "Transport ładunku i spinu oraz akumulacja spinowa w magnetycznych złączach
tunelowych"

Praca doktorska inż. Tomasza Szczepańskiego, wykonana została pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Vitalia Dugaeva. Dotyczy ona teoretycznej analizy podstawowych własności fizycznych transportu nośników prądu przez wielowarstwowe struktury półprzewodnikowe z uwzględnieniem spinu tych nośników. Analiza ta służy bliższemu poznaniu zasad fizycznych funkcjonowania struktur półprzewodnikowych, ważnych dla zastosowań spintronicznych, takich jak złącza tunelowe oraz układów z tak zwanymi kropkami kwantowymi. Do zbadania powyższych modeli wykorzystane zostały metody teorii ciała stałego. Celem pracy było wyznaczenie charakterystyk fizycznych tunelowania nośników prądu przez bariery potencjału w powyższych strukturach wielowarstwowych oraz wyjaśnienie wpływu geometrii (na przykład nieporządku w skali atomowej) i natężeń pól elektrycznych i magnetycznych na te charakterystyki. Drugim problemem, jaki interesował doktoranta, był ważny problem wpływu szumów śrutowych na własności fizyczne wielowarstwowych złącz tunelowych. Analizę rozszerzono na wpływ pola magnetycznego na magnetoopór złącz tunelowych z różnymi asymetriami barierów potencjału. Autor prezentuje szereg wykresów aby pokazać jak wygląda wpływ różnych czynników zewnętrznych na namagnesowanie, prąd spinowy, czynnik Fano, oraz inne charakterystyki półprzewodnikowych struktur wielowarstwowych.

Zarówno wybór badanych układów, jak i wykorzystanie zaawansowanych metod teorii ciał stałych i procesów stochastycznych uważam za bardzo trafny. Z jednej strony, postęp technik eksperymentalnych pozwala na coraz bardziej dokładną obserwację zjawisk fizycznych w powyższych strukturach półprzewodnikowych. Z drugiej strony, w ostatnich latach badania teoretyczne i symulacji numeryczne szumów i fluktuacji w realnych układach wykorzystywanych w mikroelektronice, odbywają się na coraz większą skalę. Połączenie tych dwóch metod może dać fundamentalną wiedzę na temat wpływu szumów i fluktuacji na tune-

lowanie nosników prądu przez bariery potencjału w strukturach wielowarstwowych. Wiedza ta z kolei może być wykorzystana praktycznie w układach elektronicznych i spintronicznych zwłaszcza tych o nanowymiarach.

Tematyka ta doskonale wpisuje się do bardzo aktualnego nurtu badań w teorii ciała stałego, półprzewodników, struktur wielowarstwowych oraz spintroniki.

Wyniki badań, na których oparta jest praca mgra. Tomasza Szczepańskiego są liczne i różnorodne. Docenić należy tutaj wysiłek doktoranta, który wykonując swoje badania, musiał poznać bliżej tajniki wiedzy z mechaniki kwantowej, fizyki statystycznej, ogólnej teorii ciał stałych oraz z procesów stochastycznych. Nie bez znaczenia tutaj są też techniki numeryczne, skutecznie zastosowane przez doktoranta w celu uzyskania wykresów. Procesy tunelowania kwantowego oraz szumu śrutowego zostały wnikliwie przeanalizowane przez autora poczynając od funkcji falowych cząstek biorących udział w danych procesach do końcowych wyników w postaci czynnika Fano, namagnesowania oraz magnetooporu uzyskanych stosując znane techniki teorii ciał stałych.

Praca doktorska mgra. Szczepańskiego liczy 106 stron. Zawiera ona 6 rozdziałów oraz bibliografię. Szczegółowe omówienie przedstawionej pracy rozpocznie od pierwszego rozdziału, zawierającego cele i motywację pracy, oparte o ostatnie doświadczalne wyniki w dziedzinie spintroniki. Rozdział ten gra rolę pomocniczą i pokazuje rolę badań nad materiałami spintronicznymi z punktu widzenia zarówno rozwoju ogólnej wiedzy o ciele stałym jak i zastosowań nanotechnologicznych. Zastosowania te dotyczą w szczególności inżynierii materiałowej oraz produkcji urządzeń elektronicznych takich jak rezonansowe diody tunelowe (RDT). Jeszcze jedną możliwością może tutaj być zaproponowanie algorytmów tak zwanych obliczeń kwantowych przy użyciu spinu elektronów oraz powyższych RDT gdyż mają oni szybkość przełączania o wielu wiekszą niż zwykłych układach półprzewodnikowych.

W Rozdziale 2, zostały omówione ważne zjawiska magnetooporu, transportu ładunku i spinu oraz generacji prądu spinowego w złączach magnetycznych z barierą tunelową. W szczególności, przeanalizowany został transport ładunku oraz spinu przez barierowe złącze tunelowe ze strukturą rezonansową, czyli RDT. W Rozdziałach 2.1 - 2.3 omówiona została konstrukcja diod tunelowych pod względem użytych struktur półprzewodnikowych.

Struktury te zostały wykorzystane w dalszym ciągu (Rozdział 2.5) do skonstruowania modelu rezonansowego złącza tunelowego. Model ten polega na reprezentacji układu wielowarstwowego z niemagnetyczną warstwą centralną za pomocą potencjałów prostokątnych ze studnią kwantową, jak pokazane na Rys. 2.1. Pewien niedosyt budzi to, że na tym rysunku brakuje wyjaśnień. Na przykład, co to jest U_d , U oraz U_u ? Też, nie wiadomo czemu odpowiadają linie czerwona i niebieska. Zauważam błąd drukarski na str. 20, linia 10 od dołu, gdzie słowo "jest" powtarza się. Potencjał z Rys. 2.1 zostaje dalej wstawiony do równania Schrödingera w celu otrzymania odpowiednich funkcji falowych. Metoda rozwiązywania równania Schrödingera jest podobna do tej ze zwykłej jednowymiarowej studni kwantowej czyli znalezieniu rozwiązań na odpowiednich obszarach (różnych warstwach w tym przypadku) z następnym "zszyciem" wartości funkcji i ich pierwszych pochodnych w punktach skoków potencjału. Procedura ta została wykonana poczynając od wzoru (2.18) (str. 28). Na stronach 28 - 37 zostały szczegółowo przeanalizowane matematyczne subtelności obliczeń. Zauważę tutaj "nadmiar wzorów" na tych stronach. Na przykład, wzory (2.18) oraz (2.20) mogą zostać uproszczone wprowadzeniem oznaczeń dla całek $\int_0^x \kappa_1 dx$, $\int_{d+a}^x \kappa_2 dx$ oraz wynoszeniem wspólnych czynników $\sqrt{\kappa_{1,2}}$. Całki (2.25) oraz (2.27) są jednakowe tak że wzór (2.27) można pominąć. We wzorach (2.30) oraz (2.31) warto wprowadzić oznaczenia dla wykładników, co znacząco zwiększy ich czytelność. To samo dotyczy wzorów (2.33), (2.36), (2.37). Wzór (2.32) zawiera literówkę: dolna granica całkowania ma być $d + a$. Oprócz tego, całka (2.32) jest podobna do (2.25) i (2.27), czyli warto było by te całki połączyć w jedną i odnosić się do niej. Zauważę, że gdyby rys. 2.1 zawierał wyjaśnienia, rysunki 2.5 oraz 2.6, na których również brak wyjaśnień, mogli by być odniesione do rys. 2.1. Wzory (2.57), (2.60), (2.61) - (2.63) oraz (2.83) wykraczają poza marginesy, co łatwo było usunąć. Za pomocą uzyskanych funkcji falowych zostało wyliczone namagnesowanie w zewnętrznym polu magnetycznym (rozd. 2.6), oraz rozszczepienie poziomu energetycznego wywołane prądem (rozd. 2.7). W rozdziale (2.8) zostały przeanalizowane zjawiska prądu spinowego i akumulacji spinowej. Mogę tutaj stwierdzić że, mimo powyższych uwag, autor rozprawy bardzo dobrze sobie poradził z różnymi kwestiami obliczeń analitycznych.

W Rozdziale 3 przeanalizowane zostało zjawisko szumu śrutowego w podwójnym złączu tunelowym bez uwzględnienia procesów relaksacji spinowej. Szumy i fluktuacje są bardzo wyraźne w układach o nanowymiarach ze względnie niewielką liczbą atomów i dlatego

analiza ta jest szczególnie ważną. Zostało pokazane, iż w domieszkowanych (przez atomy z nieskompensowanym spinem) złączach magnetycznych szum śrutowy może być znacząco zredukowany przez koherencyjne przestrzenne ustawienie momentów magnetycznych tych domieszek. Ponadto szum ten zależy od wartości napięcia, przyłożonego do struktury, co powoduje że przedstawiona praca prezentuje nową metodę badania czasu relaksacji spinowej poprzez wykorzystanie szumów śrutowych. W rozdziale 3.2 został zbadany wpływ szumów śrutowych na zjawiska transportu elektronów w dwubarierowych magnetycznych złączach tunelowych. Głównym parametrem tutaj jest tak zwany czynnik Fano. W rozdziale 3.2 czynnik Fano został wyliczony dla szumów z uwzględnieniem spinu, czyli spinowy szum śrutowy. Zauważam literówkę "śutowy" zamiast "śrutowy" na str. 44, druga linia nad wzorem (3.1). Wzór (3.1) wyznacza szukany szum śrutowy, natomiast wzór (3.2) - czynnik Fano. Rozważania zostały przeprowadzone w przypadkach magnetycznej oraz niemagnetycznej warstwy środkowej. Okazało się, że czynnik Fano zawiera informację o względnym uporządkowaniu momentów magnetycznych w różnych warstwach. W dalszym ciągu został uwzględniony wpływ tunelowania oraz relaksacji spinowej. Przypadek braku tej relaksacji został zbadany w rozdz. 3.3 - 3.5 w przypadkach niemagnetycznej (rozdz. 3.4) oraz magnetycznej (rozdz. 3.5) warstwy środkowej. Zauważam literówkę na str. 47, linia 5 w górę od wzoru (3.4): jest "kanły" zamiast "kanały". Czynnik Fano w przypadku braku relaksacji spinowej jest dany ogólnym wzorem (3.20), co prowadzi do szczególnych przypadków centralnej warstwy niemagnetycznej (wzór (3.23) i dalej) oraz magnetycznej, wzór (3.34) i dalej. Oprócz tego, zostało uwzględnione sprzężenie spin-orbita.

W Rozdziale 4 zbadany został szum śrutowy w podwójnym złączu tunelowym w obecności relaksacji spinowej w środkowej warstwie magnetycznej. Został wyprowadzony wyraz dla relaksacji spinowej przez małe nierównowagowe odchylenie całkowitego spinu w warstwie środkowej magnetycznej. W tym modelu wzór (4.11) definiuje szum śrutowy, a wzór (4.13) - czynnik Fano. Rozdział 4.1 poświęcony przypadkowi silnej relaksacji spinowej, w którym obliczony współczynnik Fano został pokazany na rys. 4.1 - 4.3. z uwzględnieniem sprzężenia spin-orbita. Porównanie otrzymanych wyników teoretycznych z eksperymentalnymi zostało wykonane w rozdziale 4.3. Dopasowanie wyników teoretycznych do eksperymentalnych zostało zobrazowane na rys. 4.6. Zauważam tutaj znów przykry brak wyjaśnień w podpisach pod rysunkami 4.5 oraz 4.6. Mimo tego braku widać że zgodność teorii z eksperymentem

jest bardzo dobra, co świadczy o trafnym wyborze modelu teoretycznego. Otrzymane wyniki uwzględniają wzajemne ustawienie momentów magnetycznych w poszczególnych warstwach materiału, jak również różnice w prawdopodobieństwie tunelowania poprzez poziomy energetyczne w warstwie środkowej w zależności od spinu elektronów. Okazało się, że symetria struktury gra znaczącą rolę w uporządkowaniu momentów magnetycznych. Oprócz tego, spin nośników prądu wpływa na wartości czynnika Fano. Ponadto zbadany został wpływ różnicy prawdopodobieństw tunelowania elektronów przez jedną i drugą barierę tunelowa na wielkość magnetooporu w omawianych układach.

W Rozdziale 5 zostało zbadane złącze tunelowe zawierające warstwy molekularne lub kropki kwantowe. Do tego badania został użyty aparat teorii procesów stochastycznych a mianowicie równań kinetycznych w postaci Smoluchowskiego. Równanie fundamentalne zostało wyprowadzone w rozdziale 5.1, natomiast w rozdziale 5.2 została szczegółowo omówiona tak zwana statystyka pełnego zliczania, zbliżona do metody całek po trajektoriach Feynmana i stosowana do obliczeń prawdopodobieństw tunelowania cząstek z uwzględnieniem wszystkich możliwych kanałów transportu ładunku i spinu. Rozdział 5.3 jest poświęcony opracowaniu modelu transportu elektronów (z uwzględnieniem ich spinu) poprzez zlokalizowane stany molekularne oraz charakterystyki szumu śrutowego w organicznych złączach tunelowych. Głównymi wynikami są tutaj zależności czynnika Fano F dla szumu super-poissonowskiego (tak że $F > 1$ w tym przypadku) jako funkcji parametrów asymetrii transportu przez oba złącza tunelowych. Wyniki te są przedstawione na rysunkach 5.3 - 5.6, które teraz zawierają wyjaśnienia parametrów. Zauważę, że wzór, co następuje po wzorze (5.21), wykracza poza marginesy i wymaga formatowania. W rozdziale 5.3 za pomocą powyższej statystyki pełnego zliczania został opracowany model matematyczny przepływu prądu spinowego poprzez strukturę wielowarstwową z dwoma poziomami energetycznymi. Głównymi wynikami tutaj są polaryzacja spinowa prądu (przedstawiona na rys. 5.7 i 5.8) oraz spinowy czynnik Fano (rys. 5.9, 5.10). Porównanie wyników teoretycznych i doświadczalnych zostało wykonane na rysunku 5.11. Jak poprzednio, widać dobrą zgodność pomiędzy teorią a eksperymentem. Zauważę, że rys. 5.11 zawiera szczegółowe wyjaśnienia parametrów co czyni go czytelnym i zrozumiałym.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie wyników uzyskanych w pracy oraz perspektywy

dalszych badań w tym zakresie. Ostatnia część pracy to bibliografia licząca 106 pozycji oraz spis rysunków.

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pana mgra Tomasza Szczepańskiego nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale. Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz okazały dorobek naukowy Pana magistra utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pana mgra Tomasza Szczepańskiego, wykonana pod opieką naukową promotora - Pana Profesora Vitalia Dugaeva - jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących istotny wkład do obszaru wiedzy, który można określić jako teoria tunelowania elektronowego w wielowarstwowych strukturach półprzewodnikowych. Pokazuje ona także jego ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego i symulacji komputerowych z wykorzystaniem autorskich programów. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę o dopuszczenie Pana mgra Tomasza Szczepańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

