

## Recenzja

rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Grzegorza Ilnickiego,  
pt.: **"Spinowo spolaryzowany i nadprzewodzący transport elektronowy w  
kropkach kwantowych"**

---

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Grzegorza Ilnickiego poświęcona jest zagadnieniom dotyczącym zależnego od spinu transportu elektronowego w kropkach kwantowych trojakiemu rodzajowi. Teoretycznie badane są: (i) nanorurki węglowe z niemagnetycznymi elektrodami, (ii) nanokropki magnetyczne osadzone w warstwie izolatora MgO z ferromagnetycznymi elektrodami, oraz (iii) nanokropki magnetyczne z nadprzewodzącymi elektrodami. Inspiracją do zajęcia się tymi zagadnieniami była chęć zinterpretowania wyników eksperymentalnych uzyskanych niedawno w renomowanych ośrodkach naukowych Japonii (prof. Ishibashi, z RIKEN) i USA (prof. Parkin z IBM), z którymi promotor doktoranta (prof. Jan Martinek) ma robocze kontakty. Wspomniane zagadnienia są bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia w kontekście zastosowań w mikroelektronice i spintronice. Z teoretycznego punktu widzenia interesującym wyzwaniem jest próba wyjaśnienia współzależności między kolektywnymi zjawiskami typu efekt Kondo, ferromagnetyzm i nadprzewodnictwo - które choć rywalizują ze sobą – mogą w niektórych okolicznościach współistnieć.

Rozprawa doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów, z których 5 pierwszych wprowadza czytelnika w najważniejsze zagadnienia podejmowane w pracy. Znajdujemy tu podstawowe informacje na temat kropek kwantowych (rozdział 1), w tym o tranzystorze jednoelektronowym i zjawisku blokady kulombowskiej. Należyta uwagę Autor poświęca omówieniu zjawiska sekwencyjnego tunelowania i współtunelowania (kotunelowania). Jest to ze wszech miar uzasadnione, gdyż w dalszej części pracy występują liczne odwołania do tych zjawisk. Również efekt Kondo został wyczerpująco zaprezentowany. Autor omówił, zarówno klasyczny efekt Kondo w metalach z domieszkami magnetycznymi, jak i w nanokropkach z niesparowanym spinem – wyjaśniając mechanizmy fizyczne odpowiedzialne za występowanie odpowiednio maksimum w oporze i maksimum w przewodnictwie w tych układach. Pod koniec rozdziału 1, wspomniane są też krótko nanorurki węglowe. Omawiając wpływ pola magnetycznego na transport elektronowy, Autor ogranicza się do uwzględnienia wyłącznie rozszczepienia zeemanowskiego. Tymczasem istnieje bogata literatura na temat wpływu pola magnetycznego zarówno o orientacji podłużnej jak i poprzecznej. Interesującym byłoby poznać opinię Autora na temat tej drugiej orientacji, odnośnie sposobu pełnego jej uwzględnienia w stosowanych metodach obliczeniowych oraz liczbowego oszacowania

spodziewanego efektu dla badanych nanorurek węglowych i maksymalnego pola magnetycznego stosowanego w eksperymentach (8 T).

W następnych rozdziałach pracy Doktorant przedstawia szereg informacji na temat spinowo spolaryzowanego transportu w wielowarstwach i związanych z tym zastosowań w spintronice. Definiuje podstawowe pojęcia, jak polaryzacja spinowa, akumulacja spinowa i różnego typu efekty magnetooporowe (AMR, GMR, TMR) – rozdział 2. Opisuje też zwięźle zastosowania praktyczne związane z tymi efektami, w tym: czujniki pola magnetycznego, głowice czytające twarde dyski, czy też trwała (nieulotna, ang. *non-volatile*) pamięć typu MRAM. Autor wykazał się dobrą znajomością tej problematyki, wspominając obok metody przełączania namagnesowania polem magnetycznym, także bardziej efektywną metodę przełączania za pomocą spinowo spolaryzowanego prądu (*spin torque switching*). Natomiast stwierdzenie w kontekście porównania przewodnictwa układu w konfiguracji równoległej i antyrównoległej, że w tej ostatniej (cytat) „oba kanały przewodzą znacznie słabiej ze względu na niedopasowanie gęstości stanów” jest zbyt radykalne. Na ogół bowiem kanały te przewodzą istotnie znacznie słabiej niż dobrze przewodzący kanał w konfiguracji równoległej, ale często lepiej niż kanał słabo przewodzący w konfiguracji równoległej. Należy też pamiętać o tym, że w niektórych sytuacjach może występować tzw. odwrotny (*inverse*) GMR lub TMR. Rozdział 3 poświęcony jest problematyce nadprzewodnictwa. Autor przywołuje w nim znany eksperyment Meserveya [52] i wyjaśnia wpływ pola magnetycznego na gęstość stanów złącza nadprzewodnik/metal. W kolejnych dwóch rozdziałach zamieszczono opis metod teoretycznych stosowanych w rozprawie oraz dyskusję przejścia singlet-tryplet, do którego Autor powraca w dalszych oryginalnych częściach pracy.

Do opisu kropki kwantowej przyjęto standardowy hamiltonian składający się z części opisującej elektrody, poziomy energetyczne kropki, energię ładowania, oraz członu opisującego tunelowanie między elektrodami a kropką – traktowany jako mały parametr teorii zaburzeń. Rachunek zaburzeń prowadzony jest z dokładnością do drugiego rzędu wzgl. parametru rozwinięcia, przyjęto też wartości współczynników tunelowania wg złotej reguły Fermiego i zastosowano bardzo prosty schemat rozszczepiania funkcji Grena. Ponadto, stosowano równanie master (nazywane czasem w polskiej literaturze równaniem kluczowym) do opisu limitu blokady kulombowskiej i procesów pierwszego rzędu (tunelowanie sekwencyjne) i drugiego rzędu (kotunelowanie). Zastosowana metoda obliczeniowa ustępuje dokładnością metodom diagramowym, w których - zamiast obrywania szeregu perturbacyjnego - sumuje się do nieskończoności wszystkie diagramy danego rzędu. Do opisu efektu Kondo Doktorant posługuje się modelem Andersona. Przypadek z wieloma domieszkami modeluje dwudomieszkowym hamiltonianem Andersona. Tak więc Autor używa raczej prostych teoretycznych metod obliczeniowych, pozwalających uzyskać zgrubny wgląd w badane mechanizmy fizyczne w miarę tanim kosztem. Takie pragmatyczne podejście jest wg mnie uprawnione ze względu na wielką złożoność badanych problemów. Ostateczny sukces polegający na dobrym pod wzgl. jakościowym zinterpretowaniu wyników eksperymentalnych dowodzi bardzo dobrej intuicji fizycznej Doktoranta (i jego promotora) i inteligentnego kojarzenia badanych problemów z podobnymi znanymi już z literatury.

Rozdział 6 pracy przynosi pierwsze oryginalne rezultaty Autora. Poświęcony jest badaniu transportu elektronowego przez kropkę kwantową w postaci nanorurki węglowej w polu magnetycznym. Nanorurka modelowana jest jako dwa orbitale, których łączne obsadzenie może się zmieniać od  $n=0$  do 4. Zbadano zarówno tunelowanie sekwencyjne jak i kotunelowanie, zwracając szczególną uwagę na zakres obsadzeń bliskich  $n=2$  i punktu degeneracji ( $\epsilon_{a\uparrow}=\epsilon_{b\downarrow}$ ), gdzie może zachodzić przejście typu singlet-tryplet. Teoria przewiduje, że w funkcji pola magnetycznego przejście to cechuje się charakterystyczną zmianą nachylenia wykresu zależnych od spinu poziomów elektronowych. Tego typu zachowanie faktycznie obserwowano eksperymentalnie (patrz zależność  $dV_g/dB$  w funkcji  $B$  na rysunku

6.1). ale występująca tam zmiana nachylenia jest bardzo słaba. Oczekiwałbym komentarza na temat porównania tego nachylenia z oszacowaniami teoretycznymi. Autor tłumaczy obrazowo badane procesy fizyczne za pomocą diagramów 6.2 i 6.5, oraz prezentuje rezultaty dopasowań teoretycznych do mierzonych natężeń prądu. Dopasowania są bardzo dobre, tak w przypadku tunelowania sekwencyjnego jak i kotunelowania. W tym ostatnim przypadku Autor z powodzeniem wyodrębnia składowe pochodzące od procesów elastycznych i nieelastycznych, tj. te które nie zmieniają stanu kropki kwantowej od tych (dla wyższych napięć transportowych), które go zmieniają.

W rozdziałach 7 i 8 Doktorant przedstawia wyniki eksperymentalne współpracowników z IBM i swoje własne teoretyczne dotyczące bardzo interesującego układu złożonego z ferromagnetycznych nanoziaren (CoFe) w osnowie izolatora (MgO) umieszczonej między ferromagnetycznymi elektrodami (też z CoFe). Głównym obiektem zainteresowania w tej części pracy jest pik centralny w widmie przewodnictwa różniczkowego. Autor pokazuje, że ta anomalia typu ZFA (*zero field anomaly*) spowodowana jest efektem Kondo. Przemawia za tym przede wszystkim charakter zależności  $dI/dV$  w konfiguracji równoległej i anytrównoległej ferromagnetycznych elektrod. Jak wiadomo w pierwszej z nich obserwuje się rozdwojony pik centralny (związany z rozszczepieniem Zeemana), a w drugiej – pojedynczy na skutek kompensacji pól magnetycznych pochodzących od elektrod. Porównanie wyników eksperymentalnych przedstawia rysunek 8.3. Wynika z niego, że zachodzi pewna jakościowa zgodność i występują wspomniane wyżej trendy. Ilościowe porównanie utrudnia jednak fakt, że Autor stosuje inne jednostki w dolnej (teoretycznej) części tego wykresu niż w części górnej (eksperymentalnej). Po ujednoliceniu jednostek widać, że wyniki teoretyczne są o rząd wielkości niższe niż doświadczalne. Dodatkowy komentarz Autora – poza stwierdzeniem, że teoretyczna szerokość linii jest znacznie mniejsza niż eksperymentalna – byłby w tym miejscu wskazany.

Układ analizowany w rozdziale 9 różni się od układu z rozdziału ósmego tym, że elektrody ferromagnetyczne zostały zastąpione elektrodami nadprzewodzącymi. Tak więc występuje tu możliwość prześledzenia rywalizujących ze sobą zjawisk związanych z magnetyzmem pochodzącym od nanoziaren w warstwie izolacyjnej, nadprzewodnictwa elektrod i ewentualnie efektu Kondo (jeśli zachodzi ekranowanie momentów magnetycznych przez elektrody). W celu dokładnego zbadania tych kwestii w badanych doświadczalnie układach zastosowano nadprzewodzące elektrody Al (o wąskiej przerwie energetycznej), oraz NbN – o znacznie szerszej przerwie. Jeśli efekt Kondo występuje (przypadek elektrod Al), to związana z nim szerokość pików centralnych jest wyraźnie większa niż przerwa energetyczna w nadprzewodzących elektrodach. Prowadzi to do sytuacji przedstawionej na rysunku 9.2, gdzie w zmierzonym widmie przewodnictwa różniczkowego, na tle szerokiego maksimum pojawiają się dwa dodatkowe leżące blisko siebie maksima. Istotną wskazówką do zrozumienia natury tych maksimów jest fakt, że dodatkowe maksima znikają w dostatecznie silnym polu magnetycznym (ponad 3T), a duży pik nie pojawia się, jeśli w układzie nie ma warstwy nanokropek (rysunek 9.3). Eksperymentalne wyniki dla elektrod nadprzewodzących NbN wykazują brak pików kondowskiego, ale interesujące rozdwojenie pików pochodzących od nadprzewodzących elektrod. Do wyjaśnienia tego zjawiska Autor użył dwudomieszkowego modelu Andersona. Przyjmując, że domieszki sprzężone są wymiennie i mogą tworzyć stany singletowe i trypletowe, Autor argumentuje, że wyższe energetycznie z rozdwojonych maksimów odpowiada (głównie) nieelastycznemu kotunelowaniu przez stan trypletowy, a niższe – kotunelowaniu elastycznemu przez stan singletowy. Wg mnie, jest jednak pewien problem z tą argumentacją, bo jak pokazuje inny rysunek (9.7(a)) podwójna struktura maksimów występuje też w niskich temperaturach i zerowym polu magnetycznym w układzie **bez** magnetycznych kropek kwantowych.

Oceniając pozytywnie pracę od strony merytorycznej, mam kilka uwag krytycznych:

- Struktura rozprawy nie jest zbyt przejrzysta. Autor odsyła czytelnika wielokrotnie do wcześniejszych rozdziałów (co jest dopuszczalne), ale także do dalszych rozdziałów – co utrudnia lekturę.
- Praca napisana jest głównie w pierwszej osobie liczby mnogiej. Forma „my” utrudnia identyfikację koncepcji teoretycznych, które stanowią samodzielny wkład Autora. Za nieuprawnione uważam kilkakrotne użycie tej formy i zwrotów typu „nasz” w odniesieniu do prac stricte technologicznych i eksperymentalnych, wykonanych przez zagranicznych partnerów wspólnych publikacji. Oto kilka przykładów:
  - „Jest ona w naszym eksperymencie niezależna.....” (str. 68),
  - „W naszych złączach z aluminium ...” (str. 110),
  - „w naszej próbce z NbN ...” (str. 120).
- Zabawny błąd literowy wystąpił w paragrafie poświęconym podstawowym definicjom funkcji Grena, gdzie użyto angielskiego określenia *casual* zamiast *causal* (czyli przypadkowa zamiast przyczynowa).
- W podpisie pod rysunkiem 6.8 występuje ujemna wartość parametru oddziaływania kulombowskiego ( $U = -26.7$  meV). Jeśli nie jest to błąd drukarski, to sprawa wymaga wyjaśnienia.
- Na stronie 78 nie zgadzają się jednostki w „ $\Delta B_0 = 0.18 \text{ meV}$ ”. Chodzi zapewne o  $g\mu_B \Delta B_0 = 0.18 \text{ meV}$ .
- Błąd w podpisie pod rysunkiem 9.9:  $|T, 1\rangle$  (a),  $|T, 0\rangle$  (b) zamiast  $|T, 0\rangle$  (a),  $|T, 1\rangle$ .
- W tekście na stronie 121 w dwóch ostatnich akapitach należy zamienić 9.9(c) na 9.9(a) i odwrotnie.

W sumie uważam jednak, że rozprawa została zredagowana poprawnie, jest dobrze ilustrowana wykresami i rysunkami poglądowymi. Cytowania są dobrze dobrane i obejmują najistotniejsze publikacje dla omawianych zagadnień, co wskazuje na to, że Autor bardzo dobrze zna literaturę przedmiotu. Szkoda tylko, że w spisie literatury nie umieścił pełnych tytułów cytowanych prac.

### Konkluzja

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autor uzyskał szereg interesujących wyników poszerzających wiedzę na temat zależnego od spinu transportu elektronowego w różnego typu nanokropkach kwantowych. Na szczególne wyróżnienie zasługuje interpretacja danych eksperymentalnych dotyczących efektu Kondo i wyjaśnienie wpływu rodzaju elektrod zewnętrznych (w tym ferromagnetycznych i nadprzewodzących) na ten efekt.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska w pełni spełnia ustawowe wymagania i wnoszę o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Grzegorza Ilnickiego do publicznej obrony.



Stefan Krompiewski