

**Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr. Michała Gawęczyka  
pt. „Dynamika i dekoherencja spinu w nanostrukturach półprzewodnikowych”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Michała Gawęczyka dotyczy zagadnień bardzo ważnych dla postępu technologicznego. Postępu, na który jest ogromne zapotrzebowanie wynikające ze zbliżania się do granic możliwości funkcjonowania tradycyjnej elektroniki. Przy ogromnym wzroście ilości przetwarzanych informacji, w sytuacji gdy wiemy, że prawo Moore'a nie da się stosować poza granicami wynikającymi m.in. z zasad mechaniki kwantowej, konieczne jest znalezienie innych sposobów fizycznej realizacji procesów przechowywania i przetwarzania informacji. Wierzymy, że odpowiednio dalekim horyzoncie czasowym odpowiedzią będą komputery kwantowe, choć w obecnej chwili trudno jeszcze powiedzieć, która z proponowanych praktycznych realizacji znajdzie praktyczne zastosowanie. W bliższym horyzoncie liczymy, że dotychczas wykorzystywane ładunkowe stopnie swobody zastąpione zostaną spinowymi, czyli że do przetwarzania informacji będzie można wykorzystać spintronikę.

Praca doktorska Pana Gawęczyka poświęcona jest dynamice spinu, czyli kluczowego elementu, który może być użyty do zapisu informacji – zarówno klasycznej, bitu, czy kwantowej, w postaci kubitu. Aby tak zapisana informacja była trwała w skali czasowej umożliwiającej jej praktyczne wykorzystanie, niekontrolowane procesy niszczące stan spinowy muszą być odpowiednio wolne. I właśnie tym procesom, ich szybkości oraz pytaniom jak możemy uczynić je odpowiednio powolnymi, poświęcona jest recenzowana rozprawa.

Ten długi wstęp miał za zadanie podkreślenie wagi tematyki rozprawy. Wagi zarówno z czysto poznawczego punktu widzenia, żeby pomóc zrozumieć mechanikę procesów zachodzących w nanoukładach, jak z punktu widzenia potencjalnych zastosowań spinowych stopni swobody do przechowywania i przetwarzania informacji, czyli gdy w praktyce

niektóre urządzenia elektroniczne będziemy chcieli zastąpić ich spintronicznymi odpowiednikami. Zadanie było więc ambitne i nieco wybiegając do przodu mogę powiedzieć, że doktorant bardzo dobrze się z niego wywiązał.

Na rozprawę składa się *Wstęp*, siedem rozdziałów stanowiących zasadniczy trzon pracy, *Podsumowanie*, oraz kilka krótszych części zawierających m.in. spis literatury czy wykaz używanych symboli. Praca jest długa, 161 stron nie licząc załączonych wykazów osiągnięć doktoranta. Nawet jeśli weźmie się pod uwagę jej dość „barokową” strukturę z dużą liczbą odnośników i dygresji, to zawarty w niej materiał wykracza ponad średnią podobnych rozpraw.

Praca rozpoczyna się w typowy sposób, czyli od *Wstępu*, w którym omawiana jest motywacja wyboru tematyki oraz schemat budowy pracy. Następnie, w dwóch pierwszych rozdziałach („*Spin nośników zlokalizowanych w nanostrukturach*” oraz „*Formalizm i elementy modelu teoretycznego*”) doktorant opisuje obiekty i metody badań. I tak rozdział pierwszy poświęcony jest opisowi spinu elektronów uwięzionych w pojedynczych kropkach kwantowych i ich układach. W telegraficznym skrócie przedstawione są tu metody wytwarzania kropek kwantowych, sposoby inicjalizacji i pomiaru stanów spinowych oraz zjawisko dysocjacji ekscytonu w sprzężonych kropkach. Rozdział drugi poświęcony jest natomiast matematycznemu opisowi powyższych obiektów i zjawisk. Na początku wprowadzone są tu takie pojęcia jak macierz gęstości czy formalizm drugiego kwantowania. Dalej wprowadzany jest model, który będzie używany w dalszych częściach pracy. Początek tej części jest w zasadzie krótkim wprowadzeniem w fizykę ciała stałego. Oczywiście nie da się tego zrobić na kilku czy kilkunastu stronach i w efekcie pojawiają się tam fragmenty chyba nie najszcześliwiej sformułowane, jak np. „*Mimo tych przybliżeń, do rozważenia nadal pozostaje makroskopowo wielociałowy problem oddziałujących elektronów, który sprowadza się do zagadnienia pojedynczego elektronu w sieci rdzeni atomowych i w średnim polu oddziaływań z pozostałymi elektronami, wprowadzając przybliżenie jednoelektronowe*”. Problem w tym, że przybliżenie jednoelektronowe, zwłaszcza opisane następującymi dalej wzorami, pomija efekty wielociałowe. Następnie doktorant koncentruje się na metodzie  $k \cdot p$  i fragment ten jest już znacznie bardziej precyzyjnie sformułowany. Wprowadzany jest tam ośmiopasmowy hamiltonian, opisana metoda przejścia od rozwiązań dla litego kryształu do rozwiązań dla nanostruktury, przybliżenie jednopasmowe i harmoniczne przybliżenie potencjału pułapkującego. Dalej omawiany jest wpływ odkształceń i defektów struktury kry-

stalicznej, a także metody opisu wpływu pól elektrycznego i magnetycznego. Duża część rozdziału poświęcona jest oddziaływaniu elektronów z fononami. Rozdział kończy się opisem efektów dynamicznych, w tym dekoherencji fazowej i oddziaływaniu z impulsem optycznym.

Rozdział trzeci „*Dekoherencja spinu w trakcie optycznej inicjalizacji*”, rozpoczyna prezentację oryginalnych wyników doktoranta. Z eksperymentów wiadomo, że tytułowe zjawisko jest bardzo szybkie. Żeby znaleźć jego wyjaśnienie wprowadzany jest model opisujący oddziaływanie nośników z fononami i impulsem świetlnym, gdyż to właśnie one są tu źródłami dekoherencji. Prócz samego procesu dekoherencji przedyskutowana jest tam także efektywność optycznej inicjalizacji wraz z sugestiami jej optymalizacji. Rozdział ten oparty jest o bardzo ciekawą publikację Phys. Rev. B **87**, 195315 (2013).

Kolejny rozdział, „*Dynamika spinu w sprzężonych nanostrukturach*”, który prezentuje m.in. wyniki zawarte w pracy Semicond. Sci. Tech. **32**, 045005 (2017), dotyczy także układu pobudzanego impulsem optycznym, ale złożonego z dwóch kropek kwantowych. W celu zbadania ewolucji spinu zbudowany został model opisywany hamiltonianem zawierającym energie stanów jednocząstkowych, energie ekscytonów, sprzężenie z impulsem optycznym oraz zeemanowskie oddziaływanie z polem magnetycznym. Wpływ otoczenia został zamodelowany poprzez dopuszczenie przejść pomiędzy stanami układu. Szybkość tych przejść traktowana była jako parametry modelu. Ewolucja zbadana została w oparciu o równanie Lindblada. Główne wyniki zawierają m.in. czasową zależność polaryzacji spinu dla różnych temperatur. Omówiony został wpływ obrotu spinu w trakcie tunelowania czy różna wartość czynnika żyromagnetycznego w poszczególnych kropkach. Zbadano także jaki wpływ ma odchylenie kierunku pola magnetycznego od płaszczyzny układu. Pokazano, że efekty te, których zbadanie miało na celu zbliżenie modelowych rozwiązań do realnej sytuacji mającej miejsce w eksperymentach, mają destrukcyjny wpływ na analizowaną w tym rozdziale polaryzację.

W piątym rozdziale, zatytułowanym „*Szybkość tunelowania z odwróceniem spinu*”, doktorant rozbudowuje analizę tytułowego procesu, który wprowadzony był już w poprzednim rozdziale. Rozdział rozpoczyna się szacunkami perturbacyjnymi, mającymi zilustrować – jak to określa doktorant – „*domieszkowy*” mechanizm relaksacji spinu. Ponieważ fonony nie oddziałują bezpośrednio ze spinem, relaksacja spinowa z użyciem fononów możliwa

jest tylko wtedy, gdy biorące w niej udział stany mają domieszkę stanów z przeciwnym spinem. Oddziaływaniem mieszającym stany spinowy jest w tym przypadku sprzężenie spinowo-orbitalne typu Dresselhausa. W zupełności zgadzam się tu z doktorantem, że określenie tych stanów jako „domieszkowych” jest niefortunne, choć nie przychodzi mi do głowy żadne inne, które można by uznać za lepsze. Oczywiście relaksacja spinowa w kropkach kwantowych jest zjawiskiem dobrze zbadanym i dlatego w rozdziale piątym badany jest ten proces połączeniu z tunelowaniem pomiędzy sprzężonymi kropkami. Po szacunkach perturbacyjnych następuje opis modelu użytego w dalszych obliczeniach. Jest to realistyczny układ dwóch kropek InAs w matrycy z GaAs, umieszczonych jedna nad drugą z możliwym horyzontalnym przesunięciem i gaussowskim rozmyciem granicy, które modeluje efekty dyfuzji. Stany własne zostały wyznaczone w ośmiopasmowym modelu  $k \cdot p$  z uwzględnieniem m.in. odkształceń wynikających z niedopasowania stałych sieciowych. Przejścia pomiędzy tymi stanami zostały wyznaczone ze złotej reguły Fermiego z uwzględnieniem oddziaływania z fononami akustycznymi. W szczególności zbadana została szybkość tunelowania pomiędzy kropkami z odwróceniem spinu w stosunku do szybkości przejść, w których kierunek spinu jest zachowany. Badania uwzględniały wpływ zewnętrznego pola magnetycznego, szczegółów budowy nanostruktury czy temperatury. Zbadano także jak tunelowanie z obrotem spinu wpływa na relaksację spinu zlokalizowanego w poszczególnych kropkach. Dyskusja wyników pozwoliła na określenie roli odgrywanej przez różne mechanizmy mające wpływ na badaną relaksację.

Rozdział szósty, „*Dekoherencja spinu w trakcie relaksacji orbitalnej*”, także poświęcony jest układowi dwóch sprzężonych kropek kwantowych i także wiąże się z tunelowaniem pomiędzy nimi. Badany tam jest układ, w którym czynniki żyromagnetyczne są różne w różnych kropkach, co w obecności pola magnetycznego prowadzi do czystej dekoherencji fazowej spinu. Część materiału składającego się na rozdział szósty została opublikowana w Phys. Rev. B **98**, 075403 (2018) oraz w Acta Phys. Pol. **134**, 926 (2018). Rozdział rozpoczyna się bardzo ciekawą analizą układu dwupoziomowego, w którym rozszczepienia Zeemana tych dwóch poziomów są różne. Energia przekazywana do otoczenia w trakcie relaksacji orbitalnej zależy od kierunku spinu, więc proces ten jest swego rodzaju pomiarem, który prowadzi do dekoherencji. Idea ta jest w dalszej części rozdziału demonstrowana na układzie modelowym, gdzie m.in. zbadano zależność tego efektu od morfologii struktury. Przeanalizowano także możliwość jego kompensacji poprzez odpowiedni dobór pola magnetycznego, w szczególności przez obecność gradientu pola. Podobnie jak

w poprzednich rozdziałach zbadano także efekty termiczne, które prowadzą tu do wykładniczego zaniku koherencji.

Także ostatni rozdział pracy, „*Spinowo-wybiórcze tunelowanie fononowe nośników*”, dotyczy układów, w których występują różne rozszczepienia Zeemana w różnych kropkach. Doktorant w rozdziale tym proponuje użycie takich układów jako filtrów spinowych. Zostało tam pokazane, że szybkość tunelowania może być zależna od kierunku spinu. Następnie idea ta została wykorzystana do zaproponowania urządzenia, które pozwalałoby na przepływ nośników jedynie o jednej polaryzacji spinowej. W tym celu do układu sprzężonych kropek doczepiono elektrody, przy czym parametry tak dostrojono, żeby blokada kulombowska pozwalała jedynie na sekwencyjne tunelowanie przez nanostrukturę. Obecność elektrod zaowocowała dodatkowymi wyrazami w równaniu na ewolucję macierzy gęstości. Główny wynik to S-kształtna zależność polaryzacji spinowej płynącego prądu od przyłożonego pola elektrycznego, zaprezentowana na rysunku 7.6. Trochę szkoda, że ten ciekawy wynik nie został w żaden sposób przedyskutowany.

Podsumowując tą część recenzji muszę stwierdzić, że rozprawa zawiera bardzo bogaty materiał. Co więcej, jest on stosunkowo zwarty tematycznie, tzn. wszystkie rozdziały dotyczą tytułowej dynamiki spinu w mniej lub bardziej rozbudowanych nanostrukturach. Oczywiście jest to bardzo szeroka tematyka i można by pomyśleć o wielu problemach, które nie zostały tu poruszone, ale już w obecnej formie materiał ten jest bogatszy, niż w przeciętnej pracy doktorskiej. Prócz czysto merytorycznej oceny rozprawy, trzeba tu koniecznie zwrócić uwagę także na kwestie edytorskie, bo także pod tym względem recenzowana rozprawa odbiega od przeciętnych. Jak już wcześniej to zostało wspomniane, praca jest napisana z jednej strony w sposób nieco „barokowy”, z ogromną liczbą odwołań, odnośników i dygresji, z drugiej z użyciem języka odmiennego od typowego („suchego”) języka publikacji naukowych. Oczywiście nie jest to zarzut, bo w wielu miejscach często dzięki temu praca jest przyjemniejsza do czytania. W kilku miejscach może to jednak prowadzić do pewnych niejednoznaczności. Przykładowo, muszę przyznać, że nie wiem, co doktorant miał na myśli pisząc na stronie 28 zdania „*Te dwa efekty okażą się szczególnie istotne także przy omawianiu oddziaływania nośników z fononami. Te ostatnie, jako fale odkształceń materiału, wpływają na nośniki w taki właśnie sposób.*” W niektórych miejscach można też zastanawiać się, czy dobór polskich słów jest odpowiedni. Przykładowo, gdy mowa jest kształcie kropki, to odstępstwo od symetrii cylindrycznej może lepiej być na-

zwać anizotropią niż asymetrią, ale to są mało znaczące szczegóły i w ogromnej większości praca jest bardzo czytelna. Także liczba błędów edytorskich jest znacznie poniżej tego, czego można by się spodziewać po tak rozbudowanej pracy z tak dużą liczbą wzorów. W zasadzie jedynym błędem w tekście, który udało mi się wychwycić to mowa o „kropkach kantowych” na str. 118. Podkreślić należy też wygodę korzystania z pliku PDF, który zawiera ogromną liczbę miejsc, których kliknięcie przenosi nas do fragmentu, do którego w tekście jest robione odwołanie.

Przechodząc do ogólniejszych konkluzji, chciałbym stwierdzić, że obfity materiał zawarty w rozprawie świadczy, że Pan mgr Michał Gawętczyk bardzo dobrze opanował zarówno podstawy teoretyczne fizyki układów nanoskopowych, jak i potrafi swobodnie posługiwać się używanymi w tym obszarze metodami obliczeniowymi. Prócz samej rozprawy świadczy o tym także jego bogaty dorobek publikacyjny. Jest to o tyle ważne i zasługujące na pochwałę, że wcześniej zajmował się zupełnie inną tematyką. O jego aktywności świadczy też duża liczba wystąpień konferencyjnych, wiele z nich poza granicami Polski.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym*, jednocześnie wnosząc o dopuszczenie Pana mgr. Michała Gawętczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Proponuję także wyróżnienie rozprawy. Motywacją takiego wniosku jest ponadprzeciętna ilość uzyskanych przez doktoranta nowych i interesujących wyników. Na podkreślenie zasługuje także jego bogaty dorobek publikacyjny oraz aktualność badań, które stały się podstawą ocenianej rozprawy.



Maciej Maśka