

Michał Gawęlczyk

Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.
„Dynamika i dekoherencja spinu w nanostrukturach półprzewodnikowych”

Przedmiotem rozprawy jest analiza wybranych zagadnień dotyczących ewolucji stanów spinowych nośników, elektronów i dziur, uwięzionych kwantowo w nanostrukturach wytwarzanych z półprzewodników na drodze samoorganizacji materiału. Problemem naukowym, który rozwiązano, jest dostarczenie teoretycznego opisu wybranych procesów dekoherencji spinu w kropkach kwantowych i ich sprzężonych parach oraz ich przejawów w nieliniowej spektroskopii optycznej. Rozważane są zatem dwa pokrewne rodzaje struktur: kropki kwantowe oraz ich pary, podwójne kropki kwantowe, w których dochodzi do tunelowania nośników. W tak określonych układach badane są procesy relaksacji i dekoherencji stanów spinowych nośników w obliczu zewnętrznych pól: elektrycznego i magnetycznego, jak również pod wpływem optycznego pobudzenia za pomocą impulsów laserowych. Zasadniczą część rozprawy składa się ze Wstępu, siedmiu rozdziałów oraz Podsumowania.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do szerokiego tematu, nanostruktur półprzewodnikowych. Dokładniej omówiono samorosnące kropki kwantowe, które są głównym układem fizycznym rozważanym w pracy. Następnie poruszono zagadnienie spinowego stopnia swobody elektronów i dziur w półprzewodnikach oraz opisano metody eksperymentalne, dzięki którym możliwe jest śledzenie ewolucji spinu nośników uwięzionych w nanostrukturach, jak również inicjalizacja spinu.

Drugi rozdział zawiera opis wykorzystanego formalizmu matematycznego oraz elementy teoretycznego modelu wspólne dla dalszych rozdziałów. W pierwszej jego części określono formalizm i metody, jakimi autor posługuje się w badaniach oraz ustalono notację. Przedstawienie modelu teoretycznego zawiera zaś dość obszernie opisy i wyprowadzenia elementów znanych z literatury takich jak stany własne nośników uwięzionych w nanostrukturach, wpływ zewnętrznych pól, oddziaływanie nośników z fononami akustycznymi, czy ewolucja układu wskutek oddziaływania z otoczeniem. Jedno z wyprowadzeń (wyższe rzędy oddziaływania piezoelektrycznego z fononami) stanowi wynik oryginalny.

Kolejne rozdziały zawierają opis przeprowadzonych badań, ich rezultaty wraz z interpretacją i omówieniem. Rozdział trzeci poświęcony jest czystej dekoherencji fazowej spinu rezydentnych nośników w domieszkowanych nanostrukturach, która zachodzi w trakcie optycznej inicjalizacji spinu. Sformułowany model teoretyczny uwzględnia pobudzenie układu impulsem laserowym i oddziaływanie nośników z fononami akustycznymi. Rezultatem są dwa kanały utraty koherencji spinu w czasie trwania impulsu: jeden spowodowany samym optycznym pobudzeniem, drugi zaś wynikający z oddziaływania z fononami akustycznymi, które śledzą ewolucję układu. W obu przypadkach dekoherencja zostaje zinterpretowana jako wynik wypływu informacji o stanie spinowym nośnika do otoczenia, co jest następstwem faktu, że sama procedura inicjalizacji polega na uzależnieniu absorpcji fotonu od orientacji rezydentnego spinu, więc fakt jej zajścia stanowi pewnego rodzaju pomiar. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na wyznaczenie optymalnych warunków pobudzenia układu, przy których utrata koherencji jest minimalna.

W czwartym rozdziale sformułowano, w języku kwantowego równania fundamentalnego, oraz przebadano ogólny model ewolucji spinu i położenia nośników oddziałujących z fononami akustycznymi i polem magnetycznym w nanostrukturach sprzężonych tunelowo. Zaprezentowano wyniki uzyskane dzięki numerycznemu rozwiązaniu modelu i przeanalizowano wpływ parametrów układu na ewolucję czasową polaryzacji i koherencji spinu. Wykazano, że możliwe jest uzyskanie długo utrzymującej się polaryzacji spinowej po optycznym pobudzeniu układu, gdy szybkość tunelowania jednego z nośników do sąsiadującej kropki kwantowej przewyższa intensywność rekombinacji ekscytonu zlokalizowanego w pobudzonej kropce. Zbadano też destruktywny wpływ relaksacji spinu w trakcie tunelowania oraz niejednorodności układu na polaryzację spinową w polu magnetycznym. Ponadto omówiono ewolucję układu w polu magnetycznym odchylonym od płaszczyzny próbki. Wyniki przedstawiono w postaci symulowanego sygnału eksperymentalnego.

Rozdział piąty poświęcono obliczeniom szybkości tunelowania elektronu pomiędzy kropkami kwantowymi z równoczesnym odwróceniem spinu. Dokładne obliczenia przeprowadzone w modelu wielopasmowym

poprzedzono perturbacyjnym oszacowaniu przyczynku pochodzącego od głównego kanału rozważanego w literaturze. Całkowity efekt rozłożono na przyczynki od różnych oddziaływań i wskazano te, które dominują w danych przedziałach parametrów, wykazując dominującą rolę oddziaływania spinowo-orbitalnego. Wykazano także, że w niezerowej temperaturze, wskutek cyklicznego wirtualnego tunelowania, omawiany efekt daje przyczynę do relaksacji spinu w każdej z kropek kwantowych, w szczególności stanowiąc kanał relaksacji w dublecie Zeemana aktywny bez pola magnetycznego.

Tematyką szóstego rozdziału jest czysta dekoherencja fazowa spinu zachodząca w trakcie orbitalnej relaksacji elektronu w polu magnetycznym pomiędzy stanami, w których rozszczepienia Zeemana są różne. Sam efekt i jego zaprezentowany opis teoretyczny są ogólne. Przedstawiono też dokładną analizę tego zjawiska na przykładzie tunelowania elektronu pomiędzy kropkami kwantowymi, które różnią się wartością efektywnego czynnika żyromagnetycznego. Oszacowano stopień dekoherencji w typowych, realistycznie odwzorowanych nanostrukturach oraz zaproponowano szereg metod pozwalających na kontrolowanie dekoherencji lub całkowite jej uniknięcie. W szczególności podano sposób kontroli nad dekoherencją w niemal pełnym zakresie wartości za pomocą zewnętrznego pola elektrycznego oraz gradientu indukcji magnetycznej. Wykazano też, że w niezerowej temperaturze wskutek dwustronnego wirtualnego tunelowania efekt ten prowadzi do wykładniczej dekoherencji o czasach porównywalnych z tymi wynikającymi z oddziaływań nadsubtelnych.

Rozdział siódmy zawiera opis wstępnych badań nad zależną od orientacji spinu szybkością tunelowania fononowego elektronów pomiędzy kropkami kwantowymi. Zaproponowano wykorzystanie różnicy rozszczepień Zeemana w dwóch kropkach kwantowych jako podstawy działania filtra spinowego. Obliczenia przeprowadzone w uproszczonym modelu pozwoliły wykazać silną blokadę fononowego tunelowania elektronów w jednym ze stanów spinowych, co po włączeniu układu w obwód elektryczny powinno owocować spolaryzowanym spinowo prądem nośników.

Główną część pracy wieńczy podsumowanie, w którym zebrano i zwięźle opisano wyniki przedstawione w rozdziałach 3-7, sformułowano ogólniejsze wnioski oraz zarysowano możliwy plan dalszych badań.