



Poznań, dnia 18 lutego 2021 roku

Prof. UAM dr hab. Anna Dyrdał
Zakład Fizyki Mezoskopowej
Instytut Spintroniki i Informatyki Kwantowej, Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. Michała Górskiego

pt. Szybka inicjalizacja spinu elektronów uwięzionych w elektrostatycznych kropkach kwantowych zbudowanych na bazie katalitycznie hodowanych półprzewodnikowych drutów kwantowych

Pan magister Michał Górski przygotował rozprawę doktorską pod tytułem „*Szybka inicjalizacja spinu elektronów uwięzionych w elektrostatycznych kropkach kwantowych zbudowanych na bazie katalitycznie hodowanych półprzewodnikowych drutów kwantowych*” na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pod kierunkiem prof. dr. hab. Stanisława Bednarka. Promotorem pomocniczym jest Pan dr inż. Jarosław Pawłowski z Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

Rozprawa zawiera wyniki badań teoretycznych opartych o symulacje numeryczne, które składają się na projekt półprzewodnikowego nanourządzenia do szybkiej inicjalizacji spinu elektronu uwięzionego w elektrostatycznej kropce kwantowej. Tematyka związana z ultraszybką kontrolą spinowego stopnia swobody stanowi obecnie bardzo aktualny kierunek badań fizyki ciała stałego, w szczególności w kontekście elektroniki spinowej i możliwych zastosowań praktycznych w elementach spintronicznych, które pozwolą na dalszą miniaturyzację urządzeń elektronicznych przy jednoczesnym zwiększeniu szybkości zapisu i odczytu informacji. Z drugiej strony, koncepcja szybkiej kontroli spinu elektronu uwięzionego w kropce kwantowej może posłużyć do realizacji kubitu i z powodzeniem może zostać wykorzystana w kwantowych technikach informatycznych. Autor rozprawy włączył się więc w nurt bardzo aktualnych i interesujących, z punktu widzenia fundamentalnych praw fizyki i praktycznych zastosowań, badań dotyczących obliczeń kwantowych i budowy komputera kwantowego. W rozprawie zaproponowana została bardzo ciekawa koncepcja inicjalizacji spinu elektronu przy pomocy oddziaływania spin-orbita typu Rashby. W heterostrukturach półprzewodnikowych siła tego oddziaływania jest kontrolowana przez zewnętrzne pole elektryczne, które skutkuje złamaniem symetrii potencjału ograniczającego. Mamy więc tu do czynienia z propozycją czysto elektrycznej kontroli spinu, a co za tym idzie z koncepcją kubitu kontrolowanego poprzez napięcie przyłożone do elektrod bramek.

Rozprawa liczy 97 stron i składa się z trzech części, przy czym pierwsza część stanowi wprowadzenie do teoretycznych podstaw wykonywanych w rozprawie symulacji numerycznych, a kolejne dwie części opisują szczegółowo wpływ oddziaływania Rashby na ewolucję czasową pakietu falowego elektronu uwięzionego w elektrostatycznej studni kwantowej oraz koncepcję urządzenia do szybkiej inicjalizacji spinu kontrolowanego poprzez napięcie bramkujące zmieniające siłę sprzężenia Rashby. Część z wyników zaprezentowanych w rozprawie została zawarta w czterech publikacjach,

których Pan Michał Górski jest współautorem, w tym dwa artykuły w Physical Review B, oraz po jednym w New Journal of Physics i Physical Review Applied.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do symulacji numerycznych wykonywanych w kolejnych dwóch rozdziałach. Autor wprowadza teoretyczny model nanodrutu półprzewodnikowego wykonanego z antymonku indu (InSb) otoczonego dielektrykiem - azotkiem krzemu (Si_3N_4). W modelu zastosowano przybliżenie masy efektywnej oraz podparte obliczeniami numerycznymi założenie, że ruch elektronu w kierunku poprzecznym do osi nanodrutu jest zablokowany, natomiast w kierunku równoległym do jego osi elektron porusza się swobodnie. Założenie to pozwala analizować dynamikę elektronu wykorzystując przybliżenie jednowymiarowe podczas rozwiązywania zależnego od czasu równania Schrodingera. Dodatkowe ważne założenie dotyczy wzrostu nanodrutu InSb w kierunku krystalograficznym [111]. Dzięki temu oddziaływanie spin-orbita typu Dresselhausa w kierunku ruchu elektronu znika a na spinowy stopień swobody elektronu wpływ ma jedynie oddziaływanie spin-orbita Rashby kontrolowane przez napięcie bramki.

Dalej Autor omawia metody numeryczne, które wykorzystał w swoich symulacjach opierających się na iteracyjnym rozwiązywaniu zależnego od czasu równania Schrodingera i obliczaniu w każdym kroku potencjału elektrostatycznego przy pomocy uogólnionego równania Poissona. Doktorant przeprowadził szereg testów na podstawie których dokonał optymalizacji dyskretyzacji przestrzennej oraz wyboru odpowiednich wartości parametrów. Warto zauważyć, że w obliczeniach uwzględnione zostały szczegóły geometrii nanourządzenia, wartości napięć przyłożonych do elektrod, oraz oddziaływanie cząstki z ładunkiem wyindukowanym na elektrodach i w dielektryku. W tym miejscu oczekiwałabym poświęcenia trochę więcej uwagi na wyjaśnienie schematu wykorzystanego do iteracyjnego rozwiązania równania Poissona dla zadanej chwili czasu na siatce przestrzennej. O ile rozumiem, że wyprowadzenie wzoru (1.36) nie było zadaniem Doktoranta, to jednak kilka zdań na temat jego wyprowadzenia byłoby przydatne dla czytelników (np. studentów lub doktorantów), którzy mogą być zainteresowani tą rozprawą.

Druga część rozprawy skupia się na idei sterowania ruchem elektronu uwięzionego w kropce kwantowej przy pomocy oddziaływania spin-orbita typu Rashby. Autor rozpoczyna swoją dyskusję od wprowadzenia potencjału indukowanego, wynikającego z oddziaływania elektronu z metalową elektrodą. Potencjał ten wprowadza nieliniowość do równania Schrodingera i w konsekwencji prowadzi do efektu samoogniskowania funkcji falowej. W rozważaniach tych zaniedbana jest możliwość pojawienia się ładunku indukowanego w otaczającym nanodrut dielektryku poprzez przyjęcie takiej samej przenikalności elektrycznej dla dielektryka i nanodrutu. Założenie to nie jest jednak podparte żadnymi danymi literaturowymi i wydaje się być dość zgrubnym przybliżeniem. Myślę, że warto było zawrzeć w pracy jakiś komentarz na ten temat.

W kolejnych częściach tego rozdziału Autor dyskutuje wpływ oddziaływania Rashby na rozwiązanie równania Schrodingera. W rozdziale 2.4. możemy znaleźć proste rozważania oparte na wyidealizowanym potencjale parabolicznym, które prowadzą do analitycznych rozwiązań pozwalających lepiej zrozumieć kolejne wyniki prezentowane w rozprawie i będące już rezultatem symulacji numerycznych. I tak, Autor opisuje jak przy pomocy skokowych lub ciągłych zmian pola elektrycznego sterującego parametrem sprzężenia spin-orbita Rashby można wprawić elektron w ruch (w kierunku równoległym do osi nanodrutu) lub spowodować jego zatrzymanie. Następnie prezentuje możliwość zwielokrotnienia przyspieszenia elektronu łącząc ze sobą naprzemienne zmiany kierunku pola z odbiciem elektronu od bariery potencjału. Kluczowy w tych rozważaniach jest fakt, że zmiany pola elektrycznego poprzez zmianę siły sprzężenia Rashby powodują spinowo-zależny ruch elektronu. Tak więc, elektron o spinie „w górę” wprawiany jest w ruch w kierunku przeciwnym do ruchu elektronu ze spinem „w dół”, przy zadanej orientacji pola elektrycznego sterującego oddziaływaniem Rashby. Autor pokazał również, że jeśli elektron znajduje się w superpozycji stanu ‘spin góra’ i ‘spin w dół’ to gęstość prawdopodobieństwa znalezienia elektronu (gęstość elektronowa) w obecności oddziaływanie

Rashby jest funkcją posiadającą dwa maksima oddalone symetrycznie od położenia minimum potencjału uwięzienia. Natomiast gęstość spinowa jest antysymetryczną funkcją położenia względem minimum potencjału uwięzienia, a jej ekstrema pokrywają się z maksimami gęstości elektronowej. Zatem, jeśli w wyniku pomiaru znajdziemy elektron w prawej (lewej) części studni potencjału, to przy zadanym kierunku pola elektrycznego sterującego oddziaływaniem Rashby będzie on miał dodatni (ujemny) kierunek rzutu spinu na oś z (tutaj jak również dalej odwołuję się do definicji układu współrzędnych zawartych w rozprawie). Autor zrealizował przestrzenną separację spinu, a dokładniej spinowo-zależny przestrzenny rozkład prawdopodobieństwa, na dwa sposoby. Pierwszy z nich polega na użyciu ciągłych sinusoidalnych zmian pola o małej amplitudzie i wymaga skompensowania potencjału indukowanego, natomiast drugi sposób polega na wykorzystaniu pojedynczego silnego impulsu pola elektrycznego.

W trzeciej części pracy magister Górski omawia projekt nanourządzenia opartego na nanodrucie półprzewodnikowym, które umożliwia ustawienie spinu elektronu równoległe do osi nanodrutu. Autor szczegółowo omówił budowę zaprojektowanego urządzenia oraz sposób jego działania. W ogólności proces inicjalizacji spinu podzielony jest na dwie fazy. Pierwsza faza polega na wygenerowaniu spinowo-zależnego przestrzennego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa przy pomocy pola elektrycznego wzdłuż osi y, które steruje oddziaływaniem Rashby. Faza ta kończy się wzniesieniem bariery potencjału w centralnej części nanourządzenia. W konsekwencji układ zostaje podzielony na dwie elektrostatyczne kropki kwantowe i jest gotowy do przeprowadzenia drugiej fazy inicjalizacji. Dzięki zastosowaniu impulsu pola elektrycznego przyłożonego w kierunku z, o odpowiednim czasie jego trwania, w fazie tej obserwujemy zmianę w czasie wartości oczekiwanych rzutu spinu na kierunek x dla składowej gęstości prawdopodobieństwa zlokalizowanej w prawej i lewej kropce kwantowej. Po zakończeniu fazy drugiej wartość oczekiwana spinu na kierunek x stabilizuje się w jednej i drugiej kropce kwantowej w pobliżu wartości $\hbar/2$. Jak wynika z przedstawionych symulacji zaproponowane urządzenie pozwala na ustawienie spinu równoległe bądź antyrównoległe do osi x z dokładnością większą niż 99,5% w czasie 60 ps, a więc w czasie krótszym o trzy rzędy wielkości od czasu dekoherencji.

Dużą zaletą zaproponowanego urządzenia, oprócz samej dokładności inicjalizacji spinu, jest fakt, że nie wymaga ono zastosowania pól magnetycznych bądź koherentnych wiązek światła o odpowiedniej polaryzacji jak to ma miejsce w stosowanych dotąd metodach inicjalizacji spinu. Tak więc, propozycja inicjalizacji spinu przez przyłożenie do lokalnych elektrod dwóch impulsów napięć generujących silne oddziaływanie spinowo-orbitalne typu Rashby wydaje się być koncepcją bardzo ciekawą i efektywną. Czysto elektryczna inicjalizacja kubitu opartego na spinie elektronu mogłaby prowadzić do zmniejszenia kosztów budowy potencjalnego komputera kwantowego opartego na elektrostatycznych kropkach kwantowych co nie jest bez znaczenia.

Rozprawę kończy Podsumowanie, które w jasny i zwięzły sposób konkluduje uzyskane wyniki. Zabrakło mi w nim jednak pewnego szerszego komentarza odnośnie aspektów fizyki jakie składają się na pracę zaproponowanego nanourządzenia. Model jest wyidealizowany i zawiera wiele przybliżeń. Pożądanym był tu więc pewien krytyczny komentarz na temat tego w jaki sposób odstępstwo od zastosowanych przybliżeń oraz inne czynniki fizyczne (jakie w realnym układzie mogą wystąpić) wpływają na długość procesu inicjalizacji i jego dokładność. Nie wpływa to jednak na moją ogólną, bardzo pozytywną ocenę wyników zawartych w rozprawie.

Praca doktorska została zredagowana bardzo poprawnie i starannie. Treści poszczególnych rozdziałów składające się kolejno na opis modelu, stosowanych metod numerycznych, poszczególnych operacji na funkcji falowej elektronu (wykorzystywanych następnie do procesu szybkiej inicjalizacji spinu) i wreszcie opis zaproponowanego nanourządzenia wprowadzane są w sposób bardzo przejrzysty i logiczny. Cel rozprawy doktorskiej został bardzo dobrze określony i konsekwentnie zrealizowany.

Oprócz drobnych uwag, o których wspomniałam wcześniej, pracę uważam za merytorycznie bardzo dobrą i ciekawą. Praca została napisana poprawnym językiem, chociaż miejscami Autor stosuje skróty myślowe. Przykładowo w tekście pojawia się stwierdzenie:

„Dysponując pakietem falowym rozdzielonym przestrzennie na dwie części o przeciwnej orientacji spinu możemy dokonać obrotu ich spin w taki sposób, by w obu częściach urządzenia był on skierowany w tym samym kierunku”.

Bardziej poprawne wydaje się jednak mówić o (i) przestrzennym rozdzieleniu gęstości spinowej (gęstości prawdopodobieństwa) niż samego pakietu falowego (sens fizyczny ma gęstość prawdopodobieństwa a nie sama funkcja falowa), (ii) o zmianie wartości oczekiwanej rzutu spinu elektronu (nie spinu pakietu falowego) na daną oś i w końcu (iii) o takim obrocie składowej wartości oczekiwanej spinu, aby była ona taka sama w obu częściach urządzenia.

Są to jednak drobne mankamenty, o których wspominam jedynie z powinności recenzenckiej, i które nie umniejszają mojej oceny zrozumienia przez Doktoranta fizyki omawianych zagadnień, gdyż tego typu skróty myślowe często pojawiają się po prawidłowym opisanu omawianych procesów.

Podsumowując, Pan magister Michał Górski przedstawił w pracy propozycję nanourządzenia do szybkiej inicjalizacji spinu elektronu uwięzionego w elektrostatycznej kropce kwantowej, zbudowanego na bazie półprzewodnikowego drutu kwantowego. Autor opracował oryginalne i bardzo ciekawe podejście oparte na kontroli spinowego stopnia swobody elektronu uwięzionego w studni potencjału poprzez napięcie przyłożone do elektrod bramkujących odpowiedzialnych za kontrolę oddziaływania spin-orbita typu Rashby. Praca zaproponowanego urządzenia zilustrowana została interesującymi wynikami szeregu symulacji komputerowych opartych na iteracyjnym rozwiązywaniu zależnego od czasu równania Schrodingera oraz rozwiązywaniu uogólnionego równania Poissona w każdym kroku symulacji. Przedstawiona w rozprawie koncepcja szybkiej inicjalizacji spinu ma duży potencjał aby zostać zrealizowana eksperymentalnie i być dalej rozwijana, o czym świadczy fakt, że część z przedstawionych w rozprawie wyników udało się opublikować w bardzo dobrych czasopismach, w tym w *Physical Review Applied*.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim oraz wnoszę o dopuszczenie magistra Michała Górskiego do dalszych etapów postępowania w procesie o nadanie stopnia naukowego doktora.

Anna Dyrdał

