

U n i w e r s y t e t Ś l ą s k i
I N S T Y T U T F I Z Y K I
im. Augusta Chelkowskiego

40-007 Katowice, ul. Uniwersytecka 4
tel./fax. +48(32) 2583-653, fax: +48(32) 2588-431

Prof. dr hab. Elżbieta Zipper

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Poniedziałka
pt.: „Siła Lorentza w transporcie ładunku przez
pierścienie kwantowe”

Kwantowe nanostruktury są czasem nazywane sztucznymi atomami ponieważ, podobnie jak naturalne atomy, mają dyskretny układ poziomów energetycznych. Jednak wykazują one wiele interesujących własności, które nie mają analogii w zwykłych atomach.

W ostatnich kilkunastu latach zrobiono istotny postęp w kontroli i manipulowaniu np. przy pomocy napięcia na bramkach, pojedynczymi elektronami w półprzewodnikowych nanostrukturach. Niezwykły postęp technologii półprzewodnikowej pozwala wykorzystać bardzo interesujące własności tych kwantowych nanoukładów w nowoczesnej elektronice, spintronice czy optoelektronice. Koherentny transport elektronów przez takie układy jest jednym z ważnych problemów współczesnej nanoelektroniki i wymaga intensywnych badań.

Praca doktorska Pana Macieja Poniedziałka poświęcona jest badaniom zjawiska transportu w półprzewodnikowych pierścieniach kwantowych w reżimie kwazibalistycznym przy zachowaniu kwantowej koherencji fazowej. Dwuspójna geometria pierścienia pozwala na badanie efektów interferencyjnych funkcji falowych elektronów, które w obecności prostopadłego do płaszczyzny pierścienia pola magnetycznego przejawiają się oscylacjami przewodności. Zjawisko to znane jako efekt Bohma-Aharonova

pokazuje wpływ potencjału wektorowego pola wytworzonego przez np. cienki solenoid na interferencję funkcji falowych. Rozmiary badanych pierścieni muszą być mniejsze niż długość koherencji. Powoduje to, że pole magnetyczne w doświadczeniach jest polem jednorodnym, obecnym na trajektorii elektronu, a więc na elektron oddziałuje również klasyczna siła magnetyczna, która może w istotny sposób zaburzyć koherentny transport.

Doktorant w swojej pracy doktorskiej analizuje wpływ sił magnetycznych na kwantowy transport w pierścieniach w sytuacji konkurencyjnego działania klasycznych i kwantowych zjawisk.

Na rozprawę mgra Macieja Poniedziałka składa się cykl siedmiu prac naukowych (oznaczonych jako A1-A7), obszerne omówienie ich zawartości, oraz uzupełnienia w których przedstawił wyczerpująco kontekst pracy. Prace opublikowane zostały w bardzo dobrych czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym w tym trzy prace w Physical Review B. Prof. F. Peeters dostarczył oświadczenie o znaczącym wkładzie mgra inż. Macieja Poniedziałka w pracę, której jest współautorem.

Poniżej omówię skrótowo niektóre najciekawsze uzyskane przez doktoranta wyniki.

Do analizy problemu doktorant opracował numeryczną procedurę rozwiązywania problemu rozproszeniowego dla elektronu na poziomie Fermiego przy użyciu metody różnic skończonych. Przedstawił metodę rozwiązania dwuwymiarowego, jednoelektronowego równania Schroedingera (używając przybliżenia masy efektywnej) w prostopadłym polu magnetycznym, co pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo transmisji elektronu przez układ i między różnymi podpasмами. Oddziaływanie elektron-elektron zostało zaniedbane lub uwzględnione w przybliżeniu pola średniego. Nasuwa się tu pytanie - na ile dobre jest to przybliżenie dla problemów rozpatrywanych w pracy.

W pracach A1-A4 autor rozważał przypadek pojedynczego pasma na poziomie Fermiego. W pracach A1-A2 autor zbadał transport elektronów przez układ z trzema końcówkami i przedyskutował efekty związane z działaniem klasycznych sił magnetycznych. Pokazał, że siła Lorentza powoduje preferencyjne wstrzykiwanie elektronów do jednego z ramion pierścienia. Ta asymetria skutkuje redukcją interferencji funkcji falowych, a w konsekwencji osłabieniem oscylacji Bohma-Aharonova. Pokazał też, że dla słabych pól magnetycznych B wprowadzenie do jednego z ramion pierścienia domieszki skutkuje dodatkową asymetrią transmisji do kanałów wyjściowych oraz obniżeniem amplitudy

oscylacji Bohma-Aharonova. Tak więc pomimo, że rozpraszanie elastyczne nie niszczy koherencji fazowej jednak utrudnia przejście przez jedno z ramion pierścienia co ma powyższe konsekwencje. Innym efektem wpływającym na badane zjawisko jest, nieuwzględniana w tej pracy, dekoherencja. Czy można określić który z tych mechanizmów jest bardziej destrukcyjny?

Doktorant ustalił parametry badanego układu tak, aby można było porównać wyniki z pomiarami eksperymentu z pracy Strambini et al., gdzie zaobserwowano asymetrię przewodności do dwóch końcówek wyjściowych oraz tłumienie oscylacji Bohma-Aharonova. Otrzymane przez doktoranta rezultaty pozostają w dobrej zgodności z doświadczeniem – ta dbałość o konfrontację wyników z eksperymentem jest dużą zaletą pracy.

W swych badaniach mgr inż. Poniedziałek pokazał też, że dla pewnego wąskiego zakresu silnego pola magnetycznego B , istnieją pewne anomalne warunki dla interferencji kwantowej co skutkuje odmiennym zachowaniem się przepływu elektronów. Efekty te nie zostały zaobserwowane w doświadczeniu, ze względu na niespełnienie warunków koniecznych dla ich detekcji.

Wyjaśnienie ich pochodzenia dyskutowane jest w pracach A3-A4 gdzie zbadano naturę tych anomalnych przepływów. Pokazano, że wynikają one z wąskich rezonansów Fano. Szerokość tych rezonansów zmienia się w charakterystyczny sposób w zależności od kierunku cyrkulacji prądu. Szerokość rezonansów Fano rośnie dla stanów z orbitalnym momentem magnetycznym równoległym do pola B , a maleje dla stanów z momentem antyrównoległym. Pokazano też, że modyfikacja tych pików jest również wynikiem działania klasycznych sił magnetycznych. Dla pierścieni w reżimie balistycznym rezonanse pojawiają się z periodycznością Bohma-Aharonova. Autor wykazał, że obecność defektów powodujących rozpraszanie elastyczne niszczy tę periodyczność – może to być przyczyną nieobserwowania tych stanów w wykonanych dotąd eksperymentach.

Uwzględnienie w analizie nie jednego, a kilku pasm (praca A5) skutkuje wprowadzeniem do obliczeń rozpraszania międzypasmowego. Wpływ siły Lorentza na koherentny transport jest tu trudniejszy do oszacowania, efekty rozpraszania międzypasmowego zaburzają periodyczność oscylacji.

Dwie ostatnie prace dotyczą innego ciekawego zagadnienia – problemu łamania relacji Onsagera. Doktorant rozważył pojedynczy elektron poruszający się w półprzewodnikowym kanale który jest rozpraszany kulombowsko przez elektron w, umieszczonym bocznie, jednowymiarowym idealnym pierścieniu nanoskopowym. Transfer

elektronu między kanałem a pierścieniem jest zablokowany i badany jest ruch elektronu w kanale zmodyfikowany przez oddziaływanie z pierścieniem. Obliczenia rozproszenia elektronu przeprowadzono przy użyciu zależnego od czasu równania Schroedingera. Pokazano, że postać relacji dyspersyjnej pierścienia skutkuje asymetrycznym w B rozpraszaniem nieelastycznym elektronu co prowadzi do nowego mechanizmu łamania relacji Onsagera. Innymi słowy przyczyną tego efektu jest możliwość przekazania części energii elektronu w kanale elektronowi w pierścieniu w takim asymetrycznym układzie. Sądzę, że diskutowany efekt byłby osłabiony w przypadku bardziej realistycznych pierścieni o skończonej grubości i z domieszkami ze względu na „spłaszczenie” relacji dyspersyjnej pierścienia. (Pokazują to zarówno obliczenia teoretyczne jak i dane eksperymentalne). Ciekawe byłoby też oszacowanie jaki wpływ na badany problem miałyby klasyczne siły magnetyczne działające na elektron w niejednowymiarowym pierścieniu.

Pan Poniedziałek zaproponował następnie układ w którym relacja Onsagera może zostać przywrócona. Pokazał, stosując tym razem metodę stacjonarnego opisu rozproszeń, że da się to zrobić przez eliminację możliwości rozpraszania nieelastycznego poprzez umieszczenie podwójnych barier potencjału w kanale po obu stronach pierścienia.

Podsumowując mgr inż. Maciej Poniedziałek w swojej pracy doktorskiej przeprowadził wnikliwą analizę teoretyczną wpływu klasycznych sił magnetycznych na kwantowe zjawisko interferencji w pierścieniach mezoskopowych. Uzyskał wiele interesujących wyników rozwiązując metodami numerycznymi równania na transmisję elektronu w różnych sytuacjach fizycznych. Widać, że potrafi on bardzo dobrze posługiwać się skomplikowanymi metodami analizy teoretycznej nanoukładów oraz świetnie opanował metody ich numerycznej analizy.

Przeprowadzone badania charakteryzuje duża pomysłowość, staranność, wnikliwość i rzetelność. Poszerzają one w znaczący sposób naszą wiedzę o badanych nanoukładach.

Zauważyłam parę błędów natury technicznej – autor w uzupełnieniach niezbyt precyzyjnie używa pojęć: potencjał, różnica potencjałów i odpowiednich oznaczeń U , V oraz oznaczeń na temperaturę. Te drobne uwagi nie umniejszają wartości pracy którą oceniam wysoko.

Praca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Macieja Poniedziałka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie tej pracy doktorskiej.

Katowice, 19.05.2012

Prof. dr hab. Elżbieta Zipper

