

Recenzja pracy doktorskiej
mgra inż. Krzysztofa Kolasińskiego
pt. „Modelowanie mikroskopii bramki skanującej w układach z
dwuwymiarowym gazem elektronowym”,
przygotowanej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii
Górnniczo-Hutniczej

Rozprawa doktorska pt. „**Modelowanie mikroskopii bramki skanującej w układach z dwuwymiarowym gazem elektronowym**”, przygotowana przez mgra inż. Krzysztofa Kolasińskiego pod opieką prof. dr hab. Bartłomieja Szafrana jest pracą o charakterze teoretycznym a w znacznej części obliczeniowo-numerycznym. Rozprawa ta składa się z dziesięciu prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach: osiem prac w Physical Review B i dwie w New Journal of Physics. Są to czasopisma o uznanym prestiżu w środowisku naukowym. We wszystkich publikacjach autor rozprawy doktorskiej jest pierwszym autorem, co wskazuje na jego dominujący wkład w powstanie tych prac. Trzy spośród wszystkich dziesięciu prac są publikacjami dwu-autorskimi (oprócz autora rozprawy współautorem jest promotor pracy doktorskiej, prof. B. Szafran). W sześciu publikacjach występuje dwóch dodatkowych współautorów, natomiast w jednej jest ich trzech. Z dołączonych oświadczeń wszystkich współautorów wynika, że autor rozprawy przygotował program obliczeniowy, wykonał obliczenia numeryczne oraz przeprowadził analizę wyników we wszystkich publikacjach. Zbiór publikacji opatrzony jest krótkim komentarzem, który właściwie sprowadza się do podsumowania poszczególnych publikacji w kolejności wg. ich spisu. Tutaj mam pewien niedosyt bo wydaje mi się, że lepiej byłoby krótko omówić w sposób logiczny i spójny sam problem fizyczny rozwiązany w pracy doktorskiej, odnosząc się przy tym do odpowiednich publikacji. Nie ma to w zasadzie wpływu na samą ocenę pracy doktorskiej mgra Kolasińskiego, jednakże znacznie ułatwiłoby potencjalnemu czytelnikowi zorientowanie się w problematyce.

Tematyka pracy obejmuje aktualne zagadnienia w ramach teorii zjawisk transportu elektronowego w półprzewodnikowych nanostrukturach, w szczególności transportu kwantowego. Obliczenia i symulacje numeryczne dotyczą przede wszystkim wykorzystania metody bramki skanującej do obrazowania przewodności i analizy lokalnej gęstości stanów.

Mikroskopia bramki skanującej jest w zasadzie metodą eksperymentalną, natomiast praca doktorska obejmuje numeryczne symulacje odpowiednich eksperymentów. Niektóre wyniki symulacji porównane zostały z wynikami eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Istotą tej metody jest wyznaczenie zmian przewodności niskowymiarowego układu (jedno lub wielo-modowego kanału transportowego) w funkcji położenia ostrza bramki skanującej, a jednym z istotnych celów jest powiązanie map przewodności w funkcji położenia skanującego ostrza z lokalną gęstością stanów elektronowych układu swobodnego, tzn. układu bez bramki skanującej. Nie jest to jednak oczywiste ze względu na modyfikację układu przez potencjał elektrostatyczny ostrza bramki i nielokalność transportu kwantowego. Obliczenia wykonane w ramach rozprawy doktorskiej w przeważającej części sprowadzają się do wyznaczenia map przewodności w oparciu o numeryczne rozwiązanie równania Schrodingera i wykorzystanie formuły Landauera na przewodność układu. W pracy rozważono szereg układów o różnej geometrii i różnych parametrach. Jednym z rozważanych układów była prostokątna wnęka połączona kanałem o zmiennej szerokości i długości z kanałem transportowym (Praca A1). W pracy tej wyznaczono mapy przewodności i mapy lokalnej gęstości stanów elektronowych oraz parametr r opisujący korelacje między tymi mapami. Pokazano, że proste powiązanie lokalnej gęstości i przewodności istnieje tylko dla układu w którym wnęka i kanał transportowy połączone są jedno-modowym kanałem. Zmiana przewodności indukowana ostrzem bramki jest wtedy proporcjonalna do lokalnej gęstości stanów. Pokazano też, że znak współczynnika korelacji r jest zawsze przeciwny do znaku pochodnej współczynnika transmisji względem energii. Dodatkowo pokazano, że jeśli połączenie kropki z kanałem transportowym jest na tyle wąskie, że dopuszcza tylko jeden mod, wówczas współczynnik r przyjmuje wartości 1 lub -1.

Interesującym rozszerzeniem metody, zaproponowanym w pracy A2, jest wprowadzenie podwójnej bramki skanującej. W mapach przewodności pojawiają się wówczas efekty generowane przez potencjał elektrostatyczny obydwu bramek, co pozwala badać efekty interferencyjne w układzie. Warunkiem na to jest oczywiście odpowiednia długość koherencji fazowej, która musi być znacznie większa niż rozmiary układu. Jednakże w rozprawie nie rozważano procesów dekoherencji, więc ten problem nie występuje. Z wyznaczonych rezonansów można uzyskać informacje, między innymi, nt. długości fali Fermiego. W pracy A2 przeprowadzono również obrazowanie efektu Younga w układzie z dwiema bramkami skanującymi. Aby uzyskać dwie wiązki elektronowe, ostrze jednej bramki umiejscowiono na wyjściu z kontaktu punktowego. Drugie ostrze wykorzystane jest wówczas do zbierania

informacji nt. zmian przewodności w funkcji jego położenia. Do wytworzenia dwóch wiązek elektronowych można wykorzystać również potencjał wewnętrzny układu, np. defektów, jak to zrobiono w publikacji A3, gdzie badano efekty interferencyjne w mapach przewodności w przypadku zewnętrznego pola magnetycznego prostopadłego do powierzchni badanego układu. Potencjał elektrostatyczny lokalnego defektu umiejscowiono w obszarze kontaktu punktowego. Spełnia on wówczas podobną rolę jak potencjał ostrza bramki w pracy A2. Pozwala to zaobserwować również efekty interferencyjne zinterpretowane w pracy jako efekt Aharonova-Bohma. Problem interferencji wiązek elektronowych przechodzących przez dwie szczeliny (podobnie jak w doświadczeniu Younga dla światła) rozważono w pracy A4. Publikacja ta jest jedną z ciekawszych prac w ramach rozprawy doktorskiej. Pokazano, że aby uzyskać efekty interwencyjne wiązka padająca na kontakt punktowy powinna być jedno-modowa. W przypadku wiązki wielo-modowej efekty się uśredniają i dają obraz klasyczny, pomimo tego że fale padające w poszczególnych modach dają oddzielnie obrazy interferencyjne. W przypadku wiązki wielo-modowej obraz uzyskany przy dwóch szczelinach jest sumą obrazów uzyskanych dla poszczególnych szczelin oddzielnie. Dopiero wprowadzenie dodatkowego wąskiego kanału transportowego dla wiązki elektronowej padającej na obydwie szczeliny (zapewniającej transport jedno-modowy) prowadzi do obrazu interferencyjnego, takiego jak w doświadczeniu Younga. Zachowanie to wyjaśniono w oparciu o symetrię fal padających. Podobny problem zbadany został w pracy A5. Wprowadzono tam dodatkowy wąski kanał dla wiązki przechodzącej do elektrody docelowej (drenu). Pokazano, że jego wprowadzenie zmienia mapy przewodności i obraz interferencyjny.

Problem wpływu nieporządku w układzie na mapy przewodności rozpatrzono w pracy A6, gdzie nieporządek związany był z przypadkowo rozłożonymi defektami o daleko-zasięgowym potencjale rozpraszającym. W przeciwieństwie do wcześniej omawianych prac, obliczenia wykonano dla niezerowej temperatury, która wprowadzona była poprzez rozkład Fermiego-Diraca. Istotnym pytaniem w tym przypadku jest problem dekoherencji w układzie spowodowanej np. drganiami termicznymi sieci. Ten problem nie jest jednak dyskutowany w pracy. Uogólniając procedurę numeryczną stosowaną wcześniej wyznaczone zostały mapy przewodności dla dwuwymiarowego układu, w którym elektroda źródłowa dołączona jest do prostokątnej wnęki kwantowej poprzez kontakt punktowy. Pokazano, że rozpraszanie elektronów na 'sztywnych' defektach oraz na potencjale skanującego ostrza prowadzi do charakterystycznych struktur „lejkowych” w mapach przewodności, które widać jeszcze w

temperaturach podwyższonych (rzędu 4 K). Metodę bramki skanującej zastosowano również do obrazowania ścieżek prądowych przy pomocy map pochodnej przewodności względem położenia ostrza bramki skanującej. Potencjał ostrza, jeśli jest odpowiednio duży, może prowadzić do częściowej lub całkowitej redukcji koncentracji elektronów w obszarze pod ostrzem, co z kolei może doprowadzić do redukcji lub zablokowania prądu w wąskim kanale transportowym. W mapach pochodnej przewodności pojawia się charakterystyczna struktura gałęziowa przy wyjściu z kontaktu punktowego. Widać to wyraźnie na rysunku 2 w pracy A6. Na rysunku tym brakuje jednak skali, podobnie jak na rysunkach 3, 5, 10 i 11 w tej publikacji.

Procedura numerycznego rozwiązywania problemu rozproszeniowego została nieco zoptymalizowana w pracy A7, gdzie wykorzystując podejście Lippmanna-Schwingera sformułowano algorytm w ramach modelu ciasnego wiązania, który okazał się numerycznie znacznie efektywniejszy. Algorytm ten zastosowano do wyznaczenia map przewodności dla złącza grafenowego typu p-n, natomiast w pracy A8 dla złącza grafenowego p-n w zewnętrznym polu magnetycznym. W tej drugiej pracy z map przewodności uzyskano informację na temat trajektorii prądowych wzdłuż złącza.

Ostatnie dwie prace, tj A9 i A10, dotyczą ponownie nanostruktur na bazie dwuwymiarowego gazu elektronowego. Włączono jednak dodatkowo oddziaływania spinowo-orbitalne, pominięte we wcześniejszych pracach. Uwzględniono przy tym oddziaływanie spinowo-orbitalne generowane potencjałem wyznaczającym kontakt punktowy oraz oddziaływanie typu Rashby i Dresselhausa. Pokazano, że analizując przewodność w zależności od natężenia i kierunku pola magnetycznego można wyznaczyć efektywny czynnik Lande'go g (praca A9). Poza tym pokazano, że pomiary przewodności w polu magnetycznym pozwalają również wyznaczyć parametr opisujący oddziaływanie Rashby (A10).

Praca doktorska zawiera dużo oryginalnych wyników. Autor pracy wykazał się przy tym bardzo dobrą znajomością tematyki i dużą sprawnością numeryczną. Uzyskane wyniki były w niektórych przypadkach konfrontowane z wynikami eksperymentalnymi, co podnosi wartość uzyskanych rezultatów. Sądzę, że materiał zawarty w pracy doktorskiej pod względem liczby publikacji i prezentowanych wyników z dużym nadmiarem spełnia wymagania. To wszystko oczywiście przemawia na korzyść doktoranta. Jestem jednak przekonany, że z powodzeniem można było zredukować liczbę publikacji włączonych do doktoratu. Na przykład ostatnie

dwie prace dotyczące oddziaływań spinowo-orbitalnych można było pominąć, gdyż wychodzą one nieco poza zasadniczy temat pracy doktorskiej. W pracach tych nie ma na temat spektroskopii bramki skanującej. Również wstęp do pracy doktorskiej można było przygotować w nieco inny sposób. Jak już wspomniałem wcześniej, wstęp ten sprowadza się do krótkiego omówienia wyników uzyskanych w poszczególnych publikacjach, w kolejności w jakiej prace te włączone są do pracy doktorskiej. Sadzę, że rozprawa doktorska zyskałaby gdyby wstęp ten zawierał omówienie głównego celu pracy i jej problematyki, oraz syntetyczne omówienie wyników od strony fizycznej, co moim zdaniem stanowiłoby bardziej spójną całość.

W podsumowaniu stwierdzam, że praca doktorska pt. „Modelowanie mikroskopii bramki skanującej w układach z dwuwymiarowym gazem elektronowym”, przygotowana przez mgr inż. Krzysztofa Kolasińskiego zawiera dużą liczbę interesujących i oryginalnych wyników. Praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki kwantowego transportu w nanostrukturach półprzewodnikowych. Składa się ona ze zbioru prac opublikowanych w wysoko notowanych recenzowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Biorąc to wszystko pod uwagę stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Kolasińskiego spełnia ustawowe wymogi dotyczące prac doktorskich. Dlatego też wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Kolasińskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Jednocześnie uważam, że ze względu na oryginalność, różnorodność i ilość uzyskanych wyników, jak również aktualność tematyki, praca doktorska zasługuje na wyróżnienie.

Poznań, dnia 3 marca 2017 r.

prof. dr hab. Józef Barnaś



Wydział Fizyki UAM w Poznaniu