Dr hab., Prof. UR **Jerzy Mizia**
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy
Uniwersytetu Rzeszowskiego

Rzeszów, dnia 19 Maja 2014

Recenzja rozprawy doktorskiej

***Tytuł rozprawy*: Transport nośników ładunku w nanostrukturach zawierających studnie kwantowe różnych kształtów**

***Autor*: mgr Klaudiusz Majchrowski**

Pan Mgr **Klaudiusz Majchrowski** przedstawił do recenzji liczącą 126 stron rozprawę doktorską poświęconą związanym tematycznie badaniom transportu nośników ładunku w nanostrukturach zawierających tak asymetryczne jak i symetryczne względem inwersji współrzędnych przestrzennych studnie kwantowe. Przedmiot danej pracy doktorskiej jest osadzony w ogólnym kontekście badań nad strukturami niskowymiarowymi, stanowiącymi podstawę obszernej klasy przyrządów kwantowych. Rozprawa, napisana pod kierunkiem **profesora, dr hab. Igora Tralle** oparta jest na **pięciu pracach,** opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak: *Acta physica polonica, Journal of Physica: Conference Series, Physics Letters, World Journal of Condensed Matter Physics, IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics.*

Recenzowana rozprawa składa się ze Wstępu, czterech zasadniczych rozdziałów, stanowiących jej treść merytoryczną, podsumowania i analizy wyników oraz czterech Dodatków, zawierających niektóre ze szczegółów obliczeń i programów komputerowych. Dysertacja zawiera 126 stron tekstu, zaś bibliografia obejmuje 110 pozycji literaturowych.

Rozprawa zaczyna się od **Wstępu**, w którym został określony merytoryczny zakres pracy, dotychczasowy stan wiedzy w zakresie tematyki pracy, jej cel, którym jest badanie anizotropii fotoprzewodnictwa w asymetrycznych nanostrukturach, inteligentny design struktur, zawierających studnie kwantowe o określonym widmie energetycznym oraz konstruowanie na tej podstawie dostrajanych detektorów w zakresie promieniowania THz.

Rozdział **pierwszy** recenzowanej rozprawy zawiera krótkie, zwięzłe a zarazem niezbędne wprowadzenie w obszar zagadnień, stanowiących główny nurt badań Autora. Zawiera omówienie quasi-klasycznego modelu ruchu elektronu w polu magnetycznym w jego odniesieniu do rozpatrywanych modeli studni, dynamikę elektronów w modelu kwantowym, oraz efekty fotogalwaniczne w asymetrycznych studniach kwantowych.

Rozdział **drugi** zawiera oryginalne rezultaty Autora rozprawy i w całości jest poświęcony badaniom efektu anizotropii w asymetrycznych względem inwersji współrzędnych przestrzennych studniach kwantowych, trójkątnej i pół-parabolicznej umieszczonych w zewnętrznym polu magnetycznym. Zostały w sposób istotny ulepszone

rezultaty znanej pracy O. Kibisa [17] poprzez uwzględnienie skończonej głębokości studni i wykorzystania realistycznych parametrów struktur niskowymiarowych. Zostało wykazane, iż w rozpatrywanych asymetrycznych studniach kwantowych może zachodzić efekt anizotropii fotoprzewodnictwa względem kierunków quasi-pędu prostopadłych do kierunku wzrostu struktury. Pokazano, że efekt może być mierzalny w stosunkowo niedużych polach magnetycznych rzędu kilku Tesli.

W rozdziale **trzecim** Autor recenzowanej rozprawy podejmuje się zadania inteligentnego projektowania nanostruktur, zawierających pojedyncze i podwójne studnie kwantowe. Na współczesnym etapie rozwoju technologii wytwarzania struktur niskowymiarowych stopniowo powstaje nowy paradygmat elektroniki, który można określić mianem technologii kwantowych, lub inżynierii kwantowych. W praktyce w różnego rodzaju zastosowaniach struktur niskowymiarowy, składających się ze studni kwantowych, często pojawia się następujące pytanie: jaki kształt studni zagwarantuje nam określone, zadane z góry widmo energetyczne? Na przykład, znane są prace, w których zostało wykazane, iż jeśli supersieć posada określone widmo energetyczne, ogniwa słoneczne skonstruowane na podstawie takiej supersieci mogłyby posiadać wydajność, znacznie przewyższającą wydajność ogniw obecnie produkowanych. W takim przypadku można zadać pytanie: z jakiego kształtu studni kwantowych powinna być zbudowana supersieć, aby spełniać określone kryteria. Rozwiązaniu właśnie takiego typu problemów jest poświęcony trzeci rozdział omawianej rozprawy. W celu uzyskania odpowiedzi na powyższe pytania Autor rozprawy zastosował tak zwaną metodę *odwrotnego problemu rozpraszania* (z ang. *Inverse Scattering Problem Method, ISP*) i stworzył oryginalne programy komputerowe, które pozwoliły na podstawie zadanego widma uzyskać kształty potencjałów tak pojedynczych tak i podwójnych studni kwantowych. Takie podwójne studnie stanowią podstawowe „ogniwo" supersieci, gdyż szerokość mini-pasm supersieci określona jest głownie poprzez rozczepienie na skutek tunelowania stanów energetycznych sąsiadujących studni. W większości przypadków kształt potencjału studni kwantowych uzyskany za pomocą metody ISP jest wysoce nie trywialny i bardzo skomplikowany. Jednak taki potencjał może być zastąpiony jego aproksymacją (na przykład, funkcją schodkową) w taki sposób, aby uzyskane przy rozwiązywaniu numerycznym odpowiedniego równania Schrödingera widmo energetyczne studni kwantowej różniło się w sposób nieistotny od początkowego. Dzieje się tak, dlatego, że w odróżnieniu od problemów odwrotnych, większość z których należy do klasy tak zwanych problemów *ill-posed*, problem rozwiązywania wprost równania Schrödingera należy do klasy problemów *well-posed* charakteryzowanych liniową zależnością od danych początkowych. W rozdziale podane są przykłady kształtów potencjałów studni pojedynczych i podwójnych, które gwarantują, że poziomy energetyczne poszerzone na skutek niezerowych temperatur, nie zachodzą jeden na drugi nawet przy temperaturach rzędu 130 K.

W **czwartym** rozdziale rozprawy Autor przechodzi do zastosowania rezultatów, uzyskanych w rozdziale trzecim do inteligentnego konstruowania dostrajanego detektora w zakresie THz. Zagadnienie generowania i detekcji pól elektromagnetycznych w zakresie THz jest ogromnie ważne ze względu na możliwe zastosowania. Potencjalne zastosowania promieniowania z zakresu THz obejmują między innymi, wykrywanie nielegalnych

substancji chemicznych i biologicznych, broni, obrazowanie medyczne, wykrywanie nowotworów, kontrolowanie rozmaitych procesów produkcyjnych i wiele innych.

Stosując rozwinięte w poprzednim rozdziale pracy metody i techniki obliczeniowe w oparciu o metodę ISP, Autor zaprojektował najpierw strukturę tunelową z podwójną barierą o określonym widmie energetycznych, która pozwala na rejestrowanie promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach około 2,5 oraz 3 THz. W dalszym ciągu, stosując formalizm nierównowagowej funkcji Greena, Pan mgr Majchrowski przechodzi do analizy charakterystyk zaproponowanego przyrządu, obliczając różne parametry, takie jak gęstość prądu ciemnego, gęstość stanów i gęstość elektronów, scałkowaną względem składowej quasi-pędu elektronów prostopadłej do kierunku wzrostu struktury i innych; wreszcie oblicza foto-prąd struktury względem przyłożonego napięcia oraz energii fotonów. Ciekawym pomysłem jest dodanie do struktury dodatkowej bariery o niedużej wysokości i szerokości około 20 nm. Okazało się, że bariera ta skutecznie blokuje odpływ nośników ładunku ze stanu podstawowego, zwiększając w ten sposób akumulację nośników właśnie w tym stanie, dzięki czemu zostaje zostaje zwiększona absorpcja fotonów dla przejścia $1 \rightarrow 2$, przez co znacznie zwiększa się odpowiedź foto-prądowa przy tej częstotliwości. Rezultaty symulacji komputerowych dla ulepszonej w taki sposób struktury detektora także zostały przedstawione w rozdziale czwartym.

Rozdział **piąty** poświęcony jest podsumowaniu wyników całej rozprawy. W szczególności nowym jest poprawa modelu Kibisa [17] polegająca na zastąpieniu kwantowej trójkątnej studni o nieskończonej głębokości poprzez studnię o skończonej głębokości (rozdział II). W rozdziale III Autor opracował nowy program służący do rekonstrukcji potencjałów studni kwantowych na podstawie zadanego widma energetycznego o dowolnej ilości poziomów. W rozdziale IV autor połączył metodę 'inverse scattering problem' z nie równowagowymi funkcjami Greena otrzymując gęstość prądu ciemnego, gęstość elektronów na kwantowanych poziomach studni kwantowej detektora oraz odpowiedź fotoprądową detektora. Metoda ta pozwoliła na zaprojektowanie nowych detektorów promieniowania w zakresie THz.

Podsumowując tę część recenzji, chciałbym dodać kilka uwag natury ogólnej. Recenzowana praca doktorska dotyczy bardzo aktualnej i ważne tematyki, związanej z teorią transportu nośników ładunku w strukturach niskowymiarowych, stanowiących podstawę nowoczesnej mikro- i nano-elektroniki. Charakteryzując warsztat teoretyczny Autora rozprawy, pragnę podkreślić, że jest on bardzo zaawansowany, należą do niego między innymi, metody algebraiczne stosowane do rozwiązania zagadnień własnych operatora Schrödingera, metody odwrotnego problemu rozpraszania i elektrodynamiki kwantowej w odniesieniu do transportu ładunku w układach niskowymiarowych, jak i wiele innych. Oddzielnie chciałbym podkreślić kunszt programistyczny Autora rozprawy.

Zadaniem recenzenta niejako z urzędu jest wyszukiwanie mankamentów recenzowanej rozprawy. Również i w danej pracy można dostrzec pewne niedociągnięcia. Oto kilka przykładów.

Na Rysunku 2.2 brak jest drugich pochodnych energii elektronu względem wektora falowego, do których Autor odnosi się na stronie 27.

Strona 35, w tytule skrót ISP (inverse scattering problem) powinien być rozwinięty, nawet jeśli wcześniej w pracy został on już zdefiniowany.
Strona 49, energie $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ dla podwójnej studni kwantowej jako pochodzące od tej samej energii ε_1 w studni pojedynczej powinny zostać oznaczone np. jako $\varepsilon_1^{\mp}$. Podobnie $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ powinny przejść w $\varepsilon_2^{\mp}$.
Strona 77 pod wzorem (4.79) napisano: 'wyrażenie Σ^R może być przedstawione jako efektywny Hamiltonian' , co powinno być : 'wyrażenie Σ^R może być przedstawione jako efektywna energia własna'.
Tym niemniej liczba takich błędów w tej pracy była znikoma i jako recenzent miałem trudności z wychwyceniem tych kilku przykładów.

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy mgra Klaudiusza Majchrowskiego nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale i poprawną polszczyzną. Praca jest dobrze ułożona i zilustrowana licznymi rysunkami i wykresami.

Szczególne zapoznanie się z treścią rozprawy oraz osobiste długie dyskusje z Panem, magistrem K. Majchrowskim, jak również dorobek naukowy Pana mgra utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wysokich kwalifikacjach. Jego rozprawa doktorska, napisana pod opieką naukową promotora – profesora dr hab. Igora Tralle – jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących **istotny wkład** do obszaru wiedzy, który można określić jako **ilościową analizę transportu nośników ładunku w strukturach niskowymiarowych na podstawie rozmaitych studni kwantowych, w tym ze z góry określonym widmem i ich zastosowanie do detekcji promieniowania z zakresu THz**. Pokazuje ona także jego ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego.

W mojej osobistej opinii rozprawa ta jest rozprawą wyróżniającą się, natomiast decyzję w tej sprawie pozostawiam recenzentowi zewnętrznemu.

Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę, zatem o dopuszczenie Pana mgra **Klaudiusza Majchrowskiego do dalszych kroków przewodu doktorskiego.**