

Prof. dr hab. inż. Vitalii Dugaev
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechniki Rzeszowskiej
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 20 października 2017 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Marcina Zyberta
pt. "Przejścia magnetoptyczne w strukturach zawierających wiele
studni kwantowych"**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgr. Marcina Zyberta było badanie eksperymentalne właściwości magnetoptycznych w półprzewodnikowych strukturach wielowarstwowych GaAs/AlGaAs ze studniami kwantowymi. Kwantyzacja stanów elektronowych w strukturach warstwowych prowadzi do tego, że gaz elektronowy w studniach kwantowych jest dwuwymiarowym, natomiast kwantyzacja Landaua tych stanów, związana z przyłożonym silnym polem magnetycznym w kierunku prostopadłym do płaszczyzny studni kwantowej powoduje powstanie poziomów energetycznych. Ponadto, stany domieszkowe donorów także zmieniają się istotnie w silnym polu magnetycznym i mogą być opisane jako stany magneto-donorowe. Badane zjawiska magnetoptyczne w tych strukturach są związane z przejściami elektronowymi między stanami Landaua oraz przejściami między poziomami magneto-donorów.

Teoretyczny opis badanych zjawisk był zawsze oparty na bardzo uproszczonym modelu swobodnych elektronów w pojedynczej studni kwantowej. W przypadku struktury GaAs/AlGaAs ten model oczywiście nie ma zastosowania, ponieważ elektrony w polu krystalicznym dla tych materiałów mogą być opisane tylko w modelu wielopasmowym i tylko w pobliżu pewnego punktu Γ strefy Brillouina. W silnym polu magnetycznym praktycznie nie istnieje ścisła teoria zjawisk magnetoptycznych w GaAs/AlGaAs, można zaproponować jedynie pewne przybliżenia. Dlatego badania eksperymentalne są bardzo ważne dla rozwinięcia naszej wiedzy o właściwościach materiałów półprzewodnikowych w układach nano-warstwowych, znalezienia parametrów struktury elektronowej, wyjaśnienie mechanizmów przewodnictwa, lokalizacji elektronów w polu magnetycznym, fizyki kwantowego efektu Halla, i zjawisk topologicznych, oraz możliwości praktycznego wykorzystania w nanoelektronice. Ten kierunek badań wzbudza obecnie bardzo duże zainteresowanie.

Praca doktorska Pana mgr. Zyberta składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów, wniosków końcowych i bibliografii, która zawiera 126 pozycji. Praca ma 85 stron, trzy tabele i 49 rysunków.

Praca doktorska mgr. Zyberta została wykonana w Centrum Dydaktyczno-Naukowym Mikroelektroniki i Nanotechnologii Uniwersytetu Rzeszowskiego pod kierownictwem profesora Eugeniusza Szeregija. Trzeba podkreślić bardzo wysoki poziom wykonanych eksperymentów oraz wykorzystanie materiałów i struktur współczesnej nanotechnologii. Tekst rozprawy jest napisany bardzo dobrze. Najważniejsze wyniki są zamieszczone w dwóch artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach *Physica E* oraz *Physical Review B*.

We wstępie zostały skrótowo opisane struktury dwuwymiarowe i wielowarstwowe, ich zastosowania w optoelektronice, medycynie, oraz zastosowania wojskowe, podano dość dużo cytowań najważniejszej literatury na ten temat.

Pierwszy rozdział pracy doktorskiej stanowi dokładny przegląd literatury. Została opisana teoria Landaua kwantyzacji stanów elektronu swobodnego w polu magnetycznym i formowania poziomów Landaua, teoria rezonansu cyklotronowego elektronów swobodnych oraz elektronów lokalizowanych na domieszkach, kwantyzacja ruchu elektronów w studni kwantowych i tworzenia mini-pasm energii w strukturach wielowarstwowych, a także klasyczna teoria kwantowego zjawiska Halla. W dalszej części rozdziału zostały opisane niektóre znane wyniki pomiarów rezonansu cyklotronowego w strukturach kwantowych na bazie GaAs/AlGaAs i przedstawiono porównanie tych wyników z teorią. Została przedstawiona również specyfika zjawisk magnetoptycznych, związana z poziomami magneto-donorów. Cały rozdział pierwszy jest dobrze napisany co wskazuje, że Pan Marcin Zybert zapoznał się z istniejącą literaturą i ma dobrą wiedzę zarówno w teorii zjawisk kwantyzacji stanów, związanych z polem magnetycznym i opisem stanów elektronowych w układach kwantowych, jak i w eksperymentach magnetoptycznych w strukturach na bazie GaAs/AlGaAs. Jednakże, rozdział pierwszy stanowi ponad 1/3 całej pracy doktorskiej, dlatego moim zdaniem mógłby być nieco skrócony.

Rozdział 2 stanowi krótkie sformułowanie problemu badawczego. Celem pracy, jak wynika z tego sformułowania, jest otrzymanie wyników eksperymentalnych, które mogłyby zostać wykorzystane dla stworzenia modelu tłumaczącego obraz przejść magnetoptycznych w szerokim zakresie pól magnetycznych i temperatur w strukturach GaAs/AlGaAs.

Rozdział 3 przedstawia opis metodyki przeprowadzonych badań. Z tego opisu widać, że najpierw zostały wykonane pomiary zjawisk magneto-transportowych w niskich polach magnetycznych w przedziale temperatur od 0.3 do 300 K. Oczywiście dużym wyzwaniem było badanie transmisji światła (promieniowania w zakresie podczerwieni), rezonansu cyklotronowego i zależności magneto-transmisji od pola magnetycznego w strukturach na bazie GaAs/AlGaAs w silnych polach impulsowych do 150 T. Pomiary w silnych polach były wykonane w Narodowym Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Los Alamos

(USA), który specjalizuje się na takich badaniach. W podrozdziale 3.4 są opisane wielowarstwowe struktury kwantowe i podane parametry.

Rozdział 4 przedstawia wyniki badań magneto-transportowych. Pomiary oporu Halla zostały wykonane w przedziale niskich temperatur 1,6 - 4,2 K w polu magnetycznym do 10T. Przedstawiono także wyniki pomiarów oscylacji Shubnikova-de Haasa i zaobserwowano obszary plateau oporu Halla, co odpowiada kwantowemu zjawisku Halla. Porównanie wyników tych eksperymentów z obliczeniami energii poziomów Landaua pozwoliło wyznaczyć pewne parametry struktury: koncentrację i ruchliwość nośników.

W rozdziale 5 zostały przedstawione wyniki badań magnetoptycznych w silnych polach magnetycznych do 150 T w zakresie temperatur od 6K do 300K. Przez pomiary współczynnika transmisji od czasu w zmiennym polu magnetycznym zostały dokładnie ustalone położenia pików rezonansowych przy pewnych wartościach pola magnetycznego. Przedstawiono zależności magneto-transmisji od pola magnetycznego przy pewnych wartościach długości fali. Na wykresach są widoczne rozszczepienia pików rezonansowych a także można zaobserwować pewną strukturę pików. Dla interpretacji wyników eksperymentu została użyta teoria bazowana na 14-pasmowym modelu Kp , która opisuje strukturę elektronową półprzewodników typu GaAs w polu magnetycznym. Porównanie obliczonych wartości poziomów Landaua w tym modelu z eksperymentem pozwoliło zinterpretować położenie i strukturę obserwowanych pików rezonansowych. Głównym rezultatem wyjaśnienia charakteru pików jest to, że faktycznie istnieją trzy rodzaje rezonansów, związanych ze swobodnymi elektronami, stanami donorów w studniach kwantowych, oraz stanami donorów w barierach tunelowych układów z wieloma studniami kwantowymi.

Podsumowanie wyników badań zostało przedstawione we **wnioskach końcowych**. Bardzo ciekawym jest to, że zostało ustalone istnienie przejść magneto-ptycznych różnego rodzaju, w tym z uczestnictwem stanów związanych w barierach tunelowych.

Moje zastrzeżenia jako recenzenta pracy związane są przede wszystkim z wyznaczeniem parametrów charakteryzujących badany materiał. Mimo, że zostały podane wartości ruchliwości i gęstości nośników, to nie jest jasne, czy odnoszą się do wszystkich badanych próbek, jaki jest rozrzut parametrów dla różnych próbek, a także jaka jest zależność parametrów charakterystycznych od temperatury i od pola magnetycznego? Oprócz tego, nie jest jasne, dlaczego koncentracja nośników jest o rząd wielkości większa niż koncentracja domieszek donorowych? Odpowiedzi na te pytania nie znalazłem w pracy.

Na stronie 55 podano równania do obliczenia poziomów Landaua. Niestety, nie jest zrozumiałe, w jaki sposób i w jakim przybliżeniu teorii znaleziono te równania, nie są opisane wszystkie parametry (E^p , m_c), nie jest jasne w jaki sposób został wyznaczony współczynnik k , gdzie jest parametr głębokości studni? Moim zdaniem, w rozprawie doktorskiej wszystko to powinno być dokładnie i jasno opisane.

Na stronie 67 przedstawiono podrozdział V.3.1 - wyznaczenie energii przejść swobodnych elektronów. Niestety, oprócz samego równania Schrödingera (I-44), które w tym przypadku jest faktycznie układem 14 równań różniczkowych, nie podano żadnych wyjaśnień, w jaki sposób zostało rozwiązane zadanie i gdzie są zamieszczone wyniki obliczeń?

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pana mgr Marcina Zybarta nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz dorobek naukowy Pana mgr Zybarta utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pana mgr Marcina Zybarta, wykonana pod opieką naukową promotora - Pana Profesora Eugeniusza Szeregija - jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących istotny wkład do obszaru wiedzy, który można określić jako **ilościową i jakościową analizę kwantowych zjawisk magneto-optycznych w półprzewodnikowych strukturach wielowarstwowych**. Pokazuje ona także jego ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego i badań eksperymentalnych struktur półprzewodnikowych. 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 mgr Marcina Zybarta do dalszych kroków przewodu doktorskiego.

