

Prof. dr hab. Piotr Kossacki
Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki
Instytut Fizyki Doświadczalnej
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa

Warszawa 9 IX 2016

Recenzja pracy doktorskiej autorstwa mgr. Łukasza Dusanowskiego z Politechniki Wrocławskiej zatytułowanej "Dynamika nośników, statystyka emisji fotonów oraz dekoherencja fononowa w pojedynczych kreskach kwantowych emitujących w zakresie bliskiej podczerwieni"

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zaawansowanych badań spektroskopowych kropek kwantowych InAs na podłożu GaP. Badane heterostruktury pozyskane w ramach współpracy z Uniwersyterem w Wuerzburgu wytworzono techniką epitaksji z wiązek molekularnych. Zaprojektowano je jako emitery światła z zakresu podczerwieni o długości fali około $1,3\mu\text{m}$ i $1,55\mu\text{m}$. Celem pracy była wszechstronna charakteryzacja dynamiki tego systemu i określenie wzbudzeń elektronowych prowadzących do emisji fotonów z pojedynczych kresek kwantowych.

Wybór przedmiotu badań był umotywowany potencjalnie sporym znaczeniem zastosowawczym kropek kwantowych emitujących w zakresie światłowodowych okien telekomunikacyjnych. W zakresie tym brakuje dobrych nieklasycznych emiterów fotonów, porównywalnych z kropkami kwantowymi stosowanymi w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Może to być bardzo istotne w systemach kryptografii kwantowej, jeśli tylko uda się opanować technologię prostych i relatywnie tanich detektorów pojedynczych fotonów pracujących w tym zakresie. Niezależnie od potencjalnych zastosowań, kropki kwantowe emitujące w dłuższych długościach fal stanowią relatywnie słabo poznany system i są warte dokładniejszego zbadania. Wykazują one szereg odmiennych cech i są ciekawe z czysto poznawczego punktu widzenia. Z kolei pomiary korelacyjne w tym zakresie energii stanowią wyzwanie doświadczalne. Doktorant sprostał temu wyzwaniu i uzyskał wartościowe wyniki dzięki wykorzystaniu unikatowych detektorów nadprzewodnikowych. Z punktu widzenia fizyki kropek kwantowych, interesujące jest to, że badane struktury mają kształt wydłużonych

kresek. Prowadzi to do znaczącej modyfikacji ich własności, a w szczególności sprzężenia z fononami co skutkuje odmiennymi zależnościami temperaturowymi.

Zasadniczym celem pracy było szczegółowe określenie dynamiki wzbudzeń optycznych, mechanizmów dekoherencji oraz statystyki fotonów emitowanych z kresek kwantowych. Założone cele zostały osiągnięte. W mojej ocenie mocną stroną pracy stanowią zarówno zaawansowane techniki eksperymentalne jak i wybór interesującego, dość słabo zbadanego systemu kresek kwantowych. Pomiary w trudnym zakresie widmowym stanowiły poważne wyzwanie i znacząco wpłynęły na wartość pracy.

Rozprawa doktorska zawiera 6 rozdziałów. Rozdziały 1 - 4 poprzedzone wstępem stanowią wprowadzenie w podstawowe zagadnienia półprzewodnikowych kropek kwantowych oraz fotoluminescencji i spektroskopii pojedynczych fotonów. Wprowadzenie jest zrozumiałe i zawiera omówienie zagadnień i modeli przydatnych w lekturze dalszych części pracy. Szczególnie przydatny jest opis przejść optycznych związanych z relaksacją poszczególnych kompleksów ekscytonowych oraz opisu statystyki fotonów. Szczegółowo przedyskutowane zostały potencjalne zastosowania badanych kropek. Ta część wydała mi się nawet nadmiernie szczegółową. Opis próbek, ich przygotowania i metod pomiarowych jest zamieszczony w rozdziale 5. Jest on w pełni zadowalający i zawiera wszystkie potrzebne informacje. Moje uznanie wzbudził opis układu do pomiarów spektroskopii korelacyjnej w zakresie podczerwieni i wspomniana przez autora konieczność przygotowania oprogramowania umożliwiającego długotrwałe pomiary na dość niestabilnych detektorach nadprzewodnikowych. Rozdziały 1 - 5 dokumentują ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej i dobre rozeznanie w literaturze.

Zasadnicze wyniki pracy zawarte są w rozdziale 6. W częściach 6.1 i 6.2 przedstawiono wyniki prowadzące do identyfikacji linii widmowych odpowiadających rekombinacji kompleksów ekscytonowych ekscytonu neutralnego, bieksytonu i trionu. Wykorzystano w tym celu pomiary fotoluminescencji rozdzielonej polaryzacyjnie, pomiary w zależności od mocy pobudzania oraz pomiary korelacji pojedynczych fotonów. Zaproponowano również model opisujący otrzymane histogramy korelacji fotonów. Jednym z interesujących wniosków jest stwierdzenie, że poprawny opis można otrzymać przy założeniu porównywalnego prawdopodobieństwa wychwytu w kropce ekscytonów i pojedynczych nośników. W tym miejscu chętnie bym się dowiedział do jakich efektów prowadziłoby uwzględnienie zaniedbanych ciemnych ekscytonów, rozumiem jednak, że taka analiza wymagałaby dalszych założeń i mogłaby być dość skomplikowana.

W następnej części (6.3) przeanalizowane zostały wyniki pomiarów dynamiki zaniku fotoluminescencji po nierezonansowym impulsowym pobudzeniu. Wyznaczono czasy zaniku poszczególnych kompleksów ekscytonowych dla szeregu indywidualnie wybranych kropek kwantowych. Ich szczegółowa analiza doprowadziła do wyodrębnienia dwu klas kropek o różnym stopniu związania ekscytonów. Wynik ten zinterpretowano jako przejaw występowania ekscytonów silniej i słabiej zlokalizowanych na niejednorodnościach/defektach kresek kwantowych. Wynik ten uważam za bardzo istotny i w przyszłości mogący prowadzić do lepszego zrozumienia i sterowania lokalizacją ekscytonów w obiektach jednowymiarowych.

Dla wybranych linii ekscytonowych przeprowadzono analizę wpływu mocy pobudzenia na kształt przebiegów czasowych mikrofotoluminescencji. Zaobserwowano rosnące czasy narastania sygnału ekscytonu jak również ekscytonu naładowanego. Przebiegi zinterpretowano w modelu kaskadowej rekombinacji z uwzględnieniem bieksytonu oraz bieksytonu naładowanego. Wyniki są bardzo przekonujące, chociaż niewielki niedosyt pozostawia brak dyskusji widocznego czasu narastania bieksytonu (rys 6.15 i 6.16). Ciekawe, czy w celu jego wyjaśnienia należałoby uwzględnić wyższe kompleksy multiekscytonowe, czy też wydłużony w czasie proces wychwytu nośników w kropce.

Części 6.5-6.7 poświęcone są analizie wpływu temperatury na szerokość linii emisyjnych, statystykę emitowanych fotonów oraz dynamikę zaniku fotoluminescencji. W tej części przedstawiono najbardziej zaawansowane modele teoretyczne i uzyskano bardzo dobrą zgodność z danymi pomiarowymi. Wyniki te są bardzo istotne jeśli dalszym celem miałyby być skonstruowanie nieklasycznych źródeł fotonów pracujących w wyższych temperaturach.

Praca zakończona jest jasnym i szczegółowym podsumowaniem.

Rozprawa doktorska jest napisana w sposób jasny i zrozumiały, a zamieszczona bibliografia jest pełna. Z niewielkich usterek technicznych, zwróciłbym uwagę na błędnie zamieszczony rysunek 6.9, który jest powtórzeniem rysunku 6.7 (na szczęście na rysunku 6.12 jest już poprawny), oraz nieliczne niezręczności językowe takie jak „plamka ograniczona limitem dyfrakcyjnym” czy „efektywne jego sprzęgnięcie do światłowodów”. Są to jednak trudne do uniknięcia drobne błędy edytorskie.

Mimo drobnych uwag, pracę oceniam bardzo wysoko. Otrzymane wyniki są bardzo bogate i znaczące. O ich randze świadczy to, że zostały zaprezentowane w szeregu publikacji w dobrych czasopismach, oraz na wielu konferencjach. W większości istotnych publikacji doktorant był pierwszym autorem. Reasumując uważam, że pan mgr. Łukasz Dusanowski w przedstawionej pracy doktorskiej samodzielnie rozwiązał postawione sobie zadanie naukowe i

wykazał się wiedzą oraz umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia doktora fizyki. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam że. przedstawiona praca doktorska odpowiada warunkom ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom naukowy przedstawionych wyników wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Piotr Konach