

Warszawa, dnia 10 października 2016 r.

Prof. dr hab. Grzegorz Karczewski
Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk
Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Pawła Mrowińskiego
pod tytułem
Optyczne własności pojedynczych nanostruktur epitaksjalnych z InAs
pod kątem zastosowań w nanofotonice

Rozprawa doktorska mgr Pawła Mrowińskiego składa się z pięciu rozdziałów i bardzo obszernej bibliografii liczącej aż 171 pozycji. Do rozprawy dołączona została również kopia artykułu ostatnio przyjętego do druku w Physical Review, którego mgr Mrowiński jest pierwszym autorem. W artykule tym przedstawiona jest znaczna część wyników opisywanych w rozprawie.

W rozdziale pierwszym, wprowadzającym do rozprawy autor przedstawia motywację do podjęcia badań optycznych nanostruktur półprzewodnikowych (zastosowania jako emiterzy kwantowe w zakresie drugiego (1300 nm) i trzeciego (1550 nm) okna telekomunikacyjnego), definiuje przedmiot tych badań (nanostruktury InAs/InGaAlAs/InP o wydłużonej geometrii, tzw. kreski kwantowe) oraz wyznacza cele badawcze rozprawy. Cele te dotyczą podstawowych własności optycznych pojedynczych kresek kwantowych, które autor definiuje następująco: (1) identyfikacja kwasi-cząstek aktywnych optycznie w kreskach kwantowych, takich jak ekscytony, bieksytony i triony oraz wyznaczenie ich energii wiązania; (2) wyznaczenie energii rozczepienia struktury subtelnej ekscytonu oraz stopnia anizotropii polaryzacyjnej ekscytonu; (3) wyznaczenie g-czynników różnych cząstek oraz współczynnika diamagnetycznego. W rozdziale wstępnym autor opisuje również, w sposób bardzo kompleksowy, układ do pomiarów mikrofotoluminescencji, na którym prowadził gros

swoich badań eksperymentalnych. Pewien niedosyt pozostawia bardzo krótki wstęp do fizyki obiektów o ograniczonej wymiarowości. Autor przedstawia wprawdzie podstawowe informacje dotyczące wzrostu struktur 0D oraz wpływu ograniczenia wymiarowości na gęstości stanów energetycznych, ale mógłby tu popisać się bardziej erudycją i rozwinąć te tematy, szczególnie pod kątem profitów jakie daje ograniczenie wymiarowości dla zastosowań w przyrządach optycznych.

Niedostatki opisu teoretycznego pierwszego rozdziału skompensowane są z nawiązką w rozdziale drugim, w którym autor przedstawia obszerny, szczegółowy i staranny i opis różnych kompleksów ekscytonowych, które występują i badane są w różnych nanostrukturach, w szczególności, w kreskach kwantowych. Autor opisuje relacje energetyczne pomiędzy energiami wiązania ekscytonów, biexcytonów i trionów, omawia dynamikę przejść optycznych, podaje podstawowe informacje dotyczące rekombinacji promienistej, opisuje strukturę subtelną ekscytonów, polaryzację emisji promienistej, przybliża czytelnikowi efekt Purcella oraz omawia obszernie wpływ pola magnetycznego na emitowane promieniowanie. Opisując efekty związane z zewnętrznym polem magnetycznym autor bardziej szczegółowo omawia rozczepienie magnetyczne elektronowych poziomów energetycznych (efekt Zeemana) oraz przesunięcie diamagnetyczne linii emisyjnych. Rozdział drugi dowodzi, że od strony teoretycznej mgr Mrowiński świetnie przygotował się do zadań eksperymentalnych postawionych mu przez promotora. Jestem pod bardzo pozytywnym wrażeniem wiedzy autora oraz formy i treści przedstawienia tych niełatwych zagadnień.

Zasadnicza część rozprawy relacjonująca wyniki badań mgr Mrowińskiego to rozdziały trzeci i czwarty. W rozdziale trzecim autor opisuje wyniki swoich badań dotyczących własności optycznych pojedynczych kresek kwantowych typu InAs/InGaAlAs/InP. Pomiarów wstępne, zespołu kresek przeprowadzone na niestrukturyzowanych próbkach, pokazują szerokie widma związane z niejednorodnościami składu i rozmiaru kresek. Szerokie widma zespołu kresek korzystne są dla zastosowań w strukturach laserowych działających w zakresie widmowym okien telekomunikacyjnych, ponieważ prowadzą do wzmocnienia w szerokim zakresie spektralnym. Poprzez skupienie wiązki pobudzającej do ok. 2 μm oraz strukturyzację próbek polegającą na wytrawieniu mezo o rozmiarach submikrometrycznych, autor otrzymał widma składające się z pojedynczych linii emisyjnych pochodzących od kilku blisko położonych kresek kwantowych i poddał je szczegółowej analizie. Za pomocą pomiarów w funkcji mocy pobudzania zidentyfikował,

które z obserwowanych linii pochodzą z rekombinacji ekscytonów, które z bieksytonów a które z trionów. W ten sposób doszedł do wniosku, że analizowane widmo (Rys. 20) pochodzi od czterech niezależnych kresek kwantowych i każda z tych kresek emituje ekscyton, bieksyton oraz trion. Bardzo interesująca analiza przedstawiona jest w rozdziale III.4., w którym autor poszukiwał rozczepienia linii emisyjnych co wskazywałoby na rozczepienie struktury nadsubtelnej ekscytonu. W tym celu przeprowadził precyzyjne pomiary kąta polaryzacji liniowej emitowanego promieniowania i na tej podstawie potwierdził pochodzenie poszczególnych linii emisyjnych.

Analizując polaryzację liniową widma mikrofolunimescencji autor zauważył, że intensywność emisji w istotny sposób zależy od kąta polaryzacji. Bierze się to z silnej anizotropii kształtu kresek kwantowych, która powoduje mieszanie stanów lekko- i ciężko-dziurowych w paśmie walencyjnym, i w konsekwencji prowadzi do eliptycznej polaryzacji stanów własnych ekscytonu. Uwzględniając domieszkę stanów lekko-dziurowych, jak również efekt sprzężenia emitera z modelem optycznym ośrodka autor otrzymał bardzo dobrą zgodność danych doświadczalnych z przewidywaniami teoretycznymi.

Zbadany został również wpływ zewnętrznego pola magnetycznego w konfiguracji Faradaya i Voigta na kompleksy ekscytonowe obserwowane w kreskach kwantowych. Na podstawie pomiarów rozczepienia Zeemana wyznaczone zostały podstawowe parametry magnetyczne takie, jak wartość g-czynników oraz energie rozczepienia struktury subtelnej. Wyznaczone zostały również współczynniki diamagnetyczne badanych kwasi cząstek. Na podstawie wielkości tych parametrów autor przeprowadził analizę efektywnego rozmiaru emitującej nanostruktury. Otrzymane rozmiary kresek kwantowych porównywane były z przewidywaniami teoretycznymi opartymi na modelu kp, które zostały wykonane przez dr Janusza Andrzejewskiego z Politechniki Wrocławskiej. Mgr Mrowiński w przekonujący sposób przedyskutował niewielkie rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a przewidywaniami teorii.

Z badań przeprowadzonych w konfiguracji Voigta najciekawszym wynikiem jest niewątpliwie zależność rozczepienia ekscytonu w funkcji pola magnetycznego i zaobserwowana zmiana znaku tego rozczepienia (Rys. 30). Efekt ten jest istotny z punktu widzenia praktycznego wykorzystania kaskady fotonowej ze stanu bieksytonowego i ekscytonowego, która może stanowić źródło fotonów spolaryzowanych polaryzacyjnie. Obserwowane zjawisko związane jest z przecinaniem energetycznym stanów ekscytonu

jasnego i ciemnego pod wpływem pola magnetycznego obniżającego symetrię układu. Trzeba podkreślić, że autor poświęcił temu zagadnieniu sporo uwagi, a jego wyniki doświadczalne i ich interpretacja są bardzo ciekawe.

Badania opisane szczegółowo w rozdziale trzecim dla pojedynczych kresek kwantowych przeprowadzone zostały następnie dla znacznie większego zbioru kropek o różnej budowie i w rozdziale czwartym mgr Mrowiński omawia wpływ morfologii kresek i czynników zewnętrznych na ich własności optyczne. W ten sposób autor otrzymał zależności poszczególnych parametrów kresek kwantowych od energii ich emisji. Zależności energii wiązania bieksytonu i trionu oraz rozczepienia struktury subtelnej ekscytonu zostały porównane z wynikami obliczeń teoretycznych z uwzględnieniem bezpośredniego oddziaływania kulombowskiego, oddziaływania wymiany oraz efektów korelacyjnych. Pozwoliło to na określenie znaku ładunku obserwowanego trionu. Porównanie to wykazało również znaczny wpływ efektów korelacyjnych na strukturę elektronową kresek kwantowych. Zauważony wpływ parametrów morfologicznych na rozczepienie struktury subtelnej ekscytonu dowodzi, że wysokie wartości rozczepienia subtelnego spowodowana jest prawdopodobnie wydłużonym kształtem badanych nanostruktur (powyżej 50 nm).

Mgr Mrowiński przeprowadził badania wielu kresek kwantowych o różnej morfologii w polu magnetycznym. Na podstawie rozczepienia Zeemana wyznaczył zależność g-czynnika ekscytonu od energii emisji. Otrzymany rezultat powiązany został z zależnością g-czynnika elektronu wynikającą z teoretycznej krzywej Rotha. Podobnie jak zostało to opisane w rozdziale trzecim, wyznaczył rozmiary ekscytonu w wielu badanych nanostrukturach na podstawie współczynnika diamagnetycznego. Potwierdził poprzednio zaobserwowany rezultat wskazujący, że rozmiary ekscytonu są systematycznie mniejsze niż rozmiary fizyczne kresek określone na podstawie skaningowej mikroskopii elektronowej. Mgr Mrowiński wyznaczył również średnicę funkcji falowej ekscytonu w kierunku osi wzrostu i pokazał, że funkcja falowa znacząco wnika w obszar bariery.

Badania efektu Zeemana ekscytonów w konfiguracji pola magnetycznego równoległego po płaszczyźnie nanostruktur pokazały, że dla każdego ekscytonu istnieje możliwość zmiany znaku rozczepienia subtelnego, a tym samym, zmiany konfiguracji stanów w strukturze energetycznej ekscytonu. Jest to bardzo istotna obserwacja z punktu widzenia zastosowań kresek kwantowych jako emitery splecionych par fotonowych w zakresie telekomunikacyjnym.

Mgr Mrowiński dążył do kontroli stopnia polaryzacji emisji z pojedynczych kresek

kwantowych poprzez wytwarzanie mezo o różnej geometrii. Przeprowadził systematyczne pomiary dla mezo o różnych rozmiarach i stałej asymetrii dla geometrii prostokątnej w płaszczyźnie, a także dla mezo prostopadłościennych zorientowanych równoległe i prostopadle w stosunku do kresek, a także mezo kwadratowych w płaszczyźnie. Wyniki wykazały silny wpływ ośrodka na intensywność polaryzacji poprzez efekt sprzężenia emitera z polem elektromagnetycznym w mezie. Autor porównał wyniki eksperymentalne z własnymi symulacjami numerycznymi wykonanymi metodą FDTD i otrzymał bardzo dobrą zgodność, co świadczy o znaczącym wpływie ośrodka na spolaryzowaną emisję.

Reasumując, mgr Mrowiński przeprowadził bardzo skrupulatne pomiary optyczne kresek kwantowych InAs na podłożach InP. Rozprawa doktorska mgr Pawła Mrowińskiego zawiera dużo bardzo ciekawych wyników eksperymentalnych omówionych przeze mnie powyżej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że pomiary prowadzone przez mgr Mrowińskiego były żmudne i bardzo trudne technicznie. Niełatwo, bowiem, mierzyć sygnał optyczny od pojedynczych emiterów o wymiarach nanometrów. Żeby nie zgubić sygnału trzeba zapewnić ogromną stabilność mechaniczną i termiczną układu. Jest to szczególnie trudne przy pomiarach w polu magnetycznym, w funkcji natężenia pobudzenia oraz przy pomiarach polaryzacyjnych. Jakość i ilość uzyskanych przez mgr Mrowińskiego wyników świadczy o tym, że jest on bardzo dobrym eksperymentatorem, który świetnie opanował stosowane przez siebie techniki pomiarowe.

Interpretację i dyskusję wyników eksperymentalnych przeprowadzonych w rozprawie oceniam również bardzo wysoko. Na szczególne uznanie zasługuje fakt, że w celu pogłębionej interpretacji wyników mgr Mrowiński zapewnił sobie współpracę kolegów teoretyków z Wrocławia i Torunia. Rozprawa pokazuje, że mimo iż poszczególne rachunki prowadzili ci współpracownicy, to mgr Mrowiński doskonale orientuje się w fizycznej stronie zastosowanych modeli teoretycznych. Co więcej, potrafi je jasno i przystępnie opisać, nie gubiąc przy tym istotnych aspektów fizycznych.

Uzyskane przez mgr Mrowińskiego wyniki stanowią istotny wkład w rozwój nanotechnologii, w szczególności wiedzy o własnościach optycznych nanostruktur półprzewodnikowych. W swoich zasadniczych częściach dotyczy zagadnień ambitnych i będących obecnie centrum zainteresowania specjalistów na świecie. Oceniam pracę doktorską mgr Pawła Mrowińskiego bardzo wysoko.

Rozprawa napisana jest bardzo ładnym, poprawnym językiem. Jest również starannie przygotowana od strony edytorskiej. Rysunki i tabele są przejrzyste i dobrze opisane.

Trzeba również zwrócić uwagę na bardzo bogaty i wartościowy dorobek publikacyjny mgr Pawła Mrowińskiego. Mimo młodego wieku i krótkiego stażu naukowego mgr Mrowiński jest współautorem aż 12 publikacji naukowych, w siedmiu z których jest on pierwszym autorem. Jak na bardzo młodego badacza jest to dorobek zasługujący na szczególne uznanie, tym bardziej, że są tam artykuły publikowane w tak renomowanych czasopismach jak Physical Review B, Applied Physics Letters (2 szt.) i Journal of Applied Physics. Mgr. Mrowiński jest również współautorem 14 prezentacji konferencyjnych. Tzw. Indeks Hirsha jego dorobku naukowego wynosi 4 (za Web of Sciences).

Jako recenzent powinienem również wskazać słabe strony recenzowanej pracy. Niestety jest to bardzo trudne, ponieważ praca jest po prostu bardzo dobra. W zmian, proszę, żeby podczas obrony doktorant zechciał omówić szerzej dwa zagadnienie, które wprawdzie wykraczają poza zakres tej rozprawy, ale są z nią blisko związane i wydają się bardzo ciekawe. Mianowicie, proszę bardziej dokładnie omówić zagadnienie fotonów splątanych, szczególnie splątanych polaryzacyjnie (co to jest, jakie są perspektywy wytwarzania i wykorzystania takich obiektów) oraz przypadek anizotropii emisji optycznej z izotropowego, punktowego źródła promieniowania (idealnej kropki kwantowej) w mezie o różnym kształcie, jako odniesienie do anizotropii świecenia kresek kwantowych.

Stwierdzam, rozprawa mgr Pawła Mrowińskiego w pełni spełnia wymagania Ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, biorąc pod uwagę zarówno rozprawę doktorską mgr Pawła Mrowińskiego, jak i jego całkowity dorobek naukowy z głębokim przekonaniem wnioskuję o wyróżnienie tej pracy i jej autora przez Radę Naukową Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej.


Grzegorz Karczewski