

Warszawa, 16.06.2014 r.

PRZYJĘTE
WCh

dr hab. Andrzej Wysmołek,
prof. UW
Zakład Fizyki Ciała Stałego
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytet warszawski

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Jakubczyka
„Effects of photonic confinement on the emission of CdTe quantum dots”**

Temat rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Jakubczyka bardzo dobrze mieści się w nurcie światowych badań emisji z półprzewodnikowych kropek kwantowych z wykorzystaniem mikrownek optycznych. Podjęcie tej tematyki wydaje się naturalnym rozszerzeniem badań struktur o obniżonej wymiarowości (takich jak studnie kwantowe, kropki kwantowe) wykorzystujących półprzewodniki półmagnetyczne II-VI. Badania takie prowadzone są od wielu lat na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W połączeniu ze świetnymi możliwościami nanotechnologicznymi Uniwersytetu Bremeńskiego dało to nowe możliwości badawcze, których potwierdzeniem jest rozprawa doktorska mgra Tomasza Jakubczyka.

Głównym celem pracy mgra Tomasza Jakubczyka było wykorzystanie mikrownek półprzewodnikowych do efektywnego sterowania emisją spontaniczną z kropek kwantowych z tellurku kadmu (CdTe) umieszczonych w matrycy z tellurku cynku (ZnTe). Oprócz aspektu związanego z poszukiwaniem metod polepszenia właściwości optycznych mikrownek, np. na potrzeby laserów o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (Vertical Cavity Surface Emitting Laser -VCSEL), pracujących w obszarze zielono-pomarańczowym światła widzialnego, podjęty temat jest bardzo ważny z punktu widzenia polepszenia efektywności emisji z kropek kwantowych jako źródeł pojedynczych fotonów do wykorzystania w kryptografii kwantowej. Ważną motywacją do podjęcia powyższych badań jest również perspektywa umieszczania w mikrownękach kropek kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi, uzyskanymi niedawno w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego, Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Stworzyłoby to zupełnie nowe możliwości doświadczalne badań kropek kwantowych jako podstawowych elementów solotroniki - nowej dziedziny elektroniki i spintroniki.

Próbki użyte w pracy wyhodowano na Uniwersytecie w Bremie oraz na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Do badań wykorzystano dwa typy kropek - hodowanych z wykorzystaniem amorficznego telluru oraz inicjowanych przy użyciu cynku. Przy zachowaniu odpowiednich parametrów technologicznych, w obu przypadkach można uzyskać układy wysokiej jakości samoorganizujących się kropek kwantowych CdTe/ZnTe.

Dalszym, ważnym krokiem technologicznym było wbudowanie warstw z kropkami kwantowymi w obszar pomiędzy rozproszonymi zwierciadłami Bragg, dopasowanymi sieciowo do ZnTe. Tak uzyskane mikrownęki planarne zostały następnie wykorzystane do wytworzenia, za pomocą zogniskowanej wiązki jonów (Focused Ion Beam – FIB), wnęk filarowych. Powstał bardzo interesujący układ umożliwiający badanie wpływu trójwymiarowego uwięzienia fotonicznego na procesy wzbudzenia i rekombinacji, zachodzące w kropkach kwantowych.

Treść pracy została podzielona na 8 rozdziałów. We wprowadzeniu, opartym na bogatej bibliografii, Autor w jasny i przystępny sposób wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z wnękami i mikrownękami, z uwzględnieniem efektu Purcell'a, który ma szczególne znaczenie dla rozprawy. Oprócz podstawowych informacji o kropkach kwantowych oraz aktualnej wiedzy na temat parametrów mikrownek, pokazane zostały tam kierunki rozwoju mikrownek oraz podstawowe wyzwania, które stoją na drodze do różnorodnych zastosowań układów mikrownęk filarowych bazujących na półprzewodnikach z szeroką przerwą energetyczną.

W rozdziale 2 przedstawiono szczegóły technologiczne kolejnych etapów prowadzących do wytworzenia mikrownęk filarowych:

- hodowanie struktur z wykorzystaniem epitaksji z wiązki molekularnej,
- charakteryzację *in situ* wytwarzanych warstw i kropek półprzewodnikowych z wykorzystaniem dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED) oraz odbicia światła,
- charakteryzację z wykorzystaniem wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej,
- strukturyzację warstw dwuwymiarowych przy użyciu zogniskowanej wiązki jonów (FIB),
- formowanie kropek kwantowych,
- wzrost rozproszonych zwierciadeł Bragga.

Warto podkreślić, że mgr Tomasz Jakubczyk opanował wszystkie wymienione powyżej etapy technologiczne, co jest dość unikatowe, jeśli dodać, że przeprowadził również zaawansowane badania optyczne uzyskanych nanostruktur.

W rozdziale 3 przedstawiono szczegóły eksperymentalne dotyczące charakteryzacji mikrownek filarowych oraz kropek kwantowych obejmujące: układ do badania odbicia i luminescencji niskotemperaturowej, układ do czasowo-rozdzielonej mikroluminescencji, oraz układ do mapowania rozkładu pola elektromagnetycznego w filarach i kąтового rozkładu emisji z mikrownęki. Są to zaawansowane układy optyczne, których używanie wymaga od eksperymentatora dużego doświadczenia.

W rozdziale 4 w sposób skondensowany Autor przedstawił typowe wyniki badań optycznych mikrownęk planarnych oraz mikrownęk filarowych. Pomiary odbicia i mikroluminescencji wnęk planarnych umożliwiły wyznaczenie energii rezonansowej wnęk oraz szerokości spektralnej modu wnęki. Połączenie tych wyników pozwoliło na uzyskanie informacji o dobroci wnęki planarnej, będącej dla badanych struktur na bardzo dobrym poziomie (rzędu 1000).

W przypadku mikrownęk filarowych w wyniku dodatkowego ograniczenia przestrzennego zaobserwowano szereg dodatkowych modów. W celu ich zbadania przeprowadzono pomiary widm mikroluminescencji z kropkami kwantowymi, w różnych temperaturach oraz przy zróżnicowanych mocach pobudzania. Uzyskane rezultaty

doświadczalne zostały w zadowalający sposób odtworzone w symulacjach wykorzystujących metodę macierzy przejścia. Badając parametry linii emisyjnych z kropek kwantowych umieszczonych we wnękach filarowych wyznaczono zależność dobroci wnęk od średnicy filara w zakresie od 0,7 do 5 μm . Interesującym wynikiem jest obserwacja rozszczepienia modu podstawowego wnęki (zarówno planarnej, jak też filarowej) na dwie składowe o wzajemnie prostopadłych polaryzacjach, odchylonych od osi krystalicznych wysokiej symetrii o kilka stopni. Obserwowane rozszczepienie energetyczne modów jest mniejsze dla mikrownęk filarowych, co zostało zinterpretowane jako efekt relaksacji naprężeń. Problem ten wymaga jednak dalszych badań. W rozdziale 4 zaprezentowano również rozkład kątowy emisji wnęk planarnych oraz rozkład przestrzenny emisji mikrownęk filarowych. Pomimo tego, że zgodność wyników eksperymentalnych i symulacji wykorzystującej rozszerzoną metodę macierzy przejścia ma jedynie charakter jakościowy, uzyskany rezultat można uznać za zadowalający.

W rozdziale 5 zaprezentowano wyniki badań efektu Purcella dla wnęk mikrofilarów. W połączeniu z informacją o objętości poszczególnych modów, uzyskanej z symulacji metodą macierzy przejścia, stwierdzono wzrost czynnika Purcella wraz ze zmniejszaniem średnicy mikrofilara. Dla średnicy ok. 1,5 μm współczynnik ten jest na poziomie 5. Wynik ten potwierdzono wykonując pomiary czasowo rozdzielonej mikroluminescencji dla przejść w kropkach kwantowych, będących w rezonansie z modem wnęki, uzyskując dla mikrofilara o średnicy 1,5 μm wartość czynnika Purcella $5,7 \pm 0,5$.

Bardzo interesującym rezultatem badań, przedstawionych w rozdziale 5, jest wykazanie zależności siły rezonansowego oddziaływania pomiędzy kropką kwantową i modem wnęki. Dokonano tego wykorzystując zależność energii emisji kropki kwantowej od temperatury. Uzyskany wynik można jakościowo opisać poprzez rezonansowe wzmocnienie efektu Purcella.

Rozdział 6 poświęcony jest badaniom mikrofilarów z dodatkowymi radialnymi zwierciadłami Bragga. Osadzenie tych zwierciadeł przy użyciu metody PLD (Pulsed Laser Deposition) z Al_2O_3 oraz ceramiki YSZ składającej się z ZrO_2 oraz Y_2O_3 , było możliwe dzięki współpracy z Uniwersytetem Lipskim. To nowatorskie rozwiązanie wykazało, że tempo rekombinacji promienistej w mikrownęce może zostać wydłużone o czynnik 3, co świadczy o znaczącym ograniczeniu „wyciekania” modów z wnęki. Może to mieć kluczowe znaczenie dla badań kropek kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi w zastosowaniach solotronicznych, a także dla zastosowań w konstrukcji laserów VCSEL.

W rozdziale 7 przedstawiano wyniki badań wzrostu struktur II-VI (kropek kwantowych, rozproszonych zwierciadeł braggowskich) na podłożu GaSb. Główna motywacja podjęcia tych badań wynika z chęci zastąpienia GaAs jako podłoża niedopasowanego do ZnTe. Eksperyment technologiczny zakończył się bardzo obiecującymi rezultatami – stwierdzono, że zmniejszyła się koncentracja defektów indukowanych w strukturach wynikających z niedopasowania do podłoża GaAs. Uzyskane wyniki stanowią dobry punkt wyjścia do dalszych badań w tym zakresie.

Wyniki uzyskane w pracy doktorskiej mgra Tomasza Jakubczyka stanowią bardzo szeroki wkład w poznanie właściwości kropek kwantowych oraz mikrownęk uzyskiwanych z materiałów II-VI. Część uzyskanych wyników została już opublikowana w 13 pracach w czasopiśmie z listy filadelfijskiej. W czterech z nich mgr Tomasz Jakubczyk jest pierwszym autorem. Kolejna praca pt. *“Inhibition and enhancement of the spontaneous emission of quantum dots in micropillar cavities with radial distributed Bragg reflectors”*, w której mgr

Tomasz Jakubczyk jest również pierwszym autorem jest w trakcie recenzji w ACS Nano Letters. Jego indeks H wynosi aktualnie 5 co stanowi bardzo dobry dorobek jak na ten etap rozwoju naukowego w obszarze fizyki materii skondensowanej.

Przygotowując rozprawę mgr Tomasz Jakubczyk wykazał się bardzo dobrą znajomością literatury przedmiotu i udowodnił, że potrafi ją właściwie wykorzystać. W mojej opinii, rozprawa będzie bardzo dobrym materiałem źródłowym zarówno dla specjalistów jak też studentów i doktorantów zajmujących się badaniami mikrownęk i ich oddziaływaniu z kropkami kwantowymi. W rozprawie można znaleźć drobne błędy językowe, które mogą sugerować pośpiech przy pisaniu pracy. Autor nie uniknął też drobnych błędów edytorskich, np. pozostawiając duże miejsca na niektórych stronach z rysunkami i czasami kończąc rozdział podpisem pod rysunek. Te drobne potknięcia nie zmieniają ogólnego, bardzo dobrego odbioru pracy.

Mgr Tomasz Jakubczyk pokazał, że posiadał umiejętność jasnego wypowiadania się o zagadnieniach fizycznych związanych z tematyką pracy. Potrafił je umiejscowić w szerszym kontekście. Warto podkreślić jest to, że uczestniczył w hodowaniu i wytwarzaniu mikrownęk filarowych przy użyciu zaawansowanych technik strukturyzacji (takich jak FIB) i następnie badał tak przygotowane próbki z wykorzystaniem zaawansowanych metod optycznych. Świadczy to o jego uniwersalnym przygotowaniu do samodzielnej pracy naukowej.

W mojej opinii rozprawa mgra Tomasza Jakubczyka zawiera wyniki ważne dla społeczności naukowej zajmującej się mikrownękami półprzewodnikowymi i ich sprzężeniem z kropkami kwantowymi. Rozprawa mgra Tomasza Jakubczyka z nadmiarem spełnia ustawowe wymagania dotyczące prac doktorskich i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Za najcenniejszy element rozprawy uważam oryginalny pomysł wykorzystania radialnych, rozproszonych zwierciadeł braggowskich w mikrownękach filarowych z kropkami kwantowymi CdTe. W mojej ocenie jest to powód do wyróżnienia rozprawy, o co wnioskuję do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

