

2019 -02- 07 MB

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Sęk
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 06.02.2019

Recenzja Rozprawy Doktorskiej pt.
„Spektroskopia sprzężonych mikrownęk optycznych z emiterami kwantowymi”

Autor rozprawy: mgr Maciej Ściesiek
Promotorzy: prof. dr hab. Andrzej Golnik
dr hab. Jan Suffczyński

Rozprawa dotyczy badań nad właściwościami fizycznymi kwantowych układów półprzewodnikowych wytworzonych na bazie materiałów grupy II-VI i zawierających pionowo sprzężone podwójne wnęki optyczne. Dysertacja wraz z dodatkami obejmuje ponad sto dwadzieścia stron, plus obszerną bibliografię (88 pozycji), oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów. Pierwszy z nich jest wprowadzeniem do podjętej tematyki, definiuje cele pracy oraz podaje w bardzo skróconej wersji podstawy fizyczne badanych zjawisk. Rozdział drugi omawia projektowanie i wytwarzanie struktur będących potem przedmiotem badań, gdzie część związana z projektowaniem bazuje na własnych symulacjach Autora rozprawy, które obejmują obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego fali elektromagnetycznej jak i symulacje widm odbicia metodą macierzy przejścia. Na tej podstawie, próbki na bazie materiałów CdTe, ZnTe oraz stopów wieloskładnikowych CdZnTe również z magnezem i manganem, zostały wytworzone metodą epitaksji z wiązek molekularnych przez dr hab. Wojciecha Pacuskiego z Zakładu Fizyki Ciała Stałego, Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Opis technologii wzrostu oraz wyniki charakterystyki strukturalnej zawarto w dalszych częściach tego rozdziału.

Rozdział trzeci zawiera opis wykorzystanych, optycznych metod eksperymentalnych, oraz powiązanych z nimi układów do pomiarów widm fotoluminescencji i odbicia w różnych konfiguracjach/geometriach przebiegu doświadczenia, w tym mapowanie przestrzenne własności optycznych, pomiary rozdzielone polaryzacyjnie i w zewnętrznym polu magnetycznym. Omówiono także dane techniczne podstawowych elementów składowych tych układów.

Kolejne dwa rozdziały stanowią zasadniczą część pracy i zawierają główne wyniki własne uzyskane przez Autora. Rozdział 4 dotyczy badania sprzężenia pomiędzy dwoma mikrownękami umieszczonymi w strukturze jedna nad drugą. Dysponowano dwiema próbkami o różnej liczbie par zwierciadeł Bragga oddzielających obie wnęki. Emiterem w

tym układzie była warstwa kropek kwantowych (CdTe lub CdTe:Mn) w środku jednej z wnęk, która służyła do zasilania modów optycznych, aby pozwolić na ich obserwację w widmach emisyjnych. W pierwszej części Autor bada sprzężenie dla niesktrukturyzowanej próbki (ograniczenie przestrzenne dla fotonów tylko w kierunku wzrostu) na podstawie widm odbicia (oraz map dwuwymiarowych) dla różnych położeń na próbce, porównanych później również z widmami fotoluminescencji. Zmiana położenia na próbce przekłada się na naturalną zmianę grubości warstw, a to zaś na różny stopień odstrojenia (lub dostrojenia) spektralnego pomiędzy modami optycznymi obu wnęk i różny stopień sprzężenia pomiędzy nimi. Wyniki doświadczalne wspiera prosta analiza teoretyczna na podstawie modeli ciasnego wiązania oraz sprzężonych oscylatorów harmonicznym. W dalszych podrozdziałach badane są mikrorezonatory trójwymiarowe wykonane za pomocą trawienia jonowego. Głównym rezultatem tej części jest otrzymana zależność energii modów w takim układzie dwóch sprzężonych wnęk w funkcji rozmiaru poprzecznego badanych, cylindrycznych mikrofilarów. Pomimo, że uzyskane w tym rozdziale wyniki są dość oczekiwane nawet w oparciu o prostą intuicję, to trzeba podkreślić, że są to właściwie pionierskie badania sprzężonych pionowo mikrownęk związków II-VI oraz kontroli sprzężenia pomiędzy nimi poprzez gradient parametrów struktury w skali trzycalowego podłoża.

W rozdziale nr 5 przedstawione są wyniki badań podobnej struktury ze sprzężonymi pionowo wnękami (ograniczenie przestrzenne tylko w kierunku wzrostu), ale zawierającej studnie kwantowe w obu wnękach. Przy czym, jedna ze studni wykonana jest z półmagnetycznego półprzewodnika (CdZnTe:Mn), co miało na celu uczynić ją bardziej czułą na przestrajanie polem magnetycznym. Uzyskano w ten sposób wielopoziomowy układ ekscytonowo-fotoniczny, w którym, ze względu na separację przestrzenną wykluczone jest bezpośrednie sprzężenie pomiędzy studniami kwantowymi, ale możliwe jest sterowanie sprzężeniem całego systemu przez wykorzystanie intencjonalnie wprowadzonych gradientów przestrzennych grubości warstw oraz zastosowanie pola magnetycznego przesuwającego znacząco energie stanów studni półmagnetycznej. Najpierw Autor zamieścił przewidywania teoretyczne dla takiego układu w funkcji wybranego parametru odstrojenia, które weryfikuje później częściowo doświadczalnie poprzez wyznaczenie map odbicia i fotoluminescencji (również fotoluminescencji w polu magnetycznym) oraz bezpośredni pomiar krzywych dyspersyjnych dla różnych odstrojeń. Rozdział kończy się danymi z pomiarów emisji z krawędzi dla selektywnego przestrzennie pobudzania. Subiektywnie, za najciekawsze, ale też wymagające doświadczalnie, uważam wyniki właśnie tego rozdziału, demonstrujące kontrolowane sprzężenie pomiędzy dwoma odseparowanymi studniami za pośrednictwem pola modu podwójnej wnęki rezonansowej z zastosowanym dodatkowo przestrajania układu polem magnetycznym. Przeprowadzono systematyczną analizę w funkcji regulowanego przestrajania różnych stanów tego czteropoziomowego układu względem siebie, wraz z porównaniem do modelu (uzyskano nadzwyczaj dobrą zgodność!), i na podstawie dopasowania do danych doświadczalnych wyekstrahowaniem współczynników Hopfielda dla poszczególnych przypadków. To ostatnie jest szczególnie przydatne do zrozumienia nietrywialnych zmian intensywności poszczególnych linii.

W rozdziale 6 Autor krótko podsumowuje rozprawę oraz rozstraca pewne perspektywy dalszych badań takich układów, a nawet ich praktycznego wykorzystania. Rozdział 7, zaś to zbiór dodatków, dotyczących pewnych aspektów technicznych pomiarów oraz dyskusji doboru parametrów w symulacjach.

Przedstawiona rozprawa jest obszerną i systematyczną analizą właściwości wybranych struktur z dwoma, sprzężonymi pionowo wnękami rezonansowymi wytworzonymi epitaksjalnie z materiałów CdTe/ZnTe, i ich pochodnych. Wyniki te są ciekawe, wartościowe naukowo i zdecydowanie oryginalne w skali międzynarodowej. Praca napisana jest jednak bardzo nierówno, tak jakby Autor poszczególne części pisał w bardzo dużych odstępach czasu albo przykładał do nich nierównomierną wagę. Rozdziały wstępne, w szczególności rozdz. 1, napisane są znacznie mniej starannie, czasami powierzchownie i chaotycznie, z całym szeregiem niedomówień merytorycznych, nieprecyzyjnych określeń i lapsusów językowych czy nomenklaturowych (przykłady podano przy końcu niniejszej recenzji). Na szczęście, w miarę przechodzenia do opisu zasadniczych wyników doktoratu zmienia się zarówno język, a co najważniejsze, szczegółowość rozważań. Same wyniki są imponujące, o dużym ciężarze ilościowym i jakościowym. Wymagały od Autora zrozumienia wielu aspektów fizyki i technologii struktur półprzewodnikowych, współpracy z innymi badaczami (także z innych ośrodków) oraz nabycia bardzo dużego doświadczenia w przeprowadzaniu trudnych pomiarów spektroskopowych, m in. z wysoką rozdzielczością przestrzenną, również z krawędzi próbki półprzewodnikowej, z rozdzielczością kątową (obrazowanie w przestrzeni pędów) oraz w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego. Dlatego też moja sumaryczna ocena wyników pracy pana mgra Ścieśka jest bardzo pozytywna. Dojrzałość naukowa Doktoranta jest dodatkowo wsparta jego współautorstwem w czterech artykułach (w tym dwa w *Physical Review B*). Zastanawiającym jest fakt, że tylko część wyników rozdziału 4 została opublikowana, a nie opublikowano do tej pory wyników rozdziału 5 dotyczącego „tunelowania polarytonów”?

Istotnym plusem rozprawy jest połączenie wyników badań doświadczalnych z różnych metod, zarówno strukturalnych jak i spektroskopii optycznej. Wartym podkreślenia jest w tym miejscu fakt, że pan mgr Maciej Ścieśka opanował również w niezbędnym stopniu warsztat modelowania teoretycznego zachodzących zjawisk i symulacji widm optycznych, co zostało wykorzystane zarówno na etapie projektowania struktur do badań jak i potem przy analizie i interpretacji uzyskanych wyników doświadczalnych. Jest to wciąż nie tak częstym połączeniem w pracach o dominującym charakterze eksperymentalnym.

Praca doktorska mgra Macieja Ścieśka jest w ogólności napisana poprawnie, układ pracy jest logiczny, a struktura przejrzysta. Autor nie ustrzegł się jednak kilku niejasności czy niedomówień, które nasuwają następujące uwagi/pytania:

1. Nie jest jasnym, dlaczego w rozdz. 4.3 nie przedstawiono analogicznej analizy dla próbki UW0389 jak to np. na stronach 59-60 uczyniono dla próbki UW0417? Nie

napisano również, której próbki dotyczy analiza w rozdz. 4.4 (prawdopodobnie UW0417)? Dlaczego nie pokazano podobnej dla drugiej badanej próbki?

2. Na str. 66 brak komentarza nt. pozornych pików emisyjnych widocznych na rys. 4.8c w zakresie widmowym poza tzw. „stop-band”.
3. Przydatne mogłoby być bezpośrednie porównanie na jednym wykresie stosunku intensywności modów w odbiciu i fotoluminescencji, które można było otrzymać na podstawie danych takich jak na rys. 4.9? Na pytanie o główny czynnik decydujący o różnicach w intensywności modów w PL mogło częściowo odpowiedzieć umieszczenie wykresów z rys. 4.9 na tle emisji z samych kropek. Można założyć, że położenie widmowe pasma emisji z kropek jest słabo zależne od położenia na próbce.
4. Na wyznaczaną doświadczalnie dobroć mikrownek ma wpływ obecność kropek w jednej spośród sprzęganych wnęk (absorpcja). Czy różnice w Q modów różnych wnęk można wiązać z tym faktem?
5. Niejasny jest fragment dyskusji na końcu rozdz. 4.5.2 o zależności różnic energii pomiędzy modami w mikrownece od jej rozmiaru poprzecznego, w szczególności komentarz: „*Widoczne jest, że wraz ze zmniejszaniem średnicy mikrofilarów zarówno energia submodów jak i ich wzajemna odległość energetyczna wzrasta (rysunek 4.13c)). Pokazuje to wzrost siły sprzężenia modów na skutek zwiększonego związania fotonu w strukturze.*”. Tutaj nakładają się dwa efekty. Podstawowym jest zależność widma modów od rozmiaru mikrorezonatora (wzrost energii i separacji energetycznej wraz ze spadkiem rozmiaru). Drugim zaś jest sprzężenie pomiędzy wnękami w pionie, które zależne jest od rozmiaru poprzecznego mikrofilarów. Czy Autor próbował analizować wyniki w ten sposób?
6. W kontekście wniosków z rozdz. 5.4.2 oraz 5.4.3, interesującym byłby eksperyment z selektywnym pobudzaniem w krawędź próbki (np. w jedną z mikrownek w warunkach gwarantujących sprzężenie pomiędzy wnękami) i detekcją z powierzchni. Czy rozważano/próbowano robić takie pomiary?
7. Pomimo niewątpliwych elementów oryginalności przedstawionych wyników, autor dość stanowczo stwierdza, że to są one jedynymi/pierwszymi mówiącymi o sprzężeniu za pośrednictwem fotonu pomiędzy „odległymi” emiterami kwantowymi oraz, że są to pierwsze badania sprzężenia w układzie pionowym. Istnieją jednak pewne wcześniejsze doniesienia pokazujące istnienie tego typu efektów w innych układach, w tym również w ułożeniu wertykalnym [np. *Nature Com.* 4, 1400 (2013); *J. Lumin.* 87, 25 (2000)], co jednak nie umniejsza osiągnięciom niniejszej rozprawy.

Dodatkowo, z obowiązku recenzenta wypisuję też poniżej przykłady innych, pomniejszych usterek, braki w informacji czy błędy językowe, drugoplanowe jednak dla zasadniczej zawartości merytorycznej pracy:

- Nieco utrudnia analizę przedstawionych wyników fakt, że Autor rozprawy przeskakuje często pomiędzy zależnościami spektralnymi przedstawianymi w funkcji energii albo długości fali. Przeważnie dałoby się to rozwiązać poprzez narysowanie obu skal.

- Pewnym nadużyciem jest nazywanie „tunelowaniem ekscytonów” sprzężenia na duże odległości studni kwantowych poprzez mod fotonu w podwójnej wnęce, w przeciwieństwie do bardziej uprawnionego „tunelowania polarytonów”.
- Nie zdefiniowano macierzy M w równaniu (2.4).
- Rys 2.2, prawa oś, „współczynnik absorpcji” czy „współczynnik ekstynkcji”?
- Nie podano grubości wnęk w symulacjach na str. 16-17.
- Linia omawiana na str. 22 jako niebieska jest na rys. 2.6 linią zieloną.
- W podpisie rys. 2.15 nie opisano co jest pokazane na poszczególnych rysunkach od (a) do (o); również na rys. 2.16 nie podano w podpisie co jest na (a) a co na (b).
- Przykład mało zrozumiałego, nieprecyzyjnego fragmentu tekstu: *„Dzięki większej sile oscylatora emisja radiacyjna jest bardziej efektywna, a przy małej masie i wynikającej z tego dużej długości fali, kondensacja jest łatwiejsza.”*
- Można też znaleźć wiele określeń nieścisłych, zbyt skrótowych albo zwrotów będących żargonem czy naleciałościami z języka angielskiego (szczególnie w pierwszych rozdziałach pracy), np. „foton wnękowy”, „siła oscylatora w związkach półprzewodnikowych”, „rozmiar funkcji falowej”, „rozmiar fali świetlnej”, „w obszarze stopbandu”, „propagować się”, „częstotliwość $\rightarrow$ częstość”, „w danym poziomie polarytonowym”, „głębokość modu”, „siła sprzężenia”, „obliczoną dystrybucją kwadratu pola elektrycznego”, „można wysymulować ewolucję”, „lampa biała”, „obrazy są spójne ze sobą”, etc.

Wymienione niejasności merytoryczne oraz usterki innego typu nie mają jednak wpływu na moją pozytywną ocenę całej rozprawy, ani też na jej wartość i znaczenie, jako opracowania zawierającego nową wiedzę i oryginalne dane doświadczalne nt. fizyki złożonych układów półprzewodnikowych i zjawisk elektrodynamiki kwantowej w ciele stałym. Dysertacja wnosi istotny wkład do tego obszaru nauki i spełnia wszystkie zarówno zwyczajowe jak i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim, dlatego też wnioskuję o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Gregor Sph