

Dr hab. Michał Matuszewski  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
Al. Lotników 32/46, Warszawa  
[mmatu@ifpan.edu.pl](mailto:mmatu@ifpan.edu.pl)  
tel. 22 116 3482

Warszawa, 26.02.2019

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI  
WPŁYNĘŁO

2019 -02- 28 *W. Bielecki*

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Macieja Ścieśka**  
**"Spektroskopia sprzężonych mikrownęk optycznych z emiterami kwantowymi"**

Rozprawa mgr. Macieja Ścieśka dotyczy badań mikrownęk półprzewodnikowych opartych na materiałach z grupy (Cd,Zn)Te. Przedstawiono metody wytworzenia próbek zawierających mikrownęki optyczne w których może mieć miejsce zjawisko silnego sprzężenia między fotonami w modach mikrownękowych i ekscytonami w studniach kwantowych. W wyniku silnego sprzężenia zaobserwowano polarytony ekscytonowe, czyli kwantowe kwazicząstki będące superpozycją wzbudzeń światła i materii. W niektórych z opisanych doświadczeń zastosowano półprzewodniki półmagnetyczne, które pozwalają na manipulację energią ekscytonów za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego. Uzyskano silne sprzężenie między fotonami w sprzężonych mikrownękach a wzbudzeniami ekscytonowymi, co jest świadectwem silnego sprzężenia ekscytonów i tunelowania między ekscytonami w studniach kwantowych oddalonych od siebie na odległość około dwóch mikrometrów.

Rozprawa liczy 134 strony, jest podzielona na pięć rozdziałów, podsumowanie i dodatki. Pierwszy rozdział to dość krótkie wprowadzenie do tematyki przedstawionej w rozprawie, obejmujące ekscytony, polarytony i półprzewodniki półmagnetyczne. Rozdział drugi zawiera opis projektowania i wytworzenia próbek, w tym wprowadzenie do zastosowanej metody macierzy przejścia. Rozdział trzeci to opis układów eksperymentalnych i wyszczególnienie ich parametrów technicznych. Rozdział czwarty zawiera wyniki badań eksperymentalnych dotyczących sprzężenia między mikrownękami w reżimie słabego sprzężenia. W rozdziale piątym przedstawiono wyniki w reżimie silnego sprzężenia, czyli polarytonowym, dokumentujące silne sprzężenie ekscytonów w sąsiadujących mikrownękach, a także dodatkowe pomiary z krawędzi próbki. Autor nie podaje listy publikacji, ale zawartość rozdziału 4 pokrywa się z grubsza z pracą M. Ściesiek i wsp., „Design and Control of Mode Interaction in Coupled ZnTe Optical Microcavities” Crystal Growth and Design, 2017, 17 (7), 3716–3723. Jest to wysoko punktowane czasopismo z listy filadelfijskiej. Wyniki z rozdziału piątego zapewne będą treścią przyszłej publikacji.

Tematyka związana z polarytonami ekscytonowymi jest w mojej ocenie jednym z najciekawszych i najszybciej rozwijających się nurtów fizyki materii skondensowanej. Należy przy tym podkreślić, że rozwój ten jest w dużej mierze możliwy dzięki postępowi w metodach wytwarzania próbek mikrownękowych o rozmaitych własnościach, dostosowanych do potrzeb właściwego eksperymentu czy koncepcji teoretycznej. Praca mgr. Macieja Ścieśka świetnie wpisuje się w ten kierunek badań. Przedstawiono w niej wyniki badań doświadczalnych w układzie sprzężonych mikrownęk, które pozwalają na uzyskanie silnego sprzężenia między ekscytonami znajdującymi się w oddalonych od siebie mikrownękach. Efekt ten uzyskany jest dzięki mediacji za pomocą modów fotonowych, symetrycznego bądź asymetrycznego, które można uzyskać w mikrownękach odseparowanych od siebie kilkoma warstwami zwierciadeł Bragga.

Przechodząc do bardziej szczegółowej oceny pracy, chciałbym podkreślić staranność prezentacji wyników, która pomaga w zrozumieniu najważniejszych aspektów pracy. Autor bardzo dokładnie opisuje metody którymi posługiwał się w swojej pracy. Dotyczy to zarówno metod teoretycznych, takich metoda macierzy przejścia, jak i technicznych aspektów zastosowanych metod doświadczalnych. Z drugiej strony, pewnym mankamentem jest brak wyczerpującego wprowadzenia teoretycznego do poruszanej tematyki.

*Mat*



Wprowadzenie do fizyki ekscytonów i polarytonów to jedynie 6 stron w 130-stronicowej rozprawie. Jest to zbyt mało, by praca mogła służyć w przyszłości jako materiał pomocny zainteresowanym podstawami teoretycznymi omawianych zjawisk.

Na uznanie zasługuje fakt, że w swojej pracy doktorant musiał opanować bardzo wiele technik doświadczalnych, ponieważ praca obejmuje zarówno produkcję próbek metodą epitaksji, formowanie mikrofilarów, charakteryzację jak i pomiary spektroskopowe. Jeśli do tego dodać jeszcze zadania teoretyczne, takiej jak modelowanie fotonów i ekscytonów w strukturach półprzewodnikowych, jasne jest że doktorant musiał nabyć bardzo szeroki i różnorodny zestaw umiejętności. Pojawia się tutaj pytanie o wkład autora w poszczególne fazy tych badań. Niestety autor nie wyszczególnia ani nie komentuje własnego wkładu w prezentowane prace, a trudno przyjąć że wszystkie prezentowane wyniki są wyłącznie jego autorstwa, uzyskane przy wsparciu promotorów. Nie wskazuje na to również lista autorów opublikowanej pracy. W związku z tym trudno jest tak naprawdę przedstawić w pełni rzetelną ocenę przedstawionej rozprawy. W dalszej części recenzji będę przyjmować że wkład autora był dominujący w każdym aspekcie przedstawionych badań, ale doktorant powinien odnieść się do tej kwestii podczas obrony.

W związku z różnorodnością przedstawionych badań należy wyszczególnić dwa jej podstawowe elementy: opracowanie metody wzrostu i wytwarzanie próbki ze sprzężonymi mikrowękami, w tym wszelkie aspekty technologiczne, oraz badanie spektroskopowe uzyskanych mikrowęk i obserwacja w nich wzbudzeń polarytonowych. Z tych dwóch części jestem w stanie w kompetentny sposób ocenić jedynie drugą, chociaż zdaje sobie sprawę, że uzyskanie sprzężonych mikrowęk w materiałach II-VI jest niewątpliwie dużym osiągnięciem, o czym świadczy publikacja w *Crystal Growth and Design*. W kwestii badań spektroskopowych i obserwacji silnego sprzężenia, prezentowanych w rozdziałach 4 i 5, w mojej ocenie prezentowane wyniki są przekonujące, a opis uzyskanych wyników w pełni adekwatny. Najbardziej przekonujące wyniki zaprezentowane są na rysunku 5.9, pokazującym antyprzecięcie modów w emisji ograniczonej do zerowego pędu w płaszczyźnie próbki. Niemniej należy mieć na uwadze, że podobne węki były badane w przeszłości m.in. w grupie Maurice Skolnicka i współpracowników, i opisane w pracach cytowanych w rozprawie [9,10], zatem istotne jest wyszczególnienie elementów nowatorskich. Do takich należy zastosowanie studni półmagnetycznej w jednej z mikrowęk, co pozwoliło na selektywną zmianę energii ekscytonów, a dzięki temu na przejrzystą ilustrację zmienności dyspersji poszczególnych modów polarytonowych w układzie sprzężonych czterech modów kwantowych. Badania takie niewątpliwie są pouczające i pozwalają lepiej zrozumieć strukturę stanów własnych układu. Interesujące jest także zastosowanie pomiarów referencyjnych przy pobudzaniu i detekcji z krawędzi próbki. Jest to według mojej wiedzy również metoda zupełnie nowatorska.

W mojej ocenie w rozprawie doktorant skupia się na tych dwóch aspektach doświadczalnych, nieco jednak zaniedbując aspekty teoretyczne oraz motywację prowadzonych badań. Dużo uwagi poświęca solidnemu wykonaniu powierzonych mu zadań, które wykonuje i opisuje bardzo dobrze, jednak brak mi nieco w tej pracy odpowiednich podstaw teoretycznych. Niektóre uwagi autora są dość dyskusyjne. Na stronie 72 „widoczne jest, że wraz ze zmniejszaniem średnicy mikrofilarów zarówno energia submodów jak i ich wzajemna odległość energetyczna wzrasta (rysunek 4.13c)”. Doktorant wnioskuje, że „pokazuje to wzrost siły sprzężenia modów na skutek zwiększonego związania fotonu w strukturze”. Jest to wniosek niesłuszny, ponieważ to nie siła sprzężenia, a jedynie energia fotonu wzrasta. W innym miejscu doktorant pisze o stanach „czystych” i „zmieszanych”. Jest to niefortunne nazewnictwo, ponieważ w fizyce kwantowej stany mieszane są dobrze zdefiniowane, a rozważane w tej pracy superpozycje są mimo wszystko stanami czystymi.

Wyszczególniona w pracy motywacja do podjęcia takich a nie innych badań, czyli potencjalne zastosowania lub wpływ prezentowanych na przyszły rozwój dziedziny również nie jest w pełni przekonująca. Autor argumentuje, że przedstawione wyniki pozwalają uzyskać tunelowanie między modami ekscytonowymi oddalonymi o kilka mikrometrów. Jak jednak przyznaje, sprzężenie takie uzyskano już w układach opartych na pojedynczej mikrowęce. Do cytowanych prac dodałbym jeszcze serię prac w których zademonstrowano tunelowanie polarytonów w płaszczyźnie próbki w sieciach mikrofilarów, np. T. Jacqmin i wsp., „Direct Observation of Dirac Cones and a Flatband in a Honeycomb Lattice for Polaritons”, *Physical Review Letters* **112**, 116402 (2014) i inne prace tej grupy, a także grup z Würzburga i Sheffield. Jaką zatem przewagę ma badany układ sprzężonych mikrowęk? Przytoczone przykłady, takie jak chłodzenie laserowe, kondensacja, laserowanie polarytonowe, rozpraszanie parametryczne czy systemy hybrydowe zawierające

Met



dwa różne typy ekscytonów, zostały już zrealizowane, a doktorant nie argumentuje dlaczego rozważana konfiguracja miałaby być lepsza w tych zastosowaniach. Moim zdaniem takie potencjalne zastosowania istnieją, ale aspekt ten nie został należycie przez doktoranta przemyślany i/lub opisany. Na stronie 73 doktorant argumentuje że „w rezultacie wysokiej symetrii mikrofilara i wynikającym z niej niskim stratom na ściankach, zaprezentowany sposób zaprojektowania trójwymiarowej molekuly fotonicznej jest obiecujący dla praktycznych zastosowań wymagających dużej wydajności zbierania sygnału – większej niż w przypadku molekuly sprzężonej poziomo”. W jakim stopniu wydajność zbierania sygnału ma być zależna od symetrii, czy też lepsza niż w przypadku poziomej molekuly? Nie zostało to wyjaśnione.

Ostatnia moja uwaga dotyczy strony 89 i rysunku 5.8. Czy w dopasowaniach zastosowano przybliżenie paraboliczne (4.3)? Dla wektorów rzędu  $4 \text{ 1/um}$  prowadziłyby to do sporych błędów dopasowania, a pozorne antyprzecięcia mogłyby być wynikiem niedokładności występujących dla dużych kątów.

Podsumowując, poziom przedstawionych badań uznaję za wysoki zwłaszcza w aspekcie doświadczalnym. Wyniki przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny układów polarytonowych. Ze względu na dynamiczny rozwój dziedziny, można się spodziewać, że będą miały wpływ na prace badawcze prowadzone w przyszłości. Na uznanie zasługuje bardzo dobra jakość eksperymentów i klarowna prezentacja. Ponadto, autor wykazał bardzo dobrą umiejętność połączenia różnych aspektów wytwarzania próbek i spektroskopii z analizą teoretyczną. Stwierdzam, że rozprawa mgr. Ścieśki spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Matuszewski

Michał Matuszewski