

Warszawa, 10.12.2025

prof. dr hab. Jan Muszalski
Sieć Badawcza Łukasiewicz
-Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Magdaleny Furman
pt. "Study of nonlinear effects in exciton-polariton condensates"
napisanej pod kierunkiem naukowym dr hab. Barbary Piętki, prof. UW
na wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

1. Wstęp

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Magdaleny Furman poświęcona jest szeroko zakrojonym, wielowątkowym, eksperymentalnym badaniom zjawisk optycznych polarytonów w mikrownękach półprzewodnikowych. W rozprawie raportowane są wyniki własne pomiarów eksperymentalnych autorki i ich dyskusja w trzech obszarach: badaniach zjawisk bistabilności optycznej, sprzężenia balistycznego kondensatów polarytonowych, i technologii wywarzania i pomiarów z wykorzystaniem mikrosoczewek polimerowych. Badania autorka przeprowadziła wykorzystując głównie struktury epitaksjalne z półprzewodników półmagnetycznych AII-BVI na bazie CdTe.

Tematyka polarytonów w mikrownękach półprzewodnikowych jest obecnie bardzo aktualna. W szczególności ich optyczne własności nieliniowe budzą obecnie duże zainteresowanie z uwagi na potencjał ich przyszłych wielorakich zastosowań. Nieliniowe własności optyczne są konieczne jeśli myśleć o przyszłych sieciach neuronowych, symulatorach kwantowych i innych. W tym kontekście rozprawa jak najbardziej wpisuje się w nurt współczesnej fizyki, a otrzymane przez mgr Magdalene Furman wyniki przyczyniają się do głębszego zrozumienia fundamentalnych zjawisk fizycznych, które mogą przyczynić się do przyspieszenia kwantowej rewolucji w procesowania danych oczekiwanej w najbliższych latach.

Badania zostały wykonane przez mgr Magdalene Furman w Laboratorium Struktur Plazmonowo-Polarytonowych „Polaryton” Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego samodzielnie w zakresie pomiarów optycznych i we współpracy z naukowcami Wydziału Fizyki UW, którzy osadzili struktury epitaksjalne, wprowadziły w tajniki techniki mikrodruku soczewek, i z Instytutu Fizyki PAN, którzy to z kolei stworzyli model teoretyczny kondensatów polarytonowych. Tak szeroka współpraca zaowocowała nowymi naukowo ważnymi wynikami. Bardzo dobrze świadczy o dojrzałości naukowej autorki rozprawy, potrafi współpracować, nie koncentruje się przesadnie na samodzielnym rozwiązywaniu pomniejszych problemów, a wykorzystuje szanse stwarzane przez jej środowisko naukowe. Za stworzenie sprzyjającej temu atmosfery i dania tej szansy docenić należy też panią promotor omawianej pracy prof. Barbar Piętkę.

2. Omówienie treści pracy.

Rozprawa napisana po angielsku składa się z siedmiu rozdziałów. W pierwszym autorka omawia swoją motywację badawczą podjęcia akurat tej tematyki. Dwa następne poświęca wprowadzeniu w tematykę mikrownęk półprzewodnikowych i ich właściwości (rozdziały 2 i 3). W trzech dalszych (rozdziały 4-6) omawia swoje wyniki eksperymentalne i ich interpretację fizyczną. Rozprawę kończy podsumowanie, dodatki, bibliografia (171 pozycji) i opis dorobku naukowego autorki. W sumie 142 strony. Praca jest bardzo dobrze zredagowana, logicznie podzielona na rozdziały. W każdym rozdziale przedstawiono w pierwszej kolejności zagadnienie fizyczne, później eksperyment i jego interpretację fizyczną. Każdy rozdział rozpoczyna się stroną tytułową z ładnym rysunkiem i informacją o publikacjach naukowych, w których były raportowane wyniki autorki. Wyniki pomiarów są przedstawione na licznych ładnych, klarownych rysunkach dobrze opisanych, ułatwiających lekturę rozprawy.

Dwa wstępne rozdziały są bardzo ciekawe i stanowią bardzo dobre wprowadzenie do tematyki omawianych później zjawisk fizycznych. Autorka przypomina czytelnikowi podstawowe informacje dotyczące ekscytonów w jamach kwantowych, fotonów w mikrownękach półprzewodnikowych i ich sprzężenia zarówno słabego jak i silnego czyli polarytonów w mikrownęce. Omawiane teoretycznie zjawiska silnego sprzężenia i kondensacji Bosego-Einsteina polarytonów zilustrowane są poprzez pomiary własne autorki. Dodatkowo zagadnienia teoretyczne są szczegółowo omówione pod koniec każdego rozdziału poświęconemu kolejnym eksperymentom i ich wynikom. Doskonale „prezentuje to ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie¹” nauk fizycznych. Omówione są tu też szczegółowo wykorzystywane w pracy metody pomiarowe w przestrzeni pędów i rzeczywistej dla precyzyjnego obrazowania badanych zjawisk fizycznych. Tak jak zagadnienia teoretyczne, bardziej szczegółowe opisy układów pomiarowych zostały zamieszczone w odpowiednich rozdziałach.

Trzy kolejne rozdziały prezentują trzy różne zagadnienia badawcze, którymi zajmowała się mgr Magdalena Furman. Zagadnienie optycznej bistabilności optycznej (rozdział 4) zademonstrowane jest z wykorzystaniem specjalnie przygotowanych próbek/membran/struktur epitaksjalnych przeniesionych z rodzimego, nie przezroczystego podłoża (GaAs), na przezroczysty materiał (szafir Al_2O_3). Wykonano to by przeprowadzić badania w modzie transmisyjnym. Umożliwiło to odkrycie dwu nowych typów bistabilnej odpowiedzi optycznej. Zjawiska bistabilności zostały pokazane zarówno w przestrzeni wektora falowego $k_{||}$ jak również w przestrzeni rzeczywistej, czyli pola bliskiego. Teoretyczne wyjaśnienie obserwowanych zjawisk oparte zostało o model zaproponowany przez współpracowników z IF PAN, jako konsekwencje zarówno przejścia z reżimu silnego do słabego sprzężenia pod wpływem efektów cieplnych. Podkreślenia tu wymaga fakt, że dwa różne nowe mody bistabilności optycznej w mikrownękach polarytonowo-ekscytonowych zostały zaprezentowane po raz pierwszy.

Rozdział 4 zawiera też część poświęconą pokazaniu punktów wyjątkowych w przestrzeni odwrotnej. Podrozdział ten jednak dość zdawkowo opisuje zjawisko kwantowej degeneracji stanów i ich wartości własnych występujące w układach niehermitowskich. Polarytony w mikrownęce są takim niehermitowskim układem.

Kolejnym zagadnieniem przebadanym przez mgr Magdalenę Furman jest wykorzystanie pola magnetycznego do kontroli supermodów kondensatów polarytonowych. W rozdziale tym autorka prezentuje bardzo ciekawy eksperyment wzajemnego oddziaływania dwu kondensatów polarytonowych wytworzonych synchronicznie przez dwie pobudzające wiązki lasera impulsowego. Poprzez umieszczenie próbek w silnym polu magnetycznym mogła autorka rozprawy mogła wpływać na przestrzenne oddziaływanie tychże kondensatów, ich supermodu. Pokazała, że może wedle swej

¹ Art. 187.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2018 poz. 1668.

woli zmieniać symetrie supermodu z nieparzystej na parzystą poprzez zwiększanie/zmniejszanie natężenie pola magnetycznego. W eksperymentach tych w pełni pokazała zalety mikrownek półprzewodnikowych opartych o związki półmagnetyczne AII-BVI na bazie CdTe i domieszkowane jonami Mn. Dogłębna analiza fizyczna w oparciu o prace autorstwa Dr. Helgi Sigurdsson kończy ten rozdział.

W ostatnim (szóstym) rozdziale raportującym badania własne autorki rozprawy przedstawione są prace nad wytworzeniem i wykorzystaniem mikrosoczewek dla zwiększenia kąta ekstrakcji fotonów z mikrownęki, a tym samym zwiększenia obszaru pomiarów w przestrzeni odwrotnej tzn. funkcji wektora falowego. Z trzech rozdziałów raportujących prace eksperymentalne autorki rozprawy ten jest najbardziej techniczny, skoncentrowany na rozwinięciu nowej techniki pomiarów. W rozdziale tym, tak jak w poprzednich, klarowna narracja prowadzi czytelnika od pomysłu na zastosowanie mikrosoczewek, poprzez modelowanie metodami optyki geometrycznej, wytwarzanie za pomocą litografii dwufotonowej do pokazania ich własności i przydatności do badań polarytonów w mikrownękach półprzewodnikowych. Ostatecznie po dopracowaniu techniki wytwarzania mikrosoczewek autorka prawie dwukrotnie powiększyła zakres pomiarów w funkcji wektora pędu. Użycie konwencjonalnego podejścia do takich pomiarów wymagało by użycia obiektywu o skrajnie wysokiej aperturze numerycznej $NA=0.95$ co nie jest wykonalne w kriostacie.

Po opanowaniu techniki wytwarzania mikrosoczewek autorka rozprawy wykorzystwała swoją nową zdolność do pomiarów polarytonów w mikrownękach z wykorzystaniem dwuwymiarowych matryc soczewek. Ten doskonały pomysł pozwolił na przestrzenne mapowanie przestrzeni odwrotnej. Jest to niewątpliwie nowa technika charakteryzacji próbek z mikrownękami półprzewodnikowymi z dużym potencjałem na przyszłość.

Jednakże najciekawszym wynikiem badań mgr Magdaleny Furman w rozdziale poświęconym mikrosoczewka są wyniki pomiarów kondensatów polarytonowych w próbkach o dużych fluktuacjach potencjału optycznego. W tym przypadku zastosowanie mikrosoczewek pozwoliło na radykalne, do submikronowych rozmiarów zmniejszenie obszaru pobudzenia i w konsekwencji od kilku do kilkudziesięciu krotnego zmniejszenia energii potrzebnej do wytworzenia kondensatu. Przypuszczalnie tym samym wyizolowanie w pomiarach obszarów wolnych od dyslokacji i innych defektów strukturalnych próbek.

Rozprawę kończą dwa załączniki. W pierwszym opisane są heterostruktury, z których pozyskano próbki wykorzystywane w następnie w eksperymentach. Drugi załącznik, do którego w treści rozprawy nie ma odwołania, zaskakująco jest opisem nowego eksperymentu. Mgr Magdalena Furman zamieściła tu opis ciekawego eksperymentu, w którym generuje trzy kondensaty w niewielkiej odległości od siebie i bada ich wzajemne oddziaływanie poprzez obserwację natężenia sygnału luminescencji każdego z nich, w zależności od energii pobudzenia. Zmieniając miejsca na próbce wykorzystując niejednorodność przestrzenną posiadanego materiału epitaksjalnego zmienia lokalizację przestrzenną poszczególnych kondensatów. W konsekwencji pokazuje, że kondensaty oddziałują wzajemnie i że to oddziaływanie może być nieliniowe.

3. Ogólna opinia o pracy

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską oceniam jako bardzo dobrą. Rozprawa raportuje wyniki badań z wykorzystaniem mikrownęki półprzewodników półmagnetycznych AII-BVI na bazie CdTe. Mikrownek z nieoczywistego układu materiałowego, trudnego w badaniach optycznych, ale jak pokazuje autorka bardzo płodnego naukowo materiału. Pomiaru mgr Magdaleny Furman doprowadziły do wielu nowych ciekawych i naukowo ważnych odkryć. Do najważniejszych należy wskazać:

- odkrycie dwu modów bipstabilności optycznej, których przyczyna jest inna niż dotychczas znany efekt Kerra,

- wykorzystanie pola magnetycznego do sterowania wzajemnego oddziaływania dwu kondensatów polarytonowych i pokazania możliwości wpływania na ich wzajemne interferencje za pomocą zmiany natężenia tegoż pola magnetycznego.
- Opanowanie techniki przygotowania próbek: eksfoliacja membran epitaksjalnych z podłoży epitaksjalnych na płytce szafirowe, projektowanie i wytworzenie mikrosoczewek polimerowych dla zwiększenia zakresu pomiarów w funkcji wektora falowego. Prace te są przedstawione szczegółowo dokumentując nie łatwą drogę dojścia do sukcesów.

Wyniki prac własnych autorki potwierdzają jej biegłe opanowanie technik eksperymentalnych zarówno w dziedzinie optyki jak i technologii przygotowanie próbek do eksperymentu. Pomiary optyczne wymagały zbudowania wyrafinowanych układów optycznych. Takie układy zostały zbudowane każdorazowo do każdego eksperymentu, szczegółowo opisane w odpowiednich rozdziałach i z sukcesem wykorzystane do przeprowadzenia podjętych badań.

Dogłębna analiza wyników pomiarów wykonana we współpracy z innymi członkami zespołu badającymi układy polarytonowe dowodzi głębokiego zrozumienia badanych zjawisk fizycznych. Omawiając rozprawę mgr Magdaleny Furman podkreślić należy bardzo szczegółowe i klarowne rozdzielenie wkładu autorki i jej współpracowników.

Całość pracy i dokonań autorki rozprawy potwierdza jej wysoką dojrzałość naukową.

Wyniki otrzymane podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej zostały już opublikowane w czterech publikacjach, których mgr Magdalena Furman była pierwszą autorką i dziesięciu gdzie była współautorką. Wszystkie czasopisma naukowe, w których zostały opublikowane te prace cieszą się bardzo wysoką renomą i wysokim współczynnikiem wpływu. Ponadto mgr Magdalena Furman uczestniczyła w 12 konferencjach naukowych gdzie pięciokrotnie referowała swoje wyniki i siedmiokrotnie prezentowała plakaty.

4. Uwagi do pracy

Praca mgr Magdaleny Furman oceniam jako bardzo dobrą i trudno wskazać jakieś jej istotne słabości. Jednakże po szczegółowej lekturze nasuwa się kilka pytań:

1. Autorka rozprawy wykorzystywała heterostruktury półprzewodnikowe na bazie związków AlI-BVI. Schematy tych struktur zostały zamieszczona w Apendyksie I. Wielokrotnie w swej rozprawie porusza zagadnienie „jakości” posiadanych próbek. Jednakże, poza wizualizacją potencjału optycznego (rys. 3.5) nie ma prawie żadnej informacji na temat jakie te próbki były, np: charakteryzacji jakości krystalograficznej np. mapy mikrofotoluminescencji, wizualizacji tzw. czarnych linii będących świadectwem obecności dyslokacji niedopasowania, wizualizacji morfologii powierzchni (zdjęcia powierzchni spod mikroskopu z kontrastem Nomarskiego lub AFM). Czy w przyszłości gdy otrzyma inne próbki np. z innego laboratorium to czy przed wyrafinowanymi eksperymentami będzie umiała powiedzieć o ich przydatności? W tekście rozprawy autorka kilkakrotnie odwołuje się do wyników dla mikrownęki AlIII-BV na bazie GaAs jasko tych o doskonalszej jakości, choć wiadomo, że te też są z reguły zrelaksowane. Jakże zatem były/powinny być próbki na bazie CdTe lub GaAs wykorzystywane w raportowanych w rozprawie lub podobnych badaniach ?
2. W rozdziale 4 przedstawiono przestrzenne rozkłady emisji rys. 4.13 - 4.15, które są przestrzennie silnie niejednorodne. Co jest przyczyną tak silnej niejednorodności ? Czy nie są to tzw. „speckle” tzn. zjawiska interferencyjne promieniowania lasera pobudzającego do emisji? A może to konsekwencja jakości krystalograficznej materiału epitaksjalnego ?
3. W rozdziale 4.6 analizowane są wyniki bistabilności optycznej dla próbki z pojedynczą jamą kwantową w mikrownęce półprzewodnikowej. Za przyczynę bistabilności autorka uznaje termiczny dryft modu fotonowego, rys. 4.19. Dlaczego nie jest obserwowany dryft modu

ekscytonowego? Przecież przerwa wzbroniona również zależy od temperatury ? Nie jest dla mnie jasne źródło emisji dla $k_{||}=0$.

4. Projektując programem komputerowym mikrosoczewki wydaje się, że autorka pracy nie dość jasno rozróżnia dwa aspekty: (1) zwiększenie kąta ekstrakcji promieniowanie z struktury półprzewodnikowej o wysokim współczynniku załamania ~ 3 poprzez nałożenie warstwy polimeru o współczynniku załamania zdecydowanie większym od 1 (powietrza), (2) eliptycznego kształtu mikrosoczewki, który formuje wiązkę i pozwala na obrazowanie przestrzeni odwrotnej w płaszczyźnie Fouriera.
5. W rozprawie kilkakrotnie są odniesienia do ewentualnych praktycznych zastosowań układów będących obiektem badań. Czy autorka spodziewa się zastosowań praktycznych obiektów w temperaturze zbliżonej do pokojowej? Czy spodziewa się podobnie ciekawych zjawisk w materiałach o większej energii wiązania ekscytronów np. ZnO ?

5. Wniosek końcowy

Podsumowując całość przedłożonej do recenzji rozprawy uważam, że spełnia/wypełni ona wymagania Art. 187. Punkty: 1-4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2018 poz. 1668 i wnioskuję o dopuszczenie mgr Magdaleny Furman do jej obrony.

