

Warszawa, 5.07.2021

Prof. dr hab. Czesław Skierbiszewski

Instytut Wysokich Ciśnień PAN

ul. Sokołowska 27/37

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Krzysztofa Sawickiego pt.**„Laserowanie z pojedynczych i sprzężonych podwójnych mikrownek polarytonowych wykonanych z tellurków i selenków”**

Praca doktorska mgra Krzysztofa Sawickiego dotyczy badań nad laserowaniem z mikrownek z grupy materiałowej II-VI t.j. heterostruktur CdSe/CdMgSe oraz CdZnTe/CdZnMgTe. W rozprawie doktorskiej badane są właściwości optyczne tych mikrownek w szczególności efekty nieliniowe związane z laserowaniem z pojedynczych i sprzężonych wnek rezonansowych. Szczególny nacisk położony jest na udowodnienie, że jednocześnie dla tej samej struktury makroskopową koherencję układu można otrzymać za pomocą stymulowanego chłodzenia w przypadku laserowania polarytonowego jak również za pomocą stymulowanej emisji w warunkach inwersji obsadzeń dla lasera fotonowego. Różne reżimy kwantowej koherencji uzyskuje się przez pobudzanie układu w warunkach silnego i słabego sprzężenia ekscytonów w studni kwantowej z fotonami we wnęce rezonansowej.

Efekty związane z makroskopową koherencją układów fizycznych są jednymi z najbardziej badanych zjawisk w fizyce skondensowanej materii, fizyce atomowej i fizyce wysokich energii. Jednym z najbardziej powszechnych przykładów makroskopowej koherencji jest laserowanie powodowane emisją wymuszoną w układzie fotonów. Kondensacja Bosego-Einsteina (BEC) jest kolejnym przykładem kolektywnej koherencji wielu cząstek, w którym powyżej pewnej gęstości krytycznej (lub równoważnie poniżej temperatury krytycznej) cząstki spontanicznie zajmują stan podstawowy. Można tutaj podać dwa przykłady (i) nadciekłego helu 4 który jest najwcześniejszą realizacją BEC, w obecności silnych oddziaływań oraz (ii) nadprzewodnictwo, postrzegane jako kondensacja par Coopera, umożliwiające bezoporowy przepływ prądu. Wspólnym aspektem tych zjawisk jest to, że wszystkie cząstki w układzie początkowo nie wykazujące żadnej zależności fazowej, zajmują ten sam stan kwantowy (stają się spójne), gdy parametr systemu, taki jak temperatura lub gęstość, przekroczy pewien próg. Dodać należy, że badania nad BEC w różnych układach ostatnio bardzo dynamicznie się rozwijają – zważywszy na fakt, że pierwszy kondensat BEC został otrzymany eksperymentalnie dopiero w 1995 roku (pomimo faktu, że teoria tego zjawiska opisana została w latach 20 XXw).

Badania nad wnękami rezonansowymi pokazały że możliwy jest nowy typ układu wykazującego spontaniczną koherencję – kondensat ekscytonowo-polarytonowy. Polarytony to bozonowe quasicząstki, które istnieją w mikrownękach półprzewodnikowych, składających się z superpozycji ekscytonu i fotonu wnękowego. Powyżej progowej gęstości polarytony makroskopowo zajmują ten sam stan kwantowy, tworząc kondensat. Czas życia polarytonów, jest zwykle porównywalny lub krótszy niż czasy termalizacji, nadając im z natury nierównowagowy charakter. Niemniej jednak wykazują wiele cech czego można by się spodziewać po równowagowych kondensatach Bosego-Einsteina. Nierównowagowy charakter systemu podnosi fundamentalne pytania, co to znaczy, że system jest kondensatem bozonowym, i wprowadza nową fizykę, wykraczającą poza tę obserwowaną w innych makroskopowo spójnych systemach. Istnieje szereg cech fizycznych wykazywanych przez kondensaty ekscytonowo-polarytonowe. W szczególności pozostaje pytanie jaka jest różnica między laserowaniem z ekscytonowo-polarytonowego kondensatu BEC, laserem polarytonowym i laserem fotonowym. W tym kontekście ciekawe do dalszych badań w ekscytonowo-polarytonowym kondensacie są takie zjawiska fizyczne, takie jak nadciekłość, tworzenie wirów.

Mgr Krzysztof Sawicki w swojej pracy doktorskiej koncentruje się na badaniu dynamiki polarytonów w mikrownękach rezonansowych w materiałach II-VI. Szczególny nacisk został położony na pokazanie różnic pomiędzy laserem polarytonowym a laserem fotonowym. Wyjaśnienie obserwowanych zjawisk laserowania polarytonowego bazuje na opisie nierównowagowego kondensatu polarytonowo-ekscytonowego. Istotnym elementem w pracy doktoranta było zastosowanie istniejącej wiedzy teoretycznej do kompleksowego wyjaśnienia zjawisk obserwowanych eksperymentalnie.

Praca doktorska mgr Krzysztof Sawickiego składa się z 151 stron i podzielona jest na wprowadzenie, 6 rozdziałów i bibliografię. Główne wyniki zamieszczone w pracy zostały opublikowane w czterech publikacjach o wysokim współczynniku cytowań. W trzech z nich doktorant jest pierwszym autorem.

We wprowadzeniu Autor opisuje motywacje prowadzenia badań, podkreślając rolę selenków i tellurków z grupy II-VI które charakteryzują się dużą siłą oscylatora w stosunku do badanych materiałów III-V co prowadzi do wyższej siły oddziaływania pomiędzy fotonowym modem wnękowym i ekscytonem w studni. W konsekwencji budzi to nadzieję na zbudowanie systemów z kondensatami BEC pracujących w wyższych temperaturach i na praktyczne zastosowania dla bramek kubitowych.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do efektów fizycznych obserwowanych w mikrownękach – m.in. do mechanizmu tworzenia polarytonów ekscytonowych (PE). Usystematyzowana jest także wiedza na temat laserowania z mikrownęk półprzewodnikowych.

Rozdział 2 zawiera metody wytworzenia struktur epitaksjalnych z elementami processingu – formowanie geometryczne mikrownęk metodą trawienia skupioną wiązką jonów (FIB – focused ion beam) w celu otrzymania odpowiednich falowodów dla światła.

Podkreślić należy fakt, że struktury do badań zostały wytworzone w laboratorium MBE na Wydziale Fizyki UW.

W Rozdziale 3 omówiono metody badawcze stosowane w pomiarach optycznych, natomiast główne wyniki badań nad mikrownkami zamieszczone są w Rozdziałach 4 i 5.

W Rozdziale 4 Autor koncentruje się na opisie efektów laserowania z pojedynczej mikrownki dla pojedynczej studni kwantowej. Najciekawszy wynik dotyczy pokazania trzech reżimów laserowania zależnych od mocy pobudzania w niskiej temperaturze (8K): (1) laserowania z kondensatu PE, (2) laserowania fotonowego z ekscytonów oraz (3) laserowania fotonowego z plazmy elektronowo-dziurowej (Rys 4.3.2). Ciekawym wynikiem jest też pokazanie laserowania z plazmy elektronowo-dziurowej otrzymane w temperaturze pokojowej. Ponieważ prezentowane wyniki uzyskano na planarnych próbkach, bez strukturyzacji w kierunku lateralnym w celu wytworzenia mikro-słupków, Autor dużą część rozdziału 4 poświęca na dyskusję wpływu strukturalnych defektów na lateralną lokalizację ekscytonów i wpływu tych pułapek na własności emisji światła. Niezależnie od tej analizy, Autor wykonał eksperymenty na mikro-słupkach intencjonalnie trawionych poprzez FIB. Wynika z niej, że średnica pułapki fotonicznej w planarnych strukturach wynosi około 3-5 mikronów.

W Rozdziale 5 przedstawiono badania efektów nieliniowych w układzie dwóch sprzężonych mikrownek, którego mody oddziałują z dwoma grupami studni kwantowych. Zaobserwowane krzywe czasowe zaniku kondensatu - wykazujące charakter oscylacyjny - przypisywany jest oddziaływaniu kondensatu z rezerwuarem ekscytonów. Ponadto, w badanym systemie dzięki czteropoziomowej zależności dyspersyjnej, obecność kondensatu wymusza zdegenerowane w energii rozpraszanie parametryczne polarytonów. Otrzymane wyniki dają wgląd w dynamikę polarytonów w systemach wielopoziomowych

Rozdział 6 zawiera podsumowanie i perspektywy na przyszłość.

Całość pracy jest napisana bardzo przejrzystie, część wprowadzająca (Rozdział 1) jest wystarczająco klarownie opisana do pełnego zrozumienia wyników zawartych w Rozprawie. Prezentowane wyniki eksperymentalne są dobrze udokumentowane i opisane teoretycznie.

Poniżej zamieszczam listę pytań, które nasuwają się po przeczytaniu Rozprawy:

1. Dlaczego nie obserwujemy zmniejszenia szerokości połówkowej linii dla laserowania polarytonowego (Rys 4.3.2). Jak należy wytłumaczyć ten wynik?
2. Najbardziej eleganckim dowodem na laserowanie polarytonowe (które odbywa się w warunkach silnego sprzężenia, jest odstrojenie się poprzez zmianę miejsca na próbce (wnęka rezonansowa ma kształt klina) i pokazanie, że dla odstrojonego układu w ogóle nie mamy laserowania polarytonowego – a jedynie fotonowe w warunkach inwersji obsadzeń. Czy takie próby zostały podjęte?
3. Następną wątpliwość dotyczącą prezentowanych wyników, budzi przypadkowość znajdowania na próbce obszarów dla których Autor prowadzi badania laserowania. W pracy opisywane są one jako miejsca występowania tzw 'pułapek

fotonicznych". W miejscach tych obserwowano lokalne zwiększenie dobroci wnęki rezonansowej (zawężenie linii luminescencji) które tłumaczone jest poprzez obecność defektów strukturalnych. Czy podjęto próbę badań strukturalnych tych obszarów? Naturalne wydaje się zastosowanie techniki FIB do wytworzenia intencjonalnego nanokolumn w różnych miejscach na próbce, gdzie znajdują się obszary o silnym lub słabym sprzężeniu (parametryzowane przez szerokość wnęki rezonansowej – tak jak na Rys 1.2.2). Pozwoliłoby to na wytworzenie struktur zawierających wnęki rezonansowe w których powtarzalnie można badać układy silnie lub słabo sprzężone. Czy podjęto taką próbę dla systemu z pojedynczą studnią kwantową?

4. Czy dla mikrokolumn wytworzonych metodą FIB (dla wielostudni w pojedynczej wnęcie rezonansowej – rozdział 4.7) wyniki prezentowane na rysunku 4.7.1 są dla układu w warunkach silnego sprzężenia? Jeśli tak, to czy dla wyższych mocy pobudzania obserwowano laserowanie fotonowe?
5. Czy laserowanie z kondensatu BEC nie może być interpretowane jako standardowe laserowanie, gdzie ekscytony pełnią rolę ośrodka wzmacniającego? Takie wytłumaczenie znaleźć można w pracy M. Kira et al. "Quantum theory of nonlinear semiconductor microcavity luminescence explaining "Boser" experiments". Phys. Rev. Lett. 79, 5170 (1997). Od początku badań nad kondensatami PE we wnękach rezonansowych istotna dyskusja dotyczy pytania czy mówienie o laserowaniu z kondensatu Bosego-Einsteina nie jest zbyt dużym skrótem myślowym. Jak sam autor stwierdza, kondensat PE obserwowany w mikrownękach nie znajduje się w warunkach równowagi termodynamicznej i do jego opisu należy stosować formalizm opisujący nierównowagowy kondensat - odpowiednio zmodyfikowane równanie Grosa-Pitajewskiego. Dla pełnej ścisłości opisu własności optycznych z badanych mikrownęk należałoby mówić o nieliniowej emisji światła w czterech przypadkach: (1) laserowaniu z kondensatu BEC, (2) laserowania polarytonowym (kondensat polarytonowo-ekscytonowy w warunkach nierównowagowych) oraz (3,4) laserowaniu fotonowym (tutaj z rozbiem na laserowanie ekscytonowe i z plazmy elektronowo-dziurowej). Idealny kondensat BEC jest w stanie podstawowym poniżej progu, natomiast powyżej progu opisywany jest rozkładem Bosego. Te dwa warunki nie są spełnione w przypadku lasera polarytonowego którego „kondensat” polarytonowo-ekscytonowy ciągle musi być zasilany generowanymi ekscytonami.

Załączona bibliografia liczy 160 pozycji i świadczy o głębokiej znajomości literatury przez Autora.

Najważniejsze osiągnięcia mgra Krzysztofa Sawickiego w ramach rozprawy doktorskiej można podsumować następująco:

1. Pokazano laserowanie polarytonowe i fotonowe dla tej samej wnęki rezonansowej w zależności od gęstości mocy pobudzającej.

2. Pokazano, że w warunkach laserowania polarytonowego możliwe jest parametryczne rozpraszanie polarytonów zdegenerowane w energii (dla pobudzania nierezonansowego). Wykonano szczegółową analizę (eksperymentalną i teoretyczną) kinetyk polarytonów w czteropoziomowym układzie dwóch sprzężonych wnęk rezonansowych.

Podsumowując, praca doktorska mgra Krzysztofa Sawickiego pt. „Laserowanie z pojedynczych i sprzężonych podwójnych mikrownęk polarytonowych wykonanych z tellurków i selenków” zawiera szereg wartościowych wyników na temat laserowania polarytonowego i fotonowego z pojedynczej oraz ze sprzężonych wnęk rezonansowych. Praca dotyczy fundamentalnych badań nad zrozumieniem własności i formowania się kondensatów bozonowych w warunkach nierównowagi termodynamicznej we wnękach rezonansowych. Badanie dynamiki polarytonów w sprzężonych układach jest szczególnie interesujące dla praktycznych zastosowań w układach realizujących operacje logiczne.

Bardzo wysoko oceniam wkład eksperymentalny i umiejętność teoretycznego opisu obserwowanych efektów przez mgra Krzysztofa Sawickiego oraz fakt, że struktury do badań wytworzone były na Wydziale Fizyki UW.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Sawickiego spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”. Wnoszę o skierowanie tej rozprawy do publicznej obrony. Ponadto biorąc pod uwagę charakter pracy – poszukiwania fundamentalnych praw fizyki, olbrzymie zainteresowanie w świecie rezultatami tego typu badań wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej mgra Krzysztofa Sawickiego.

Czesław Skierbiszewski

