

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 3224

Warszawa, 11.08.2017

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Macieja Pieczarki  
"Badania kondensatów polarytonów ekscytonowych  
w półprzewodnikowych mikrownękach optycznych z wbudowanym nieporządkiem"**

Polarytony ekscytonowe są kwantowymi kwazicząstkami złożonymi z fotonów i ekscytonów, generowanymi w specjalnie zaprojektowanych półprzewodnikowych strukturach mikrownękowych. Szczególne własności polarytonów związane są z ich ultraniską masą, silnymi oddziaływaniami i bozonową naturą. Uzyskanie kondensacji Bosego-Einsteina polarytonów w temperaturach rzędu kilku do kilkuset kelwinów sprawiło, że stały się one przedmiotem zainteresowania szerokiego grona fizyków. Badania układów polarytonowych stanowią obecnie jeden z najciekawszych i najszybciej rozwijających się nurtów fizyki materii skondensowanej. Praca mgr. Macieja Pieczarki świetnie wpisuje się w ten kierunek badań. Przedstawiono w niej wyniki badań doświadczalnych dotyczących podstawowych własności kondensatów polarytonowych, takich jak spektrum wzbudzeń elementarnych i dynamiki w przestrzeni rzeczywistej, w przypadku próbki z relatywnie dużym wbudowanym potencjałem nieporządku.

Rozprawa liczy 117 stron, jest podzielona na pięć rozdziałów, podsumowanie i dodatki. Pierwsze trzy rozdziały to obszernie i wyczerpujące wprowadzenie do istotnych z punktu widzenia rozprawy zagadnień takich jak ekscytony, mikrownęki optyczne, kondensacja Bosego-Einsteina oraz spektra wzbudzeń elementarnych. Część wstępna zawiera informacje ściśle związane z rozprawą i stanowi bardzo dobre źródło podstawowej wiedzy dla osób które chciałyby rozpocząć pracę w tej dziedzinie. Rozdział czwarty zawiera omówienie układu doświadczalnego i szczegółów wykonywanych pomiarów. W rozdziale tym przedstawiono także własności użytej w eksperymentach próbki.

Rozdział piąty zawiera właściwe wyniki, które zostały podzielone na dwie części. W podrozdziale 5.1 omówiono wyniki opublikowane w czasopiśmie Physical Review Letters w pracy pt. „Ghost Branch Photoluminescence From a Polariton Fluid Under Nonresonant Excitation”. Dotyczą one obserwacji tzw. „gałęzi-widma” wzbudzeń elementarnych, które istnieje w nadciekłych kondensatach Bosego-Einsteina i jest scharakteryzowane energią wzbudzeń niższą od potencjału chemicznego kondensatu. Istnienie takiego widma zostało przewidziane teoretycznie i zaobserwowane eksperymentalnie w przypadku kondensatów

pobudzanych rezonansowym laserem, jednakże nie zostało zarejestrowane w przypadku pobudzania nierezonansowego. Jest to kwestia o tyle istotna, że w kondensacie pobudzonym nierezonansowo możemy mówić o spontanicznym łamaniu symetrii i nierównowagowym przejściu fazowym. Pomimo że w poprzednich eksperymentach dopasowano widmo wzbudzeń do liniowego spektrum typu Bogoliubowa, świadczącym o nadciekłości, autor słusznie zauważa w rozprawie, że efekt ten może być artefaktem pochodzącym od uśredniania po czasie emisji z kondensatu w przypadku impulsowego pobudzania nierezonansowego. Zatem obserwacja spektrum Bogoliubowa, w tym nieodłącznej gałęzi-widma pozostawała jak dotąd kwestią nie do końca wyjaśnioną.

Autor rozprawy wypełnia tę lukę, wykonując eksperymenty w próbce z dużą amplitudą wbudowanego potencjału nieporządku. Zastosowano interesującą metodę pomiaru wzbudzeń. Istnienie nieporządku powoduje, że kondensat ulega rozproszeniu na defektach próbki, co jednak przy odpowiednio dużej mocy pobudzania nie powoduje uwięzienia w pojedynczej studni potencjału. Przy dużej mocy, mniejszej jednak od progu laserowania czysto fotonowego, kondensat po rozproszeniu interferuje i oddziałuje poprzez zderzenia. Ze względu na to, że stała oddziaływania zależy w istotny sposób od spinu składnika ekscytonowego, polaryzacja cząstek, która jest liniowa w kondensacie, ulega odwróceniu po rozproszeniu. Pozwala to wyróżnić wzbudzenia które powstały w wyniku oddziaływań, ponieważ charakteryzują się one polaryzacją ortogonalną do polaryzacji kondensatu. Spektrum energetyczne wykazuje istnienie dwóch gałęzi, przy czym gałąź o energiach niższych od kondensatu jest spolaryzowana ortogonalnie. Dodatkowo, autor pokazuje za pomocą czasowo rozdzielonej spektroskopii, iż gałąź niższa występuje przy dużych gęstościach kondensatu, co potwierdza że jest ona nieodłącznie związana z oddziaływaniami. Wskazuje to, że odpowiada ona w istocie przewidzianej teoretycznie gałęzi-widmu, choć postać jej pozostaje nieco zniekształcona ze względu na istniejący nieporządek i anizotropię kondensatu. Wyniki te można uznać za bardzo istotny krok potwierdzający poprawność stosowanych powszechnie teorii fundamentalnych własności kondensatu.

W podrozdziale 5.2 autor omawia wyniki zawarte w artykule „Relaxation Oscillations and Ultrafast Emission Pulses in a Disordered Expanding Polariton Condensate” opublikowanym w czasopiśmie Scientific Reports. Analizowana jest tym razem dynamika emisji z kondensatu utworzonego w potencjale nieporządku w przestrzeni rzeczywistej, na skali czasu rzędu stu pikosekund. W zależności od mocy impulsu pobudzającego, obserwowana jest kondensacja w pojedynczej studni potencjału lub rozprzestrzenianie się kondensatu przy jednoczesnych oscylacjach w czasie. Tempo ewolucji zależy także od mocy pompowania, przy czym większa moc odpowiada szybszym zmianom. Wyniki doświadczalne zostały w bardzo dobrym przybliżeniu odtworzone numerycznie przy użyciu modelu w którym uwzględniono trzy komponenty: kondensat polarytonów, gęstość rezerwuaru i gęstość par elektron-dziura, kreowanych laserem pompującym. Parametry modelu zostały, tam gdzie to możliwe, wyznaczone eksperymentalnie lub wyznaczone za pomocą numerycznego modelowania własności ekscytonów, a w pozostałych przypadkach oszacowane na podstawie danych literaturowych. Wyniki uzyskane w tym rozdziale są w zgodzie ze zjawiskami opisanymi w literaturze jako oscylacje relaksacyjne, zachodzące w wyniku oddziaływania kondensatu z wieloma



stopniami swobody rezerwuaru. W istocie, obliczenia teoretyczne potwierdziły istnienie oscylacji także w przypadku bez uwzględnienia potencjału nieporządku.

Powyższe rezultaty stanowią istotny wkład w rozwój badań nad kondensatami ekscytonowo-polarytonowymi i w mojej ocenie z nawiązką spełniają ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Przejdę teraz do uwag bardziej szczegółowych. W niektórych miejscach formuły użyte przez autora nie są zgodne z układem jednostek SI, co prawdopodobnie jest spowodowane użyciem jednostek cgs, w szczególności we wzorach (2.9) i (2.28). W niektórych miejscach mamy niefortunne tłumaczenia angielskich wyrażeń jak np. „narost” zamiast „wzrost”, „koherentność” zamiast „koherencji”, czy „nieprzecinanie” zamiast „antyprzecięcia”.

Na rysunku 5.1.1 b) przedstawiono spektrum fotoluminescencji stanu skondensowanego w zależności od mocy pompowania. Na wykresie tym widoczne jest przesunięcie energii emisji powyżej energii mikrownęki (CM) dla mocy pompowania powyżej 2-3 mocy progowych  $P_{th}$ . Zjawiska tego nie można uzasadnić emisją z modu dolnych polarytonów, ponieważ, jak wynika ze wzorów (2.32), energia dolnej gałęzi jest zawsze niższa od energii modu fotonowego. Ponadto, dla wyższych mocy widoczne jest laserowanie współistniejące na dwóch długościach fal, powyżej i poniżej CM. Sugeruje to, że w przypadku wyższej linii mamy do czynienia z laserowaniem na stanie górnego polarytonu lub innym stanie wzbudzonym.

W rozdziale 5.1.1 poświęcono nieco uwagi kwestii możliwego przejścia do laserowania fotonowego, dotyczy to jednak względnie niskiej mocy pompowania  $1.4 P_{th}$ , uwidocznionej na rys. 5.1.2 c). Natomiast w przypadku  $P=100 P_{th}$  krzywizna dyspersji głównej gałęzi jaka i energia emisji na rys. 5.1.3 g) odpowiadają z grubsza modowi fotonowemu z rysunków 5.1.1 b) i 5.1.2 c). Ponadto, na str. 73 autor stwierdza że przy  $P=90 P_{th}$  występuje już wkład emisji z laserowania fotonowego. W tym kontekście brakuje dyskusji, czy dla dużych mocy pompowania emisja z górnej gałęzi pochodzi w przeważającej części od kondensatu, czy też w dużej mierze również ze współistniejących obszarów gdzie utracono warunek silnego sprzężenia. Dyskusja taka pojawia się dopiero w sekcji dotyczącej czasowo rozdzielonych widm emisji.

Na stronie 81 autor pisze, że wektor polaryzacji kondensatu jest losowy w każdej realizacji w ciągu impulsów, jest to mocne stwierdzenie które nie zostało jednak uzasadnione. Na stronie 83 podano wzory na dyspersję wzbudzeń spolaryzowanych zaczerpnięty z pracy [148], jednak nie podkreślono, że formuły te są poprawne jedynie w granicy małych wektorów falowych. Na stronie 98 autor powołuje się na pracę [91] w której zapostulowano, że w przypadku gdy czasu życia cząstek w rezerwuarze jest dużo dłuższy od czasu życia polarytonów w kondensacie, w modelu z pojedynczym rezerwuarem występuje zjawisko oscylacji pomiędzy rezerwuarem a kondensatem. Późniejsze prace numeryczne nie potwierdziły jednak tego scenariusza, wykazując że tym przypadku mamy w istocie do czynienia z eksponencjalnie narastającą dynamiczną niestabilnością układu. Z tego względu modele wykazujące oscylacyjny charakter, w tym model zastosowany przez autora, a także w pracy [157], wymagają uwzględnienia więcej niż jednego modu

rezerwuaru.

Podsumowując, wyniki przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny kondensatów polarytonowych, demonstrując eksperymentalnie istnienie gałęzi-widma w spektrum wzbudzeń kondensatu pompowanego nierezonansowo. Poprzednie prace nie wykazały istnienia tej gałęzi, co jednak związane jest prawdopodobnie z niepoprawną interpretacją wyników uzyskanych w przypadku pompowania impulsowego, uśrednionych w czasie. Praca autora stanowi potwierdzenie jednej z najbardziej fundamentalnych własności nierównowagowych kondensatów polarytonowych. Ze względu na dynamiczny rozwój dziedziny, można się spodziewać, że wyniki autora będą miały bardzo duży wpływ na prace badawcze prowadzone w przyszłości. Na uznanie zasługuje świetne przygotowanie eksperymentów, przejrzystość uzyskanych danych i jasność zaproponowanej interpretacji. Ponadto, autor wykazał doskonałą umiejętność połączenia doświadczenia z analizą teoretyczną, zwłaszcza w części pracy dotyczącej oscylacji relaksacyjnych. W swoich badaniach wykazał się dużą pomysłowością, samodzielnością i dojrzałością naukową. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa mgr. Pieczarki spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ze względu na wysoki poziom naukowy, stawiam również wniosek o wyróżnienie tej pracy.



Michał Matuszewski