



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

Dr hab. Jacek Szczytko

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Pieczarki pt.  
*Badania kondensatów polarytonów ekscytonowych w półprzewodnikowych  
mikrownękach optycznych z wbudowanym nieporządkiem***

Recenzowana praca doktorska pana mgra inż. Macieja Pieczarki dotyczy badań spektroskopowych kondensatów polarytonów ekscytonowych w planarnych mikrownękach półprzewodnikowych zawierających 8 studni kwantowych  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  z dużą zawartością indu ( $x=28\%$ ). Praca została wykonana w Laboratorium Optycznej Spektroskopii Nanostruktur w Katedrze Fizyki Doświadczalnej Politechniki Wrocławskiej, pod kierunkiem dr hab. inż. Grzegorza Sęka prof. nadzw., promotora rozprawy. Badana struktura została wytworzona metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) w Technische Physik, Physikalisches Institut and Wilhelm Conrad Röntgen-Research Center for Complex Material Systems na Uniwersytecie w Würzburgu przez dr Fabiana Langerę.

Polarytony ekscytonowe są kwazicząstkami powstałymi na skutek silnego sprzężenia dwóch pól bozonowych: fotonu zlokalizowanego w mikrownęce optycznej oraz wzbudzenia ekscytonowego, najczęściej w studni kwantowej. Gdy stała sprzężenia jest większa niż jego dekoherencja, wtedy w opisie układu pojawiają się nowe stany własne – kwazicząstki – będące kombinacją liniową fotonu i ekscytonu: tzw. górny i dolny polaryton. Ich energie zmieniają się w zależności od wektora falowego. Badając fotony emitowane pod różnymi kątami z próbki można uzyskać informację na temat relacji dyspersyjnych dolnego i górnego polarytonu. Badana próbka miała różną grubość, dzięki czemu zmieniając położenie plamki pobudzającej można było zmieniać tzw. odstrojenie, czyli różnicę energii pomiędzy modem fotonowym wnęki a energią ekscytonu w studni kwantowej. Ta różnica, poprzez tzw. współczynniki Hopfielda, decyduje o charakterze polarytonu w przestrzeni wektora falowego. Zainteresowanie polarytonami ekscytonowym związane jest z uzyskaniem kondensatu Bosego-Einsteina. Autor rozprawy zajął się właściwościami takiego kondensatu w mikrownęce zawierającej osiem studni kwantowych  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  z dużą zawartością indu ( $x=28\%$ ). Z jednej strony duża zawartość In w studni kwantowej  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sprawia, że studnia jest głębsza, co ułatwia wiązanie ekscytonów, ale jednocześnie duży skład In wprowadza nieporządek wynikający z naprężenia struktur i fluktuacji składu indu. Współczesne badania kondensatów polarytonowych na strukturach III-V AlAs/InAs/GaAs koncentrują się głównie na próbkach

bardzo wysokiej jakości, w których rola nieporządku jest minimalizowana. Autor pracy doktorskiej poszedł zupełnie inną drogą. Wykorzystał słabą jakość próbki do zbadania w jaki sposób kondensat polarytonów ekscytonowych zareaguje na obecność nieporządku. W szczególności w mojej opinii najbardziej wartościową częścią rozprawy mgra inż. Macieja Pieczarki jest obserwacja i analiza wzbudzeń nadciekłego kondensatu polarytonowego. Bezpośredni pomiar luminescencji kondensatu z tzw. gałęzi wirtualnej (tzw. *ghost branch*) oraz liniowej relacji dyspersyjnej wzbudzeń Bogolubowa został opublikowany w pracy w *Phys. Rev. Lett.* 115, 186401 (2015), której pierwszym autorem jest mgr. Pieczarka. Drugim ważnym i przyznam, że zaskakującym wynikiem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest wyjaśnienie pulsacyjnego charakteru luminescencji kondensatu polarytonowego w pewnych zakresach mocy pobudzania. Dzięki symulacjom numerycznym wykorzystującym równania kinetyczne, model Grossa-Pitajewskiego i obliczenia dynamiki na dyskretnej siatce przestrzennej i czasowej Autor wyjaśnił obserwowaną przez niego ewolucję czasową emisji kondensatu. Oscylacyjna relaksacja z rezerwuaru ekscytonów do kondensatu Bosego Einsteina nie jest spowodowana przez obecność defektów, ale jest właściwością samego rezerwuaru ekscytonów w studni kwantowej. Praca opisująca te wyniki ukazała się niedawno w *Scientific Reports* (2 sierpnia 2017 r.) i także w niej pierwszym autorem był mgr. Pieczarka.

Praca mgra Macieja Pieczarki jest starannie zredagowana. Składa się z 6 rozdziałów i liczy 92 strony bez spisu treści, bez załączonej bibliografii (zawierającej 166 pozycji) i bez dodatków. Pierwsze 4 rozdziały poświęcone są wprowadzeniu czytelnika Rozprawy z badane zagadnienie – omówione zostały poszczególne części składowe próbki, dzięki którym możliwe jest zaobserwowanie kondensatu polarytonów ekscytonowych, podano zwięzły opis teoretyczny badanych zjawisk oraz stosowane metody doświadczalne. Praca zawiera także solidny przegląd literatury tematu badań. Widać, że Autor doskonale orientuje się w swojej dziedzinie i swobodnie porusza się po bogatym dorobku teoretycznym i doświadczalnym wypracowanym ostatnich dwóch dekadach. W Rozdziale 4. pojawia się charakteryzacja optyczna badanej struktury. Rozdział 5. stanowi zasadniczą część Rozprawy. Rozdział 6. to dwustronicowe podsumowanie.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera kilka błędów edytorskich, które powinny zostać wychwycone na końcowym etapie, przed złożeniem pracy do obrony. Zawiodła redakcja prawidłowych odniesień do literatury, np. w kilkunastu publikacjach *American Physical Society* (*Phys. Review*) i *Applied Physics Letters* zero na początku numeru strony jest znaczące (pomijam oczywiste błędy jak np. brak nazwy czasopisma w ref. 63, czy brak numeru strony w ref. 124). Można w Rozprawie znaleźć powtórzenia (np. „polarytony akumulują w obszarze tzw. obszarze wąskiego gardła...” (str. 40), „[...] wybrano strukturę [...] o wysokim poziomie zdefektowania spowodowanym zastosowaniem wysoce naprężonych studni kwantowych *InGaAs/GaAs* o wysokiej zawartości *InAs*...” (str. 8)), anglicyzmy (np. „pierwsze *demonstracje* tworzenia się kondensatu polarytonów ekscytonowych zostały zaprezentowane...” (str. 7), „taka idea została wielokrotnie *zaimplementowana* od początku

badań nad polarytonami...” (str. 38), „częściowa *saturation* siły oscylatora” (str. 73), itp.). Wyłapałem dwa błędy ortograficzne („ztermalizowany”, (str. 7), „z goła inna sytuacja...” (str. 74 i 79)), kilka gramatycznych i stylistycznych („istnienie się prądów stałych” (str. 47), „pozwała to na umieszczenie [...] elementów optycznych w osi, które nie zaburzają jakości [...] obrazu” (str. 56)) lub użycie żargonu („V to dwuciałowy potencjał oddziaływania między kwantami” (str. 37)). W pracy znajduje się odniesienie do „Rys. 5.1.9 d, e, f i g” ale nie ma panelu „g”, zamienione są oznaczenia promienia bohrowskiego i energii wiązania na str. 96 („ $a_B = 8.6 \text{ meV}$  oraz  $E_B = 11.6 \text{ nm}^{-1}$ ”). W języku polskim przyjęto się stosować notację ułamków dziesiętnych po przecinku, a nie po kropce. Pozwalam sobie na te krytyczne uwagi tylko dlatego, że obrona doktoratu jest chyba ostatnim momentem, w którym można (i trzeba) zwrócić uwagę młodemu badaczowi, że stawiając kroki na samodzielnej ścieżce kariery naukowej od teraz będzie brał odpowiedzialność za to, w jaki sposób ta wiedza będzie dalej przekazywana polskiemu społeczeństwu – np. kolejnym studentom. Dbałość o polską nomenklaturę naukową i kulturę języka spoczywać będzie na pokoleniu Doktoranta, więc mam nadzieję, że te kilka krytycznych i życzliwych uwag mgr Pieczarka weźmie sobie do serca. Tym bardziej, że te mimo wszystko błahie i drobne niedociągnięcia psują ogólnie bardzo dobre wrażenie jakie zrobiła na mnie przedłożona rozprawa doktorska.

Pomimo powyższych uwag uważam pracę za bardzo wartościową, a uzyskane wyniki za ważne dla badań polarytonów ekscytonowych. Istotność rozprawy doktorskiej mgra Macieja Pieczarki potwierdzają bardzo dobre publikacje naukowe w recenzowanych czasopismach.

Chciałbym skorzystać z możliwości zadania pytań Doktorantowi podczas obrony rozprawy doktorskiej. Wydaje mi się, że w rozprawie dość powierzchownie potraktowano dyskusję trzech kwestii:

1. Próbkę miała zmienną grubość – ale nie znalazłem oszacowania zmiany tej grubości w przestrzeni. Rys. 4.2.2 i 4.2.3 podaje pozycję na próbce w jednostkach umownych, więc trudno sobie wyrobić opinię na temat skali (np. jednostki we wzorze 4.2 są podane w eV/pozycję). Chodzi o mikrony, milimetry, czy centymetry? Czy kierunek dyfuzji polarytonów z rys. 5.1.3 ma jakikolwiek związek z klinowym kształtem struktury?
2. W badanych zjawiskach obecność nieporządku jest kluczowym czynnikiem decydującym o zachowaniu się kondensatu Bosego Einsteina. Charakterystyka próbki na rysunku 4.2.5 i interferencje kondensatu 5.1.2h ukazują niemal kartezjańską siatkę defektów wyjaśnioną przez autora jako obecność tzw. *cross-hatched defects*, których wpływ na polarytony był wcześniej opisywany w literaturze (np. publikacje Joanny Zajęc i Wolfganga Langbeina z 2012 r.). Autor Rozprawy głębiej nie zajmuje się źródłem tego nieporządku – czy jest on powodowany fluktuacjami potencjału studni InGaAs (wprowadzającym poszerzenie niejednorodne: *inhomogeneous broadening*), czy fluktuacjami grubości warstw luster Bragga, czy obecnością defektów niedopasowania warstw itd. Wydaje mi się jednak, że źródło nieporządku powinno zostać wskazane, a w każdym razie zawężone. Eksperymenty, które przeprowadził Autor, polegające na

silnym pobudzeniu próbki z mocą o dwa rzędy wielkości przewyższającą moc progową, w inny sposób można interpretować biorąc pod uwagę ekranowanie fluktuacji potencjału przez plazmę elektronowo-dziurową, ekcytony lub kondensat polarytonów ekscytonowych (chodzi o różne skale przestrzenne i energetyczne). Chciałbym usłyszeć opinię mgra Macieja Pieczarki na ten temat w kontekście zjawisk obserwowanych na Rys. 5.1.3 i 5.1.5. Być może Autor dysponuje jakimiś dodatkowymi informacjami, np. z pomiarów rentgenowskich dra Fabiana Langer (wspomnianych, ale nie pokazanych w pracy), na temat nieporządku w badanej strukturze i może odnieść je do rozciągłości przestrzennej obserwowanych zjawisk? Pewną wskazówką byłaby moim zdaniem dyskusja dobroci wnęki – autor wyjaśnia dużą szerokość modu podstawowego mikrownęki uśrednianiem pod dużym obszarze lub absorpcją studni InGaAs. Z mojego doświadczenia wynika, że niejednorodność grubości luster Bragga także poszerza mod wnęki, co by wskazywało na jakąś rolę nieporządku fotonicznego.

3. Widma wzbudzeń Bogolubova zależy m.in. od wzajemnej relacji szybkości zaniku kondensatu  $\gamma_C$  i rezerwuaru  $\gamma_R$  (Fig. 3.3.1). W szczególności Autor w rozdziale 5.2 przekonuje czytelnika, że obserwowane efekty mogą być wyjaśnione jeśli w próbce mamy do czynienia z „powolnym rezerwuarem”. Jednocześnie mam wrażenie, że w rozdziale 5.1.4 stara się dopasować liniową zależność dyspersyjną, charakterystyczną raczej dla „szybkiego rezerwuaru”. Czy Autor próbował do widma z rys. 5.1.9 dopasować widmo wzbudzeń z parametrami  $\gamma_R < \gamma_C$ ? Czy te parametry nie poprawiłyby zgodności prędkości dźwięku wspomnianej w rozdz. 5.1.4? Czy „powolny rezerwuár” ma związek z nieporządkiem (niektóre rodzaje nieporządku skracają czas życia ekscytonów, inne wydłużają)?

Przyznam też, że w Podsumowaniu (Rozdz. 6) brakuje mi opisu możliwych kierunków badań związanych z podejmowaną przez Autora tematyką. Czy to znaczy, że wszystko zostało wyjaśnione i nie warto dalej zajmować się nieporządkiem w strukturach polarytonowych?

Mam nadzieję, że w trakcie obrony, Autor odniesie się do powyższych kwestii.

Pan mgr inż. Maciej Pieczarka jest współautorem 11 publikacji w recenzowanych czasopismach (stan na sierpień 2017 r.). Poza trzema publikacjami będącymi treścią Rozprawy w wielu z nich dotyczących luminescencji kropek kwantowych jest pierwszym autorem. Dorobek ten został pominięty w niniejszej rozprawie, jednak warto go podkreślić, gdyż pokazuje drogę naukową jaką przebył Doktorant zanim zajął się tematyką polarytonów. Doświadczenie w pracy naukowej jakie zdobył Doktorant badając spektroskopowo kropki kwantowe oraz struktury laserowe przydało się w pomiarach polarytonów ekscytonowych. Mgr Pieczarka został także zaproszony na szereg prestiżowych seminariów (w Instytucie Fizyki PAN, na Wydziale Fizyki UW) co świadczy o tym, że środowisko naukowe doceniło wyniki uzyskane przez młodego badacza. Swoje wyniki miał możliwość prezentować ustnie na kilku konferencjach międzynarodowych.

Recenzowana przeze mnie rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań, które nie są przyczynkowe, a wnoszą nowe i istotne informacje na temat dynamiki polarytonów ekscytonowych. Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym...” z dn. 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami i zwracam się do Rady Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej z wnioskiem o dopuszczenie mgr inż. Macieja Pieczarki do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto uważam, że wartość naukowa rozprawy doktorskiej zasługuje a wyróżnienie, o co wnioskuję do Rady Wydziału.



Dr hab. Jacek Szczytko  
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
[jacek.szczytko@fuw.edu.pl](mailto:jacek.szczytko@fuw.edu.pl)

Warszawa 29.08.2017