



INSTYTUT FIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK
INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

02-668 WARSZAWA, Al. LOTNIKÓW 32/46
fax: + (48-22) 843-0926; <http://info.ifpan.edu.pl>

dr hab. Piotr Wojnar, prof. IFPAN
email: wojnar@ifpan.edu.pl

tel. +(48-22)-116-3202

Warszawa, 18 września 2023r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Wyborskiego pt.: „*GaAs-based quantum dots grown by MBE on metamorphic buffers as a platform for single-photon emitters in the telecommunication spectral range*”

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska jest pracą eksperymentalną dotyczącą tematyki związanej z fizyką półprzewodnikowych struktur niskowymiarowych. Jej głównym celem jest uzyskanie kontroli nad energią emisji optycznej z pojedynczych kropek kwantowych InAs w heterostrukturach wytworzonych na podłożu GaAs celem przesunięcia jej do trzeciego zakresu telekomunikacyjnego. Jest to szczególnie interesujące zagadnienie ze względu na fakt, że kropki kwantowe mogą stanowić niemalże idealne źródła pojedynczych fotonów, a także źródła splątanych fotonów, a tym samym znaleźć zastosowania w bezpiecznym przekazie informacji. Otrzymanie efektywnych źródeł pojedynczych fotonów emitujących w zakresie telekomunikacyjnym stanowi aktualny kierunek badań mogący prowadzić do ważnych zastosowań.

W ramach niniejszego doktoratu zaprezentowana została propozycja rozwiązania problemu zbyt wysokiej energii emisji optycznej z kropek kwantowych InAs/GaAs poprzez wprowadzenie metamorficznej warstwy buforowej (In,Ga)As pomiędzy podłożem a warstwę kropek kwantowych. Zmniejsza ona naprężenie w strukturze oraz wysokość ograniczenia kwantowego, co prowadzi do zmniejszenia energii emisji z kropek kwantowych. Przedstawione w doktoracie badania optyczne prowadzone były w ścisłej współpracy z zespołem technologicznym wykonującym kolejne serie odpowiednio zaprojektowanych struktur przy użyciu epitaksji z wiązek molekularnych. Zbadane zostały parametry

wpływające na zmianę energii emisji, polaryzację, stabilność termiczną, oraz dynamikę rekombinacji emisji optycznej z kropek kwantowych. Co istotne, na koniec rozprawy zaprezentowane zostały pomiary korelacji fotonów pochodzących z linii emisyjnych od pojedynczych kropek kwantowych emitujących w drugim i trzecim zakresie telekomunikacyjnym, które świadczyły o jednofotonowym charakterze tej emisji optycznej.

Zaprezentowane w rozprawie doktorskiej obszernie badania kropek kwantowych InAs w barierze (In,Ga)As wytworzonej na podłożu GaAs mają niewątpliwie nowatorski charakter. Zostały one opublikowane w dwóch artykułach, które ukazały się w dobrym czasopiśmie *Materials* oraz w manuskrypcie wysłanym do *Physical Review Applied*. W jednym z artykułów w *Materials* oraz w wysłanym manuskrypcie mgr Paweł Wyborski jest pierwszym autorem, co świadczy o jego znacznym wkładzie w powstanie tych prac.

Rozprawa doktorska podzielona jest na siedem rozdziałów stanowiących logiczną całość. We wstępie szczegółowo zdefiniowane są cele rozprawy doktorskiej oraz dokładnie przedstawiona rola Doktoranta w przeprowadzeniu doświadczeń opisanych w rozprawie. Doktorant odpowiedzialny był przede wszystkim za przeprowadzenie wszystkich eksperymentów optycznych na strukturach zawierających kropki kwantowe. Zakres przeprowadzonych przez niego badań jest obszerny i obejmuje czasowo i polaryzacyjnie rozdzielone pomiary fotoluminescencji, pomiary mikro-fotoluminescencji oraz pomiary korelacji fotonów. W mojej ocenie zakres ten jest zdecydowanie wystarczający, żeby stanowić podstawę do napisania rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim opisana jest dość szczegółowo teoria wyjaśniająca własności emisji optycznej z kropek kwantowych, a rozdział trzeci zawiera kompletny przegląd literatury dotyczący różnych sposobów i strategii na otrzymanie emisji optycznej z kropek kwantowych w drugim i trzecim zakresie telekomunikacyjnym. Rozdział czwarty natomiast poświęcony jest szczegółowemu opisowi układów optycznych stosowanych przez Doktoranta do wykonania poszczególnych pomiarów. Wszystkie wyżej wspomniane rozdziały są napisane starannie, a literatura zacytowana jest w nich w sposób prawidłowy.

Najważniejsze wyniki eksperymentalne przedstawione są w rozdziałach 5 – 7. W pierwszej kolejności opisane są trzy serie próbek wytworzone w celu uzyskania przesunięcia energii emisji optycznej z kropek kwantowych InAs w niższe energie, do drugiego i trzeciego zakresu telekomunikacyjnego poprzez zmianę struktury metamorficznej warstwy buforowej (In,Ga)As. Emisja optyczna z kropek kwantowych w drugim oknie telekomunikacyjnym została osiągnięta w drugiej serii próbek, w próbce nazwanej In-29%, a w trzecim zakresie telekomunikacyjnym w próbce In-38% z trzeciej serii, co jest niewątpliwie najważniejszym osiągnięciem niniejszej rozprawy doktorskiej. Mam jednak kilka drobnych uwag/pytań odnośnie tego rozdziału.

- Pierwsze pytanie dotyczy roli supersieci GaAs/AlAs w trzeciej serii próbek. AlAs ma nieco większą stałą sieci niż GaAs. Czy obecność supersieci GaAs/AlAs może prowadzić do

znaczącej zmiany naprężenia w badanych strukturach, a tym samym wpłynąć na energię emisji z kropek kwantowych?

- Na rys 5.10 przedstawione jest porównanie makro- i mikrofotoluminescencji z próbki In_{38%}. Obserwujemy, że emisja z pojedynczych kropek kwantowych w mikrofotoluminescencji ma miejsce w niższych energiach niż dla głównej linii emisyjnej zmierzonej w makro-fotoluminescencji. Czy oznacza to, że główna linia emisyjna pochodzi od warstwy zwilżającej (wetting layer)? Czy cała emisja w energiach 0.5 - 0.8 meV pochodzi od kropek kwantowych, czy możliwe jest że mamy do czynienia częściowo z emisją defektową z bufora (In,Ga)As?

Rozdział 6 szczegółowo przedstawia własności emisji optycznej zespołów kropek kwantowych emitujących w różnych długościach fali. Nie mam wątpliwości, że interpretacja większości pomiarów fotoluminescencji, w tym pomiaru w funkcji mocy pobudzenia, temperatury, a także pomiaru zaników fotoluminescencji jest prawidłowa. Termicznie aktywowana redystrybucja nośników pomiędzy kropkami kwantowymi w zespole, obecność emisji ze stanów wzbudzonych przy silnym pobudzaniu oraz zmniejszenie się wielkości ograniczenia kwantowego wraz rosnącą zawartością In w buforze są efektami, które niewątpliwie mają miejsce w badanych strukturach. Trochę niepewności budzi w mojej ocenie interpretacja wyników polaryzacyjnych. Obserwowany stopień polaryzacji liniowej odpowiada stosunkowi wymiarów w płaszczyźnie wynoszącym aż 2 lub nawet 3. Ponieważ mierzymy sygnał z zespołu kropek kwantowych oznacza to, że większość kropek powinna być znacznie wydłużona w jednym kierunku. W pomiarach SEM i AFM nie obserwuje się natomiast takiego efektu. Pomiar intensywności luminescencji w zależności od kąta polaryzacji liniowej jest natomiast dość trudnym pomiarem ze względu na silną zależność spektralną większości polaryzatorów oraz czułość monochromatora na badaną polaryzację liniową. Czy efekty związane z aparaturą mogły mieć wpływ na pomiary stopnia polaryzacji liniowej?

W ostatnim rozdziale opisane są właściwości optyczne emisji z pojedynczych kropek kwantowych. Duże wrażenie zrobiły na mnie szczególnie pomiary korelacji fotonów wykazujące bardzo małe wartości $g^2(0)$ dla kropek kwantowych InAs/(In,Ga)As emitujących w drugim i trzecim zakresie telekomunikacyjnym. Ponadto obserwacja wyraźnych kaskad biekscyton-ekscyton pozwoliła na jednoznaczną identyfikację linii emisyjnych od poszczególnych kompleksów wieloekscytonowych. Mam natomiast kilka drobnych uwag dotyczących zagadnień niewpływających na główne wnioski rozprawy doktorskiej:

- Na rys. 7.9K Autor wyznaczył wielkość FSS równą 50 μeV . Na podstawie danych doświadczalnych widać jednak, że ta wartość jest znacznie mniejsza i wynosi 20 - 30 meV.

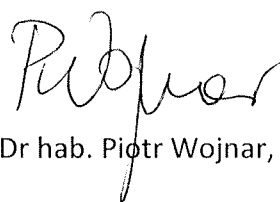
- Zachowałbym ostrożność w interpretacji stopnia polaryzacji liniowej od pojedynczych kropek kwantowych ze względu na możliwy wpływ kształtu mesy.

- Rys 7.11B, powinno być ' μeV ' na osi odciętych

- Strona 110, wiersz 11; trzeba skreślić nieprawidłowe jednostki 'ns' w trzech miejscach.

Podsumowując, mgr Paweł Wyborski przeprowadził szczegółowe badania emisji optycznej z kropek kwantowych InAs wytworzonych na metamorficznych buforach (In,Ga)As na podłożach GaAs celem otrzymania emisji jednofotonowej w drugim i trzecim zakresie telekomunikacyjnym. Wykazał się przy tym starannością, a wyciągnięte wnioski naukowe były formułowane z należytą ostrożnością. Świadczy to o dojrzałości naukowej Doktoranta pozwalającej mu w przyszłości na samodzielne podjęcie zagadnień badawczych. Drobne uwagi, które wymieniłem w recenzji nie zmieniają mojej wysokiej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr. Pawła Wyborskiego spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania dotyczące uzyskania stopnia doktora. Wniosuję o dopuszczenie mgr. Pawła Wyborskiego do dalszych etapów procedury.



Dr hab. Piotr Wojnar, prof. IFPAN