



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

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera pogłębione studium wpływu warunków wzrostu kropek kwantowych InAs wytworzonych na warstwie metamorficznego bufora (MBL) pod kątem ich zastosowań w technologiach kwantowych. Rozwój tych technologii i poszukiwanie optymalnych źródeł pojedynczych fotonów w ich implementacjach powoduje, że tematyka ta jest stale aktualna i budzi zainteresowanie środowiska badaczy. Kropki kwantowe powstające na podłożu zawierającym MBL, które są tematem przedstwionej dysertacji charakteryzują się mniejszym niedopasowaniem sieciowym, niż w przypadku wzrostu bezpośrednio na GaAs, a przez to mniejszym naprężeniem i co za tym idzie zmniejszeniem energii emisji w kierunku trzeciego okna telekomunikacyjnego w okolicach 1,55  $\mu\text{m}$ . Dzięki temu stają się potencjalnie interesującym rozwiązaniem jako źródła pojedynczych fotonów o energiach odpowiadających transmisji światłowodów.

Autor zaprezentował w swojej dysertacji wyniki logicznego ciągu badań ukierunkowanego na optymalizację kropek pod tym kątem. Badania te obejmowały charakteryzację morfologiczną i pomiary optyczne próbek wyhodowanych metodą epitaksji z wiązki molekularnej (MBE) w trzech seriach i pozwoliły na ich optymalizację w kierunku emisji w drugim i wreszcie trzecim oknie transmisji. Pozwoliły one na wybór sześciu struktur, które były następnie szczegółowo charakteryzowane przy użyciu bardziej wyrafinowanych technik pomiarowych takich jak pomiary emisji pojedynczych kropek kwantowych, pomiary korelacji pojedynczych fotonów czy pomiary emisji rozdzielonej czasowo.

Układ pracy jest poprawny i w sposób wielce dydaktyczny umożliwia czytelnikowi prześledzenie wszystkich elementów prezentowanego studium.

W pierwszej części, zawierającej wprowadzenie do tematyki znajdujemy wyczerpujący opis podstawowych własności kropek kwantowych (*Quantum dot*), własności kompleksów ekscytacyjnych w kropkach kwantowych (*Excitonic complexes in QD*), inżynierii kropek kwantowych z punktu widzenia emisji pojedynczych fotonów w oknie transmisji światłowodowej (*Engineering the QDs for single-photon emission in the telecommunication range*). Bez wątplenia można polecić tę część dysertacji jako doskonały materiał wspierający kształcenie młodych badaczy. Przedstawiona w nim wiedza, wsparta bogatą literaturą podana jest przystępnie, a jednocześnie wyczerpująco.

W kolejnym rozdziale (*Experimental methods and theoretical calculation of QDs properties*) Autor prezentuje zastosowane techniki doświadczalne i podstawowe założenia obliczeń teoretycznych. Rodział ten potwierdza bogactwo zastosowanych technik optycznych, od pomiarów luminescencji i odbicia zbiorów kropek kwantowych, aż do rozdzielonych czasowo pomiarów emisji z pojedynczych kropek kwantowych. Nieco mniej obszerny jest wykład dotyczący obliczeń teoretycznych.

W następnym rozdziale (*QD emission redshift via growth on metamorphic buffer layers*) podsumowano systematyczne wyniki badań trzech serii próbek uzyskanych w różnych warunkach technologicznych. Pokazano w nim jak zmiana składu kropek i parametrów MBL wpływa na energię emisji optyczną, przesuwając w kierunku drugiego, a wreszcie trzeciego okna transmisji. Bardziej szczegółową analizę własności optycznych tych struktur można znaleźć w kolejnych rozdziałach (*Optical properties of QDs ensembles* i *Emission properties of single QDs*). Należy w tym miejscu jeszcze raz docenić zawansowany charakter takich pomiarów jak czasowo-rozdzielona spektroskopia pojedynczych kropek kwantowych oraz analiza korelacji emisji pojedynczych kropek jednoznacznie wskazująca na nieklasyczny charakter tej emisji, tym bardziej, że sama detekcja emisji w tym zakresie jest zagadnieniem nietrywialnym.

W podsumowaniu (*Summary*) zestawiono główne konkluzje dysertacji. Wskazano na wykonanie precyzyjnej charakteryzacji serii próbek z kropkami kwantowymi InGaAs wytworzonymi metodą MBE na warstwie MBL potwierdzającej możliwość modulacji emisji w szerokim zakresie energii sięgającym trzeciego okna emisji. Co najważniejsze, udowodniono, że badany system ma potencjał zastosowania w schematach bezpiecznej komunikacji kwantowej. Dysertację kończy bogata lista literatury, a także lista prac, współautorstwa mgr. Wyborskiego, w tym bezpośrednio związanych z tematyką dysertacji. Należy w tym miejscu dodać, że już po złożeniu dysertacji, jej główne elementy zostały opublikowane w pracy *Impact of MBE-grown InGa/GaAs metamorphic buffers on excitonic and optical properties of single quantum dots with single-photon emission tuned to the telecom range* w *Physical Review Applied* **20** 044009, której mgr. Wyborski jest pierwszym autorem. Podkreśla to znaczenie prezentowanej dysertacji, a także potwierdza potencjalne zainteresowanie społeczności badaczy zamieszczonymi w niej wynikami.

Analizując przedstawioną dysertację trzeba wyrazić ogromne uznanie dla jej zawartości. Należy także wskazać na dwa ważne aspekty potwierdzające dojrzałość warsztatu młodego badacza, które z niej jasno wynikają. Mnogość użytych technik zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych budzi szacunek i uznanie. W szczególności dotyczy to pomiarów optycznych. Tak boaty zakres badań wymusił jednocześnie szeroko zakrojoną współpracę z wieloma grupami badawczymi. Dodatkowym aspektem jest także otwarcie na współpracę międzynarodową, która pozwoliła zrealizować wzrost trzech serii struktur szczegółowo analizowanych w niniejszej pracy, gdyż badane struktury wytworzone zostały w Uniwersytecie w Würzburgu. Autor wywiązał się z tego zadania znakomicie jasno potwierdzając swoją gotowość do rozwijania kariery w otoczeniu środowiska badawczego.

Jak to wspomniano, dysertacja została skonstruowana poprawnie. Nie znaczy to jednak, że spotkać w niej można pewne niedoskonałości o charakterze edytorskim, które zaadresowane,

jeszcze bardziej wzmocniłyby jej przekaz. Warto na nie zwrócić uwagę w kontekście dalszego rozwoju Autora. W szczególności należy wskazać na wyjątkowo oszczędny rozmiar prezentowanych rysunków. W istocie, niewielki rozmiar rysunków przedstawiających zdjęcia SEM lub STEM nie pozwala w pełni docenić ich szczegółów, co utrudnia znacznie obserwację kropek kwantowych na przekroju próbki (Rys. 5.11C i Rys. 5.14). Ponadto na niektórych z nich (5.5, 5.7) zabrakło markera umożliwiającego ocenę skali prezentowanego obszaru. Także *surface roughness* raportowana dla próbki In-38% mogłaby być lepiej doceniona na rysunku prezentującym topografię próbki mierzoną AFM niż z obrazu SEM.

Niejako z obowiązku recenzenta wypada zwrócić uwagę także na kilka innych kwestii, których pogłębienie z pewnością byłoby korzystne dla Autora.

W pracy nie jest w sposób czytelny przedstawiona informacja na temat gęstości powierzchniowej kropek w kolejnych strukturach. Mogłaby być ona interesująca np. w kontekście liniowej zależności intensywności emisji kropek od mocy zmieniającej się o 7 dekad.

Równie ciekawa byłaby informacja na temat orientacji podłoży GaAs użytych do wzrostu badanych struktur, która nie jest łatwa do znalezienia w dysertacji. Jest interesujące czy obserwowana anizotropia polaryzacji (Rys. 6.4) pozostaje w prostej zależności z ewentualnymi wyróżnionymi kierunkami krystalograficznymi podłoża, czego słusznie spodziewa się Autor na str. 75, oczywiście jeśli do wzrostu wykorzystywane były "przekoszone" podłoża.

Zabrakło także pogłębionej analizy obserwacji podsumowanej na Rys. 6.3. Autor stwierdza, że jednym z powodów często (referencja?) obserwowanego efektu przesunięcia emisji w wyższe energie może być zapełnianiem stanów i zwiększony wkładem emisji z kropek o wyższych energiach emisji. Należy zauważyć, że równie często zdarza się obserwować efekt odwrotny, wynikający z renormalizacji oddziaływań pomiędzy nośnikami w kropce. Ponadto, zwiększony wpływ emisji z kropek o wyższych energiach zakładałby, że kropki nie są zapełnianie w sposób losowy i przy niskich gęstościach pobudzania emisja zachodziłaby raczej z kropek o energiach niższych. Właściwe było przeanalizowanie możliwych powodów takiej redystrybucji. Jednak, jak się wydaje słusznie, Autor dalej zauważa, że efekt przesunięcia emisji jest raczej związany z zapełnianiem kolejnych stanów uwięzionych w kropkach.

Przyznać należy jednak, że te uwagi nie umniejszają w żaden sposób wysokiej oceny przedstawionej pracy. Nie ma wątpliwości, że przedstawiona dysertacja spełnia wszystkie ustawowe warunki i wnoszę o dopuszczenie mgr. Pawła Wyborskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Ponadto, biorąc pod uwagę

a) szeroki zakres prowadzonych badań łączący studium technologiczne, elementy analizy teoretycznej,

b) mnogość obserwacji wykorzystujących wyrafinowane techniki doświadczalne,

c) pogłębiony charakter ich analizy,

d) znaczenie przedstawionych konkluzji dla społeczności badaczy z dziedziny technologii kwantowych,

wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr. Pawła Wyborskiego.