

Wrocław, 12 lutego 2019

Prof. Robert Kudrawiec
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wroclawska
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27,
50-370 Wrocław
Tel.: +48-71320-42-80, Fax: +48-71-328-36-96
E-mail: robert.kudrawiec@pwr.edu.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr Dawida Jarosza zatytułowanej „*Warstwy i struktury kwantowe na bazie ZnO i Zn_{1-x}Mg_xO otrzymane metodą PA-MBE do zastosowań w optoelektronice*”

Praca doktorska Pana mgr Dawida Jarosza jest pracą eksperymentalną i składa się z pięciu rozdziałów, podsumowania i tzw. dodatku. Rozdział III, IV i V stanowią kluczową część rozprawy, w której doktorant przedstawia wyniki swoich badań i odnosi się do celów rozprawy doktorskiej sformułowanych na początku doktoratu w sekcji zatytułowanej *Cele Pracy*. Dwie pierwsze części rozprawy zaznajamiają czytelnika z tematyką dysertacji i obejmują: ogólne wprowadzenie do struktur na bazie tlenku cynku, wybrane zagadnienia dotyczące struktur laserowych, wprowadzenie do technologii MBE oraz opis zastosowanych metod badawczych (tj. opis mikroskopii sił atomowych AFM, spektroskopii fotoluminescencyjnej, dyfrakcji rentgenowskiej, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz pomiarów optycznych w wysokich ciśnieniach hydrostatycznych). Podsumowując dwa pierwsze rozdziały rozprawy uważam, że czyta się je bardzo dobrze, balans pomiędzy długością opisu oraz zawartością informacji potrzebnych do zrozumienia wyników eksperymentalnych przedstawionych w głównej części rozprawy jest bardzo dobry. Doktorant w odpowiednich miejscach odsyła czytelnika do odpowiedniej literatury, a jej dobór jest właściwy i świadczy o znajomości literatury przedmiotu rozprawy.

Odnosząc się do części zasadniczej rozprawy zawartej w rozdziałach III, IV i V uważam, że podział wyników na poszczególne rozdziały/podrozdziały jest bardzo właściwy, a ich wewnętrzna struktura bardzo przystępna dla czytelnika. Na początku każdego z tych rozdziałów pojawia się krótkie wprowadzenie do problemu, a następnie przedstawione są odpowiednie wyniki wraz z ich dyskusją.

W rozdziale III doktorant szczegółowo opisuje technologię kontroli składu warstw ZnMgO w procesie MBE. Tego typu warstwy są podstawą wytwarzania struktur laserowych na bazie ZnO (tj. głównego celu niniejszej dysertacji) i w tym kontekście wprowadzenie takiego rozdziału jest

całkowicie uzasadnione. Należy tutaj zaznaczyć, że w literaturze przedmiotu można znaleźć prace na ten temat jednak przeniesienie parametrów wzrostu z jednej maszyny MBE do drugiej nie jest oczywiste i nie zawsze sprawdza się dlatego takie badania muszą być wykonane jeżeli planuje się w pełni kontrolowane wytwarzanie struktur laserowych. Rozdział III dowodzi, że takie badania zostały wykonane i doktorant w sposób przewidziany, a nie losowy, jest w stanie wytworzyć strukturę ZnO/ZnMgO o zadanych parametrach, tj. o odpowiednim składzie i szerokości warstw. Część z tych badań została opublikowana w Journal of Alloys and Compounds w pracy pt. "Influence of substrate temperature on incorporation of magnesium into ZnMgO grown by molecular beam epitaxy" w której doktorant jest pierwszym autorem. Ponadto w przypadku tego rozdziału na podkreślenie zasługuje opracowanie metody szybkiej zmiany składu w warstwach ZnMgO za pomocą przepływu tlenu, które zakończyło się zgłoszeniem patentowym (P.423624).

W rozdziale czwartym doktorant przedstawia wyniki badań fotoluminescencji w wysokich ciśnieniach hydrostatycznych dla studni kwantowych ZnO/ZnMgO. Do tego celu wytworzono polarne i niepolarne studnie kwantowe ZnO/ZnMgO o szerokości 6 nm oraz polarną studnię kwantową ZnO/ZnMgO o szerokości 8 nm. W ramach tych badań wykazano, że w polarnych studniach kwantowych mamy do czynienia z silnym sprzężeniem elektron-fonon, a ciśnienie hydrostatyczne ma silny wpływ na to sprzężenie. Wyniki tych badań zostały opublikowane w AIP ADVANCES w pracy w której doktorant jest pierwszym autorem. Uważam, że jest to wątek badawczy, który jest interesujący i może być kontynuowany jednak w kontekście celów doktoratu jest on poboczny, a rozdział III nie jest niezbędny w niniejszym doktoracie. Umieszczenie tych wyników w pracy doktorskiej traktuje jako dodatkową tematykę, która w jakiś sposób wiąże się z celami pracy co zresztą zostało zaznaczone przez doktoranta w sekcji *Cele Pracy*.

Podsumowując materiał eksperymentalny przedstawiony w rozdziale III i IV należy podkreślić jego wartość naukową co potwierdzają odpowiednie publikacje. Odnosząc się do dyskusji wyników przedstawionych w tych rozdziałach chciałbym zaznaczyć, że nie dostrzegam błędów pojęciowych, interpretacyjnych lub wewnętrznych sprzeczności jednak mam pytania dotyczących zagadnień, które mogą być bardzo istotne dla tych badań, a nie zawsze są poruszane/komentowane wystarczająco obszernie w dyskusji wyników.

Pytanie 1: Doktorant jest w stanie uzyskać warstwy ZnMgO o różnej zawartości magnezu poprzez zmianę temperatury wzrostu. Z drugiej strony dobrze wiadomo, że temperatura wzrostu jest kluczowym parametrem jeżeli chodzi o jakość optyczną uzyskanego materiału tj. udziału rekombinacji niepromienistej. Czy doktorant porównywał intensywności fotoluminescencji dla

próbek o podobnych składach uzyskanych w różnych temperaturach wzrostu lub w jakiś inny sposób badał wpływ temperatury wzrostu na intensywność fotoluminescencji?

Pytanie 2: Czytając rozdział III narzuca się pytanie dlaczego pomiarów fotoluminescencji w funkcji ciśnienia hydrostatycznego nie wykonano dla próbek o szerokości studni 6 nm i dla tych próbek nie zbadano wpływu ciśnienia hydrostatycznego na sprzężenie elektron-fonon?

Rozdział V stanowi najważniejszą część rozprawy i dotyczy pomiarów emisji wymuszonej ze struktur z ośrodkiem czynnym wykonanym ze studni kwantowych ZnO/ZnMgO umieszczonych w falowodach wytworzonych z warstw ZnMgO o odpowiedniej szerokości i składzie (parametry te były dobierane we współpracy z prof. Tomaszem Czyszanowskim). Tego typu struktury zostały wykonane na podłożu szafirowym oraz na podłożu ZnO. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów fotoluminescencji w funkcji mocy pobudzania doktorant twierdzi, że uzyskał akcję laserową przy pompowaniu optycznym. Dowodem tego mają być widoczne mody laserowe charakterystyczne dla laserów półprzewodnikowych, silna zależność modów laserowych od ustawienia polaryzatora oraz zaobserwowanie progu emisji wymuszonej na wykresach intensywność emisji vs. gęstość mocy impulsu. W mojej ocenie zaprezentowane wyniki eksperymentalne nie są ostatecznym dowodem na laserowanie badanych struktur. Uważam, że w tym wypadku bezpieczniejszym sformułowaniem może być twierdzenie o obserwacji wzmocnionej emisji co nie jest jednoznaczne z laserowaniem jakie chce się uzyskać dla półprzewodnikowej studni kwantowej. Mimo tego uważam, że przedstawione wyniki stanowią istotny krok w stronę uzyskania laserowania ze studni kwantowych ZnO/ZnMgO i tą część rozprawy uważam za najbardziej wartościową. Dodatkowo chciałbym podkreślić, że tzw. „dodatek” odgrywa w niniejszej dysertacji istotną rolę ponieważ pokazuje jak duże ryzyko niesie za sobą podjęcie badań eksperymentalnych w których sukces zależy od sprawności maszyny MBE. W tym wypadku miało to istotne znaczenie i na uznanie zasługuje upór i konsekwencja w dążeniu do celu jakim w tym wypadku było wytworzenie struktur laserowych na bazie studni kwantowych ZnO/ZnMgO. Jestem całkowicie przekonany, że jest to temat który nie jest zamknięty i wciąż jest interesujący do badań. W przypadku niniejszego rozdziału chciałbym, żeby podczas obrony doktorant ustosunkował się do poniższych pytań:

Pytanie 3: Dlaczego emisja wymuszona obserwowana jest przy mniejszej energii niż emisja spontaniczna? Czy jest to efekt grzania próbki czy coś innego?

Pytanie 4: Czy widmo emisji spontanicznej przedstawione na Rysunku R.V.6 i R.V.15 uzyskane jest przy pobudzaniu tym samym laserem co widmo emisji wymuszonej? Z opisu tych rysunków w pracy doktorskiej nie jest to jasne.

Pytanie 5: Ze względu na dużą masę efektywną nośników w ZnO w porównaniu z innymi materiałami półprzewodnikowymi dodatnie wzmocnienie optyczne dla badanych studni kwantowych spodziewane jest przy bardzo dużej koncentracji nośników ($n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bez przeliczania na koncentracje 2D). Czy reżim pobudzania optycznego zapewnia taką koncentrację nośników. Krótka dyskusja na ten temat pojawia się w pracy jednak czuję tutaj pewien niedosyt dlatego, że uważam to za kluczowy element w tych pomiarach.

Pytanie 4: W jaki sposób szerokość studni kwantowych podana w rozprawie (tj. 3 nm) została zweryfikowana. W przypadku polarnych studni kwantowych dodatnie wzmocnienie optyczne bardzo mocno zależy od szerokości studni. Obawiam się, że łatwiej było by uzyskać laserowanie dla węższych studni kwantowych np. 2 nm dlatego, że w takich studniach dodatnie wzmocnienie optyczne powinno pojawić się przy niższych mocach pompowania optycznego.

Należy podkreślić, że doktorant jest współautorem 9 prac z tematyki ZnO w dobrych i bardzo dobrych czasopismach (np. *Nanoscale*, *ACS Materials & Interfaces*). Dwie z nich w których doktorant jest pierwszym autorem i o których już wspomniałem w recenzji bezpośrednio dotyczą rozprawy doktorskiej. Pozostałe świadczą o tym, że doktorant posiada odpowiednie kompetencje potrafi pracować w grupie co jest bardzo ważne w fizyce eksperymentalnej.

Podsumowując wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie można stwierdzić, że stanowią one istotny wkład do literatury przedmiotu. Ponadto chciałbym podkreślić, że praca została bardzo starannie zredagowana (znalazłem tylko dwie literówki str. 35 i 114). Przytoczona analiza przedłożonej dysertacji pozwala mi stwierdzić, że postawione na początku pracy cele zostały zrealizowane w zadowalającym stopniu. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr Dawida Jarosza spełnia wszystkie wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych dla rozpraw na tytuł doktora oraz zwyczajowo przyjęte kryteria w środowisku „fizyki półprzewodników”. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Dawida Jarosza do publicznej obrony niniejszej rozprawy.



Robert Kudrawiec