

Łódź, 15 listopada 2021 r.

dr hab. inż. Robert Sarzała, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka  
Instytut Fizyki  
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej  
ul. Wólczańska 217-221, 93-005 Łódź

**Recenzja Rozprawy Doktorskiej pt.  
„Spektroskopia optyczna struktur półprzewodnikowych związków III-V  
do zastosowań w emiterach promieniowania na zakres 3 – 10  $\mu\text{m}$ ”**

**Autor rozprawy: mgr inż. Marcin Kurka  
Promotor: dr hab. inż. Marcin Motyka, prof. uczelni**

Recenzowana rozprawa ma charakter pracy eksperymentalnej z pewnymi elementami prac teoretycznych, w której główne wyniki otrzymano wykonując pomiary metodami spektroskopii optycznej. Rozprawa dotyczy badań materiałów półprzewodnikowych, które obecnie brane są pod uwagę jako obszary czynne laserów półprzewodnikowych oraz diod superluminescencyjnych, mogących emitować promieniowanie w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni, a w szczególności fal w okolicach 3-3.5  $\mu\text{m}$  oraz 9-10  $\mu\text{m}$ . Celem przedstawionych w rozprawie badań było eksperymentalne zweryfikowanie własności optycznych niebadanych wcześniej struktur i fizyczne wytłumaczenie obserwowanych wyników doświadczalnych. Wnioski z przeprowadzonych badań miały umożliwić optymalizację procesu wytwarzania i projektowania tych struktur, co w efekcie ma zapewnić ich efektywniejszą pracę w wyższych temperaturach i z dłuższymi niż do tej pory długościami fal. Pozwoliłoby to wytworzyć emitery światła o lepszych parametrach użytkowych. W pracy skupiono się przede wszystkim na: studniach kwantowych GaInAsSb/((Al)GaInAsSb projektowanych jako obszary czynne diod superluminescencyjnych z emisją fali 3.5  $\mu\text{m}$ ; studniach kwantowych InAsSb/InAsSbP wytwarzanych na podłożu InP metodą MOVPE, wykorzystywanych jako obszary czynne laserów półprzewodnikowych przeznaczonych do emisji fali 3.5  $\mu\text{m}$ ; obszarach aktywnych kwantowych laserów kaskadowych wytwarzanych techniką MOVPE zamiast jak dotychczas techniką mieszaną MBE i MOVPE, emitujących falę około 9  $\mu\text{m}$ ; oraz badaniach materiałowych stopu InGaAs, a w szczególności określeniu koncentracji nośników w tym materiale, co jest ważne dla działania kwantowych laserów kaskadowych InGaAs/AlInAs wytwarzanych na podłożu InP. Wspomniane wyżej urządzenia istotne są z punktu widzenia przede wszystkim detekcji gazów, komunikacji w otwartej przestrzeni czy obrazowania.

Rozprawa obejmuje łącznie około 135 stron, z czego 99 stron stanowi właściwą treść rozprawy. Reszta to streszczenie, streszczenie w języku angielskim, podziękowania, spis treści, wykaz przytoczonej literatury, spis rysunków, spis tabel, wykaz użytych skrótów oraz wykaz dorobku naukowego autora rozprawy. Właściwą część pracy stanowi 10 rozdziałów, z których ostatni jest podsumowaniem pracy.

Rozprawę można podzielić na dwie zasadnicze części. Rozdziały 2-5 zawierają materiał wprowadzający i mają charakter bardziej ogólny. Możemy tu przeczytać informacje zupełnie podstawowe obejmujące fizykę kwantową, fizykę ciała stałego oraz fizykę półprzewodników jak i informacje ściśle związane z tematyką pracy takie jak techniki wzrostu epitaksjalnego i w końcu techniki pomiarowe używane podczas prac badawczych autora. Drugą część pracy stanowią rozdziały od 6 do 9. Obejmują one szczegółowy opis badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej wraz z wynikami, ich analizą i sformułowanymi wnioskami końcowymi.

Rozdział pierwszy stanowi krótki wstęp do całej pracy. Oprócz zwięzłego nakreślenia tematyki pracy zawiera on główny cel pracy: *eksperymentalna weryfikacja własności optycznych niebadanych wcześniej struktur oraz wytłumaczenie zachodzących w nich zjawisk*. Temat i zawartość pracy wskazuje, że chodzi tu o struktury półprzewodnikowe wykonane z pierwiastków grup III-V oraz, że struktury te rozważane są do wykorzystania w urządzeniach przeznaczonych do emisji promieniowania podczerwonego w zakresie 3-10  $\mu\text{m}$ .

Rozdział drugi składa się z czterech, w większości krótkich, podrozdziałów. Pierwszy z nich zawiera podstawowe informacje dotyczące struktury krystalicznej ciał stałych. W drugim omawiane są podstawy modelu pasmowego ciała stałego (w szczególności półprzewodnika) oraz problem obliczenia koncentracji nośników w pasmach przewodnictwa i walencyjnym. Trzeci podrozdział poświęcony jest studniom kwantowym oraz wyznaczaniu stanów energetycznych w tego typu strukturach. W ostatnim podrozdziale autor przedstawia podstawowe informacje o przejściach optycznych w strukturach półprzewodnikowych.

W rozdziale trzecim, składającym się z pięciu podrozdziałów, Doktorant przedstawia przegląd półprzewodnikowych źródeł promieniowania na zakres średniej podczerwieni. Pierwszy podrozdział zawiera bardzo podstawowe informacje na temat budowy diod i laserów półprzewodnikowych. W następnym podrozdziale przedyskutowano możliwości materiałowe konstrukcji obszarów czynnych wspomnianych przyrządów, a w szczególności diod laserowych, międzypasmowych laserów kaskadowych wykorzystujących przejścia międzypasmowe oraz kwantowych laserów kaskadowych wykorzystujących przejścia wewnątrzpodpasmowe. Oprócz materiałów III-V, które badane są w pracy, dyskutowane są także materiały z grupy II-VI. Trzeci podrozdział poświęcony jest dokładniejszemu przedstawieniu budowy obszarów czynnych kwantowych laserów kaskadowych oraz omówieniu zasady ich działania, a czwarty obejmuje podobną tematykę ale w odniesieniu do międzypasmowych laserów kaskadowych. Ostatni podrozdział zawiera podstawowe informacje odnośnie działania i budowy półprzewodnikowych diod superluminescencyjnych.

Rozdział czwarty ma tytuł „Wybrane techniki wzrostu epitaksjalnego struktur półprzewodnikowych i ich charakterystyki strukturalnej” i składa się z 6 podrozdziałów.

Wbrew tytułowi większość tego rozdziału poświęcona jest technikom wzrostu epitaksjalnego. Doktorant omawia epitaksję z fazy ciekłej (podrozdział trzeci), epitaksję z fazy gazowej ze związków metaloorganicznych (podrozdział czwarty) oraz epitaksję z wiązek molekularnych (podrozdział piąty). Dwa pierwsze podrozdziały to krótki wstęp mówiący ogólnie o modelach wzrostu warstw epitaksjalnych oraz podrozdział omawiający defekty w sieci krystalicznej. Dopiero ostatni szósty podrozdział zajmuje się rentgenografią strukturalną.

Zamykający pierwszą część pracy rozdział piąty opisuje techniki badawcze i układy pomiarowe wykorzystywane w badaniach opisywanych w recenzowanej rozprawie i stanowi naturalne przejście między częścią wstępną, a zasadniczą treścią pracy. Rozdział ten składa się z trzech krótkich lub nawet bardzo krótkich podrozdziałów. W pierwszym podrozdziale mowa jest o pomiarach widm fotoluminescencji, a w drugim o pomiarach widm odbicia i fotoodbicia. Trochę bardziej rozbudowany podrozdział trzeci omawia spektroskopię fourierowską w podczerwieni. Między innymi znajduje się tu, schemat i zdjęcia układu pomiarowego wykorzystanego przez Doktoranta w jego badaniach.

Druga część pracy to przede wszystkim cztery rozdziały przedstawiające wyniki uzyskane przez Doktoranta. Każdy z nich zawiera opis konkretnej próbki (struktury półprzewodnikowej), zebrane wyniki pomiarowe oraz ich analizę.

Rozdział szósty poświęcony został studniom kwantowym GaInAsSb/AlGa(In)AsSb dopasowanym do podłoża GaSb. Studnie te zaprojektowano jako obszary czynne diod superluminescencyjnych mających emitować promieniowanie powyżej 3  $\mu\text{m}$ . Badania wykonano dla trzech próbek o różnym składzie materiałowym. Próbkę wytworzono w Optoelectronics Research Centre na Uniwersytecie Tampere w Finlandii. Projekt próbek wykonany został we współpracy ośrodka polskiego i fińskiego. Do określenia struktury pasmowej użyto oprogramowania komercyjnego nextnano. Próbka A była próbką referencyjną z projektowanym maksimum emisji na 2.5  $\mu\text{m}$ . Próbka B zawierała większą ilość In w studni kwantowej. Natomiast w próbce C zastosowano dodatkową warstwę bariery z materiału AlGaInAsSb z odpowiednio dobraną zawartością As w celu kompensacji naprężeń. Dla wszystkich próbek wykonano pomiary widma fotoluminescencji w temperaturze 77 K. W celu lepszego wyjaśnienia wyników eksperymentalnych wykonano dodatkowo pomiary widm fotoluminescencji dla różnych temperatur próbki aż do 310 K. Efektem pośrednim tych wyników było m.in. opracowanie zależności wyrażającej wartość przerwy energetycznej materiału studni od temperatury. Wyniki potwierdziły tezę, że zwiększenie zawartości indu w próbkach przesunęło emisję w stronę fal dłuższych (nawet powyżej 3  $\mu\text{m}$ ). Niestety, jak wykazano w pracy, skutkuje to pojawieniem się dodatkowych kanałów rekombinacji, które mogą być związane z klasteryzacją atomów indu lub powstawaniem defektów punktowych najprawdopodobniej na granicach warstw w złożonych wieloskładnikowych strukturach półprzewodnikowych. Defekty te, jak wskazuje Doktorant, stanowią zapewne centra strat nośników w strukturze, co przekładać się będzie na pogorszenie parametrów roboczych gotowych przyrządów.

W rozdziale 7 składającym się z dwóch podrozdziałów Doktorant przedstawia wyniki pomiarów uzyskane dla studni kwantowych InAsSb/InAsSbP dopasowanych do podłoża

InAs. Tego typu studnie próbuje się projektować na zakres emisji 3-3.5  $\mu\text{m}$  jako obszary czynne laserów półprzewodnikowych. Uwaga Doktoranta skupia się na próbkach wykonanych techniką MOVPE, co może mieć przewagę nad dotychczasowym podejściem bazującym na MBE, gdyż teoretycznie umożliwia obniżenie kosztów wytwarzania i bardziej masową produkcję urządzeń. Próbki wykonane w zespole badawczym z Instytutu Ioffego z Sankt Petersburga w Rosji różniły się szerokością studni kwantowej (18 i 5 nm). Ponieważ badane próbki cechują się skomplikowanymi widmami fotoluminescencji wynikającymi z dużej liczby pasm emisji, w pracy przeprowadzono najpierw badania pojedynczych grubych warstw InAsSbP i InAsP na podłożu InAs, celem wyznaczenia referencyjnych widm PL. Zauważono, że intensywność fotoluminescencji silnie spada ze wzrostem temperatury próbek, co świadczy o wzroście procesów nieradiacyjnych i oczywiście niekorzystnie rokuje dla efektywnego działania emiterów. Przy okazji wyznaczono parametry Varshni'ego zależności wartości przerwy energetycznej badanych warstw od temperatury. Badania fotoluminescencji studni kwantowych połączone były natomiast z teoretycznymi obliczeniami wyznaczenia poziomów energetycznych w badanych strukturach przy wykorzystaniu komercyjnego oprogramowania. Obliczenia różniły się od wyników uzyskanych z pomiarów. Większą zgodność uzyskano zakładając nieznaczne poszerzenie QW, co według Doktoranta odpowiada tworzeniu się obszaru przejściowego między QW i barierą o szerokości około 3 nm. Potwierdza to zaobserwowanie dużej liczby stanów międzypowierzchniowych na heterozłączach, których źródłem są najprawdopodobniej defekty punktowe. Stany te szczególnie silnie ujawniają się w niskich temperaturach. Sukcesem tej części badań jest pierwsza obserwacja sygnału PL dla długości fali 3.49  $\mu\text{m}$  w cienkich studniach kwantowych (5 nm) w temperaturach bliskich temperaturze pokojowej (280 K). Pozwala to z pewnym optymizmem zakładać możliwość wykorzystania tych materiałów jako obszarów czynnych laserów emitujących w tym zakresie spektralnym.

Ósmy rozdział pracy dotyczy określenia parametrów optycznych struktury obszaru czynnego złożonego z warstw InGaAs/AlInAs lasera QCL, wytworzonych techniką MOVPE na podłożu InP. Jednym z celów badań było określenie jak parametry optyczne wspomnianej struktury zależą od temperatury wzrostu górnej warstwy falowodu. Różne wersje lasera zostały wykonane w Zakładzie Mikroelektroniki i Nanotechnologii Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Z uwagi na to, że technika MBE ma problem z wytworzeniem grubych warstw półprzewodnikowych oraz inkorporacją atomów fosforu do tej pory konstrukcje takie były wykonywane techniką mieszaną tzn. obszar czynny za pomocą techniki MBE a falowód techniką MOVPE. Ujednolicenie procesu może przynieść obniżenie kosztów i skrócenie czasu wzrostu, Należy się jednak liczyć z pogorszeniem własności optycznych struktury. Wyniki eksperymentalne uzyskane w pracy doktorskiej były porównywane z wynikami obliczeń komputerowych, których autorem był członek zespołu, w którym pracuje Doktorant dr hab. inż. Krzysztof Ryczko. Zmierzone w różnych temperaturach widma fotoluminescencji i ich porównanie z wynikami obliczeniowymi umożliwiły zidentyfikowanie najważniejszych przejść optycznych. Zaobserwowano znaczną zmianę intensywności fotoluminescencji dla próbek z falowodem wytworzonym w innych (wyższych) temperaturach niż temperatura wzrostu pozostałej części struktury laserowej. Efekt ten jak twierdzi Doktorant jest spowodowany zwiększoną liczbą defektów

powstających przy wyższej temperaturze wzrostu falowodu i zwiększeniem jego chropowatości, co prowadzi do zwiększonego rozpraszania sygnału. Największą intensywność PL otrzymano stosując niskie i te same temperatury wzrostu dla całej struktury. Zmierzone przejścia optyczne dobrze odpowiadały wynikom obliczeniowym. Występowały jednak niewielkie przesunięcia energii i wyraźny spadek intensywności widm wraz ze wzrostem temperatury wzrostu falowodu. W celu wyjaśnienia tych rozbieżności Doktorant zaproponował model interdyfuzji atomów glinu i galu prowadzący do zmiany profilu granic między poszczególnymi warstwami tworzącymi studnie kwantowe obszaru czynnego lasera. W obliczeniach pomógł dr hab. inż. Krzysztof Ryczko. Jak wynika z treści pracy wspomniany prosty model dość dobrze wyjaśnia procesy, które mogą prowadzić do pogorszenia własności optycznych urządzenia.

Ostatni dziewiąty rozdział opisujący wyniki pomiarowe zawiera informacje o pomiarach koncentracji nośników w warstwach InGaAs stosowanych w obszarach czynnych kwantowych laserów kaskadowych. Odpowiednie próbki zostały wytworzone przez zespół z Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki wchodzący w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz techniką epitaksji z wiązki molekularnej. Doktorant testuje tu możliwości nowej bezkontaktowej metody pomiaru koncentracji nośników opartej o efekt Berremana. Zjawisko to można zaobserwować jako zwiększenie absorpcji promieniowania w polaryzacji p, kiedy funkcja dielektryczna osiąga zero przy częstotliwości plazmowej. Częstotliwość ta jest bezpośrednio zależna od koncentracji nośników, co pozwala wyznaczyć wielkość tej koncentracji. Do wyznaczenia odpowiednich częstotliwości można użyć np. technik fotoodbicia, co też czyni Doktorant. Nominalne koncentracje nośników w badanych strukturach, służące do testowania metody, obliczono przez interpolację krzywych z pomiaru Halla. Z wyników przedstawionych w pracy wynika, że różnice między koncentracjami nominalnymi a zmierzonymi nową techniką nie są duże. Wyniki wskazują jednak, że we wszystkich przypadkach zmierzone wartości są mniejsze od nominalnych. Ponieważ przy wyznaczaniu koncentracji korzysta się nie tylko z częstości plazmowych ale i z wartości masy efektywnej nośników, Doktorant zaproponował wprowadzenie odpowiedniej poprawki. Uzyskane w ten sposób poprawione wartości są nadal nieco niższe od nominalnych, jednak różnica jest tu mniejsza w porównaniu z pierwszym prostszym podejściem. Jako jedną z przyczyn wyjaśnienia tej rozbieżności Doktorant sugeruje możliwy wpływ jakości osadzanych kontaktów podczas używania układu do pomiarów efektu Halla. Mimo pewnych rozbieżności wydaje się jednak, że test metody wypadł pozytywnie, a jej zaletami jest nieinwazyjność w próbkę, stosunkowo proste pomiary i możliwość stosowania do różnego rodzaju struktur wykonanych z różnych materiałów i wytwarzanych przy użyciu różnych technik.

Pracę zamyka rozdział dziesiąty, w którym Doktorant przedstawił zwięzłe podsumowanie uzyskanych wyników.

Na końcu pracy zamieszczono spis cytowanej w rozprawie literatury.

Przedstawiona rozprawa jest zestawieniem wyników badań, prowadzonych przez autora na przestrzeni ostatnich lat, obejmujących tematykę związaną głównie z technikami optycznymi służącymi do wyznaczania parametrów materiałowych struktur półprze-

wodnikowych, które projektowane są na obszary czynne diod i laserów półprzewodnikowych emitujących promieniowanie w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni. Badania te to przede wszystkim pomiary fotoluminescencji i widm odbicia ale także teoretyczne wyznaczanie pasm i stanów energetycznych w cienkowarstwowych strukturach półprzewodnikowych oraz modelowanie zjawisk fizycznych jak np. model niewielkiej dyfuzji atomów na granicach warstw (heterostruktur półprzewodnikowych) w celu wytłumaczenia zaobserwowanych różnic między wynikami eksperymentalnymi i teoretycznymi. Praca zawiera opis przeprowadzonych doświadczeń, zestawienie otrzymanych wyników, ich szczegółową analizę i dyskusję wraz z zestawieniem końcowych wniosków. W pracy nie zabrakło także wstępu teoretycznego w skład którego wchodzi m.in. opis technik pomiarowych używanych przez Doktoranta w trakcie badań. Na każdym etapie badań Doktorant podpira się literaturą naukową.

Jako najbardziej wartościowe i zarazem oryginalne wyniki pracy uważam wszystkie dane eksperymentalne uzyskane w pomiarach w rozdziałach 6, 7 i 8. W szczególności są to widma fotoluminescencji dla studni kwantowych GaInAsSb/AlGa(In)AsSb dopasowanych do podłoża GaSb, dzięki którym można było określić przejścia optyczne w tych strukturach. Ważnym elementem tych badań było także zbadanie wpływu bariery zwiększającej potencjał wiążący dziur w paśmie walencyjnym na powstawanie defektów sieci krystalicznej w pobliżu granic warstw półprzewodnikowych. Podobne oryginalne wyniki Doktorant uzyskał w rozdziale 7 dla studni kwantowych InAsSb/InAsSbP dopasowanych do podłoża InAs. Dużym sukcesem tej części badań jest także pierwsza obserwacja sygnału fotoluminescencji dla długości fali 3.49  $\mu\text{m}$  w 5 nm studniach kwantowych InAsSb/InAsSbP w temperaturach bliskich temperaturze pokojowej. Dużą wartością, szczególnie dla grup zajmujących się obliczeniami numerycznymi i teoretycznymi, mają także uzyskane wyrażenia określające zmianę przerwy energetycznej badanych warstw półprzewodnikowych z rozdziałów 6 i 7 od temperatury (parametry Varshni'ego). Interesujące i oryginalne wyniki zawiera także rozdział ósmy, zawierający widma fotoluminescencji i fotoodbicia dla struktury kwantowego lasera kaskadowego w całości wytworzonego techniką MOVPE. W celu wytłumaczenia różnic między eksperymentem i obliczeniami numerycznymi Doktorant zaproponował tu własny autorski model niewielkiej dyfuzji atomów na granicach warstw. Bardzo wysoko oceniam też rozdział 9, w którym Doktorant testuje i przygotowuje do „komercyjnych pomiarów” nową metodę bezinwazyjnego wyznaczania koncentracji nośników w próbkach półprzewodnikowych wraz z zaproponowanymi przez Doktoranta poprawkami.

Jak wynika z dorobku naukowego przedstawionego przez Doktoranta bazą dla doktoratu były cztery publikacje w czasopismach: *Optical Materials*, *Applied Physics Express*, *Journal of Physics Communications* oraz *Materials*. Trzy z nich to czasopisma za 70 pkt., a czwarte za 140 pkt. Warto podkreślić, że Doktorant jest w nich pierwszym autorem. Oprócz tego w dorobku naukowym Doktoranta znajdują się trzy inne publikacje oraz siedem wystąpień konferencyjnych. Doktorant brał udział jako wykonawca w jednym projekcie naukowym finansowanym przez NCN i jednym finansowanym przez NCBiR. Doktorant otrzymał także stypendium MNiSW „Młodzi Naukowcy” o tematyce zgodnej z recenzowaną pracą. Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że dorobek Doktoranta jest na dobrym poziomie i spełnia wymogi dorobku naukowego doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

Warto podkreślić, że prowadząc badania w ramach doktoratu Doktorant nie tylko udowodnił, że opanował odpowiednie techniki pomiarowe w swojej specjalności ale także pokazał, że nie obce mu są wybrane techniki obliczeniowe jak i teoretyczne podejście pomagające głębiej zrozumieć otrzymywane wyniki eksperymentalne. Dorobek publikacyjny pokazuje też, że i na tym polu Doktorant radzi sobie całkiem nieźle. Godny podkreślenia jest też fakt współpracy z różnymi ośrodkami badawczymi z kraju i z zagranicy. Wszystko to wskazuje, że Doktorant jest gotowy do podjęcia bardziej samodzielnych działań naukowych.

Praca doktorska Pana mgr inż. Marcina Kurki jest w ogólności napisana poprawnie. Jest to praca zarówno merytorycznie dobra, jak i pod względem jej czytelności. Układ pracy jest logiczny, a przypisy literaturowe poprawnie dobrane (mamy łącznie 153 pozycje literaturowe). Autor nie ustrzegł się jednak pewnych uchybień. Wykaz użytych skrótów nie jest zrobiony alfabetycznie, co może utrudniać znalezienie konkretnego skrótu. Występuje sporo literówek (np. „płytki stany”, „przedstaiwającym”, „ekspeymencie”) i zjedzonych wyrazów (np. „Celem tej części badań zmierzenie ...”; „Dyslokacje krawędziowe powstają zostanie wprowadzona ...”). Niektóre z tych błędów mogą znacznie zmieniać sens przedstawianej informacji np. 105 V/cm zamiast  $10^5$  V/cm. Dla niektórych rysunków brakuje opisów tego co na nich oznaczono (np. rys.2.1, rys.2.3) lub narysowano (np. rys.4.8, rys.8.6). W niektórych wzorach nie wytłumaczono wszystkich oznaczeń (np. 2.15 –  $E_0$ ; 2.19a –  $\beta$ ; 2.35a –  $\varepsilon$ ; 5.1 –  $\rho$  i  $\phi$ ). Spora liczba zdań zawiera błędy interpunkcyjne. Nie do końca jasne jest dlaczego autor niektóre rysunki (w szczególności te dość podstawowe) prezentuje z opisem polskim a inne z angielskim (np. rys.3.7, rys.3.8, 3.13)? Są też rysunki np. rys.7.4, gdzie występuje zarówno opis angielski jak i polski. Część zaprezentowanych w pracy rysunków nie ma odniesienia w tekście pracy (np. rys.2.3 rys.3.12, rys.4.1, rys.4.9). Na stronie 33 zamiast „na rysunku 3.3” powinno być „na rysunku 3.10”. Zdarza się, że rysunek jest na jednej stronie, a podpis do niego na drugiej (np. rys.4.10). Często w tekście pracy znajdującym się bezpośrednio pod podpisem rysunku pojawia się dodatkowa niepotrzebna biała linia (np. str.22, str.24, str. 58). W innych miejscach rysunek zlewa się z tekstem (np. str. 48, 51, 56, 68). W niektórych miejscach autor zapomniał wpisać numeru cytowanej literatury (np. na str. 43 i 76 mamy „[?]”). Niezrozumiałe jest też pozostawianie bardzo dużych odstępów przed i po niektórych wzorach (np. wzór 6.1, 6.2, 8.1, 9.1). Mamy tu chyba jakieś błędy formatowania tekstu. Należy jednak zaznaczyć, że przytoczone błędy edytorskie nie wpływają znacząco na czytelność i stronę merytoryczną rozprawy.

Doktorant obliczając w rozdziale 6 i 7 strukturę pasmową badanych próbek i ich poziomy energetyczne korzysta z komercyjnego oprogramowania. Nie ma jednak informacji na czym te obliczenia faktycznie polegają i jakich danych wejściowych używa. Zapewne jakiś mas efektywnych, wartości przerw energetycznych, wartości nieciągłości pasm itp. Trudno ustosunkować się do tych obliczeń nie mając tych informacji, a obliczenia te przecież stanowią bazę do dyskusji uzyskanych danych eksperymentalnych. W rozdziale 8, mimo że oprogramowanie jest napisane w zespole, w którym pracuje Doktorant, sytuacja jest podobna. W rozdziale 9 są wprawdzie odwołania do literatury ale wydaje się, że zamieszczenie tych informacji w treści pracy znacznie by podwyższyło jej wartość. W rozdziale 9.3 zastanawiające jest użycie przez autora pracy zwrotu „przedstawiliśmy metodę optyczną”. Czy liczba mnoga jest tu tylko przejęzyczeniem, czy ma głębsze znaczenie?

Jedną ze słabszych stron rozprawy doktorskiej jest niewielkie sprzężenie zwrotne między uzyskanymi wynikami a wytwórcami laserów. Przedstawione badania raczej ograniczają się do określenia własności optycznych próbek i ewentualnie próby wyjaśnienia tych własności. Brak jest pokazania jak badane struktury półprzewodnikowe faktycznie zachowują się w działających przyrządach. Podobnie nie widzimy prób modyfikacji próbek (wraz z teoretycznym ich uzasadnieniem) i sprawdzenia tych modyfikacji w działających urządzeniach. Myślę, że warto w przyszłych badaniach podjąć takie próby. Wspomniane tu uwagi nie są raczej winą Doktoranta, gdyż miał on zapewne bardzo ograniczony wpływ na takie działania.

Uważam, że recenzowana rozprawa dużo by zyskała, gdyby znacznie zredukować materiał przedstawiony w rozdziałach 2 i 3. Pisanie o podstawach półprzewodników, podstawach teorii pasmowej czy przedstawianie najprostszego skokowego homozłącza p-n (zamiast np. choćby heterozłącza z materiałów badanych w pracy) mija się z celem, gdyż ten materiał można znaleźć w wielu książkach (także wydanych w Polsce). Zamiast tego można by było opisać bardziej szczegółowo aspekty fizyczne pomiarów optycznych stosowanych w pracy lub wyjaśnić bardziej szczegółowo fizyczną stronę działania laserów ICL i QCL, gdyż przeciętny czytelnik może mieć problemy ze zrozumieniem tego materiału.

Podsumowując, uważam, że wspomniane wyżej niejasności oraz usterki redakcyjne nie mają jednak wpływu na moją pozytywną ocenę całej recenzowanej rozprawy. W mojej opinii rozprawa jest bardzo wartościowa i wnosi nową znaczącą wiedzę w temacie badań optycznych cienkowarstwowych struktur półprzewodnikowych projektowanych jako obszary czynne diod i laserów półprzewodnikowych emitujących w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni, a w szczególności fal w okolicach 3-3.5  $\mu\text{m}$  oraz 9-10  $\mu\text{m}$ . Rozprawa spełnia wszystkie zarówno zwyczajowe, jak i ustawowe (ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami)) wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności pracom doktorskim w dyscyplinie nauki fizyczne. **Wnioskuje więc do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Marcina Kurki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Robert Sarzała

15 listopada 2021r.

Robert Sarzała