

Łódź, 27 sierpnia 2024 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.
„Zbadanie właściwości optycznych niskowymiarowych struktur
półprzewodnikowych wykorzystywanych jako obszar aktywny
detektorów na zakres średniej podczerwieni”
Autor rozprawy: mgr inż. Michał Rygała
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 detektorów pracujących w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni, a w szczególności, jak zdefiniował sam Doktorant, fal z przedziałów 3-8 μm oraz 8-15 μm . Celem przedstawionych w rozprawie badań było eksperymentalne wyznaczenie energii przejść optycznych w wybranych strukturach półprzewodnikowych i fizyczne wytłumaczenie obserwowanych wyników doświadczalnych. W pracy skupiono się przede wszystkim na: badaniach optycznych supersieci II-typu InAs/GaSb (osadzonych na domieszkowanym na typ n podłożu z arsenku galu) w tym na badaniu interfejsu w analogicznych supersieciach ale wzrastanych na domieszkowanym na typ n podłożu GaSb, badaniach optycznych supersieci II typu InAs/InAsSb wzrastanych na podłożu GaSb oraz identyfikacją przejść optycznych zachodzących w rezonansowych diodach tunelowych wzrastanych na podłożu GaSb domieszkowanym na typ p z warstwą absorpcyjną $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.2}\text{Sb}_{0.8}$ o różnej grubości. Wspomniane wyżej urządzenia istotne są z punktu widzenia przede wszystkim detekcji gazów czy systemów optycznej detekcji składu atmosfery.

Rozprawa obejmuje łącznie około 112 stron, z czego 89 stron stanowi właściwą treść rozprawy. Reszta to streszczenie, streszczenie w języku angielskim, podziękowania, spis treści, wykaz przytoczonej literatury, wykaz użytych skrótów oraz wykaz dorobku naukowego autora rozprawy. Właściwą część pracy stanowi 9 rozdziałów, z których ostatni jest podsumowaniem pracy.

Rozprawę można podzielić na dwie zasadnicze części. Rozdziały 1-4 zawierają materiał wprowadzający i mają charakter bardziej ogólny. Możemy tu przeczytać informacje zupełnie podstawowe obejmujące podstawy spektroskopii absorpcyjnej, detekcji gazów, monitoringu składu atmosfery oraz podstawy fizyki półprzewodników. W części tej przedstawiono także podstawy budowy detektorów wykorzystujących badane w doktoracie struktury półprzewodnikowe (stanowiące ich obszary czynne), a także informacje ściśle związane z tematyką pracy takie jak dość szczegółowy opis technik pomiarowych używanych podczas prac badawczych Doktoranta. Drugą część pracy stanowią rozdziały od 5 do 8. Obejmują one szczegółowy opis badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej wraz z wynikami, ich analizą i sformułowanymi wnioskami końcowymi.

Rozdział pierwszy składający się z pięciu podrozdziałów stanowi wstęp do całej pracy. Znajdziemy w nim między innymi ogólne nakreślenie tematyki pracy z położeniem większego nacisku na zastosowania półprzewodnikowych detektorów pracujących w podczerwieni. Jak wynika z tytułu ostatniego 5 podrozdziału powinien on zawierać cel i zakres pracy. Niestety podrozdział ten zawiera raczej informacje o zawartości pracy niż o jej szczegółowym celu. Jak możemy przeczytać: *W pracy opisano wyniki badań spektroskopowych oraz interpretację tych wyników dla różnego rodzaju materiałów przeznaczonych dla detektorów na zakres średniej oraz długofalowej podczerwieni. Badania składały się z szeregu eksperymentów przeprowadzonych na...* i tu następuje wyszczególnienie odpowiednich materiałów i struktur półprzewodnikowych. W rozdziale tym nie ma więc jasno określonej tezy pracy. Jednak z treści całego rozdziału można domyślać się, że chodzi o wyznaczenie przejść optycznych w badanych materiałach, a tym samym o odpowiedzenie na pytanie czy dane materiały nadają się do wybranych zastosowań i spełniają pewne bliżej nieokreślone kryteria. Wyniki uzyskane w pracy miały też zapewne dać wiele informacji zwrotnych dla zespołów technologicznych wytwarzających badane struktury przez co powinny wpłynąć na udoskonalenie badanych materiałów i zwiększenie ich wydajności i żywotności jako obszarów czynnych detektorów podczerwieni. Na końcu tego rozdziału możemy się dowiedzieć, że doktorat był realizowany w Katedrze Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Badania przeprowadzone w ramach doktoratu były finansowane ze środków Katedry oraz dwóch projektów badawczych: jednego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki oraz drugiego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Rozdział drugi składa się z czterech, krótszych i dłuższych, podrozdziałów. Pierwszy z nich, bardzo krótki, zawiera podstawowe informacje dotyczące emiterów promieniowania. Drugi poświęcony jest detektorom, a tak naprawdę to materiałom na obszary czynne detektorów podczerwieni. Omawiane są tu zarówno podstawowe stopy półprzewodnikowe jak HgCdTe, PbSe, PbS czy bardziej związane z tematyką pracy InSb i InAsSb, a także nanostruktury zbudowane ze studni kwantowych (QWIP) w tym supercieci drugiego typu (T2SL) InAs/GaSb i InAs/InAsSb. W podrozdziale tym zawarte są także informacje o kwantowych kaskadowych detektorach podczerwieni ze rozróżnieniem na wewnątrzpodpasmowe kwantowe kaskadowe detektory podczerwieni (IS-QCIP, *intersubband quantum cascade infrared photodetector*) oraz międzypasmowe kwantowe kaskadowe detektory podczerwieni (IB-QCIP, *interband quantum cascade infrared photodetector*).

Informacje te uzupełnione są jeszcze o podstawowe dane o rezonansowych diodach tunelowych (RTD, *resonant tunneling diode*). Trzeci podrozdział poświęcony jest bardziej szczegółowemu omówieniu budowy wspomnianych wcześniej struktur półprzewodnikowych i ogólnej zasady ich działania. Wydaje się jednak, co prawdopodobnie wynika z zainteresowań Doktoranta, że główny nacisk położony jest tu na wewnętrzną budowę omawianych nanostruktur, natomiast budowa i zasada działania detektorów jako całości jest potraktowana marginalnie. To duża szkoda, gdyż po dodaniu tych informacji rozdział ten mógłby stanowić dobry materiał dydaktyczny dla innych studentów, doktorantów czy też osób wkraczających w tą tematykę. Ostatni podrozdział zawiera bardzo zwięzłe wybrane informacje co do wydajności i możliwości rozwoju detektorów podczerwieni.

W rozdziale trzecim, składającym się ze wstępu i czterech podrozdziałów. Doktorant przedstawia wybrane informacje z fizyki kwantowej i fizyki półprzewodników. Większość z nich na poziomie studiów pierwszego stopnia. Dobór tematów odpowiada jednak zagadnieniom poruszonym w dalszej części rozprawy.

Rozdział czwarty ma tytuł „Metody badawcze” i składa się z trzech podrozdziałów. Jest to rozdział zamykający pierwszą część pracy. W pierwszych dwóch podrozdziałach Doktorant dość szczegółowo przedstawia podstawy działania oraz schematy układów spektroskopowych wykorzystanych w swoich badaniach eksperymentalnych. W szczególności zostały tu omówione dwie metody spektroskopowe – fourierowska (w wersji emisyjnej i absorpcyjnej) oraz spektroskopia czasowo-rozdzielczej absorpcji przejściowej, a dokładnie metoda pompa-sonda w układzie odbiciowym, umożliwiająca badanie dynamiki nośników w materiałach półprzewodnikowych. Trzeci podrozdział zawiera natomiast podstawowe informacje o oprogramowaniu *nextnano*, którego Doktorant użył do modelowania właściwości optycznych oraz struktury pasmowej części badanych przez siebie materiałów. Warto zaznaczyć, że cały ten rozdział jest bardzo ściśle związany z główną tematyką recenzowanej rozprawy. Stanowi on dobre wprowadzenie do prezentowanych dalej wyników pomiarowych oraz jest dobrym materiałem dydaktycznym dla osób rozpoczynających podobne badania eksperymentalne.

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

Rozdział piąty zawiera wyniki badań optycznych supersieci II-typu składających się z InAs/GaSb o różnych okresach wzrastających na podłożu z arsenku galu. Doktorant podaje, że przedstawione w tym rozdziale wyniki uzyskane zostały w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie oraz Ohio State University w Stanach Zjednoczonych. O ile w pracy znajduje się informacja, że badane w pracy próbki zostały wytworzone w grupie z Ohio State University przy pomocy epitaksji z wiązki molekularnej, to trudno jest znaleźć informację jaki był wkład Wojskowej Akademii Technicznej? Rozdział ten składa się z czterech podrozdziałów i wstępu, w którym Doktorant bardzo ogólnie przedstawia wyniki dotychczasowych badań prowadzonych przez inne grupy badawcze we wspomnianym temacie. Wydaje się, że czytelnik oczekuje w tym miejscu postawienia wyraźnie określonej tezy (uzasadnienia prowadzonych eksperymentów), co jednak nie następuje. Poszczególne podrozdziały zawierają szczegółowy opis badanych próbek,

wyniki badań fotoluminescencji, wyniki badań fotoodbicia oraz wyniki symulacji numerycznych badanych struktur. Przeprowadzone pomiary fotoluminescencji w funkcji temperatury pozwoliły m.in. określić parametry Varshniego dla wszystkich badanych próbek o różnych okresach. Uzyskano tu dobrą zgodność z wynikami prezentowanymi w literaturze dla supersieci InAs/GaSb. Natomiast badania fotoodbicia w połączeniu z obliczeniami numerycznymi struktury pasmowej pozwoliły zidentyfikować zaobserwowane przejścia optyczne, a w szczególności ich zmienny charakter dla różnych wartości wektora falowego. Należy jednak podkreślić, że wyniki obliczeń numerycznych nie są osiągnięciem Doktoranta do czego zresztą sam się przyznaje. Zostały one uzyskane przez dra hab. inż. Krzysztofa Ryczko, prof. Uczelni, który wykorzystał swoje autorskie oprogramowanie. Jak podaje Doktorant uzyskanie tych wyników było możliwe dzięki wykorzystaniu danych eksperymentalnych uzyskanych przez Doktoranta i dopasowania dzięki nim różnych parametrów modelu numerycznego. Niestety z treści pracy nie dowiadujemy się o jakie parametry konkretnie chodzi oraz jakiego zestawu parametrów używa model numeryczny? Być może informacje te zawarte są w cytowanej publikacji [67]? Wydaje się jednak, że powinny one znaleźć się w rozprawie doktorskiej.

W rozdziale szóstym składającym się z pięciu podrozdziałów Doktorant przedstawia wyniki badań dotyczące interfejsu supersieci II-typu InAs/GaSb wzrastanych na GaSb. Podobnie jak w poprzednim rozdziale podrozdziały tego rozdziału zawierają kolejno szczegółowy opis badanych próbek, wyniki badań fotoluminescencji, wyniki badań fotoodbicia, wyniki symulacji numerycznych badanych struktur półprzewodnikowych oraz dodatkowo badania absorpcji przejściowej. Wyniki badań otrzymano w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech, gdzie zostały wytworzone badane próbki. W tej części badań Doktorant przeprowadził weryfikację wpływu procesów inżynierii interfejsu stosowanych podczas wzrostu supersieci InAs/GaSb. Badania obejmowały próbkę supersieci bez żadnej ingerencji w interfejs między poszczególnymi parami materiału (była to próbka referencyjna), próbkę z interfejsem przejściowym otrzymanym metodą czasowego przerywania wzrostu oraz próbkę z monowarstwą InSb między parami materiału InAs/GaSb. Jak pokazują wyniki przejścia optyczne zaobserwowane w wynikach doświadczalnych wykazują wysoką zgodność z obliczeniami numerycznymi przy założeniu rosnącego udziału InSb w składzie czteroskładnikowej warstwy interfejsowej GaInAsSb. Wyniki pomiarów absorpcji przejściowej pozwoliły z kolei na wyznaczenie dwóch charakterystycznych czasów zaniku nośników - pierwszy z zakresu dziesiątek pikosekund, który został utożsamiony z termalizacją dziur w paśmie walencyjnym, podczas gdy drugi, z zakresu setek pikosekund do pojedynczych nanosekund odpowiadał za rekombinację promienistą nośników. Na uwagę zasługuje fakt, że w tej części badań Doktorant nie tylko uzyskał wyniki eksperymentalne ale także samodzielnie przeprowadził badania numeryczne oraz ich porównanie i analizę z wynikami pomiarowymi. Wykorzystał tu komercyjne oprogramowanie *nextnano*. Znowu jednak dostajemy ogólny opis tych symulacji bez podania konkretnych wartości użytych parametrów. Cały rozdział zawiera wiele interesujących wyników jednak wydaje się, że brakuje tu jakiegoś podsumowania, wniosków itp. mówiących o tym czy cele badawcze zostały osiągnięte, co jest istotną nowością

w tych badaniach i jak przeprowadzone badania wpłynęły na rozwój czy ewolucję badanych struktur półprzewodnikowych?

Siódmy rozdział pracy dotyczy określenia parametrów optycznych supersieci II-typu składających się z InAs/InAsSb otrzymanych w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech. Pod względem układu rozdział ten jest niemal identyczny z poprzednim rozdziałem. Mamy więc kolejno szczegółowy opis badanych próbek, wyniki badań fotoluminescencji, wyniki badań fotoodbicia, wyniki symulacji numerycznych badanych struktur półprzewodnikowych przeprowadzone przez Doktoranta za pomocą pakietu *nextnano* oraz badania absorpcji przejściowej. Doktorant przebadał trzy próbki supersieci InAs/InAsSb o tym samym składzie różniące się długością okresu - 5, 6 oraz 8 nm. Wyniki badania fotoluminescencji w funkcji temperatury ujawniły obecność sygnałów o charakterze defektowym. Wyznaczono energię termiczną aktywacji defektów. Naturę defektową sygnałów udało się potwierdzić poprzez analizę intensywności fotoluminescencji w funkcji mocy pobudzenia. Z kolei przeprowadzone przez Doktoranta badania fotoodbiciowe w połączeniu z obliczeniami struktury pasmowej pozwoliły wyznaczyć, między innymi, parametr opisujący nieciągłość pasm walencyjnych pomiędzy InAs, a stopem InAs_{0.65}Sb_{0.35} (VBO). Dodatkowo wyniki pomiarów absorpcji przejściowej przez ich porównanie do analogicznych wyników otrzymanych dla supersieci InAs/GaSb ujawniły obecność dodatkowego mechanizmu termalizacji, zinterpretowanego przez Doktoranta jako interakcje dziur z fononami optycznymi lub akustycznymi. Mamy więc tutaj dobre połączenie metod eksperymentalnych i symulacji numerycznych. Jednak we wstępie do rozdziału 7 jest zdanie: *dodatkowe obliczenia stanów kwantowych, na podstawie których wykonywane były obliczenia prezentowane w tej pracy zostały uzyskane w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Eindhoven University of Technology w Holandii*. Niestety wydaje się, że w pracy nie ma jednoznacznie napisane o jakie wyniki chodzi i kto je wykonał, lub jest to dobrze ukryte? Podobnie też jak w poprzednim rozdziale brakuje konkretnych danych na bazie których przeprowadzono symulacje numeryczne. Odesłanie czytelnika do dość ogólnej pozycji literaturowej nie jest w przypadku rozprawy doktorskiej dobrym rozwiązaniem.

W ósmym rozdziale Doktorant opisuje badania optyczne oraz analizę numeryczną struktury pasmowej obszaru czynnego rezonansowych diod tunelowych o czteroskładnikowej warstwie absorpcyjnej GaInAsSb. Próbki otrzymano w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech. Układ rozdziału znowu jest podobny do poprzednich dwóch podrozdziałów. Mamy więc kolejno szczegółowy opis badanych próbek, wyniki badań fotoluminescencji, wyniki badań fotoodbicia, wyniki symulacji numerycznych badanych struktur półprzewodnikowych oraz badania absorpcji przejściowej. Wyniki eksperymentalne uzyskane zostały przez Doktoranta natomiast symulacje numeryczne zostały wykonane przez mgr inż. Jakuba Ziembickiego w Katedrze Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych na Politechnice Wrocławskiej (wykorzystano tu teorię funkcjonału gęstości) oraz ponownie jak w rozdziale 5 przez dra hab. inż. Krzysztofa Ryczko, prof. Uczelni (modelowanie 8kp). Wyniki symulacji komputerowych niewątpliwie ułatwiły czy wręcz umożliwiły interpretację wyników eksperymentalnych. Trudno jednak określić czy i jaki wkład w uzyskanie tych wyników miał Doktorant, a tym samym trudno je oceniać w ramach recenzji doktoratu. Doktorant przeprowadził pomiary na dwóch strukturach rezonansowych

diod tunelowych wykorzystujących warstwę GaInAsSb o różnych grubościach. Uzyskane wyniki z badań fotoluminescencyjnych i fotoodbicia, wykonane w funkcji temperatury, wykazały obecność w widmach próbek stabilnego termicznie sygnału o energii niższej niż wartość przewidywanej przerwy wzbronionej absorbera. Zaobserwowano także, że sygnał charakteryzował się dużym stopniem liniowej polaryzacji. Według Doktoranta źródłem wysokiej polaryzacji optycznej sygnału był efekt mieszania się lekko- i ciężkodziurowych funkcji falowych w dwuwymiarowym gazie dziurowym obsadzonym do poziomu Fermiego poza punktem Γ strefy Brillouina. Wyniki badań absorpcji przejściowej pozwoliły na wyznaczenie czasu rekombinacji promienistej spolaryzowanego przejścia, a szczegółowa analiza czasów zaniku i narastania sygnałów sugerowała zdaniem Doktoranta na obecność zjawiska tunelowania nośników do dwuwymiarowego gazu z obszaru warstwy absorpcyjnej.

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

Na końcu pracy zamieszczono spis cytowanej w rozprawie literatury oraz spis dorobku naukowego Doktoranta.

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 nanostruktur półprzewodnikowych, które projektowane są na obszary czynne półprzewodnikowych detektorów promieniowania w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni. Badania te to przede wszystkim pomiary fotoluminescencji, widm odbicia i czasowe pomiary spektroskopowe ale także numeryczne wyznaczanie pasm i stanów energetycznych w cienkowarstwowych strukturach półprzewodnikowych w celu lepszej interpretacji oraz wytłumaczenia zebranych wyników eksperymentalnych. Praca zawiera opis przeprowadzonych doświadczeń, zestawienie otrzymanych wyników, ich szczegółową analizę i dyskusję wraz z przedstawieniem 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.

Z punktu widzenia niniejszej rozprawy szczególnie wartościowe są według mnie badania opisane w rozdziałach 6 i 7. Wyniki te, zarówno eksperymentalne jak i teoretyczne, zostały wykonane i zinterpretowane przez samego Doktoranta. W szczególności są to wyniki dotyczące badań interfejsu supersieci II-typu InAs/GaSb wzrastanych na GaSb oraz określenia parametrów optycznych supersieci II-typu składających się z InAs/InAsSb. Pozostałe wyniki, w szczególności eksperymentalne, zawarte w rozdziałach 5 i 8 też uważam za bardzo wartościowe. Jednak obliczenia teoretyczne pozwalające na lepszą interpretację wyników pomiarowych zostały wykonane przez osoby współpracujące z Doktorantem.

Jak wynika z dorobku naukowego przedstawionego przez Doktoranta bazą dla doktoratu były cztery publikacje w czasopiśmie: *Physical Review Applied* (w chwili złożenia rozprawy artykuł był w recenzji), *Physical Review B*, *Optica Applicata* i materiałach konferencyjnych SPIE *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XX*. Dwie z nich to publikacje za 140 pkt., a jedna za 40 pkt. Wspomniane publikacje to publikacje wieloautorskie, jednak w trzech z nich Doktorant jest pierwszym autorem. Oprócz tego w

dorobku naukowym Doktoranta znajduje się osiem innych publikacji, trzy publikacje pokonferencyjne oraz dziewięć wystąpień konferencyjnych. Doktorant brał udział jako główny wykonawca w dwóch grantach finansowanych przez NCN, jako wykonawca w jednym projekcie naukowym finansowanym przez NCN i jednym finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej oraz jednym finansowanym przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej. 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 mgra inż. Michała Rygały 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 118 pozycji literaturowych). Autor nie ustrzegł się jednak pewnych uchybień. Wykaz użytych skrótów nie jest zrobiony alfabetycznie, co może utrudniać znalezienie konkretnego skrótu. Zdarzają się literówki (np. str. 20 „matriałów”), częściej zjedzone wyrazy (np. str. 18 „Ze względu jednak ich wysoką ...”; str. 40 „przez mogą zostać”, str. 58 „światła próbkującego temperaturze 10 K”) oraz powtórzenia wyrazów (np. str.22 „które wprowadzają wprowadzają dodatkową”). Autor notorycznie po zapisaniu wzoru przechodząc do opisu występujących w nim zmiennych zamiast kontynuować zdanie „gdzie ...” rozpoczyna „Gdzie ...”, co prawdopodobnie jest wynikiem automatycznej korekty tekstu przez edytor tekstowy. Zdarza się, że przy podawaniu jednostek takich jak cm^{-1} lub cm^{-3} indeks górny zamienia się na zwykły tekst. Jest tak np. na stronach 5 i 55. Problem z indeksem górnym, już poważniejszy, jest przy opisie oznaczeń do wzoru (3.6) i może prowadzić do zamieszania. Na stronie 40 powinno być $12.65 \mu\text{m}$ zamiast $1256 \mu\text{m}$. Na stronie 67 w dwóch miejscach zamiast jednostki [eV] jest [e]. Na stronie 72 autor powołuje się na „Rys.7.7a”. Nie ma takiego rysunku. Jest tylko rysunek 7.7. Na tej samej stronie jest odwołanie do Rys.7.6a. Powinno być odwołanie do rysunku 7.8a. W tekście pracy nie ma odwołania do rysunku 1.2. Podpis pod rysunkiem 7.1 jest błędny. Zamiast 5 nm, 6 nm i 8 nm powinno być 8 nm, 6 nm i 5 nm. Na rysunkach występujących w pracy mamy dużo szczegółów i oznaczeń. Niestety często nie wszystko jest wyjaśnione w podpisie rysunku. Niektóre rysunki są mało czytelne np. rys.5.3a lub rys.62d. Na rys.5.2c wartości współczynników α i β nie mają jednostek. Rysunek 3.1 powinien być podzielony na a) i b). Wydaje się, że ze względu na czytelność rys.3.1b powinien być zrobiony z uwzględnieniem skali. Poszczególne rysunki z podrozdziałów „Schemat struktur” (chodzi o górną część tych rysunków) są bardzo słabo widoczne i słabo opisane. Przykładem jest choćby rysunek 6.1. Są też rysunki jak np. rysunek 7.10, który jest tylko w tekście rozprawy wspomniany, że istnieje. Brak tu jakiegokolwiek innego opisu (analizy) tego rysunku. Na stronie 10, gdzie opisywany jest zakres pracy, jest napisane, że w rozdziale 4 zaprezentowano „*metody numeryczne użyte do modelowania właściwości optycznych oraz struktury pasmowej badanych materiałów*”. Nie jest to prawdą.

W rozdziale tym nie zaprezentowano żadnych metod numerycznych. Przedstawiono jedynie podstawowe informacje o oprogramowaniu *nextnano*. Nie jestem pewien czy dobrym pomysłem jest zamieszczanie w polskojęzycznym tekście rysunków z opisami angielskimi. Należy jednak zaznaczyć, że przytoczone błędy edytorskie nie wpływają znacząco na czytelność i stronę merytoryczną rozprawy.

Jedną ze słabszych stron rozprawy doktorskiej jest brak jasno postawionej tezy pracy oraz niewielkie sprzężenie zwrotne między uzyskanymi wynikami a wytwórcami detektorów. Przedstawione badania raczej ograniczają się do określenia własności optycznych próbek i ewentualnie próby wyjaśnienia tych własności. Brak jest informacji 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 są o tyle zasadne, że badania Doktoranta były realizowane w ramach dwóch grantów badawczych oraz współpracy z ośrodkami zagranicznymi z których pochodziły próbki. Myślę, że w ramach obrony Doktorant odniesie się do tych kwestii i jasno przedstawi cele jakie miały być osiągnięte podczas badań oraz najistotniejsze nowatorskie wyniki.

W rozdziale 2 Doktorant opisuje zasadę działania detektorów podczerwieni. Niestety opisy te ograniczają się w zasadzie do opisu samych obszarów czynnych detektora i bez uwzględnienia napięcia zewnętrznego (jeśli jest wymagane). Warto, żeby w ramach obrony Doktorant pokazał jak wygląda cały detektor, jak dochodzi do uzyskania sygnału, jego transportu w strukturze detektora oraz samej detekcji tego sygnału w postaci impulsu elektrycznego. Proponuję zrobić to na przykładzie kwantowego kaskadowego detektora międzypasmowego podczerwieni IB-QCIP (opisanego na str.23) oraz detektora wykonanego na bazie rezonansowej diody tunelowej (opisanej na str.84).

Doktorant obliczając w rozdziale 6 i 7 strukturę pasmową badanych próbek i ich poziomy energetyczne korzysta z komercyjnego oprogramowania. Nie ma jednak informacji jakiego konkretnie zestawu danych wejściowych używa i jak ewentualnie go modyfikuje. Zapewne są to jakieś masy efektywne, 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 5, mimo że oprogramowanie jest napisane w zespole, w którym pracuje Doktorant, sytuacja jest podobna. W rozdziale 8 też brakuje konkretnych danych. Zamieszczenie tych informacji w treści pracy znacznie by podwyższyło jej wartość.

W pracy użyte zostały różne programy komputerowe do obliczeń struktury pasmowej badanych próbek. Są to kolejno: autorski program dra hab. inż. Krzysztofa Ryczko (modelowanie 8kp), oprogramowanie *nextnano*, symulacje wykonane przez mgr inż. Jakuba Ziembickiego w Katedrze Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych na Politechnice Wrocławskiej (wykorzystano tu teorię funkcjonału gęstości) oraz bliżej nieokreślone obliczenia uzyskane w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Eindhoven University of Technology w Holandii. Dlaczego użyto tak wiele różnych metod? Jak poszczególne metody mają się do siebie? Jakie są ich ograniczenia a jakie są ich zalety?

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 wartościowa i wnosi wartościową wiedzę w temacie badań optycznych cienkowarstwowych struktur półprzewodnikowych projektowanych jako obszary czynne detektorów średniej i długofalowej podczerwieni. 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 Michała Rygały do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Robert Sarzała

