

Łódź, 25 sierpnia 2025 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.
„Optyczne właściwości półprzewodnikowych układów niskowymiarowych
przeznaczonych do zastosowań w emiterach promieniowania
z zakresu średniej podczerwieni”

Autor rozprawy: mgr inż. Tristan Smółka

Promotor: dr hab. inż. Marcin Motyka, prof. uczelni

Recenzowana rozprawa ma charakter pracy eksperymentalnej, w której główne wyniki otrzymano wykonując pomiary metodami spektroskopii optycznej. Rozprawa dotyczy badań materiałów półprzewodnikowych, które są lub mogłyby być brane pod uwagę jako obszary czynne półprzewodnikowych emiterów promieniowania pracujących w zakresie średniej podczerwieni, a w szczególności, jak zdefiniował sam Doktorant, fal z przedziałów 2-8 μm . Celem przedstawionych w rozprawie badań było eksperymentalne wyznaczenie energii przejść optycznych w wybranych strukturach półprzewodnikowych, a następnie ich analiza celem wytłumaczenia obserwowanych wyników doświadczalnych. Doktorant wykonał też szereg badań określających dynamikę nośników ładunku w tym badań określających charakterystyczne czasy zaników widm absorpcji przejściowej. W pracy skupiono się przede wszystkim na badaniach optycznych materiałów antymonkowych: badaniach warstw GaSbBi i InSbBi (należących do tzw. rozcieńczonych bizmutków) w tym na badaniu wpływu zmiany składu, naprężeń oraz warunków wzrostu na strukturę pasmową, sprzężenie spin-orbita, generację defektów oraz na dynamikę nośników ładunku; badaniach optycznych heterozłączy InAsSbP/InAsSb typu objętościowego (ang. bulk), w których skupiono się na wyznaczeniu zależności między procesami promienistymi i niepromienistymi, a także wyznaczono zakres spektralny stosowności InAsSb w temperaturze pokojowej, dla którego wykazano redukcję niepożądanych procesów Augera; badaniach optycznych studni kwantowych InAsSb/GaAsSb/InAsSb, gdzie głównie skupiono się na zbadaniu wpływu tzw. czasu „przedmuchu antymonowego” podczas procesu wzrostu na jakość międzypowierzchni studnia/bariera. Główną motywacją badań było zdobycie nowej wiedzy mogącej przyczynić się do rozwoju urządzeń służących do optycznej detekcji gazów, ochrony środowiska czy

monitorowania produkcji przemysłowej, a w szczególności do rozwoju półprzewodnikowych emiterów promieniowania emitujących w zakresie średniej podczerwieni.

Rozprawa obejmuje łącznie około 137 stron, z czego 99 stron stanowi właściwą treść rozprawy. Reszta to streszczenie, streszczenie w języku angielskim, podziękowania, spis treści, spis rysunków, spis tabel wykaz przytoczonej literatury, wykaz użytych skrótów, wykaz dorobku naukowego autora rozprawy oraz informacja o prawach autorskich. Właściwą część pracy stanowi 6 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 zapoznać się z wybranymi zagadnieniami fizyki ciała stałego, fizyki półprzewodników, fizyki półprzewodnikowych struktur niskowymiarowych, a także podstawami działania laserów półprzewodnikowych w tym kwantowych laserów kaskadowych (QCL) oraz międzypasmowych laserów kaskadowych (ICL). Część ta obejmuje także informacje ściśle związane z tematyką pracy takie jak dość szczegółowy opis technik pomiarowych używanych podczas prac badawczych Doktoranta. Drugą część pracy stanowi, liczący około 50 stron, rozdział 5, w którym Doktorant zawarł szczegółowy opis badań prowadzonych w ramach swojej rozprawy doktorskiej wraz z wynikami, ich analizą i sformułowanymi wnioskami końcowymi.

Pracę otwiera rozdział pierwszy „Wprowadzenie” składający się z dwóch podrozdziałów. Znajdziemy w nim po pierwsze zwięzłe uzasadnienie ważności podjętej tematyki z punktu widzenia zastosowań praktycznych urządzeń, których kluczowym elementem są struktury półprzewodnikowe badane w ramach doktoratu. Po drugie znajdziemy tu zdefiniowaną tezę lub raczej tezy pracy. Jak wynika jednak z treści rozdziału pierwszego zrealizowane i przedstawione w pracy badania właściwości optycznych wybranych struktur półprzewodnikowych, a w szczególności wyznaczenie ich kluczowych parametrów, takich jak energie pasma wzbronionego czy spin-orbita i wzajemne relacje między nimi, określenie wpływu ilości bizmutu w tzw. rozcieńczonych bizmutkach na klasteryzację atomów bizmutu, badanie międzypowierzchni struktur półprzewodnikowych czy badanie dynamiki nośników mają w konsekwencji dostarczyć wiedzy, dzięki której możliwe będzie poprawianie takich parametrów, jak moc wyjściowa, temperatura pracy czy prąd progowy. Doktorat był realizowany w Katedrze Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Badane próbki zostały przygotowane i dostarczone przez zagraniczne zespoły współpracujące, co jak się wydaje powinno wpłynąć na udoskonalenie zarówno samych badanych materiałów jak i przyrządów je wykorzystujących. W rozdziale tym zawarta została także informacja, że obliczenia teoretyczne oraz modelowanie parametrów strukturalnych, oraz optycznych właściwości badanych materiałów zostały wykonane przez dr. hab. inż. Krzysztofa Ryczko, celem lepszej i wiarygodniejszej interpretacji uzyskanych w ramach doktoratu wyników badań i dołączone do doktoratu.

Rozdział drugi i trzeci to jak już wcześniej wspomniano teoretyczne wprowadzenie czytelnika w podstawy fizyczne zjawisk badanych w ramach doktoratu. Oprócz podstawowej wiedzy o strukturze pasmowej półprzewodników oraz struktur niskowymiarowych, w tym opisu różnych typów studni kwantowych, znajdziemy tu sporo informacji o przejściach optycznych zarówno między- jak i wewnątrzpasemowych, efektach ekscytonowych czy opis

modelu niekrzyżujących się pasm (ang. band anticrossing - BAC). Warto podkreślić, że materiał tu zawarty został wybrany bardzo starannie i przede wszystkim dobrze napisany na poziomie wyższym niż zwykle widuję się to w podobnych pracach, a przede wszystkim płynnie i prawie bez literówek, pomyłek i innych tego typu błędów.

Rozdział czwarty ma tytuł „Techniki pomiarowe” i stanowi naturalne przejście między częścią wstępną a częścią badawczą rozprawy doktorskiej. Składa się z trzech podrozdziałów, w których przedstawiono trzy uzupełniające się metody pomiarowe wykorzystywane przez Doktoranta w badaniach spektroskopowych w zakresie średniej podczerwieni. Kolejno znajdują się więc zwięzłe opisy: spektroskopii Fouriera z użyciem spektrometru Bruker Vertex 80v, umożliwiającej pomiary fotoodbicia (ang. photoreflectance - PR) oraz fotoluminescencji (ang. photoluminescence - PL); czasowo-rozdzielczej fotoluminescencji (ang. time-resolved photoluminescence - TRPL) z zastosowaniem nadprzewodzącego detektora pojedynczych fotonów, co pozwala na wysoką czułość i rozdzielczość czasową rzędu pikosekund; absorpcji przejściowej metodą pompa-sonda (ang. Transient Reflection Pump-Probe), umożliwiającej pomiary z rozdzielczością czasową rzędu 200 fs w szerokim zakresie spektralnym 1–16 μm . Warto zaznaczyć, że cały ten rozdział jest bardzo ściśle związany z główną tematyką recenzowanej rozprawy i napisany ze zrozumieniem tematu. Stanowi on dobre wprowadzenie do prezentowanych dalej wyników pomiarowych oraz jest dobrym materiałem dydaktycznym dla osób rozpoczynających podobne badania eksperymentalne.

Drugą część pracy stanowi rozdział piaty podzielony na cztery podrozdziały. Przedstawiają one wyniki uzyskane przez Doktoranta. Każdy z nich zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki danego materiału oraz umotywowanie podjęcia zaprezentowanych dalej badań, opis konkretnej próbki (struktury półprzewodnikowej), zebrane wyniki pomiarowe oraz ich analizę.

W podrozdziale 5.1 Doktorant zaprezentował wyniki badań warstw GaSbBi osadzonych na podłożu GaSb metodą MBE, otrzymanych w ramach współpracy Politechniki Wrocławskiej z Tampere University w Finlandii. Jak wynika z informacji na początku tego podrozdziału jest to kontynuacja oraz finalizacja badań przeprowadzonych w ramach pracy magisterskiej Doktoranta. Wyniki uzyskano badając dwie próbki GaSbBi o koncentracjach bizmutu na poziomie 5.8% oraz 8.0%. Badania fotoluminescencyjne pozwoliły wyznaczyć wartości przerwy energetycznych obu próbek, a w konsekwencji określić zmianę przerwy energetycznej GaSbBi wraz z zawartością Bi w tym stopie. Uzyskany wynik to 27 meV na 1% Bi, co dobrze pokrywa się z wartościami podawanymi w literaturze. Badania pokazały też obecność stanów zlokalizowanych w paśmie wzbronionym GaSbBi, które, jak podkreśla Doktorant, związane są z defektami powstającymi podczas wzrostu oraz z klasteryzacją atomów Bi w badanych warstwach. Doktorant wyznaczył energie aktywacji tych stanów. Analiza wyników, jak twierdzi Doktorant, sugeruje, że wzrost koncentracji atomów bizmutu prowadzi do zwiększenia liczby centrów lokalizacji, czyli intensyfikuje proces klasteryzacji bizmutu. Przeprowadzone następnie przez Doktoranta badania dynamiki nośników metodą czasowo-rozdzielczej fotoluminescencji dostarczyły informacji o ewolucji czasowej całego widma fotoluminescencji. Badania te potwierdziły poprzednie wnioski tzn., że wraz ze wzrostem koncentracji bizmutu liczba klastrów zdolnych do pułapkowania nośników wzrasta, co prowadzi do wydłużenia czasu zaniku fotoluminescencji. Warto zwrócić uwagę,

że Doktorant na poszczególnych etapach tych badań konfrontował swoje wyniki z danymi dostępnymi w literaturze uzyskanymi z podobnych eksperymentów oraz porównywał je do analogicznych badań dla innych materiałów półprzewodnikowych. Porównania te dały dobrą zgodność wyników Doktoranta i ich interpretacji z istniejącą już wiedzą w tej dziedzinie. Jedyne co może niepokoić, to uzyskanie wyników oparte zaledwie o dwie próbki materiałowe. Wyniki jakościowe zapewne są poprawne, jednak wyniki ilościowe mogą być zafałszowane. Jeśli chcemy mieć pewność co do ilościowych wyników, to wydaje się zasadne powtórzenie przynajmniej części pomiarów bazując na większej liczbie próbek o różnych składach materiałowych.

W podrozdziale 5.2 Doktorant przedstawia badania nad warstwami InSbBi oraz InAsSbBi, które zostały przygotowane we współpracy Politechniki Wrocławskiej z University of Texas at Austin (USA). Materiał InSb charakteryzuje się wąską przerwą energetyczną, a wprowadzenie Bi ma na celu dalsze wydłużenie długości fali emisji. Dodatkowo dostajemy przy tym modyfikację rozszczepienia pasma spin-orbita, co powinno przynieść ograniczenie strat niepromienistych związanych z procesami Augera. Natomiast niewielki dodatek As w InAsSbBi umożliwia korygowanie naprężeń w sieci krystalicznej struktury półprzewodnikowej, jednocześnie w niewielkim stopniu wpływając na jej przerwę energetyczną. W przypadku InSb_{1-x}Bi_x zbadano trzy próbki osadzone na InSb metodą MBE o zawartościach Bi odpowiednio ok. 0,7%, 1,3% i 1,8%, plus próbkę referencyjną z czystego InSb. Dodatkowo zbadano cztery próbki InAsSbBi o stałej zawartości Bi (ok. 1,3%) i zmieniającym się udziale As (0,2–0,4%). Przy wyznaczeniu energii przejść między pasmem przewodnictwa a pasmem walencyjnym, oraz pasmem przewodnictwa i pasmem spin-orbita wykorzystano metodę fotoodbicia, a do badania kinetyki nośników użyto techniki spektroskopowej pompa-sonda. Przeprowadzone pomiary potwierdzają, że Bi wyraźnie obniża energię przerwy wzbronionej InSb. Jak pisze Doktorant o ok. -30 meV na 1% Bi. Z danych przedstawionych w pracy jest to raczej 26 meV na 1% Bi. Obserwacja ta jest zgodna z wcześniejszymi danymi eksperymentalnymi dla tzw. rozcieńczonych bizmutków. Jednocześnie pomiary pokazały istotny spadek energii pasma odszczepionego spin-orbita, większy, niż wskazywały wcześniejsze przewidywania teoretyczne. Z kolei dla warstw InAsSbBi dla wzrastającej zawartości As otrzymano dalszą redukcję wartości Δ_{SO} . W rozdziale tym widzimy też próbę skonfrontowania wyników doświadczalnych z symulacją numeryczną przy wykorzystaniu metody **8k.p**. Istotnym i ciekawym wnioskiem z tych badań jest zaproponowanie zmniejszonej (względem starszych modeli) wartości parametru zakrzywienia wpływającego na wyliczanie przerwy energetycznej InSbBi, która to wartość pozwala bardzo dobrze dopasować dane eksperymentalne z symulacjami. Niestety jak wynika z informacji na wstępie doktoratu symulacje te zostały wykonane nie przez Doktoranta, a przez innego członka zespołu. Stąd nie mogą być oceniane jako wkład autora rozprawy. Badania dynamiki nośników metodą pompa-sonda pokazują natomiast, że w InSbBi czas rekombinacji nie ulega znaczącym zmianom przy zwiększaniu ilości bizmutu, co sugeruje brak efektu klasteryzacji tychże atomów. Natomiast zastosowanie dodatkowo niewielkiej ilości As do InSbBi wyraźnie zwiększa czas zaniku sygnału, co można wiązać z kwestią zmniejszenia się energii Δ_{SO} . Mechanizm ten nie został jednak jednoznacznie wyjaśniony w doktoracie, gdyż do jego pełnego zrozumienia i

wyjaśnienia, jak przyznaje sam Doktorant, potrzebne byłoby wykonanie dodatkowych pomiarów na większej grupie próbek o szerszym zakresie składów As.

Podrozdział 5.3 to opis badań Doktoranta nad procesami radiacyjnymi i nieradiacyjnymi w materiałach trój- oraz czteroskładnikowych odpowiednio InAsSb, oraz InAsSbP. W szczególności Doktorant skupia się na badaniach dotyczących materiałów objętościowych wykorzystywanych w heterostrukturach InAsSbP/InAsSb stosowanych np. w diodach p-i-n, które pozwalają na uzyskanie emisji w średniej podczerwieni nawet w temperaturze pokojowej. Badania te zostały prowadzone w ramach ówczesnej współpracy Politechniki Wrocławskiej z Ioffe Institute (obecnie jak podaje Doktorant już niekontynuowanej). Padaniu poddane zostały dwie próbki jedna z pojedynczą, a druga z podwójną heterostrukturą. Doktorant wykonał pomiary fotoluminescencyjne heterostruktur w zakresie temperatur $T = 10-300$ K. Analizując uzyskane wyniki Doktorant wspiera się tutaj prostymi obliczeniami przerwy energetycznej badanych materiałów oraz odległości energetycznej pasma spin-orbita wykorzystującymi interpolację związkami binarnymi i zależność Varshniego. Większość parametrów do tych obliczeń Doktorant czerpie z dostępnej literatury. Niektóre, jak parametr zakrzywienia InAsSb wykorzystywany w obliczeniach Δ_{SO} dobiera, żeby uzyskać zgodność obliczeń z wynikami eksperymentalnymi. Niestety Doktorant nie podaje tu wprost pełnego zestawu parametrów do tych obliczeń w szczególności obliczeń dotyczących Δ_{SO} . Utrudnia to czytelnikowi wykorzystanie zgromadzonych tu informacji. Pewną niepewność, co do określenia konkretnych wartości parametrów wnosi też ograniczona liczba próbek, które podlegały badaniom. Najważniejszym wynikiem tej części pracy jest zaobserwowanie wzajemnych relacji między wartością przerwy energetycznej materiału InAsSb i parametrem Δ_{SO} . W szczególności Doktorant wykazał, że stopy trójskładnikowe $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ (z uwagi na warunek rezonansu $E_G = \Delta_{SO}$ występujący prawdopodobnie w temperaturze $T = 120$ K) mogą być atrakcyjnymi materiałami dla diod elektroluminescencyjnych pracujących w zakresie średniej podczerwieni ($\lambda > 3.5 \mu\text{m}$) w wysokich temperaturach. Jednocześnie Doktorant zauważył, że zawartość antymonu większa niż $y > 0.1$ dla warstwy aktywnej o grubości $1 \mu\text{m}$ powoduje zapewne silne niedopasowanie heterostruktury epitaksjalnej względem podłoża, co w konsekwencji prowadzi do zwiększonego naprężenia i pogorszenia jakości struktury półprzewodnikowej. Doktorant sugeruje w takim wypadku zastosowanie warstwy kompensującej naprężenia.

Ostatni podrozdział 5.4 zawiera wyniki badań dotyczących studni kwantowych typu II InAsSb/GaAsSb przystosowanych do emisji promieniowania w średniej podczerwieni. Badane struktury zostały wytworzone metodą MBE na podłożu GaSb domieszkowanego na typ n. Każda próbka zawiera siedem powtórzeń studni kwantowej InAsSb/GaAsSb o tzw. kształcie potencjału typu W, otoczonej barierami z AlSb. W strukturze tej warstwy $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ pełnią rolę studni dla elektronów otaczając z dwóch stron warstwy $\text{GaAs}_{0.2}\text{Sb}_{0.8}$, stanowiące studnie dla dziur. W badaniach Doktorant wykorzystał spektroskopię fotoluminescencyjną, fotoodbiciową oraz spektroskopię absorpcji przejściowej, wspomagane modelowaniem teoretycznym. Badania skupiają się przede wszystkim na analizie wpływu długości tzw. czasu przedmuchu atomów antymonu (ang. antimony soak time), podczas wzrostu na każdej granicy heterostruktury InAsSb/GaAsSb, na właściwości strukturalne i optyczne tych struktur, w tym na procesy dyfuzji atomów na granicach interfejsów, przekrycie się funkcji falowych elektron–

dziura oraz czasy życia nośników. Badano czasy przedmuchu w granicach od 2 do 10 sekund. Doktorant zaobserwował, że zwiększenie czasu przedmuchu wpływa na przesunięcie energii przejścia optycznego, a także zwiększa intensywność i zmienia kształt linii fotoluminescencji. Autor wiąże te efekty z powstaniem bardziej jednorodnych (idealnych) interfejsów na granicach warstw materiałów $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ i $\text{GaAs}_{0.2}\text{Sb}_{0.8}$, czyli materiałów tworzących studnie kwantowe dla elektronów i dziur. Wpływa to na ograniczenie zjawiska dyfuzji atomów. W konsekwencji prowadzi to do głębszego, czyli efektywniejszego uwięzienia nośników w odseparowanych warstwach i ostatecznie do mniejszego przekrycia funkcji falowych. W konsekwencji otrzymujemy wydłużenie czasu zaniku przejścia fundamentalnego od ułamka nanosekundy dla przedmuchu 2 sekund do wielu nanosekund dla czasu przedmuchu 10 sekund. Pokazuje to, jak inżynieria interfejsu może regulować szybkość rekombinacji w skali ponad rzędu wielkości. Taka kontrola nad czasem życia nośników może być korzystna np. w urządzeniach takich jak międzypasmowe lasery kaskadowe. Wyniki te wskazują na pewien możliwy kierunek optymalizacji obszarów aktywnych przyrządów fotonicznych na bazie struktur wykorzystujących badane studnie kwantowe. Warto podkreślić, że otrzymane w tym rozdziale wyniki eksperymentalne i ich interpretacja zostały poparte modelowaniem komputerowym. Niestety podobnie jak poprzednio modelowanie to nie jest dziełem Doktoranta, jednak dobrze, że jego wyniki zamieszczono w recenzowanej rozprawie.

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

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

Praca doktorska Pana mgr inż. Tristana Smółki jest napisana bardzo 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 nielicznych błędów edytorskich. W rozdziale 2.1 na stronie 6 jest zdanie „W półprzewodnikach pasmo przewodnictwa jest w stanie częściowo pustym w temperaturze pokojowej.” Chyba raczej powinno napisać się „częściowo zapełnionym”. W podpisie rysunku 2.3 jest „ogreniczenia” zamiast „ograniczenia”. W rozdziale 2.3.5 na stronie 22 mamy „Przykładem zastosowani wspomnianych diod ...”, a powinno być „zastosowania”. W tym samym rozdziale na stronie 23 jest „optyki nieliniowej”, a powinno być „nieliniowej”. W rozdziale 2.3.7 na stronie 25 zdanie „W studni kwantowej typu II pasmo przewodnictwa jednego materiału występuje (energetycznie) niżej niż pasmo walencyjne sąsiedniego materiału, ...” jest nieprawdziwe, wystarczy porównać je choćby z rysunkiem 2.2. We wstępie do rozdziału 3 na stronie 29 mamy „zmian w dynamiki nośników ładunku.”. powinno być w „dynamice”. W rozdziale 3.4 na stronie 33 mamy napisane „pozwalają przesunąć długość fali do tzw. pierwszego okna telekomunikacyjnego dla $1,3\mu\text{m}$ ”. Zapewne chodzi tu o drugie okno telekomunikacyjne, bo pierwsze to $0,85\mu\text{m}$. We wstępie do rozdziału 4 na stronie 36 mamy „w zakresie średniej podczerwieni..”. Niepotrzebna jedna kropka. W rozdziale 4.2.3 na stronie 42 mamy „celem przeprowadzenia na nich badań dynamiki nośników”. Powinno być „dynamiki”. W rozdziale 5.1.3 na stronie 52 mamy „a $\alpha = 2$ odpowiada rekombinacji swobodnych nośników”. Lepiej napisać „na swobodnych nośnikach”. W rozdziale 5.1.4 na stronie 54 mamy „co wymagało do tej pory stosowania zastosowania”.

Wystarczy np. „stosowania”. W podpisie rysunku 5.6 mamy „Znaczny wzrost czasu zaniku obserwowany w pobliżu energii emisji stanów defektowych.” Powinno być „obserwowany jest”. W podpisie rysunku 5.8 jest „dopasowania danych eksperymentalnych.krzywą teoretyczną”. Kropka powinna zostać przeniesiona na koniec zdania. We wzorze (5.5) współczynniki zakrzywienia oznaczone są jako C , by po chwili zostać oznaczone jako b_G . Jaki w tym jest cel? W podpisie do tabeli 5.1 powinowactwo elektronowe oznaczone jest jako x , a w samej tabeli jako χ . W podpisie rysunku 5.18 mamy „Wstawka: Zależność temperatury od szerokości przerwy energetycznej materiału ...”. W rzeczywistości wstawka przedstawia energię fotonu od temperatury. Na stronie 81 w tekście odnoszącym się do rysunku 5.22 czytamy „pełne kwadraty na rysunku 5.22”. Według mnie na rysunku 5.22 jest tylko jeden pełny kwadrat. W rozdziale 5.4.1 na stronie 84 mamy „Analizie poddano sześć próbek podzielonych na dwie serie: pierwsza obejmuje czasy soakingu 2s (Próbka A1), 4s (Próbka B1) i 6s (Próbka C1), zaś druga czasy 6s (Próbka A2) 8s (Próbka B1) i 10s (Próbka C1).” Czy druga seria nie powinna mieć oznaczeń A2, B2 i C2? Na rysunkach 5.26 i 5.31 mamy dużo różnych linii i krzywych. Niestety podpisy pod tymi rysunkami są bardzo ubogie i czytelnik musi zgadywać co faktycznie jest na tych rysunkach? W rozdziale 5.43 na stronie 94 jest „w studniach kwantowych typu II o kształcie.” Powinno być „o kształcie W”. W rozdziale 6 na stronie 97 mamy „nośniki pułapkowanie w minimach potencjału”, a powinno być „pułapkowane”. Należy jednak zaznaczyć, że przytoczone błędy edytorskie nie wpływają znacząco na czytelność i stronę merytoryczną rozprawy.

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 emiterów promieniowania w zakresie średniej podczerwieni. Badania te to przede wszystkim pomiary fotoluminescencji, widm odbicia i czasowe pomiary spektroskopowe, które prowadzą w bezpośredni sposób do wyznaczania pasm i stanów energetycznych w cienkowarstwowych strukturach półprzewodnikowych, a także czasów życia nośników, co jest istotne dla projektowania i działania wspomnianych wcześniej emiterów promieniowania. 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.

Trudno dyskutować z wynikami uzyskanymi w pracy, gdyż po pierwsze potwierdzają one w dużym stopniu wcześniejsze doniesienia publikacyjne, a po drugie Doktorant należy do zespołu znakomitych specjalistów o renomie światowej w dziedzinie zawartych w doktoracie badań, którzy nie tylko znają się na wykorzystanych w pracy technikach badawczych ale potrafią też doskonale interpretować otrzymane za ich pomocą wyniki eksperymentalne. Jedyne co się nasuwa to to czy, z uwagi czasami na małą liczbę przebadanych próbek, ostateczne wnioski zawarte w pracy mają bardziej charakter ilościowy czy jakościowy? Warto jednak spytać Doktoranta o pewne aspekty natury bardziej ogólnej, aczkolwiek związane z tematyką doktoratu.

W rozcieńczonych bizmutkach pokładano kiedyś duże nadzieje, jeśli chodzi o projektowanie emiterów działających w średniej podczerwieni. Wydaje się jednak, że po roku 2018 nie nastąpił wyraźny postęp w tej dziedzinie. Jaki jest obecny stan prac nad emiterami wykorzystującymi GaSbBi jako obszary czynne emiterów? Czy ukazują się obecnie jakieś publikacje prezentujące znaczący postęp w tej dziedzinie? Czy opublikowano jakieś prace dotyczące działających emiterów z obszarami czynnymi InSbBi? Jeśli nie to jakie według Doktoranta są tego główne przyczyny?

Co Doktorant sądzi o stopie pięcioskładnikowym GaInAsSbBi? Czy może on w najbliższej przyszłości rozwiązać różne problemy dotyczące wytwarzania emiterów średniej podczerwieni? Czy Doktorant widzi ten materiał jako rozwinięcie swoich badań dotyczących rozcieńczonych bizmutków?

Materiały objętościowe bazujące na heterostrukturach InAsSbP/InAsSb to technologia z końca lat 90. XX wieku intensywnie badana, jeśli chodzi o emitery promieniowania, np. przez zespół prof. Razeghi. Co istotnego wydarzyło się ostatnio w tym temacie? Czy istnieją jakieś publikacje z ostatnich lat o emiterach promieniowania bazujących na tych materiałach?

Czy są doniesienia o elektrycznie pompowanych LED/laserach, w których warstwą aktywną są studnie kwantowe typu II InAsSb/GaAsSb/InAsSb? Jeśli nie to jakie według Doktoranta są tego przyczyny? Czy główną przyczyną jest tu problem interfejsu? Jeśli tak to jakie są ogólnie możliwości jego poprawy oprócz stosowania przedmuchu antymonowego?

Jak wynika z dorobku naukowego przedstawionego przez Doktoranta bazą dla doktoratu były dwie publikacje w czasopismach *ACS Omega* (70 pkt.) i *Materials* (140 pkt.) oraz publikacja w materiałach konferencyjnych SPIE *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXVIII*. Wspomniane publikacje to publikacje wieloautorskie, jednak w każdej z nich Doktorant jest pierwszym autorem. Oprócz tego w dorobku naukowym Doktoranta znajduje się 11 innych publikacji, w których jest współautorem oraz 15 prac konferencyjnych w tym 4 wystąpienia konferencyjne. Doktorant brał udział jako wykonawca w 5 grantach badawczych. 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 opanował odpowiednie techniki pomiarowe w swojej specjalności oraz potrafił przeanalizować i zinterpretować otrzymywane wyniki eksperymentalne. Dorobek publikacyjny pokazuje też, że i na tym polu Doktorant radzi sobie całkiem nieźle. Godny podkreślenia jest też fakt współpracy z ośrodkami badawczymi z zagranicy. Wszystko to wskazuje, że Doktorant jest gotowy do podjęcia bardziej samodzielnych działań naukowych.

Podsumowując, uważam, że wspomniane wyżej nieliczne niejasności oraz usterki redakcyjne nie mają 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 emiterów promieniowania w średniej 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 Tristana Smółki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Robert Sarzała

Robert Sarzała
25 sierpnia 2025