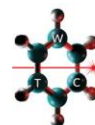




**Wojskowa
Akademia
Techniczna**

**Wydział
Nowych Technologii i Chemii**



Warszawa, dn. 4 lipca 2025 r.

ptk prof. dr hab. inż. Małgorzata KOPYTKO
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
Wydział Nowych Technologii i Chemii
Instytut Fizyki Technicznej
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

**pt. „Właściwości niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych
w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni”**

autorstwa mgr. inż. Moniki MIKULICZ

opracowana na podstawie uchwały nr 130/10/RDND11/2024-2028 Rady Dyscypliny
Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 13.05.2025 r. oraz w zw.
z art. 190 ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce
(Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.)

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Moniki Mikulicz poświęcona została badaniom nowatorskich struktur optycznych przeznaczonych do zastosowań w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni, ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjalnego wykorzystania w laserach typu VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers). Tematyka pracy wpisuje się w aktualne i dynamicznie rozwijające się obszary współczesnej optoelektroniki i fotoniki, mające duże znaczenie zarówno naukowe, jak i aplikacyjne – zwłaszcza w kontekście optycznej detekcji gazów czy rozwoju technologii emisyjnych na potrzeby czujników środowiskowych, medycyny i bezpieczeństwa.

Rozprawa ma łącznie 120 stron, włączywszy bardzo obszerną bibliografię (143 pozycji literaturowych), a wraz z wprowadzeniem i podsumowaniem składa się z 9 rozdziałów. Poprzedzona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim, rozwinięciem skrótów oraz spisem treści. Układ treści jest formalnie poprawny, jednak budzi pewne zastrzeżenia pod względem proporcji i organizacji materiału.

Główne wyniki eksperymentalne zostały przedstawione dopiero w rozdziale 6, przy czym wcześniejsze rozdziały (3–5) mają głównie charakter przeglądowy lub opisowy. W praktyce oznacza to, że zasadnicza część pracy własnej Autorki (wyniki badań) została ograniczona do jednego, choć obszernego, rozdziału. Taki sposób prezentacji ogranicza przejrzystość i wyrazistość oceny realizacji poszczególnych założeń

badawczych oraz nie pozwala w pełni wyeksponować wkładu własnego Autorki w każdy z tych obszarów.

Wprowadzenie (rozdział 3) oraz przegląd literatury i komponentów laserowych (rozdział 4) są bardzo obszerne i momentami wykraczają poza zakres niezbędny do zrozumienia części doświadczalnej. Wydają się one raczej rozbudowanym przeglądem wiedzy podręcznikowej niż krytycznym opracowaniem literaturowym prowadzącym do jasno zdefiniowanych problemów badawczych. Podobna uwaga dotyczy rozdziału 5, w którym opisano metody wzrostu i charakteryzacji – jego rozbudowanie nie zawsze znajduje uzasadnienie w odniesieniu do faktycznie zastosowanych w pracy metod.

W pracy Autorka formułuje pięć punktów jako „hipotezy badawcze”, jednak ich charakter bardziej odpowiada celom naukowym niż klasycznym hipotezom badawczym. Postawione zagadnienia nie mają formy testowalnych hipotez, które można by potwierdzić lub obalić na podstawie wyników eksperymentalnych, lecz stanowią ogólne założenia i kierunki badawcze, do realizacji których dążyła Autorka. W świetle tego określenie ich mianem „hipotez badawczych” jest nieprecyzyjne i wprowadza pewne zamieszanie co do metodologii pracy oraz sposobu interpretacji uzyskanych rezultatów. Z punktu widzenia naukowego, stosowniejszym byłoby traktowanie ich jako jasno sformułowanych celów badawczych.

Cele zostały omówione łącznie i szczegółowo rozwinięte w jednym rozdziale pracy (rozdział 6), poświęconym analizie i optymalizacji konstrukcji takich struktur jak:

- podfalone siatki dyfrakcyjne HCG (High Contrast Gratings), trawione zarówno w podłożu InP, jak i obszarze aktywnym lasera QCL (Quantum Cascade Laser);
- zwierciadła Bragga (Distributed Bragg Reflector, DBR) – w tym hybrydowe oraz plazmoneczne;
- oraz wyznaczeniu współczynników złamania niektórych związków półprzewodnikowych w funkcji długości fali i temperatury.

Znaczącym osiągnięciem jest eksperymentalne wykazanie możliwości przestrajania widma odbicia siatek HCG trawionych w podłożu InP wyłącznie poprzez zmianę głębokości trawienia, bez modyfikacji okresu i grubości warstw. Dodatkowo, przeprowadzone badania polaryzacyjne pokazały, że siatki HCG mogą pełnić funkcję selektywnych elementów optycznych, dostosowanych do polaryzacji światła – co jest istotne przy projektowaniu jednomodowych laserów VCSEL. Z pracy nie wynika jednoznacznie, czy koncepcja tego eksperymentu, polegająca na modyfikacji głębokości trawienia przy stałym okresie, została samodzielnie zaproponowana przez Autorkę, czy była elementem szerszego projektu badawczego. Zważywszy na to, że rezultat ten jest przedstawiony jako jedno z kluczowych osiągnięć, warto byłoby dokładniej określić stopień wkładu autorskiego w zaprojektowanie samego pomysłu, a nie tylko wykonanie eksperymentu.

W opisie eksperymentu fotoluminescencji dla struktur z rdzeniem lasera kaskadowego wskazano, że pomiary przeprowadzono na próbkach bez przyłożonego zewnętrznego pola elektrycznego, co wpływa na strukturę energetyczną oraz prawdopodobieństwo obserwacji przejść kwantowych, a w konsekwencji na brak

sygnału przy długości fali 9 μm (rys. 6.7). W związku z tym pojawia się pytanie, czy w pomiarach fotoluminescencji możliwe byłoby zastosowanie zewnętrznego zasilania próbki, a jeśli tak, to czy wówczas zaobserwowano by sygnał odpowiadający długości fali 9 μm ?

Pewne wątpliwości budzi późniejsza analiza i interpretacja wyników przedstawionych na rys. 6.9. Widma fotoluminescencji mierzono dla siatek HCG trawionych obszarze aktywnym lasera QCL optymalizowanym na dwie długości fali: 4 μm oraz 9 μm . Tymczasem w eksperymentach fotoluminescencji dla obu próbek zarejestrowano sygnał w tym samym zakresie długości fali (2,8 μm w 10 K), który Autorka interpretuje, na podstawie pomiarów pompa-sonda oraz obliczeń numerycznych, jako wynik przejść międzypodpasmowych. Powstaje zatem pytanie, dlaczego położenie minipasm (i w konsekwencji energie przejść) w obu próbkach są takie same, mimo że powinny różnić się ze względu na odmienną konstrukcję obszarów aktywnych. Z pracy nie wynika również, dla której próbki (4 μm czy 9 μm) wykonano pomiaru pompa-sonda oraz obliczenia numeryczne. Proszę o odniesienie się do tej niezgodności oraz wyjaśnienie, czy możliwa jest inna interpretacja zaobserwowanych sygnałów.

Jako pozytywny aspekt należy wskazać, że w przypadku struktur z rdzeniem lasera kaskadowego, zastosowanie siatek HCG doprowadziło do rekordowego wzmocnienia fotoluminescencji powierzchniowej o 1500%, co przypisano efektowi rezonansu Fano. Wynik ten, opublikowany w *Optics Express*, stanowi dowód na potencjalne zastosowanie takich struktur jako rezonatorów w nowej generacji emiterów podczerwieni.

W kolejnym podrozdziale Autorka analizuje właściwości nowego typu zwierciadeł DBR zbudowanych z par materiałów GaAs/AlAs oraz InP/InGaAs (dopasowanych do podłoża InP) zaprojektowanych dla długości fali 4 μm . Osiągnięte wartości współczynnika odbicia dla zwierciadeł hybrydowych z warstwą złota rzędu 90% oraz 80%, potwierdzone zarówno eksperymentalnie, jak i numerycznie, są bardzo dobrym wynikiem. Warto dodać, że problematyka doboru odpowiednich podłoży – domieszkowanych, jednostronnie polerowanych lub niedomieszkowanych, dwustronnie polerowanych – była również częścią prowadzonych badań nad hybrydowymi zwierciadłami DBR.

Badania nad hybrydowymi zwierciadłami DBR z dodatkowymi warstwami metalicznymi (Ti/Au) ujawniły kluczowe kwestie adhezji i optymalnej grubości warstwy tytanu (10 nm), co bezpośrednio przełożyło się na zwiększenie odbicia – wyniki te opublikowano w *Opto-Electronics Review*.

Na uznanie zasługuje dokładna analiza temperaturowych współczynników załamania dla półprzewodników (InP, GaAs) w szerokim zakresie temperatur (10–300 K) i długości fal (1,3–11 μm), przeprowadzona z użyciem spektroskopii Fourierowskiej w podczerwieni (FTIR) i elipsometrii. Pozwoliło to – w oparciu o dostępne dane literaturowe – na weryfikację, a w niektórych przypadkach korektę istniejących modeli dyspersji optycznej. Umożliwiło to wyznaczenie współczynników załamania dla półprzewodników $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ oraz AlAs w zakresie temperatur od 10 do 300 K dla długości fali 4 μm . Wyniki te stanowią cenny wkład do bazy danych materiałowych

niezbędnych przy projektowaniu struktur optoelektronicznych i zostały opublikowane w *Physical Review Applied*.

W końcowej części rozdziału 6 Autorka prezentuje innowacyjne plazmoneczne zwierciadła Bragga, w których kontrast współczynników załamania osiągnięto nie poprzez dobór różnych materiałów, lecz przez różnicę domieszkowania tego samego półprzewodnika: niedomieszkowana warstwa InP oraz warstwa InP domieszkowana krzemem na typ n. Jest to ciekawy pomysł, który generuje szereg zalet – jak podaje Autorka – znacznie ułatwia kontrolę procesu wzrostu oraz likwiduje interfejsy pomiędzy materiałami. To ostatnie stwierdzenie jest jednak nieprecyzyjne. Formalnie interfejs nadal istnieje jako granica technologiczna między dwiema warstwami o różnym domieszkowaniu, ale nie tworzy on znacznego uskoku w pasmach (przewodnictwa czy walencyjnym), ponieważ materiał bazowy (InP) pozostaje ten sam po obu stronach. Z punktu widzenia optycznego i elektronicznego, zmiana domieszkowania wpływa głównie na poziom Fermiego, ale nie prowadzi do utworzenia klasycznego przesunięcia pasm, jak w przypadku np. InP/InGaAs czy GaAs/AlAs.

W eksperymencie zmieniano zarówno ilości powtórzeń par warstw, jak i poziom domieszkowania jednej z warstw. Wzrost domieszkowania o rząd wielkości nie dał spodziewanego dużego wzrostu współczynnika odbicia, co Autorka tłumaczy faktem rozpraszania światła na inkluzjach. Rozpraszanie na pojedynczych, izolowanych atomach domieszek jest zazwyczaj bardzo słabe. Obserwowane rozpraszanie światła może sugerować, że atomy domieszek nie są równomiernie rozproszone w sieci krystalicznej, lecz tworzą lokalne skupiska. Czy Autorka rozważała zastosowanie innych metod badawczych, które potwierdziłyby tworzenie się inkluzji w silnie domieszkowanych materiałach półprzewodnikowych? Jakie metody można byłoby w tym celu zastosować?

W pracy omówiono również zagadnienie jakości interfejsów między warstwami domieszkowanymi i niedomieszkowanymi w strukturach InP/InP:Si. Autorka odwołuje się do wyników badań SIMS, które wykazały obecność gradientów domieszkowania krzemu na początku i końcu warstw. W celu ich ograniczenia zaproponowano technikę polegającą na wprowadzeniu krótkiej przerwy we wzroście po każdej warstwie domieszkowanej. Zastosowanie tej procedury doprowadziło do wzrostu współczynnika odbicia z 92% do 98% – wynik ten stanowi ważny przełom w kontekście zastosowań zwierciadeł DBR w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni.

Należy pozytywnie ocenić próbę technologicznej optymalizacji procesu wzrostu, jednakże wątpliwości budzi brak jednoznacznego powiązania między obserwowanym gradientem a poprawą parametrów optycznych. Nie jest jasne, czy analizowano więcej niż jedną parę próbek oraz czy zmiany potwierdzono innymi metodami (np. dodatkowymi profilami SIMS, analizą mikroskopową). Dodatkowo, wzrost odbicia może wynikać również z położenia na próbce, gdzie odnotowano znaczny rozrzut wyników – od 60% w pobliżu krawędzi podłoża do 98% w centrum – co sugeruje istotną niejednorodność optycznych właściwości warstwy, mogącą wynikać z niekontrolowanych czynników technologicznych (np. defektów powierzchni, rozpraszania na inkluzjach), których wpływ nie został szczegółowo omówiony.

Od strony redakcyjnej, złożona rozprawa jest w większości tekstu napisana starannie, zrozumiale i poprawnie merytorycznie, co potwierdza dużą wiedzę Autorki w zakresie prowadzonych badań. Rysunki są wykonane starannie, wszystkie w tej samej szacie graficznej. Autorka nie ustrzegła się jednak drobnych potknięć edytorskich, zwrotów żargonowych, nieścisłości nomenklaturowych, czy nawet błędów ortograficznych („konta” zamiast kąta). Niektóre z nich wymieniam poniżej:

W tekście rozprawy zauważalny jest brak konsekwencji w stosowaniu interpunkcji – w wielu miejscach występują braki przecinków lub są one wstawione w sposób nieuzasadniony składniowo. Tego rodzaju błędy utrudniają odbiór treści, wpływając negatywnie na klarowność przekazu i przejrzystość wyводу. Poprawne stosowanie interpunkcji jest elementem poprawności językowej i powinno być bezwzględnie przestrzegane w pracy o charakterze naukowym.

W pracy brakuje numeracji wzorów, co utrudnia odwoływanie się do nich w dalszej części tekstu. Dodatkowo, wyjaśnienia symboli zawartych we wzorach nie są w wielu przypadkach oznaczone kursywą – tak jak powinno to mieć miejsce zgodnie z zasadami edytorskimi przyjętymi w piśmiennictwie naukowym z zakresu nauk ścisłych i technicznych. Zauważalne są również błędy typograficzne, takie jak nieprawidłowe wstawianie spacji w symbolach fizycznych, np. „si n”, „co s”, „ex p”, co zaburza czytelność zapisu i może prowadzić do nieporozumień interpretacyjnych.

Autorka używa określenia „średnia i długofalowa podczerwień”. Aby zachować jednolitą nomenklaturę autor powinien użyć określenia „średnia i daleka podczerwień” lub „podczerwień średnio- i długofalowa”.

W zdaniu „emisja zachodzi jedynie w paśmie przewodnictwa, a w jej generację uwikłane są jedynie elektrony” zastosowano niewłaściwe sformułowania. Po pierwsze, użycie słowa „uwikłane” jest nieodpowiednie z uwagi na jego potoczne i emocjonalne konotacje, które nie odpowiadają precyzyjnemu językowi naukowemu. Poprawniej byłoby użyć terminu „uczestniczą” lub „biorą udział”. Po drugie, wyrażenie „generacja emisji” jest również niepoprawne – „generacja” odnosi się zazwyczaj do tworzenia nośników ładunku pod wpływem padającego światła (np. generacji par elektron-dziura), natomiast emisja promieniowania jest procesem wypromieniowania fotonów.

Na rys. 4.7 Autorka niewłaściwie oznaczyła obszary p i n.

W podpisie rys. 4.10 zastosowano formę „meza”, co sugerowałoby błędną spolszczoną odmianę, w literaturze naukowej przyjęto nieodmienianie tego typu terminów (np. „struktura typu mesa”, „detektor typu mesa”).

W tekście pracy pojawia się określenie „wolne nośniki”, które jest bezpośrednim tłumaczeniem angielskiego „free carriers”. W oficjalnym języku naukowym i technicznym w języku polskim poprawną formą jest „nośniki swobodne”. Wskazane byłoby stosowanie ujednoliconej i zgodnej z polską terminologią nomenklatury fizycznej.

W zdaniu „elektron najpierw jest wzbudzany do wyższego podpasma w górnym paśmie przewodnictwa” zaleca się doprecyzowanie użytej terminologii. Określenie „górne pasmo przewodnictwa” jest nieprecyzyjne i może wprowadzać w błąd, gdyż

pasmo przewodnictwa zazwyczaj traktuje się jako jedną całość, natomiast w strukturach kwantowych mówimy o poziomach lub podpasmach kwantowych.

Sformułowanie „półprzewodnik typu dziurowego” jest potoczne i niezalecane w terminologii naukowej. Poprawnym określeniem jest „półprzewodnik typu p”.

W pracy zauważalna jest niespójność terminologiczna dotycząca określania lasera półprzewodnikowego. W literaturze polskiej powszechnie stosowanym terminem jest „przyrząd półprzewodnikowy”, podczas gdy w pracy pojawia się określenie „urządzenie”. Dla zachowania precyzji i zgodności z przyjętą nomenklaturą zaleca się konsekwentne stosowanie terminu „przyrząd”.

W pracy zauważono wielokrotnie niepoprawne użycie konstrukcji typowych dla języka angielskiego. W języku polskim przymiotnik określający najistotniejszą cechę przedmiotu, zjawiska lub obiektu zazwyczaj umieszczany jest po rzeczowniku, np. „lasery półprzewodnikowe”, a nie „półprzewodnikowe lasery” czy „rozpraszanie elastyczne”, a nie „elastyczne rozpraszanie”.

W pracy użyto niepoprawnej gramatycznie formy „pasmo ciężko-dziurowe” – określenie zawiera błędną próbę utworzenia złożonego przymiotnika. W fizyce ciała stałego należy stosować określenie „pasmo dziur ciężkich”.

W pracy pojawiają się błędy fleksyjne wynikające najprawdopodobniej z nieuwagi lub braku korekty językowej, np. użycie formy „konstrukcje” zamiast poprawnej „konstrukcję” (biernik liczby pojedynczej) czy „mikroskopie” zamiast „mikroskopię” (biernik liczby pojedynczej). Tego typu błędy językowe są nie tylko niepoprawne gramatycznie, ale również utrudniają odbiór merytoryczny tekstu.

Podsumowując, przedłożona rozprawa doktorska stanowi oryginalne i wartościowe opracowanie naukowe z pogranicza fizyki ciała stałego, optoelektroniki oraz technologii półprzewodnikowej. Praca wnosi istotny wkład do rozwoju wiedzy w zakresie projektowania komponentów laserów VCSEL działających w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni. Autorka przeprowadziła szereg zaawansowanych badań eksperymentalnych i numerycznych, których rezultaty zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych. Uzyskane wyniki mają zarówno znaczenie poznawcze, jak i potencjalne zastosowania praktyczne. Nieliczne uchybienia językowe, terminologiczne czy edytorskie nie obniżają jakości naukowej pracy, mogą natomiast stanowić cenną wskazówkę dla dalszej aktywności badawczej Autorki.

Na podstawie oceny merytorycznej i formalnej stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wszystkie kryteria stawiane pracom doktorskim, a jej Autorka zasługuje na nadanie stopnia naukowego doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr. inż. Moniki MIKULICZ do publicznej obrony.