

Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgr inż. Moniki Mikulicz
Właściwości niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych
w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Mikulicz została wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Marcina Motyki, profesora uczelni, na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Dotyczy ona teoretycznego i eksperymentalnego badania niskowymiarowych struktur fotonicznych, mających zastosowanie w laserach o emisji powierzchniowej (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers — VCSELs). W szczególności oryginalne badania Doktorantki skupiają się na dwóch aspektach: (1) zastosowaniu monolitycznych podfalowych siatek dyfrakcyjnych zarówno w klasycznych laserach półprzewodnikowych jak i w kwantowych laserach kaskadowych (Quantum Cascade Lasers — QCLs) oraz (2) nowatorskich projektach zwierciadeł Bragga — z hybrydową warstwą metaliczną i zwierciadłami plazmonicznymi wykonanymi w jednorodnym materiale o zmiennym domieszkowaniu. Ponadto Doktorantka zaprezentowała nową metodę pomiaru współczynnika załamania materiałów w szerokim zakresie spektralnym.

Lasery pracujące w zakresie średniej i długiej podczerwieni mają istotne znaczenie dla optycznej detekcji gazów. Zastosowanie to wymaga wysokiej jakości emitowanej wiązki, związanej z pracą na pojedynczym modzie oraz możliwości przestrajania długości fali. Wymagania te spełniają bardzo dobrze lasery VCSEL, które ponadto charakteryzują się niewielką ceną oraz możliwością wydajnego testowania jeszcze na etapie produkcji. W związku z tym, podjęty problem badawczy uważam za znaczący i aktualny. Wyniki przeprowadzonych badań mają potencjalne zastosowanie zarówno dla dalszego rozwoju nauki jak i w przemyśle.

We wstępie do rozprawy Doktorantka deklaruje, że postawiła przed sobą następujące cele naukowe:

1. Wykazanie możliwości wytworzenia zwierciadeł na bazie siatek HCG o dużym współczynniku odbicia i przestrajalności w zakresie średniej podczerwieni.
2. Zbadania siatek HCG wytworzonych na strukturach imitujących schemat lasera kaskadowego wykazujących możliwość otrzymania silnej emisji z powierzchni w zakresie średniej i długiej podczerwieni.
3. Wykazanie możliwości wytworzenia efektywnych zwierciadeł Bragga w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni.
4. Wyznaczenie w szerokim zakresie spektralnym współczynników załamania i ich temperaturowych zależności dla materiałów InP, InGaAs, AlAs oraz GaAs.
5. Zbadanie wydajności odbicia dla nowego typu luster DBR, wykorzystujących różnicę koncentracji domieszek w poszczególnych warstwach.

Cele te uważam za zrealizowane, jednakże przedstawiony w rozprawie opis wyników jest zbyt skrótowy i powierzchowny. Uzyskane wyniki zdecydowanie lepiej przedstawione są w trzech publika-

ciach naukowych bezpośrednio powiązanych z tematyką doktoratu, których doktorantka jest pierwszą autorką (dzięki czemu uznaje jej wkład za dominujący):

1. M. Mikulicz, T. Smółka, M. Rygała, M. Badura, W. Kijaszek, A. Łozińska, M. Kamp, M. Motyka, Temperature dependence of refractive indices of InP, GaAs, AlAs, and In_{0.53}Ga_{0.47}As in the mid-infrared spectral range determined by combined ellipsometry and Fourier-transform spectroscopy, *Physical Review Applied* 21 (4), art. no. 044001 (2024).
2. M. Mikulicz, M. Rygała, T. Smółka, M. Janczak, M. Badura, A. Łozińska, A. Wolf, M. Emmerling, B. Ściana, S. Höfling, T. Czyszanowski, G. Sęk, M. Motyka, Enhancement of quantum cascade laser intersubband transitions via coupling to resonant discrete photonic modes of subwavelength gratings, *Optics Express* 31 (16), pp. 26898–26909 (2023).
3. M. Mikulicz, M. Badura, M. Rygała, T. Smółka, W. Macherzyński, A. Łozińska, M. Motyka, Development of the hybrid distributed Bragg reflectors for mid-infrared applications, *Opto-Electronics Review* 32 (1), art. no. e13002 (2024).

Powyższe prace zostały opublikowane w wysoko punktowanych recenzowanych czasopismach naukowych. Ponadto Doktorantka jest współautorką pięciu innych publikacji naukowych oraz zaprezentowała łącznie piętnaście referatów i plakatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych. Ogólnie uważam dorobek publikacyjny Doktorantki za bardzo dobry.

Sama rozprawa składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy — oznaczony numerem 2 — w zwięzły sposób opisuje cel pracy. Drugi (nr 3) zawiera wprowadzenie, którego celem jest uzasadnienie znaczenia przeprowadzonych badań i pokazanie potencjalnych zastosowań uzyskanych wyników. Rozdział trzeci (nr 4) jest bardzo obszerną prezentacją ogólnej teorii związanej z fizyką laserów półprzewodnikowych o emisji powierzchniowej, kwantowych laserów kaskadowych oraz podfalowych siatek dyfrakcyjnych. Kolejny rozdział (5) opisuje techniki wytwarzania i charakteryzacji struktur półprzewodnikowych. Oryginalne badania Doktorantki zaprezentowane są dopiero w rozdziale oznaczonym numerem 6. W każdej z jego sekcji opisane są wyniki niezależnych pomiarów, które Doktorantka wykonała w ramach realizacji doktoratu. Ostatni rozdział stanowi krótkie podsumowanie, zaś po nim następują spisy literatury oraz publikacji, wystąpień konferencyjnych oraz staży naukowych doktorantki.

Z przykrością stwierdzam, że proporcje między częścią teoretyczną a oryginalną treścią badawczą są niewłaściwe. Rozdział 6¹, zawierający wyniki badań, zajmuje jedynie 41 z 124 stron rozprawy, podczas gdy rozdziały 3–5 to aż 65 stron. Sama zawartość teoretyczna — szczególnie w rozdziale 4 — jest w dużej mierze podręcznikowa i potraktowana powierzchownie. Zamieszczenie takich treści w rozprawie doktorskiej jest uzasadnione jedynie w przypadku, gdy są one niezbędne do zrozumienia prezentowanych wyników. W tym przypadku ich objętość nie znajduje takiego uzasadnienia.

Podobne zastrzeżenia dotyczą rozdziału 5. Opisy procesów epitaksji i litografii uznaję za zbędne, jeśli Doktorantka nie wykonywała ich samodzielnie — czego nie potwierdzono w treści pracy. Sekcje dotyczące technik pomiarowych (5.2 i 5.3) są potrzebne, jednak ich umiejscowienie i forma sprawiają, że giną wśród mało istotnych ogólników.

W części teoretycznej dopatrzyłem się również nieścisłości. Przykładowo, rysunek 4.1 jest nadmiernie uproszczony — brakuje na nim kluczowych elementów, takich jak trzeci poziom energetyczny lub mechanizm wstrzykiwania nośników. W sekcji 4.5 błędnie podano, że obszar aktywny VCSEL składa

¹ W tym miejscu i w dalszej części recenzji stosuję numerację używaną przez Doktorantkę w rozprawie.

się z kilku studni kwantowych o łącznej grubości „kilku mikrometrów lub więcej niż 100 μm ”, co jest fizycznie nieprawdziwe. Takie błędy powinny zostać poprawione w przyszłości.

Część badawcza (rozdz. 6) mimo wartościowej treści, została zaprezentowana zbyt skrótowo. Brakuje m.in. klarownych schematów układów pomiarowych, które są standardem w tego typu pracach i ułatwiają zrozumienie przeprowadzonych eksperymentów.

Jak wspomniałem wcześniej, oceny rozprawy dokonałem również na podstawie opublikowanych prac naukowych, których Doktorantka była główną autorką. Całość dorobku świadczy o solidnym i samodzielным wykonaniu badań naukowych na poziomie wymaganym w przewodzie doktorskim. Szczególnie wysoko oceniam:

- analizę wpływu jakości podłoża na transmisję światła,
- opracowanie metody pomiaru współczynnika załamania w szerokim zakresie spektralnym.

Pozostałe prace, choć wykonane rzetelnie, nie mają charakteru przełomowego.

Pod względem redakcyjnym rozprawa prezentuje się przeciętnie. Numeracja rozdziałów jest niewłaściwa (niepotrzebna numeracja spisu treści), pojawiają się błędy gramatyczne, literówki oraz nieprawidłowa typografia symboli matematycznych (brak kursywy).

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorantka wykazała niezbędną wiedzę w zakresie fizyki niskowymiarowych struktur optoelektronicznych mających zastosowanie w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni. Pomimo opisanych w niniejszej recenzji niedociągnięć, rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Mikulicz spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Maciej Dems, prof. uczelni