

Warszawa, 03. sierpnia 2025



Dr hab. Henryk Turski, prof. IWC PAN  
Laboratorium Epitaksji z Wiązek Molekularnych (NL-14)  
Instytut Wysokich Ciśnień "Unipress", PAN  
ul. Sokołowska 29/37, 01-142 Warszawa  
tel. +48228760341  
e-mail: [henryk@unipress.waw.pl](mailto:henryk@unipress.waw.pl)

## Recenzja

**Pracy doktorskiej mgr inż. Moniki Mikulicz pt. "Właściwości niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni"** przygotowanej pod kierownictwem promotora: dr hab. inż. Marcina Motyki.

Niniejsza recenzja została wykonana w związku z uchwałą Rady Naukowej Instytutu Fizyki PAN z dnia 13 maja 2025r. wyznaczającej mnie na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr inż. Moniki Mikulicz w oparciu o rozprawę doktorską o wskazanym wyżej tytule. Niniejszą recenzję wykonano w oparciu o art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Dysertacja spisana została w języku polskim i poprzedzona streszczeniami w języku polskim oraz angielskim. Ma ona formę monografii składającej się ze spisu treści, celu pracy, czterech rozdziałów, podsumowania, bibliografii oraz spisu publikacji, wystąpień i staży naukowych. Elementy pracy zostały opublikowane w 3 publikacjach naukowych, w których doktorantka jest pierwszą autorką. Rozdziały numerowane 2-5 stanowią wstęp podsumowujący aktualny stan wiedzy z zakresu pracy: specyfika badanej długości fali, różne realizacje laserowania w cieple stałym, technologie wzrostu i techniki pomiarowe. W kolejnym rozdziale w formie pięciu podrozdziałów (6.1-6.5) zebrano nowe wyniki w zakresie:

6.1: Eksperymentalnych badań nad siatkami HCG w InP, pokazujące możliwość przestrajania ich właściwości optycznych poprzez kontrolę głębokości trawienia.

6.2: Struktur laserowych z siatkami HCG, wykazując ich zdolność do wzmacniania sygnałów fotoluminescencji dzięki rezonansowi Fano.

6.3: Oceny skuteczności zwierciadeł DBR dla średniej podczerwieni, w tym hybrydowych struktur z warstwą metaliczną.

6.4: Pomiaru temperaturowych zmian współczynnika załamania światła dla wybranych półprzewodników, co umożliwiło dokładniejsze modelowanie struktur optycznych w szerokim zakresie długości fal i temperatur.

6.5: Nowej koncepcji zwierciadeł DBR opartych na różnicy koncentracji nośników, osiągając wysoką efektywność odbicia i otwierając nowe możliwości dla zastosowań w średniej i długofalowej podczerwieni.

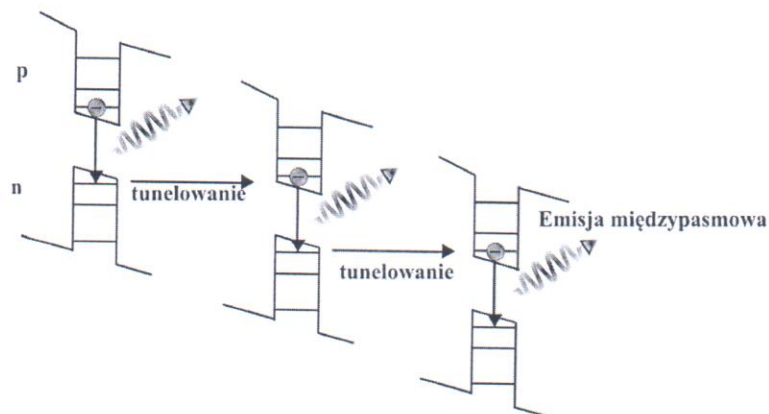
Wśród mocnych stron pracy niewątpliwie wskazałbym zwrócenie uwagi na niejednorodności warstw składowych DBR i zaproponowanie uśrednienia widm z obszaru próbki dalej od krawędzi, co zwiększa wiarygodność prezentowanych danych. Również badania poświęcone DBR opartym na różnicy w poziomach domieszkowania są bardzo istotne i poskutkowały uzyskaniem najlepszych wartości odbicia. Praca doktorska wyróżnia się również analizą wpływu warstwy złota oraz grubości tytanu na właściwości odbiciowe hybrydowych zwierciadeł DBR, co wnosi istotny wkład w projektowanie struktur optycznych. Dodatkowym atutem jest zastosowanie oprogramowania Nextnano do modelowania stanów związanych w obszarze aktywnym lasera kaskadowego, co pozwoliło na precyzyjne dopasowanie struktury elektronowej do wyników eksperymentalnych.

Wśród słabych stron dysertacji muszę wymienić nagminnie stosowany język potoczny, utrudniający często zrozumienie prezentowanych informacji przez nieodpowiednią formę. Są to stwierdzenia takie jak: „...w doktoracie zbadano...”, „Efekt ten był niejako spodziewany...”, „polepszo”, „Wytwarzanie luster półprzewodnikowych”, „Jeśli w kwestii GaAs potwierdzono poprawność jednego z dostępnych modeli to w kwestii InP trzeba raczej powiedzieć, iż otrzymane wyniki wprowadzają raczej nową zależność współczynnika załamania...”. Można również zwrócić uwagę na nieprecyzyjne bądź błędne stwierdzenia jak na str. 104.: „Zatem, brak spodziewanego dużego wzrostu współczynnika odbicia dla próbek z o rząd większą koncentracją można wytłumaczyć faktem rozpraszania światła na inkluzjach.” – mowa tutaj o zmianie domieszkowania z  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  na  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Czy str 6.: „Grzebień częstości (ang. frequency comb) to zaawansowane technologicznie źródła światła, które generują zestawy równomiernie rozłożonych w skali częstotliwości linii emisyjnych” vs str 7.: „Linie widmowe w grzebieniach częstości są równomiernie rozłożone w dziedzinie długości fali, ...”. Czy też (str 29): „Przekłada się to na wyższe napięcie prądu w działającej strukturze.”.

Poniżej pozwolę sobie wskazać kilka kwestii, które moim zdaniem wymagają jednak większej uwagi i powinny zostać wyjaśnione, mając na celu uczynienie pracy bardziej spójną:

1. (str 23) Chciałbym prosić o wyjaśnienie Rys 4.7 oraz zdania: „Na rysunku widoczne jest proces tunelowania elektronów z pasma przewodnictwa regionu n do pasma walencyjnego regionu p, a następnie kaskadowa emisja światła wynikająca z rekombinacji elektron-dziura w różnych warstwach.”





Rys 4.7. Schemat działania międzypasmowego lasera kaskadowego. Diagram ilustruje proces tunelowania elektronów między poziomami energetycznymi w strukturze kaskadowej, co prowadzi do emisji światła na wielu etapach

2. (str. 25) Prosiłbym o wyjaśnienie stwierdzenia w kontekście cytowanych prac: „Obszar aktywny VCSELa składa się najczęściej z kilku studni kwantowych o łącznej grubości kilku mikrometrów, chociaż możliwe jest zastosowanie mniejszej grubości obszaru aktywnego w celu uzyskani niskiego prądu progowego [74] albo grubości większej niż 100  $\mu\text{m}$  w celu uzyskania mocy wyjściowej powyżej 100 mW [75–77].”
3. Dlaczego na Rys 6.3 symulowane jest odbicie dla kąta padania innego niż stosowany w eksperymencie?
4. Na Rys 6.6 grubości warstw prezentowane są z dokładnością do setnych części nanometra. Czy ta precyzja jest dostępna? Czy ta grubość zgadza się z oczekiwanymi stałymi sieci tego materiału?
5. **Siatki HCG w QCL:**
  - a. Widma na Rys 6.9 zostały otrzymane w 10K i 300K, natomiast widma bez siatek prezentowane w Rys 6.7 w 77K i 300K. Czy w 10K bez siatek również byłby widoczne dodatkowe piki w  $\sim 2.8\mu\text{m}$ ? Rys 6.15 i 6.16 b) wydają się sugerować, że ta linia również była tam mierzalna.
  - b. Jakie były parametry siatki w próbce B i C? Brak jest symulacji kształtu spodziewanego odbicia tej siatki a nawet parametrów siatki (podany jest jedynie enigmatyczny rysunek 6.8, bez wartości). W tekście wspomina się o siatce „Górny panel przedstawia widma zmierzone dla struktury z zaprojektowanym maksimum odbicia siatki dla długości fali 9  $\mu\text{m}$  a dolny dla długości fali 4  $\mu\text{m}$ .” natomiast w publikacji [119] te same próbki w tabeli 1. podpisane są jako: „Sample B (2.9  $\mu\text{m}$  design grating)” oraz „Sample C (2.9  $\mu\text{m}$  design grating)”, która informacja jest prawdziwa?
  - c. Biorąc pod uwagę raportowane w późniejszej części pracy niejednorodności w grubościach otrzymywanych warstw w DBR, dla tej próbki niejednorodności mogą istotnie zmienić stany związane pokazane w Rys 6.11. czy Autorka

wykluczyła możliwość wpływu innych czynników niż wytworzenie DBR na obserwacje przejść między podpasmowych? Łatwo wyobrazić sobie, że dla tak skomplikowanej struktury, niewielkie zmiany grubości i składu mogą istotnie zmieniać kształt funkcji falowych.

6. W opisie hybrydowych DBRów brakuje informacji o odbiciu od warstwy złota (bez DBR) mierzonej przez podłoże. Czy taki pomiar był przeprowadzony? Mogłoby to ułatwić ocenę wkładu DBRów w odbicie dla próbek ze złotem.
7. Na stronie 105. napisano: „Osiągnięto zadowalający poziom współczynnika odbicia (~90%) i selektywność spektralną charakterystyczną dla zwierciadeł Bragga.”. Dlaczego 90% jest wartością zadowalającą? W jakim kontekście porównywać należy otrzymany wynik?

Zawarte powyżej pytania nie umniejszają istotnie roli przedstawionym obserwacjom, a dalekosiężny cel postawiony pracy sformułowany jako „zapropozowanie różnego typu rozwiązań wspierających rozwój VCSEL i przeznaczonych do emisji średniej/długofalowej podczerwieni, bazujących na materiałach półprzewodnikowych III-V.” uważam za zaadresowany.

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Właściwości niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych w zakresie średniej i długofalowej podczerwieni” autorstwa Pani mgr inż. Moniki Mikulicz stwierdzam, że **Doktorantka wykazała odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją**, dowiodła, że posiada umiejętności wyboru odpowiednich technik pomiarowych i planowania eksperymentów w celu rozwiązania postawionych problemów naukowych.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Mikulicz **spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (Dz.U.2024.0.1571). Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie pracy do obrony, a mgr inż. Moniki Mikulicz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Henryk Tondos