



Wojskowa  
Akademia  
Techniczna  
im. Jarosława Dąbrowskiego

Instytut  
Optoelektroniki 

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki

Warszawa, 04.09.2024r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ  
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE  
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Opracowanie nowej konstrukcji falowodów do zastosowania  
w kwantowych laserach kaskadowych**

**Autor rozprawy: mgr inż. Adriana Łozińska**

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Adriany Łozińskiej, dotyczy ambitnego zadania - opracowania nowatorskiej konstrukcji falowodu kwantowego lasera kaskadowego na bazie heterostruktur InGaAs/AlInAs/InP wytwarzanych techniką LP-MOVPE. Praca była realizowana w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydziału Elektroniki Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Przeprowadzone badania były możliwe dzięki wsparciu ze strony projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (w ramach projektu TECHMATSTRATEG 1/347510/15/NCBR/2018 „SENSE”), Narodowe Centrum Nauki (grant OPUS nr 2019/33/B/ST7/02591), Międzyuczelniane Centrum Dydaktyczno - Technologiczne „Technopolis” we Wrocławiu oraz przy współpracy w ramach Sieci Badawczej Łukasiewicz IMiF, firmą Vigo Photonics S.A. i Politechniką Łódzką.

Na stronie 37 rozprawy Autorka przedstawiła główny cel rozprawy doktorskiej:

**Opracowanie podstaw teoretycznych i weryfikacja technologiczna nowej konstrukcji lasera kaskadowego, w której zaproponowano warstwy ograniczające o gradientowym rozkładzie domieszki donorowej w celu uzyskania optymalnego profilu zespolonego współczynnika załamania.**

Praca doktorska mgr inż. Adriany Łozińskiej ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Poprzedzona jest ona krótkimi streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisem symboli i akronimów, wstępem, a zasadnicza część pracy składa się z 8. rozdziałów oraz bibliografii.

W rozdziale pierwszym, podano informacje nt. emiterów średniej i dalekiej podczerwieni oraz dotyczące zakresu przeprowadzonych badań.

W rozdziale drugim Doktorantka omówiła budowę, zasadę działania i zastosowania laserów QCL. Szczególną uwagę zwróciła Ona na rolę rdzenia, warstw separujących i ograniczających oraz zaproponowała opracowanie konstrukcji falowodów laserów QCL, bazującej na gradientowo domieszkowanych krzemem warstwach ograniczających InP:Si. Podaje także cel pracy i zadania szczegółowe. Rozdział drugi rozprawy stanowi wprowadzenie do tematyki laserów QCL.

W rozdziale trzecim przedstawiono wyniki modelowania laserów QCL. Zastosowano modelowanie numeryczne do zbadania różnych konfiguracji struktury epitaksjalnej falowodu lasera QCL i obliczenia podstawowych parametrów optycznych. We współpracy z zespołem prof. T. Czystanowskiego z Politechniki Łódzkiej wyznaczyła zależność współczynnika załamania InP od poziomu domieszkowania, dla długości fali 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$ . Następnie przeprowadzono optymalizację warstw falowodowych lasera kaskadowego dla długości fali 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$ . Autorka podała optymalne parametry warstw falowodowych dla laserów zaprojektowanych dla tych długości fali.

W rozdziale czwartym Autorka omówiła dwie współczesne technologie cienkich warstw (MBE i MOVPE) stosowane przy konstrukcji laserów półprzewodnikowych. Opisując technologię MBE Autorka oprócz zalet takich jak precyzyjna kontrola grubości i składu warstw, doskonałej jakości krystalicznej czy ostrych interfejsów podaje trudności jej stosowania przy osadzaniu warstw zawierających fosfor np. fosforek indu InP. W tym wypadku zalety technologii MOVPE są oczywiste.

W rozdziale piątym zawarto opis stosowanych przez Doktorantkę metod pomiarowych. Omówiono spektroskopię fotoluminescencyjną, dyfrakcję rentgenowską, elektrochemiczne profilowanie pojemnościowo-napięciowe, spektroskopię Ramana oraz mikroskopię sił atomowych.

Wszystkie widma fotoluminescencji, badania koncentracji swobodnych nośników w strukturach epitaksjalnych oraz badania przy użyciu mikroskopii sił atomowych zostały przeprowadzone w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii na Politechnice Wrocławskiej. Badania rentgenowskie testowych struktur epitaksjalnych wykonanych w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii na Politechnice Wrocławskiej zostały przeprowadzone w Katedrze Nanometrologii PWr, natomiast wybrane struktury badano w Sieci Badawczej Łukasiewicz – PORT we Wrocławiu.

W rozdziale szóstym omówiono technologię testowej heterostruktury rdzenia lasera emitującego promieniowanie o długości fali  $\lambda = 9 \mu\text{m}$ , warstw separujących InGaAs, a także warstw ograniczających na bazie InP:Si. W celu opracowania technologii konieczne było wykonanie wielu struktur testowych umożliwiających wyznaczenie krzywych kalibracyjnych stanowiska i określenie optymalnych parametrów procesu. W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury wygrzewania rdzenia na widma fotoluminescencji, widma Ramana i generowane naprężenia. Z badań wynika, że spektroskopia Ramana i PL może być stosowana w analizie naprężeń i ocenie jakości interfejsów w tak złożonych strukturach jak rdzeń lasera QCL. Autorka wykazała, że wybór temperatury  $645^\circ\text{C}$  był optymalny podczas procesu osadzania całej struktury epitaksjalnej lasera QCL.

W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki pomiarów (widm elektroluminescencji, elektrooptycznych L-I-V, spektralnych) struktur testowych w których zmodyfikowano jedynie górną warstwę ograniczającą (seria 1) oraz struktur z gradientowym domieszkowaniem w dwóch warstwach ograniczających struktur QCL (seria 2). Na podstawie zmierzonych charakterystyk wyznaczono podstawowe parametry użytkowe testowych struktur optymalizowanych na  $\lambda$  ok.  $5 \mu\text{m}$  tj. rezystancję szeregową, gęstość prądu progowego, szerokość połówkową linii emisyjnej oraz długość emitowanej fali. Autorka porównała wyniki uzyskane dla obu serii z wynikami dla konstrukcji standardowej. Uzyskała poprawę parametrów (o tym wypowiem się w dalszej części recenzji).

W rozdziale ósmym zawarto podsumowanie wyników pracy.

Rozprawa liczy 182 strony, w tym 15 stron stanowi bibliografia.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadcząca o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 187 pozycji. Analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, została przeprowadzona z dużą starannością. Przedstawione źródła literaturowe są aktualne i ich lektura świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki z zakresu merytorycznego rozprawy. Wnioski z przeglądu źródeł literaturowych sformułowano właściwie.

### 3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i przyjęte założenia są uzasadnione?

Autorka w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej skoncentrowała się przede wszystkim na modelowaniu nowych konstrukcji laserów QCL z zastosowaniem gradientowego rozkładu domieszkowania w obrębie warstw ograniczających oraz weryfikacji technologicznej uzyskanych wyników. Zatem, głównym celem pracy było opracowanie podstaw teoretycznych i weryfikacja technologiczna nowej konstrukcji lasera kaskadowego, w której zaproponowano warstwy ograniczające o gradientowym rozkładzie domieszki donorowej, w celu uzyskania optymalnego profilu zespolonego współczynnika załamania.

Metodologia prowadzonych przez Doktorantkę prac badawczych zakładała:

- opracowanie modelu fizycznego i projekt epitaksjalnej struktury lasera QCL z nową konfiguracją warstw ograniczających,
- modelowanie struktur laserowych QCL o emisji ok. 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$  z różną konfiguracją warstw separujących i ograniczających,
- propozycję konstrukcji i technologii struktur testowych w celu weryfikacji wyników modelowania,
- wykonanie struktur testowych,
- pomiary tych struktur i wyznaczenie głównych parametrów.

Autorka rozwiązała postawione zadania, użyła właściwych metod badawczych, a przyjęte założenia są merytorycznie uzasadnione.

### 4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Na stronie 37 rozprawy Autorka przedstawiła główny cel rozprawy doktorskiej. Osiągnięcie tego celu wiązało się z opanowaniem przez Doktorantkę wiedzy z zakresu fizyki laserów QCL, modelowania tych przyrządów, technologii oraz metrologii.

Do oryginalnych osiągnięć Autorki uznaje:

- opracowanie metodologii modelowania struktur laserów QCL na bazie heterostruktury InP/InGaAs/AlInAs, ze szczególnym uwzględnieniem warstw domieszkowanych w sposób gradientowy,
- wyznaczenie optymalnych grubości warstw separujących i ograniczających laserów QCL zaprojektowanych do emisji promieniowania o długości fali 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$ ,
- wyznaczenie poziomu i rozkładu domieszkowania w warstwach ograniczających laserów QCL zaprojektowanych do emisji promieniowania o ww. długościach fal,

- wyznaczenie krzywych kalibracyjnych stanowiska epitaksjalnego dotyczących wzrostu związków trójskładnikowych będących bazą rdzenia lasera QCL zaprojektowanego na długość fali 9  $\mu\text{m}$ ,
- określenie optymalnej temperatury wzrostu górnej warstwy ograniczającej tzw. claddingu.

Jednak najważniejszym osiągnięciem Doktorantki było przeprowadzenie weryfikacji technologicznej modelowanych struktur laserowych o  $\lambda$  ok. 5  $\mu\text{m}$ , przez wytworzenie struktur przyrządowych QCL z gradientowo domieszkowanymi warstwami ograniczającymi.

Autorka wykonała dwie serie testowych struktur laserowych: pierwszą w technologii hybrydowej (MBE+LP-MOVPE) i drugą całkowicie w technologii LP-MOVPE. W każdej serii zostały wytworzone dwie struktury: standardowa o schodkowym rozkładzie domieszki oraz gradientowa z rozkładem domieszki typu B sinus.

W obu wypadkach Doktorantka potwierdziła zasadność wprowadzenia domieszki o rozkładzie gradientowym do warstw ograniczających laserów QCL. Uzyskano w ten sposób lepsze parametry użytkowe dla struktury z 2 serii, która zawierała optymalizowaną strukturę na 5  $\mu\text{m}$  z rozkładem gradientowym domieszki, w porównaniu do konstrukcji standardowej. (Uwaga: to stwierdzenie jest słuszne tylko wtedy, gdy opieramy się na stwierdzeniu ze str. 159, że dla struktury z gradientem domieszki prąd progowy jest mniejszy w porównaniu do prądu progowego dla struktury standardowej. W tabeli 12 przypisano mniejszy prąd progowy strukturze standardowej). Proszę o wyjaśnienie występującej niezgodności danych.

Część uzyskanych przez Autorkę wyników badań została pozytywnie zweryfikowana przez recenzentów czasopism naukowych z tzw. listy filadelfijskiej. Dwie prace, w których Doktorantka jest pierwszym współautorem zostały opublikowane w *Optica Applicata*.

Polskie lasery QCL opracowane w Zespołach Profesorów M. Bugajskiego i M. Tłaczali znalazły już zastosowanie w wysokoczułych sensorach materii śladowej. Spełniają one również wymagania systemów łączności optycznej w otwartej przestrzeni (ang. *Free Space Optics*).

**5. Czy autor wykazał umiejętności poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Recenzowana praca została napisana w sposób staranny. Układ pracy jest logicznie uzasadniony. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo gruntowna analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, podanie metodyki badań i dyskusja otrzymanych wyników.

## 6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Jak w każdej rozprawie doktorskiej Autorka nie ustrzegła się drobnych niedociągnięć. Oto niektóre z nich:

- dyskusyjny jest podział zakresu promieniowania podczerwonego na podzakresy podany na str. 10. Zdaniem recenzenta powinno być: NIR (0,78-1  $\mu\text{m}$ ), SWIR (1-3  $\mu\text{m}$ ), MWIR (3-6  $\mu\text{m}$ ), LWIR (15-30  $\mu\text{m}$ ), FIR (30-100  $\mu\text{m}$ ) [A. Rogalski, *Infrared and Terahertz Detectors*, 3rd edition, CRC Press, Boca Raton, 2019],
- str. 10, zamiast rysunku 2.2 powinno być rysunku 1.2,
- str. 13 wątpliwe jest stwierdzenie ... „co daje możliwość uzyskania jednoznacznej odpowiedzi w układach detekcyjnych”,
- str. 13, błędny podpis pod rys. 1.5. Transmisja atmosfery ziemskiej obejmuje szerszy zakres niż tylko średniej podczerwieni,
- str. 20, zamiast wielkość wzmocnienia powinno być wartość wzmocnienia. Podobne stwierdzenie zauważyłem w innych miejscach pracy (np. str. 31, 45, 67),
- str. 27, zamiast rysunku 2.8 powinno być rysunku 2.9,
- str. 33, nieprawdziwe jest stwierdzenie, że „emitery promieniowania podczerwonego zapewniają wysoką czułość detekcji”,
- str. 45, jest rezystancja przyrządu „spadła prawie o 20%”. Powinno być zmalała ...,
- str. 46, podpis pod rys. 3.5 - powinno być – Zależność współczynnika uwięzienia modu ...,
- str. 47, Autorka używa pojęcia żargonowego „spacer” – podobnie jest w innych miejscach pracy,
- str. 120, „Arkusze kalkulacyjny został stworzony” – powinno być opracowany,
- str. 125, W tytule 6.1.2. powinno być InGaAs/AlInAs,
- str. 126, zamiast „Intensywność sygnału ...” rekomenduje Natężenie sygnału...

Uwagi te nie mają one wpływu na wysoką ocenę pracy. Podaję je jedynie z obowiązku recenzenta.

### Uwagi merytoryczne do dyskusji.

1. Na str. 127 jest stwierdzenie: „Zaobserwowano, że im mniejsza jest grubość bariery tym większą wartość przyjmuje FWHM”. Proszę o komentarz dlaczego?

2. Czy modele teoretyczne zastosowane w pracy do wyznaczenia korelacji zespolonego współczynnika załamania warstw InP z poziomem ich domieszkowania uwzględniają chwilowe zmiany koncentracji swobodnych nośników np. podczas przepływu prądu przez strukturę lasera w czasie ich pracy (stosujemy bowiem zasilanie prądowe)? Jaki to może mieć wpływ na wyniki modelowania projektowanych laserów QCL?
3. Przeprowadzone przez Autorkę modelowanie składało się z kilku etapów, w których badano wpływ różnych konfiguracji struktury epitaksjalnej lasera QCL na jego parametry użytkowe: najpierw badano wpływ grubości warstwy separującej InGaAs, następnie wpływ grubości oraz poziomu domieszkowania warstw ograniczających, a w ostatnim etapie wpływ gradientowego rozkładu domieszki w obrębie warstwy ograniczającej. Czy na podstawie uzyskanych wyników modelowania można jednoznacznie stwierdzić, które parametry badanych falowodów mają największy wpływ na parametry użytkowe laserów QCL?

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań przedstawione przez Autorkę rozprawy są wartościowe przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. Tego typu analizy mogą być pomocne dla technologów tych przyrządów.

Na podkreślenie zasługuje współpraca z Zespołami krajowymi (Politechniką Łódzka, Siecią Badawczą Łukasiewicz IMiF, Vigo Photonics S.A., innymi wydziałami Politechniki Wrocławskiej) i międzynarodowymi (z Hiszpanii).

Uważam, że dalsze prace w tej dziedzinie powinny być kontynuowane.

## 8. Wniosek końcowy

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adriany Łozińskiej spełnia wszystkie wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 186 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 poz. 472 z dnia 10 marca 2023 r.).

**Ponadto stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adriany Łozińskiej stanowi oryginalne rozwiązania problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy jej Autorki z dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydatkę.**

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



