

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydziałowy Zakład Mikroelektroniki i Nanotechnologii
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 12.05.2017

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ
INSTYTUTU TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ W WARSZAWIE**

**Tytuł rozprawy: Molecular beam epitaxy of quantum cascade lasers based
on InGaAs/InAlAs/InP material system**

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Gutowski

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Maciej Bugajski

Kwantowe lasery kaskadowe (QCL – Quantum Cascade Lasers) ze względu na możliwość emisji promieniowania elektromagnetycznego o długość fali od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów (od średniej podczerwieni do zakresu terahercowego) mają cały szereg potencjalnych zastosowań na przykład do monitoringu skażeń powietrza, komunikacji optycznej w wolnej przestrzeni oraz w medycynie. Zaletą tego typu laserów są ich małe rozmiary natomiast wadą bardzo skomplikowana technologia wytwarzania struktur epitaksjalnych i laserów QCL.

Dlatego badania nad opracowaniem własnej technologii osadzania struktur epitaksjalnych kwantowych laserów kaskadowymi zrealizowane przez mgr inż. Piotra Gutowskiego, autora rozprawy, mieszczą się w głównym nurcie prac prowadzonych w wiodących laboratoriach na całym świecie.

Mgr inż. Piotr Gutowski postawił sobie za cel opracowanie technologii epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) dwóch rodzajów struktur przyrządowych kwantowych laserów kaskadowych, na bazie układu materiałowego InGaAs/InAlAs/InP. Pierwszy rodzaj struktur, przeznaczony do wytwarzania kwantowych laserów kaskadowych (QCL) emitujących promieniowanie o długości fali, λ , równej $9,4\mu\text{m}$, zawierał dopasowany sieciowo do podłoża obszar aktywny. Drugi rodzaj struktur epitaksjalnych, przeznaczony do wytwarzania laserów o projektowanej długości fali, λ , równej $4,7\mu\text{m}$, był niedopasowanych sieciowo do podłoża i zawierał obszar aktywny, w którym zastosowano kompensację naprężeń.

Na podstawie obszernego przeglądu literaturowego, przeprowadzonych, przy jego współdziałaniu, eksperymentów oraz wyczerpującej analizy wyników badań autor sformułował następującą tezę badawczą, że: „wykorzystując hybrydową technologię polegającą na zastosowaniu techniki MBE i MOVPE do epitaksji struktur QCL można wykorzystać najlepsze właściwości każdej z tych metody; to znaczy uzyskać dużą jednorodność i powtarzalność obszaru aktywnego, osadzanego techniką MBE, i można wyeliminować największą wadę tej techniki polegającą na niemożności osadzania grubych warstw falowodowych InP, ponieważ w technologii hybrydowej są one sadzane techniką MOVPE”.

Praca ma charakter doświadczalno-technologiczny. Zawiera ona duży element nowości, a jej tematyka jest aktualna i ważna dla badań stosowanych w obszarze projektowania i wytwarzania zaawansowanych elementów optoelektronicznych. Praca składa się ze spisu tabel i rysunków, streszczenia w języku polski i angielskim, wprowadzenia - w którym przedstawiono główną motywację podjęcia badań oraz określono cel pracy, sześciu głównych rozdziałów, podsumowania, spisu literatury oraz spisu publikacji mgr inż. Piotra Gutowskiego. Do pracy dołączono kserokopie trzech wybranych, przez autora pracy, artykułów, które uznał on za najbardziej reprezentatywne dla zrealizowanych badań. W wypadku dwóch publikacji mgr inż. Piotr Gutowski jest ich pierwszym autorem.

W rozdziale pierwszym stanowiącym wprowadzenie do planowanych badań przedstawiono motywację podjęcia badań oraz sformułowano ich główne cele. W rozdziale drugim omówiono zasadę działania kwantowych laserów kaskadowych oraz opisano ich podstawowe parametry. W rozdziale trzecim opisano dwie techniki stosowane do osadzania struktur epitaksjalnych laserów QCL: MBE i MOVPE oraz dokonano jakościowego porównania obu metod. W rozdziale czwartym szczegółowo przedstawiono proces wytwarzania struktur epitaksjalnych laserów QCL obejmujący projektowanie i wytwarzanie obszaru aktywnego, konstrukcję i technologię warstw falowodowych oraz zaprezentowano możliwości technologiczne i pomiarowe systemów MBE będących w dyspozycji Zakładu Fotoniki ITE. W rozdziale tym przedstawiono też techniki, które zastosowano do charakteryzacji heterostruktur laserów QCL po procesie wzrostu takie jak: wysokorozdzielcza dyfrakcja rentgenowska (HXR), mikroskopia sił atomowych (AFM) i transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM). Szczegółowo omówiono zastosowane procedury kalibracji parametrów procesu MBE oraz opisano opracowane procesy technologiczne wytwarzania dopasowanych sieciowo do podłoża InP struktur epitaksjalnych laserów QCL oraz struktur epitaksjalnych laserów QCL z kompensacją naprężeń w obszarze aktywnym. Prowadzono charakteryzację *in-situ* osadzanych struktur laserowych przy użyciu pirometru optycznego, spektrometru do odbiciowej dyfraktometrii

wysokoenergetycznych elektronów (RHEED) oraz reflektometru optycznego firmy LayTec. W ostatniej części rozdziału, w sposób syntetyczny, omówiono procesy przyrządowe wytwarzania laserów QCL. Rozdział piąty zawiera wyniki pomiarów charakterystyk elektrooptycznych laserów QCL wytworzonych w heterostrukturach epitaksjalnych o różnej konstrukcji. Wytworzono lasery QCL w obu typach heterostruktur: heterostrukturach zawierających dopasowany sieciowo do podłoża obszar aktywny oraz heterostrukturach niedopasowanych sieciowo do podłoża zawierających obszar aktywny z kompensacją naprężeń. W obu typach laserów stosowano nisko-domieszkowane podłoże InP, jako dolny falowód oraz pojedynczą warstwę $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ lub InP, jako górny falowód. Wytworzono również dwie symetryczne konstrukcje falowodu z warstwami $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ lub InP po obu stronach obszaru aktywnego. Górne warstwy falowodowe InP krystalizowano techniką MOVPE w WZMiN WEMiF PWr. Przeanalizowano wpływ konstrukcji falowodów oraz konstrukcji obszaru aktywnego na charakterystyki elektrooptyczne obu typów laserów oraz ich prąd progowy. W rozdziale szóstym przedstawiono, w sposób syntetyczny, podsumowanie i dyskusję wyników badań obu typów laserów QCL wytwarzanych w podłożu InP. Rozdział siódmy zawiera wyniki badań autora nad opracowaniem technologii nowych struktur laserów z naprężonym obszarem aktywnym, wykonanych na bazie heterostruktur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$, w których wszystkie studnie GaAs zastąpiono studniami z $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ o małej, kilkuprocentowej, zawartości indu. Opisano proces projektowania takich laserów, wytwarzanie heterostruktur epitaksjalnych techniką MBE, wyniki pomiarów charakterystyk elektrooptycznych laserów QCL wykonanych w tych strukturach oraz wykazano ich zalety w porównaniu do standardowych konstrukcji laserów QCL bazujących na heterostrukturach AlGaIn/GaN. Rozdział osmy zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań oraz omówienie ich najważniejszych rezultatów.

Podstawą zrealizowanych prac badawczych było przeprowadzenie przez autora rozprawy analizy danych literaturowych dotyczących projektowania, konstrukcji i technologii wytwarzania heterostruktur epitaksjalnych laserów QCL. Autor dokonał aktualnego i wyczerpującego zagadnienie przeglądu literaturowego. W swojej pracy powołuje się on na 70 pozycji literaturowych, z których większość zostało opublikowane po roku 2000. Jednocześnie w przeglądzie literaturowym obecne są pozycje literaturowe opublikowane wiele lat temu, istotne z punktu widzenia wytwarzania struktur epitaksjalnych QCL. W przypadku 2 cytowanych prac mgr inż. Piotr Gutowski jest ich współautorem. Analiza danych literaturowych umożliwiła autorowi sformułowanie właściwych wniosków, co w połączeniu z wiedzą dostępną w Zakładzie Fotoniki ITE, pozwoliło na prawidłowe sformułowanie celu badań i efek-

tywne zaplanowanie prac eksperymentalnych. Właściwy dobór źródeł, umiejętność prawidłowej analizy zwartych w nich rezultatów oraz sposób ich wykorzystania potwierdzają bardzo dobrą wiedzę autora w dziedzinie prowadzonych badań.

Mgr inż. Piotr Gutowski, z nawiązką, zrealizował wszystkie sformułowane cele pracy. Na podkreślenie zasługuje wielowątkowość prowadzonych prac badawczych obejmujących: projektowanie konstrukcji heterostruktur laserów QCL i procesów ich osadzania, charakteryzacja *in-situ* i *ex-situ* struktur epitaksjalnych, wytwarzanie laserów QCL oraz dobrze udokumentowane zbadanie ich właściwości elektro-optycznych. Pozwala to stwierdzić, że do rozwiązania postawionych zagadnień zostały użyte właściwe metody badawcze, które umożliwiły osiągnięcie założonych celów pracy.

Praca jest oryginalna, a prezentowane wyniki badań stanowią samodzielny i oryginalny dorobek autora. Do najważniejszych jego osiągnięć można zaliczyć:

- opracowanie powtarzalnej technologii dopasowania sieciowo oraz z kompensacją naprężeń heterostruktur InGaAs/InAlAs/InP przeznaczonych do wytwarzania laserów QCL emitujących promieniowanie o długości fali, λ , odpowiednio 4,7 μm i 9,4 μm . Wszystkie lasery wytworzone w opracowanych strukturach pracowały w trybie pracy impulsowej w temperaturze pokojowej (do 100°C) w impulsowym modzie zasilania,
- opracowanie autorskiej metody pomiaru i analizy parametrów strumienia jonów, która pozwoliła na poprawę jednorodności i powtarzalności parametrów wytwarzanych heterostruktur laserowych,
- zastosowanie dwóch galowych komórek efuzyjnych do wytwarzania dopasowanych sieciowo warstw InGaAs co umożliwiło szybsze wyłączanie strumieni jonów i pozwoliło na zmniejszenie ilości defektów galowych występujących w osadzanych warstwach,
- zmodyfikowanie konstrukcji laserów QCL na bazie heterostruktur Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs, w których zastąpiono wszystkie studnie GaAs studniami z In_xGa_{1-x}As z kilkuprocentową zawartością indu. Wytworzone lasery miały lepsze parametry w porównaniu z klasycznymi laserami Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs QCL. Pracowały one w trybie pracy impulsową w temperaturach powyżej temperatury pokojowej (do 50°C) oraz miały mniejsze prądy progowe.

Opracowane przez autora heterostruktury mogą znaleźć zastosowanie w do wytwarzania dedykowanych laserów QCL. Ponadto przedstawione wyniki badań mają istotne znaczenie dla rozszerzenia stanu wiedzy dotyczącej wytwarzania heterostruktur laserów QCL dopasowanych sieciowo i z kompensacją naprężeń oraz stanowią istotny wkład w rozwój tej tema-

tyki badawczej. O oryginalności i nowatorstwie prowadzonych badań świadczą liczne opublikowane prace naukowe, których mgr inż. mgr inż. Piotr Gutowski jest współautorem (łącznie 20 publikacji, w tym 9 z listy JCR).

Praca jest napisana w języku angielskim, w sposób staranny, jasny i logiczny, poprawny pod względem stylistycznym. Jej układ i strona graficzna nie budzi zastrzeżeń.

Recenzowana praca dotyczy problematyki opracowania powtarzalnej technologii osadzania struktur epitaksjalnych przeznaczonych do wytwarzania kwantowych laserów kaskadowymi QCL emitujących promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali, λ , 4,7 μm i 9,4 μm . Ze względu na stopień złożoności tego zagadnienia uważam, że rozprawa nie ma słabych stron i istotnych wad. Jednak, jeżeli jest to możliwe recenzent chciałby uzyskać bardziej szczegółowe informacje, na temat wpływu opracowanej procedury pomiaru i analizy parametrów strumienia jonów na jednorodność parametrów wytwarzanych heterostruktur laserowych.

Prezentowana praca ma istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, przyczyni się też ona do dalszego rozwoju stanu wiedzy w dziedzinie badań

Ze względu na walory poznawcze i potencjalne możliwości aplikacyjne przedstawioną rozprawę uważam za bardzo dobrą, zasługującą na wyróżnienie. Dlatego mając również na uwadze szeroką gamę zrealizowanych prac doświadczalnych, wnikliwą analizę uzyskanych danych oraz znaczenie naukowe wyników badań i dorobek naukowy Kandydata, recenzent wnosi o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. mgr inż. Piotra Gutowskiego.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Piotra Gutowskiego stanowi oryginalny i samodzielny dorobek autora oraz spełnia z wyrażnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Piotra Gutowskiego i pozytywną ocenę Jego rozprawy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki mgr inż. Piotr Gutowski spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych i wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej Rozprawy



Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz