

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz  
Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki  
Politechniki Wrocławskiej  
50-370 Wrocław  
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 18.02.2016

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

**Tytuł rozprawy: „Study of the mid-infrared quantum cascade laser  
fabrication technology”**

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Karbownik

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Maciej Bugajski

Wstęp

Ze względu na szeroki obszar potencjalnych zastosowań półprzewodnikowych emiterów promieniowania, z zakresu średniej i dalekiej podczerwieni, badania nad opracowaniem konstrukcji i technologii kwantowych laserów kaskadowymi (QCL – Quantum Cascade Lasers) mieszczą się w głównym nurcie prac prowadzonych w wiodących laboratoriach na świecie. Badania te ukierunkowane są na opracowanie laserów kaskadowych dedykowanych do określonych zastosowań. Ze względu na duży stopień skomplikowania technologii laserów QCL istotnym czynnikiem jest opracowanie procesów wytwarzania, które umożliwią zmniejszenie kosztów bez pogorszenia parametrów użytkowych laserów. W ten wątek badawczy dobrze wpisuje się rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Karbownika, której głównym celem było opracowanie pełnej technologii wytwarzania laserów QCL, emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni przeznaczonych do pracy impulsowej w temperaturze pokojowej. Autor rozprawy skoncentrował się na analizie możliwości wykorzystania do tego celu aparatury technologiczno-pomiarowej i procedur technologicznych dostępnych w Zakładzie Fotoniki ITE. W swoich badaniach rozpatrywał dwa układy materiałowe: GaAs/AlGaAs oraz InP/InGaAs/InAlAs. Każdy z tych układów ma swoje ograniczenia, związane z możliwym do uzyskania zakresem długości fali emitowanego promieniowania, stopniem skomplikowania i kosztem technologii.

Rozprawa ma charakter technologiczno-pomiarowy. Ma ona duży element nowości, a jej tematyka jest aktualna i ważna dla badań stosowanych w obszarze kwantowych laserów ka-

skadowych. Rozprawa składa się ze streszczenia, wstępu, czterech rozdziałów głównych, podsumowania, spisu literatury, wykazu prac własnych mgr inż. Piotra Karbownika oraz trzech wybranych publikacji ilustrujących wkład Autora rozprawy w badania nad kwantowymi laserami kaskadowymi prowadzone w Zakładzie Fotoniki ITE.

Streszczenie zawiera syntetyczny opis prac badawczych przeprowadzonych przez mgr inż. Piotra Karbownika.

We wstępie omówiono, w sposób syntetyczny, zawartość rozprawy, przedstawiono historię badań nad kwantowymi laserami kaskadowymi, ich zastosowania oraz motywację do podjęcia badań nad opracowaniem pełnego procesu technologicznego uwzględniającego potencjał wytwórczy Zakładu Fotoniki ITE. W tej części rozprawy Autor powołał się na 19 pozycji literaturowych.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawy teoretyczne działania laserów kaskadowych oraz samo uzgodnioną metodę wyznaczania charakterystyk elektro-optycznych kwantowych laserów kaskadowych pracujących w zakresie średniej podczerwieni. Mgr inż. Piotr Karbownik opracował własne oprogramowanie, które nazwał SciLab, umożliwiające analizę działania laserów kaskadowych wykonywanych w heterostrukturze o zadanej konstrukcji. W końcowej części rozdziału Autor Rozprawy porównał symulowane i zmierzone charakterystyki I-V i I-L wytwarzanych laserów. Uzyskano bardzo dobrą zgodność przebiegu tych charakterystyk, chociaż wartości liczbowe różniły się dość znacznie. Na podkreślenie zasługuje podjęta, przez mgr inż. Piotra Karbownika, próba wyjaśnienia możliwych przyczyn odpowiedzialnych za te rozbieżności.

Rozdział trzeci zawiera opis teoretyczny podstawowych przyrządowych procesów technologicznych niezbędnych do wytworzenia kwantowych laserów kaskadowych oraz dyskusję wpływu typu zastosowanej metody na jakość i właściwości poszczególnych nanoszonych lub trawionych warstw. Swoje rozważania Autor rozprawy oparł na analizie 38 dobrze dobranych pozycji literaturowych.

W rozdziale czwartym przedstawiono opis procesów technologicznych, zastosowanych przez mgr inż. Piotra Karbownika, do wytworzenia kwantowych laserów kaskadowych w epitaksjalnych heterostrukturach GaAs/AlGaAs oraz InP/InGaAs/InAlAs. Szczegółowo omówiono stosowane procesy subtraktywnej i addytywnej fotolitografii oraz rodzaje fotorezystów wykorzystywane w poszczególnych etapach procesu technologicznego. Zaprezentowano wyniki mokrego trawienia struktury meza laserów na bazie heterostruktur GaAs/AlGaAs oraz InP/InGaAs/InAlAs. Kolejną część rozprawy poświęcono wytwarzaniu kontaktów omowych do GaAs typu n oraz do warstw n-InGaAs i podłoży n-InP. Na kontakty omowe do n-GaAs stosowano wielowarstwowe metalizacje Ni/AuGe/Ni/Au, które formowano termicznie w temperatu-



rze 435°C przez 90 sek. w atmosferze azotu techniką RTA. Kontakty omowe do n-InP wytwarzano z wielowarstwy AuGe/Ni/Au, formowanej termicznie w temperaturze 370°C przez 60 sek. w atmosferze azotu w piecu oporowym lub urządzeniu RTA. Na kontakty omowe do n-InGaAs stosowano dwa rodzaje metalizacji: Ti/Au lub Ti/Pt/Au, które formowano termicznie w temperaturze 370°C przez 60 sek. w atmosferze azotu techniką RTA. Zbadano wpływ procesu formowania metalizacji oraz jej starzenia termicznego na rezystancję charakterystyczną kontaktów metalicznych. Przeprowadzono analizę obrazów SEM, obrazów TEM i widm SIMS metalizacji przed i po procesie formowania termicznego oraz po procesie starzenia termicznego. Zaobserwowano tworzenie się charakterystycznych faz inter-metalicznych w wyniku formowania termicznego. W dalszej części rozdziału opisano proces pogrubiania elektrolitycznego metalizacji. Dużą część rozdziału czwartego zajmuje opis badań nad wytwarzaniem warstw dielektrycznych oraz określeniem zmian ich właściwości: takich jak naprężenia, napięcie przebicia czy transmisja w zależności od sposobu realizacji procesu osadzania. Warstwy dielektryczne SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>2</sub>, oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wytwarzano techniką PECVD i rozpylania reaktywnego. Warstwy dielektryczne stosowano do pasywacji struktur laserowych oraz nanoszenia zwierciadeł o dużym współczynniku odbicia. Zbadano wpływ technologii, rodzaju i grubości warstw na współczynnik odbicia zwierciadeł. W ostatniej części rozdziału opisano badania nad opracowaniem technologii montażu chipów kwantowych laserów kaskadowych do miedzianych radiatorów. Chipy laserów lutowano przy pomocy lutów miękkich lub twardych a następnie wytwarzano do nich kulkowe lub klinowe połączenia drutowe. Przedyskutowano wady i zalety obu sposobów montażu chipów laserowych na radiatorach miedzianych. Uzyskane rezultaty porównano z danymi literaturowymi obejmującymi 20 pozycji. Wyniki charakteryzacji kwantowych laserów kaskadowych wytwarzanych w heterostrukturach GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP przedstawiono w rozdziale piątym. Mierzono charakterystyki prądowo-napięciowe i zależność mocy optycznej od prądu laserów lub zależność mocy optycznej od gęstości prądu zasilania. Pomiary prowadzono dla laserów pracujących w różnych temperaturach (od temperatury ciekłego azotu do temperatury pokojowej) przy zasilaniu impulsowym. Mgr inż. Piotra Karbownika przeanalizował wpływ poszczególnych etapów procesu technologicznego wytwarzania kaskadowych laserów kwantowych, w heterostrukturach GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP, na charakterystyki I-V i I-L. W szczególności zba-  
dał wpływ poziomu domieszkowania obszaru iniektora, rezystancji kontaktów, technologii przygotowania powierzchni laserów przed naniesieniem luster oraz rodzaju luster. Dla wybranych laserów, wykonanych w heterostrukturach w GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP, zmierzono ich charakterystyki widmowe i rozkład natężenia promieniowania w strefie dalekiej. Zbadano jednorodność parametrów poszczególnych laserów na powierzchni podłoża o wymiarach 10x10

mm<sup>2</sup> oraz przeanalizowano czynniki technologiczne powodujące degradację pracy laserów, do których zaliczono, głównie, zbyt duże rezystancje kontaktów omowych i złą jakość pasywacji.

W rozdziale szóstym mgr inż. Piotr Karbownik przedstawił, w sposób syntetyczny, podsumowanie głównych wątków rozprawy oraz zaprezentował prototypowy analizator gazów zbudowany w Instytucie Optoelektroniki WAT w Warszawie, w którym zastosowano laser opracowany w Zakładzie Fotoniki ITE w Warszawie.

Na podkreślenie zasługuje obszerny i aktualny przegląd literaturowy, dotyczący tematyki prowadzonych badań. Autor powołuje się na 102 prace źródłowe, z których 17 zostało opublikowane po roku 2010. Jednocześnie w przeglądzie literaturowym obecne są pozycje literaturowe opublikowane wiele lat temu, istotne z punktu widzenia teorii laserów kaskadowych. W przypadku 13 cytowanych prac mgr inż. Piotr Karbownik jest ich pierwszym autorem lub współautorem. Są to prace wieloautorskie co jest całkowicie zrozumiałe w przypadku tak zaawansowanych prac technologicznych i pomiarów. Wnioski z analizy tych prac sformułowano w sposób jasny i przekonujący. Dobór źródeł, sposób ich wykorzystania i prezentowania oraz umiejętność ich krytycznej analizy potwierdzają bardzo dobrą wiedzę Autora w dziedzinie prowadzonych badań. Jest to tym istotniejsze, że dostępne dane literaturowe są często rozbieżne. Wynika to głównie z faktu istotnego wpływu na działanie kwantowych laserów kaskadowych czynników aparaturowo-technologicznych takich jak np. konstrukcja heterostruktur, technologia osadzania, sposób realizacji przyrządowych procesów technologicznych wytwarzania chipów laserów. Analizę danych literaturowych Autor rozprawy zastosował do zaprojektowania własnych przyrządowych procesów technologicznych wywarzania kwantowych laserów kaskadowych.

Autor wykazał się on cenną umiejętnością współpracy z innymi członkami Zespołu badawczego prowadzącymi badania nad konstrukcją i technologią kwantowych laserów kaskadowych i wniósł w pracę tego Zespołu własny oryginalny wkład. Na podkreślenie zasługuje wielowątkowość prowadzonych przez mgr inż. Piotra Karbownika badań: od symulacji pracy lasera przez opracowanie szczegółowych procedur technologicznych trawienia struktury meza, procedur przygotowania heterostruktur epitaksjalnych do nanoszenia kontaktów omowych i zwierciadeł do opracowania technologii warstw pasywujących i zwierciadeł.

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

- zaprojektowanie i napisanie programu komputerowego, przeznaczonego do symulacji działania kwantowych laserów kaskadowych wytwarzanych w heterostrukturach o zadanej konstrukcji,



- opracowanie procedur mokrego trawienia struktury meza, w heterostrukturach GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP, umożliwiających uzyskiwanie gładkich ścian bocznych,
- opracowanie i zweryfikowanie własnych procedur przygotowania heterostruktur do nanoszenia kontaktów omowych i zwierciadeł,
- opracowanie i zbadanie wpływu rodzaju i sposobu wytwarzania dielektrycznych warstw pasywujących na działanie kwantowych laserów kaskadowych,
- opracowanie i zbadanie wpływów sposobów wytwarzania i rodzaju zwierciadeł na działanie kwantowych laserów kaskadowych,
- zaprojektowanie i zrealizowanie pełnego procesu technologicznego wykonywania kwantowych laserów kaskadowych, na zakres średniej podczerwieni, w heterostrukturach GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP w uwarunkowaniach technologiczno-pomiarowych Zakładu Fotoniki ITE w Warszawie.

Prezentowane wyniki badań mają istotne znaczenie dla rozszerzenia stanu wiedzy dotyczącej procesu technologicznego wytwarzania kwantowych laserów kaskadowych i stanowią ważny wkład w rozwój tej tematyki badawczej. O oryginalności prowadzonych badań świadczą liczne prace naukowe opublikowane w recenzowanych czasopismach międzynarodowych i krajowych oraz materiałach konferencyjnych, których mgr inż. Piotr Karbownik jest współautorem. Łącznie jest on autorem i współautorem 42 publikacji.

Rozprawa napisana jest w sposób staranny, jasny i logiczny, poprawny pod względem językowym i stylistycznym. Jej układ jest przejrzysty i nie budzi większych zastrzeżeń. Zdaniem Recenzenta niektóre rysunki są zbyt małe (np. rys. 1,5) lub zbyt duże (np. rys. 3,6). Również wielkość opisów niektórych rysunków powinna być bardziej ujednolicona (np. rys. 5,20). Rysunek 4.17 ma nieprawidłowy opis. Te drobne niedoskonałości nie umniejszają wartości Rozprawy. Uważam, że rozprawa nie ma słabych stron i istotnych wad.

Jednak, jeżeli jest to możliwe Recenzent chciałby uzyskać bardziej szczegółowe informacje, na temat na jakiej podstawie wybrano grubości poszczególnych warstw tworzących kontakty omowe do heterostruktur GaAs/AlGaAs i InGaAs/InAlAs/InP oraz jakie stosowano materiały źródłowe w procesie nanoszenia metalizacji.

Prezentowana Rozprawa ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Opracowane oprogramowanie oraz zaprojektowany proces technologiczny mogą zostać wykorzystane w praktyce do wytwarzania prototypów kwantowych laserów kaskadowych na zakres średniej podczerwieni.

Ze względu na jej kompleksowy charakter, duże walory poznawcze i potencjalne możliwości aplikacyjne przedstawioną rozprawę uważam za bardzo dobrą.

Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Piotra Karbownika stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Piotra Karbownika 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 tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Piotra Karbownika spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych i wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej Rozprawy

*R. Paszkiewicz*

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz