

Warszawa, 10.09.2024

Prof. dr hab. Maciej Bugajski  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki  
Al. Lotników 32/46  
02 668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriany Łozińskiej pt. „Opracowanie nowej konstrukcji falowodów do zastosowania w kwantowych laserach kaskadowych”**

Badania i rozwój laserów kaskadowych przebiegały w dwóch głównych kierunkach: jako prace nad poprawą parametrów laserów i prace nad rozszerzeniem dostępnego zakresu długości fal. O ile w pierwszym przypadku dotyczyło to w głównej mierze udoskonalania konstrukcji obszaru aktywnego lasera, o tyle poszerzanie zakresu spektralnego pociągało za sobą konieczność optymalizacji strat a tym samym zwrócenia większej uwagi na falowody. Analizując publikowane prace na temat laserów kaskadowych można odnieść wrażenie, że w początkowym okresie falowodom jako pasywnym elementom laserów poświęcano stosunkowo mniej uwagi. Ta sytuacja ulegała zmianie z doskonaleniem konstrukcji laserów i dążeniem do poprawy ich parametrów użytkowych.

Rozprawa doktorska mgr Adriany Łozińskiej dotyczy opracowanie podstaw teoretycznych i weryfikacji technologicznej nowej konstrukcji lasera kaskadowego, w której zastosowano warstwy ograniczające o gradientowym rozkładzie domieszki donorowej. Zaproponowana modyfikacja ma na celu uzyskanie optymalnego profilu zespolonego współczynnika załamania warstw falowodowych i w konsekwencji poprawę współczynnika ograniczenia modowego i zmniejszenie strat.

Praca jest obszerna, liczy 182 strony i składa się z 7 rozdziałów, podsumowania i bibliografii liczącej 187 pozycji. W Rozdziale 1 autorka przedstawia motywacje podjęcia badań i określa zakres proponowanych prac. W Rozdziale 2 omówione są generalne właściwości laserów kaskadowych, ze szczególnym uwzględnieniem struktury modowej i właściwości falowodowych. Począwszy od Rozdziału 3 doktorantka przechodzi do zasadniczej, oryginalnej części pracy. Rozdział 3 poświęcony jest modelowaniu laserów na bazie heterostruktury InP/InGaAs/AlInAs i podzielony jest na dwie części. Pierwsza dotyczy optymalizacji warstw falowodowych laserów dla długości fali  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ , druga dotyczy analogicznych zagadnień w przypadku laserów dla długości fali  $\lambda = 9 \mu\text{m}$ .

Wyniki symulacji numerycznych będących przedmiotem Rozdziału 3 odnoszone są do struktury standardowej falowodu o następującej geometrii. Rdzeń aktywny lasera z InGaAs/AlInAs, z kompensacją naprężeń w przypadku laserów dla długości fali  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ , lub dopasowany sieciowo do InP w przypadku laserów dla długości fali  $\lambda = 9 \mu\text{m}$  otoczony jest



symetrycznie warstwami separującymi z InGaAs i warstwami ograniczającymi z InP, przy czym te ostatnie dzielone są na dwa obszary o różnym domieszkowaniu. Obszar bliższy rdzenia (A) domieszkowany jest do koncentracji  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  a obszar dalszy (B) do koncentracji  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Rozpatrywane w pracy modyfikacje falowodu polegają na zmianach grubości warstwy separującej i zmianach charakteru domieszkowania warstw ograniczających (B). W wybranych przypadkach zmieniano również grubość warstw ograniczających.

Dla oceny wyników modelowania zaproponowano parametr jakości falowodu  $\delta$  zdefiniowany jako stosunek współczynnika ograniczenia modowego  $\Gamma$  do wartości strat falowodowych  $\alpha$ . W obliczeniach posługiwano się oprogramowaniem udostępnionym przez Zespół Fizyki Komputerowej z Wydziału Fizyki Politechniki Łódzkiej, które umożliwiało wyznaczenie rozkładu modu optycznego wzdłuż struktury lasera QCL, przez rozwiązanie równań Maxwella za pomocą metody admitancyjnej fal płaskich. To z kolei pozwalało na wyliczenie parametrów falowodu takich jak straty optyczne, wzmocnienie progowe  $g_{\text{th}}$  oraz współczynnik ograniczenia modu  $\Gamma$ . Oprogramowanie umożliwia przeprowadzenie modelowania w wymiarach 1D, 2D a także 3D, dzięki czemu możliwa jest analiza zjawisk fizycznych w szerokim zakresie. W pracy, poza nielicznymi wyjątkami ograniczono się do symulacji jednowymiarowych, w kierunku prostopadłym do warstw falowodu i modów TM. W przypadku tego typu obliczeń istotny jest właściwy wybór danych materiałowych. Dokonywany był on częściowo w oparciu o bazę materiałową programu a w przypadku warstw domieszkowanych zespolony współczynnik załamania szacowany był na podstawie modelu Drude-Lorentza i danych literaturowych.

W wyniku przeprowadzonych symulacji zweryfikowano opracowaną metodologię modelowania struktur laserowych QCL na bazie InP/InGaAs/AlInAs, ze szczególnym uwzględnieniem warstw domieszkowanych w sposób gradientowy. W pierwszej kolejności optymalizowano grubość warstw separujących, następnie grubości i poziom domieszkowania warstw ograniczających, a w ostatnim kroku profil domieszkowania warstw ograniczających. Wyznaczono optymalne parametry warstw separujących laserów QCL, zaprojektowanych do emisji promieniowania o długości  $\lambda = 5 \mu\text{m}$  oraz  $\lambda = 9 \mu\text{m}$ . Stwierdzono, że optymalna grubość warstwy separującej InGaAs lasera QCL, ze względu na najmniejsze optyczne wzmocnienie progowe  $g_{\text{th}}$ , wynosi 310 nm i 1120 nm, odpowiednio dla fali o długości 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$ . Grubość warstwy ograniczającej powinna być dopasowana do rozkładu modu optycznego w strukturze QCL. Na tej podstawie wyznaczono optymalną grubość warstw ograniczających dla laserów o emisji 5  $\mu\text{m}$  i 9  $\mu\text{m}$ , która powinna wynosić odpowiednio 2  $\mu\text{m}$  i 3  $\mu\text{m}$ .

Najważniejszym rezultatem przeprowadzonych obliczeń było wyznaczenie poziomu i rozkładu domieszkowania w warstwach ograniczających laserów QCL zaprojektowanych na długość fali  $\lambda = 5 \mu\text{m}$  oraz 9  $\mu\text{m}$ . W wypadku obu konstrukcji zdefiniowano następujące poziomy i profile domieszkowania: obszar A domieszkowany na stałym poziomie  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , obszar B – profil domieszki typu sinus w zakresie  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \div 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .



Pozostałe rozdziały pracy zawierają ogólny opis technik epitaksji (Rozdział 4), opis stosowanych metod pomiarowych (Rozdział 5), opis realizacji technologicznej modelowanych struktur falowodowych (Rozdział 6) i wyniki pomiarów testowych struktur laserowych (Rozdział 7). Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Rozdziały 4 i 5 mogłyby być przeniesione do dodatków umieszczonych na końcu, przez co zachowana została by ciągłość wyводу a praca zyskała by na czytelności.

Rozdział 6 dotyczy realizacji technologicznej modelowanych struktur falowodowych. Autorka opisuje zarówno technologię wybranych elementów lasera kaskadowego jak i procesy kalibracyjne, które są standardowym *know-how* laboratorium epitaksji. Rozdział zawiera interesujące wyniki badań wpływu temperatury osadzania górnego *claddingu* na parametry osadzanego rdzenia. Do analizy wyników zastosowano fotoluminescencję i rozpraszanie Ramana. Ta ostatnia technika pozwala na precyzyjne określenie naprężeń w strukturze rdzenia lasera co ma istotne znaczenie dla parametrów lasera i ewentualnych, późniejszych procesów degradacyjnych. Określona maksymalna dopuszczalna temperatura wzrostu *claddingu*, 645°C pozwala na bezpieczne prowadzenie szeregu procesów technologicznych opartych na „zarastaniu” aktywnego rdzenia. Dodatkowe pomiary wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM potwierdziły brak degradacji międzypowierzchni warstw rdzenia.

Rozdział 7 poświęcony jest weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanych w wyniku modelowania nowych konstrukcji falowodów laserów kaskadowych. Wykonano dwie serie testowych struktur laserowych: pierwszą w technologii hybrydowej (MBE+LP-MOVPE), drugą całkowicie w technologii LP-MOVPE. W ramach każdej serii wytworzono dwie struktury: standardową (schodkowy rozkład domieszki) oraz gradientową (z rozkładem domieszki typu B sinus). Wszystkie testowe przyrządy emitowały zakładaną długość fali  $\sim 5 \mu\text{m}$ .

W ramach pierwszej serii wykonanej w technologii hybrydowej, w strukturze z gradientowym rozkładem domieszki typu B sinus jedynie w obszarze górnej warstwy ograniczającej uzyskano zmniejszenie wartości gęstości prądu progowego o 7%, zmniejszenie rezystancji szeregowej o 25%, węższe o 40% widmo emisyjne oraz lepszą zgodność z projektowaną długością fali w stosunku do struktury standardowej (ze schodkowym rozkładem domieszki). Tym samym udowodniono, że warstwy domieszkowane w sposób gradientowy mogą być z powodzeniem stosowane w konstrukcjach tak złożonych przyrządów jak kwantowe lasery kaskadowe.

W ramach drugiej serii, wykonanej całkowicie w technologii LP-MOVPE wprowadzono gradientowy rozkład domieszki typu B sinus w obu warstwach ograniczających, których grubość dopasowano do rozkładu modu optycznego w strukturze QCL. Także w tych przyrządach struktura z gradientowym rozkładem domieszki charakteryzowała się lepszymi parametrami użytkowymi w stosunku do konstrukcji standardowej. Uzyskano zmniejszenie wartości prądu progowego o 10%, zwiększenie maksymalnej mocy, węższe widmo emisyjne i większą czystość spektralną.

Pomiary testowych struktur laserowych, wykonanych według projektu Autorki rozprawy, opartego na wynikach przeprowadzonego modelowania, potwierdziły korzystny wpływ zaproponowanej nowej konstrukcji falowodów gradientowych na parametry wytworzonych laserów. Potwierdzono zasadność wprowadzenia domieszki o rozkładzie gradientowym do warstw ograniczających emiterów QCL i tym samym osiągnięto główny cel pracy. Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy Autorki.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska „Opracowanie nowej konstrukcji falowodów do zastosowania w kwantowych laserach kaskadowych” mgr inż. Adriany Łozińskiej spełnia wymagania związane z uzyskaniem stopnia doktora, określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Adriany Łozińskiej do dalszego postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

