

dr hab. inż. Tomasz Czyszanowski prof. PŁ
Instytut Fizyki Politechniki Łódzkiej
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź

Łódź, 10. 05. 2017

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Gutowskiego
p.t. Molecular beam epitaxy of quantum cascade lasers based on InGaAs/InAlAs/InP material
system

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Gutowskiego została wykonana pod kierunkiem prof. dra hab. Macieja Bugajskiego w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie. Rozprawa dotyczy opracowania procesu technologicznego wytwarzania struktur kwantowych laserów kaskadowych wykonanych ze związków wykorzystujących InGaAs, InAlAs na podłożu z InP przy wykorzystaniu metody nanoszenia warstw epitaksjalnych z wiązek molekularnych.

Obecny szybki rozwój laserów kaskadowych napędzany jest głównie poprzez ich zastosowania w spektroskopii. Są one jedynymi laserami półprzewodnikowymi mogącymi emitować promieniowanie z bardzo szerokiego zakresu podczerwieni od kilku do kilkuset mikrometrów. W związku z tym wykorzystywane są w przenośnych czujnikach wykrywających obecność niebezpiecznych gazów, umożliwiając transmisję danych w wolnej przestrzeni dzięki emisji w obszarach odpowiadających atmosferyczny oknom optycznym. Bez wątplenia projektowanie i wytwarzanie laserów kaskadowych jest najbardziej złożonym procesem spośród wszelkich procesów wytwarzania laserów półprzewodnikowych. Technologia ich wytwarzania wymaga ciągłego postępu umożliwiającego uzyskanie powtarzalnych procesów produkcji i poprawy ich własności dążąc głównie do uzyskania pracy na fali ciągłej w wysokich temperaturach otoczenia.

Recenzowana praca poświęcona jest opracowaniu powtarzalnej technologii wytwarzania obszarów czynnych kwantowych laserów kaskadowych metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE) oraz łączeniu metody MBE z metodą epitaksji związków metaloorganicznych (MOVPE). Autor w recenzowanej rozprawie:

1) opracował technologię powtarzalnego wytwarzania naprężonych kaskad studni kwantowych InGaAs z barierami InAlAs na podłożu z InP charakteryzujących się dobrą jakością krystalograficzną

2) opracował technologię łączenia metod MBE oraz MOVPE

3) opracował technologię wytwarzania naprężonych kaskad studni kwantowych wykonanych z InGaAs oraz barier z AlGaAs na podłożu z GaAs

Praca składa się z 8 rozdziałów. Część pierwsza obejmująca rozdziały od 1 do 3 poświęcona jest prezentacji poruszanego zagadnienia, opisowi zasad działania kwantowych laserów kaskadowych oraz opisowi metod MBE oraz MOVPE.

Rozdział 4 w pierwszej swojej części obejmującej podrozdziały od 1 do 3 zawiera szczegółowy opis struktur kaskad kwantowych i warstw pasywnych laserów wykonanych przez Autora oraz opis aparatury umożliwiającej wzrost struktur metodą MBE w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie. Kolejne podrozdziały od 4 do 6 zawierają szczegółowy opis wytwarzania warstw półprzewodnikowych będący oryginalnym wkładem Autora do rozwoju technologii wzrostu kwantowych laserów kaskadowych metodą MBE ze szczególnym uwzględnieniem wzrostu dopasowanych sieciowo kaskadowych obszarów czynnych oraz kaskadowych obszarów czynnych ze skompensowanymi naprężeniami składających się ze studni InGaAs oraz barier InAlAs na podłożu z InP. Rozdział kończy podrozdział 7 dotyczący wytwarzania laserów ze struktur półprzewodnikowych uzyskanych przez Autora. Na podkreślenie w tym rozdziale zasługuje opracowanie metody kontroli przepływu gazów z komórek epitaksjalnych, co umożliwiło opracowanie metody kalibracji i kontroli procesu wzrostu struktur laserowych. Autor szczegółowo opisał metodologię wyznaczania warunków wzrostu laserów z kompensacją naprężeń w obszarze aktywnym. Opracował także metodę łączonego wzrostu metodami MBE i MOVPE. Wysoka jakość krystalograficzna warstw tworzących struktury została potwierdzona za pomocą badań strukturalnych: dyfrakcji rentgenowskiej, mikroskopii skaningowej i mikroskopii elektronowej. Drobnym niedosytem w tym rozdziale pozostawia brak analizy porównawczej pomiędzy obrazami dyfraktometrycznymi wytworzonych struktur a analogicznymi obrazami wynikającymi z numerycznej analizy odbicia dla struktur, które miały być wytworzone. Trudno jest w związku z tym odnieść do twierdzenia, które pada na stronie 61, iż pomiary grubości warstw na podstawie zdjęć z mikroskopu elektronowego potwierdzają grubości warstw uzyskane w analizie dyfraktometrycznej.

Rozdział 5 przynosi weryfikację przeprowadzonych procesów na podstawie charakteryzacji elektryczno-optycznej laserów wytworzonych ze struktur epitaksjalnych uzyskanych przez Autora. Rozdział ten jest podzielony na dwie części, w których opisywane są wyniki pomiarowe laserów z kaskadami dopasowanymi sieciowo do podłoża i z kaskadami z kompensacją naprężeń. W pierwszej części opisane są wyniki pomiarów grupy laserów posiadających taki sam obszar czynny, zaś różniących się ilością kaskad: 30 i 50; oraz dodatkowo różniących się konstrukcją warstw ograniczających mod: jedna warstwa InAlAs u góry i podłożo InP u dołu, warstwy InAlAs u góry i u dołu oraz jedna warstwa InP u góry naniesiona metodą MOVPE oraz podłożo InP u dołu. Spośród

sześciu analizowanych konstrukcji jedna nie uzyskała progu akcji laserowej. W przypadku pozostałych struktur zademonstrowano wyniki pomiarów dowodzące ich laserowania w reżimie impulsowym. Weryfikacja jasności wykonania struktur półprzewodnikowych poprzez analizę własności laserów nie jest analizą wprost z uwagi na wrażliwość końcowego urządzenia na kroki technologiczne wykonywane po wzroście struktury półprzewodnikowej. Jednak uzyskanie mocy emitowanego promieniowania przekraczającego 3W w temperaturze pokojowej przez laser z dopasowanymi studniami dowodzi wysokiej jakości zarówno struktury półprzewodnikowej jak i dalszych kroków technologicznych prowadzących do uzyskania finalnego urządzenia.

W pierwszej części rozdziału czytelnik może napotkać kilka zagadnień wymagających wyjaśnienia. Pierwsza wątpliwość dotyczy nazewnictwa używanego przez Autora, który falowodem nazywa warstwy o niższym współczynniku załamania niż uśredniony współczynnik kaskady studni kwantowych wraz z warstwami InGaAs sąsiadującymi z obszarem czynnym. Typowo falowód to obszar o wysokim współczynniku załamania, wewnątrz którego pole optyczne jest ograniczane. Zatem warstwami falowodowymi powinny być nazywane warstwy InGaAs. Warstwy InP lub InAlAs posiadają zauważalnie mniejszy współczynnik załamania, w których promieniowanie zanika, stąd powinny być nazwane warstwami okładkowymi bądź ograniczającymi.

Wykres 5.6 ilustruje wartości gęstości prądów progowych uzyskanych w pięciu strukturach laserowych wykonanych w trzech konfiguracjach warstw ograniczających z trzydziestoma oraz pięćdziesięcioma okresami kaskad. Analizując przedstawione wartości nasuwa się pytanie o to dla jakich zewnętrznych temperatur gęstości prądów progowych zostały wyznaczone? Dlaczego zwiększenie liczby okresów kaskad prowadzi do zwiększenia prądu progowego? Ponadto wartości umieszczone w tabeli 5.2 sugerują tendencję przeciwną do przedstawionej na wykresie ponieważ według tabeli 5.2 struktura o mniejszej ilości kaskad posiada wyższy prąd progowy niż struktura z większą ilością kaskad.

W rozdziale 5.1.5 Autor analizuje wpływ ilości okresów kaskad na własności lasera i porównuje przyrosty prądu progowego i przyrosty różniczkowej sprawności laserów na podstawie dwóch struktur z 30 i 50 okresami kaskad. Z tych pomiarów wnioskuje o zależności progowej gęstości prądu i sprawności różniczkowej w funkcji ilości okresów kaskad. Czy na podstawie dwóch pomiarów można wyciągać wnioski na temat funkcji liniowej mającej określać taką zależność? Co zatem oznaczają proste na wykresie 5.7? Na jakiej podstawie proste te zostały wyznaczone? Do czego odnoszą się punkty pomiarowe oznaczone okręgami i kwadratami?

W rozdziale 5.1.6 Autor przeprowadza analizę zależności emitowanej długości fali względem niedokładności grubości warstw studni. Zastanawiające jest dlaczego Autor bierze pod uwagę tylko szerokość studni, skoro równie silny wpływ na położenie poziomów kwantowych posiada skład molowy studni? Wykres 5.8 pokazuje zależność pomiędzy emitowaną długością fali, a względną

niedokładnością uzyskanej grubości studni. Autor zauważa, iż jest obserwowana korelacja między długością fali a niedokładnością grubości. Jakie są zatem parametry korelacji? Czy gdyby nie było na wykresie punktu #C515 można byłoby wtedy zauważyć jakikolwiek związek pomiędzy długością fali, a niedokładnością grubości warstw? W tym miejscu interesujące byłoby także wykazanie na podstawie rachunków bądź szacowań, czy taka niedokładność grubości studni kwantowych, jak ta wyznaczona w pomiarach, może powodować obserwowaną zmianę długości fali emitowanego promieniowania.

W drugiej części rozdziału opisane zostały wyniki pomiarów emisji struktur z obszarami czynnymi z kompensacją naprężeń. Lasery wchodzące w skład opisywanej grupy posiadają taką samą budowę kaskad, lecz różną ich ilość: 30 i 50. Struktury różnią się ponadto konfiguracją warstw biernych. Względem grupy laserów opisaney w pierwszej części rozdziału, analizowana grupa w podrozdziale 5.2 składała się z laserów o takiej samej konfiguracji obszarów biernych za wyjątkiem struktury posiadającej dwie warstwy InAlAs, która została zastąpiona strukturą z dwiema warstwami InP naniesionymi w dwóch oddzielnych procesach MOVPE. Spośród wszystkich laserów z tej grupy jedynie struktura z pięćdziesięcioma parami kaskad oraz jedną warstwą InAlAs została umieszczona na chłodnicy. Pozostałe struktury, które nie zostały umieszczone na chłodnicy były pobudzane bardzo krótkimi i odległymi czasowo impulsami. Fakt ten znacząco utrudnia próbę porównania struktur z obszarami dopasowanymi sieciowo ze strukturami z kompensacją naprężeń. W analizowanej grupie tylko w przypadku struktur z pojedynczą warstwą InAlAs udało się przekroczyć próg akcji laserowej w konfiguracjach z 30 i 50 okresami kaskad. Dwie pozostałe struktury z jedną i dwiema warstwami InP emitowały promieniowanie laserowe tylko w konfiguracjach złożonych z 50 okresów kaskad.

W rozdziale 5.2.3 Autor zauważa, iż laser ze studniami kwantowymi z kompensacją naprężeń i z warstwami ograniczającymi wykonanymi z InP posiadał lepsze parametry od lasera z jedną warstwą InAlAs, jednak parametry te okazały się nie tak dobre jak przewidywano. Autor powinien wyjaśnić do których parametrów odnosi się oraz jakie ich wartości były oczekiwane i na jakiej podstawie? Wykres 5.14 pokazuje wartości gęstości prądów w progu akcji laserowej. Wyjaśnienia wymaga fakt większej wartości prądu progowego struktury posiadającej 30 okresów kaskad względem struktur składających się z 50 okresów kaskad, co jest tendencją przeciwną do tej obserwowanej przez Autora w części poświęconej obszarom dopasowanym sieciowo. Nie zostało także wyjaśnione dlaczego laser umieszczony na chłodnicy posiada wyższy prąd progowy niż laser chłodnicy pozbawiony.

W rozdziale 6 znajduje się podsumowanie wyników opisanych w rozdziałach 4 i 5.

Rozdział 7 przynosi opis ciekawego wyniku, który nieco wykracza poza tematykę rozprawy, a dotyczy wytworzenia lasera z naprężonymi studniami InGaAs i barierami AlGaAs umieszczonymi na podłożu GaAs. Atrakcyjność tego typu konstrukcji wynika z relatywnej prostoty jej wytworzenia ponieważ struktura epitaksjalna w całości wykonana jest z materiałów arsenkowych. Pozwala to

przeprowadzić jej wzrost w jednym procesie epitaksjalnym na podłożu, które jest dopasowane sieciowo do warstw epitaksjalnych. Literaturowe doniesienia o podobnej konstrukcji mówiły o emisji laserowej w temperaturach nieprzekraczających 200 K. Autor w rozprawie przedstawił pomiary emisji laserowej ze struktury wykonanej przez siebie w temperaturze sięgającej 320 K, co należy uznać za znaczący postęp rozwoju tego typu struktur, który był możliwy dzięki opracowanej i opisanej w rozprawie metodzie wzrostu struktur epitaksjalnych.

Wyniki opisane w rozprawie zostały opublikowane w Journal of Crystal Growth, Photonics Letters of Poland (w obu pierwszy autor) Physica Status Solidi B poświęconych w głównej mierze opracowanej metodzie wzrostu warstw. Dodatkowo jest współautorem artykułów w IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Optics Express, Journal of Applied Physics, Optical and Quantum Electronics, Semiconductor Science and Technology, Microelectronics Reliability, Opto-Electronics Review, w których struktury wykonane przez Autora zostały wykorzystane do przeprowadzenia różnorodnych badań dowodząc w ten sposób ich wysokiej jakości wytworzenia.

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim. Autor nie ustrzegł się znacznej ilości błędów językowych, które w kilku przypadkach utrudniały zrozumienie treści.

Postawione w recenzji pytania i wątpliwości, które głównie dotyczą analizy wyników, nie zaś opracowanej metody wytwarzania struktur epitaksjalnych laserów kaskadowych, nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawione są w postaci czytelnych wykresów. Praca świadczy o gruntownej wiedzy Autora w dziedzinie nauk technicznych, a w szczególności w dziedzinie wzrostu kryształów. Dowodzi ona także biegłości Autora w zakresie metod eksperymentalnych.

Mając na uwadze praktyczną wartość i nowatorski charakter opracowanej metody wzrostu struktur epitaksjalnych wyrażam przekonanie, że praca mgra inż. Piotra Gutowskiego spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora i wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Tomasz Czyszanowski
