

Warszawa, 23.05.2008

prof. dr hab. Maciej Bugajski  
Instytut Technologii Elektronowej  
Al. Lotników 32/46  
02 668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Tomasza Świetlika  
**pt. Laser diodes based on gallium nitride – investigation of carrier injection  
mechanisms, gain and distribution of the electromagnetic field**

Typowa struktura lasera azotkowego składa się z obszaru czynnego złożonego z kilku jam kwantowych z InGaN, falowodu z GaN i emiterów z AlGaIn. Proces optymalizacji struktur laserowych jest złożony ze względu na różnorodne ograniczenia co do składu i grubości poszczególnych warstw warunkowane naprężeniami, wpływem pól piezoelektrycznych i defektów. W rezultacie, mimo iż od ich zademonstrowania upłynęło już ponad 10 lat, lasery azotkowe nie są jeszcze produktem w pełni komercyjnym, głównie z powodu problemów z ich niezawodnością i trudności technologicznych w procesie ich wytwarzania. Nie do końca poznane są również wewnętrzne mechanizmy rządzące generacją promieniowania w laserach azotkowych i mające decydujący wpływ na parametry eksploatacyjne przyrządów. Należy więc uznać, że recenzowana praca podejmuje ważną i trudną tematykę o dużym znaczeniu naukowym i praktycznym. Specyfika i waga pracy polega również na tym, że dotyczy ona przyrządów wytwarzanych homoepitaksjalnie na podłożach GaN. Instytut Wysokich Ciśnień PAN jest jedynym ośrodkiem na świecie, który dysponuje taką technologią i ma swój udział światowym rynku laserów azotkowych.

Praca ma charakter eksperymentalny. Jej oryginalność naukowa i nowatorstwo są niepodważalne. Wyniki uzyskane w trakcie jej realizacji zostały już w znacznej mierze opublikowane, a tym samym zweryfikowane przez międzynarodowe środowisko naukowe. Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, podsumowania, dodatku zawierającego szczegóły

dotyczące badanych struktur i bibliografii. Praca napisana jest w języku angielskim, co na pewno przyczyni się do jej upowszechnienia. Pod względem językowym praca nie budzi zastrzeżeń.

Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie w historię rozwoju laserów azotkowych. Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu zasad działania laserów półprzewodnikowych. Trudno o systematyczny wykład podstaw działania laserów na 16 stronach, bo tyle liczy rozdział 2. Nie będę więc dyskutował z niektórymi stwierdzeniami autora, które są pewnymi uproszczeniami; zwrócę tylko uwagę na kilka ewidentnych pomyłek. Postać warunku Bernard'a – Duraffourg'a (wzór 2.4.2 na str.15) jest błędna. Zwrot obu nierówności powinien być przeciwny. We wzorze 2.7.1 na str. 20 powinno być  $2L$  w mianowniku bo chodzi tu o pełny obieg rezonatora. Stwierdzenie ze str. 17, że pojawienie się „ogonów gęstości stanów” zwiększa całkowitą ilość dostępnych stanów jest błędne, jako że stany w ogonach pasm pojawiają się w wyniku rearanżacji stanów pasmowych. Całkowita liczba stanów w paśmie jest stała. Stwierdzenie, że moc lasera powyżej progu zależy od sprawności rekombinacji promienistej (str. 22) jest nieprawdziwe. Moc powyżej progu zależy wyłącznie od sprawności wstrzykiwania  $\eta_i$ . Od sprawności rekombinacji promienistej zależy natomiast wielkość prądu progowego. Niezależnie od wymienionych uchybień uważam, że autor dobrze rozumie jak działają lasery półprzewodnikowe, czego dowodzą dalsze rozdziały pracy zawierające wyniki jego oryginalnych badań. Jako okoliczność łagodzącą należy także potraktować fakt, że w literaturze dotyczącej laserów półprzewodnikowych panuje duże zamieszanie definicyjne i nawet uznane monografie nie są wolne od nieprecyzyjnych sformułowań.

Rozdział 3 pracy zwraca uwagę na podstawowe wyzwania przed jakimi staje technologia wytwarzania laserów azotkowych, nieporównanie trudniejsza niż technologia klasycznych laserów oparta na arsenku galu i fosforu indu. W kolejnym rozdziale (rozdział 4) omawiane są zagadnienia dotyczące wzrostu epitaksjalnego struktur laserowych i wytwarzania przyrządów. Istotną nowością w stosunku do wcześniejszych prac jest tu wykorzystanie epitaksji z wiązek molekularnych (PA MBE) do wytwarzania struktur laserowych, technologii, która uważana była za nieodpowiednią dla wzrostu azotków, a która jak pokazały ostatnie prace IWC PAN może być interesującą alternatywą dla epitaksji ze związków metaloorganicznych MO CVD.

Zasadnicze wyniki pracy zebrane są w rozdziałach 5 – 9. W rozdziale 5 analizowane są mechanizm transportu nośników w strukturach i procesy rekombinacyjne, które mają bezpośredni wpływ na prąd progowy i sprawność przyrostową (zewnętrzna) lasera – podstawowe parametry eksploatacyjne lasera. Wnikliwa analiza charakterystyk moc optyczna – prąd, prąd – napięcie i emisja spontaniczna pozwoliły autorowi na określenie głównych mechanizmów rekombinacyjnych na progu wzbudzenia akcji laserowej. Wyjaśniony został także wpływ warstwy blokującej rozptył elektronów w strukturze na parametry lasera – zewnętrzną sprawność kwantową. W tym miejscu chciałbym podkreślić, że badane lasery miały bardzo dobre parametry termiczne; parametr  $T_0$  powyżej 200 K, co nawet w przypadku laserów arsenkowych uważa się za bardzo dobrą wartość.

Rozdział 6 poświęcony jest analizie wzmocnienia w strukturach laserów azotkowych. Istotną wartością tej części pracy jest porównanie właściwości struktur wytwarzanych techniką MO CVD i PA MBE. Dla zrealizowania tej części pracy opracowana została oryginalna metoda pomiaru wzmocnienia w strukturach pompowanych optycznie. Metoda ta nie wymaga wykonania kompletnych laserów i umożliwia badanie wpływu długości obszaru pompowanego na parametry akcji laserowej. Jej stosowalność nie ogranicza się do laserów azotkowych – może być ona stosowana również w przypadku klasycznych struktur laserowych. Pozwala ona również na oszacowanie strat propagacyjnych w badanych strukturach. Z porównania właściwości struktur wytwarzanych techniką MO CVD i PA MBE wynika, że lasery wytwarzane techniką epitaksji z wiązek metaloorganicznych ciągle mają nieznacznie lepsze parametry niż ich odpowiedniki wytwarzane technologią epitaksji z wiązek molekularnych. Biorąc jednak pod uwagę ilość czasu i wysiłek badawczy jaki do tej pory poświęcono obu technologiom nie przesądza to jeszcze o przewadze MO CVD nad MBE w tym obszarze zastosowań. Wyniki przedstawione w omawianym rozdziale dostarczają istotnych informacji koniecznych w procesie optymalizacji struktur.

W rozdziale 7 autor omawia problemy cieplne związane z pracą laserów azotkowych i analizuje możliwości uzyskania pracy ciągłej w temperaturze pokojowej w badanych przez siebie strukturach. Problemy termiczne, ze względu na duże napięcia pracy i specyfikę materiału, są bardzo ważne w laserach azotkowych. Rozkład temperatury w laserach analizowany jest za pomocą tomografii w podczerwieni, która daje pewien pogląd o lokalizacji gorących obszarów w przyrządzie i pozwala na oszacowanie temperatury w skali

bezwzględnej. Obserwowane przyrosty temperatury obszaru czynnego są kilkudziesięciostopniowe dla stosunkowo niewielkich prądów. Byłoby lepiej gdyby w tym przypadku posługiwano się gęstością prądu co pozwoliłoby na bardziej obiektywną ocenę parametrów termicznych laserów. Ponadto w przypadku pomiaru za pomocą kamery na średnią podczerwień rejestrowana temperatura jest uśrednioną po objętości przyrządu. Rzeczywista temperatura zwierciadeł może być znacznie większa a to ma wpływ na degradację lasera z upływem czasu. Zmierzona rezystancja termiczna, 32 K/W dla lasera zmontowanego stroną p do dołu na przekładce diamentowej i chłodnicy miedzianej jest przyzwoitą wartością ale jak stwierdza sam autor nie gwarantuje pracy na fali ciągłej w temperaturze pokojowej. Zabrakło mi w tym miejscu próby wyjaśnienia co może być przyczyną tej stosunkowo wysokiej wartości.

Rozdział 8 poświęcony jest analizie właściwości falowodowych laserów. Za pomocą mikroskopii pola bliskiego (SNOM) badano mechanizm falowodowy w płaszczyźnie złącza i zjawisko „filamentacji” pola bliskiego lasera, a także efekty „wyciekania” pola modów wnekowych poprzez emitery do podłoża. Konsekwencje tego zjawiska widoczne są nie tylko w polu bliskim ale i w widmie lasera. Niezwykle interesujące, oryginalne wyniki dotyczą dynamiki laserujących włókien (filamentów) w płaszczyźnie złącza. Obserwowane przemieszczanie się włókien z czasem interpretowane jest jako skutek przestrzennego wypalania dziur (lokalnego zubażania inwersji). W pracy nie pokazano pola dalekiego badanych laserów a jedynie zmiany obserwowane w polu bliskim w miarę oddalania się sondy od powierzchni zwierciadła. Trudno jednak uznać, że odległość 30  $\mu\text{m}$  jest wystarczająca by taktować obserwowany rozkład intensywności jako pole dalekie lasera.

Pracę kończy rozdział 9 zawierający rozważania na temat optymalizacji wnęki rezonansowej lasera. Analizowany jest wpływ długości rezonatora i ilości studni kwantowych w obszarze czynnym na prąd progowy lasera. Uzyskane wyniki mogą być bezpośrednio wykorzystane w projektowaniu i laserów.

Najważniejszym z naukowego i praktycznego punktu widzenia osiągnięciem pracy jest analiza wzmocnienia optycznego w realnych strukturach laserowych. Opracowana przez doktoranta technika pomiaru wzmocnienia z wykorzystaniem pompowanych optycznie struktur umożliwia weryfikację różnych wariantów konstrukcyjnych i różnych technologii

wytwarzania struktur bez konieczności poddawania struktur pełnemu *processingowi*. Podobnie wysoko oceniam zaprezentowaną w pracy wyniki dotyczące struktury pola optycznego laserów i jego dynamiki. Właściwości te mają bezpośredni wpływ na jakość wiązki promieniowania a jej poprawa jest niezbędna dla umożliwienia większości praktycznych zastosowań laserów azotkowych.

Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autora, potwierdzony szeregiem publikacji w czasopismach o obiegu międzynarodowym. Praca napisana jest w sposób jasny i logiczny. Dowodzi ona dużej biegłości autora w zakresie fizyki półprzewodników i technik eksperymentalnych związanych z badaniem przyrządów półprzewodnikowych. Uważam pracę za bardzo wartościową, rozszerzającą naszą wiedzę o zjawiskach fizycznych leżących u podstaw działania, ciągle jeszcze mało zbadanych, laserów azotkowych a jej autora za w pełni dojrzałego do twórczej pracy naukowej.

**Mając na uwadze dużą naukową i praktyczną wartość otrzymanych wyników wyrażam przekonanie, że praca mgr Tomasza Świetlika spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Tomasza Świetlika do publicznej obrony pracy doktorskiej a w przypadku pozytywnego jej zakończenia o wyróżnienie pracy.**

