

Warszawa 15.11.2010

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

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Anny Holc pt. **„Integrated optical systems based on laser diodes and some applications to spectroscopy”**

Praca mgr Katarzyny Holc poświęcona jest spektroskopowym układom funkcjonalnym wykorzystującym azotkowe diody laserowe. Są to przestrajalne lasery z zewnętrzną wnęką rezonansową, układy do temperaturowego przestrajania laserów i urządzenia do detekcji śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych metodą strat optycznych we wnęce rezonansowej. Istotną część pracy stanowią także zagadnienia dotyczące samych diod laserowych, takie jak optymalizacja ograniczenia optycznego generowanego promieniowania w kierunku prostopadłym do złącza oraz konstrukcja i analiza optyczna mini-matryc laserowych. Praca ma charakter eksperymentalny i jest podsumowaniem kilkuletnich badań autorki w tej dziedzinie, potwierdzonych licznymi publikacjami w czasopismach o cyrkulacji międzynarodowej. Tematyka pracy jest ważna i aktualna. Zastosowania laserów półprzewodnikowych w spektroskopii w ostatnich latach rozwijają się gwałtownie co powoduje rosnący popyt na źródła promieniowania o różnej długości fali, w tym również lasery krótkofalowe.

Rozprawa składa się ze wstępu, 6 zasadniczych rozdziałów zawierających wyniki badań własnych autorki, podsumowania i spisu cytowanej literatury. Oparta jest ona na 10 artykułach opublikowanych w latach 2007-2010 w liczących się czasopismach z dziedziny fizyki półprzewodników i przyrządów półprzewodnikowych. W pięciu z wymienionych prac doktorantka jest pierwszym autorem.

Rozdziały 2 i 3 rozprawy stanowią zwięzłe wprowadzenie w fizykę laserów półprzewodnikowych ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki laserów azotkowych. Ta

część pracy dowodzi dobrej znajomości problematyki przez autorkę i stanowi punkt wyjścia dla dalszych oryginalnych rozważań. Rozdziały wprowadzające satnowią łącznie około 30% objętości pracy.

W Rozdziale 4, który jest pierwszym z rozdziałów zawierających oryginalne wyniki omówiono szczegółowo podstawy warsztatu badawczego, t.j., metodologię pomiarów charakterystyk optycznych laserów, pomiary wzmocnienia optycznego przy użyciu metody Hakki-Paoliego i pomiary właściwości falowodowych badanych struktur. Szczególny nacisk został położony na pomiary pola promieniowania laserów w strefie bliskiej i pola w strefie dalekiej, które umożliwiły zrozumienie dynamiki modów optycznych i wyjaśnienie dlaczego pole promieniowania laserów azotkowych jest szczególnie podatne na filamentację. Dodatkowo, pomiary pola bliskiego ujawniły słabe ograniczenie pola w kierunku prostopadłym do złącza i wyciekanie modu do podłoża co zwiększa straty i zmniejsza współczynnik ograniczenia modowego. Ponieważ ze względów technologicznych niemożliwe było zwiększenie grubości warstwy ograniczającej z AlGaIn zaproponowano nowe, oryginalne rozwiązanie polegające na zastosowaniu falowodu plazmonowego w postaci dodatkowej, silnie domieszkowanej tlenem warstwy GaN nałożonej bezpośrednio na podłożu. Warstwa taka nie wprowadza dodatkowych naprężeń w strukturze i efektywnie obniża współczynnik załamania, zapewniając niemal idealne ograniczenie modu poprzecznego. Doktorantka nazywa tak spreparowany substrat podłożem plazmonowym, co może nie jest najszcześniejszym określeniem jako że rolę silnie domieszkowanej tlenem warstwy GaN jest wymuszanie ograniczenia pola promieniowania a nie modyfikacja właściwości podłoża. Falowody plazmonowe po raz pierwszy i jedyne zastosowano w laserach kaskadowych średniej podczerwieni z GaAs/AlGaAs. Wykorzystanie tego pomysłu w laserach azotkowych pozwoliło na radykalną poprawę ich parametrów i jest jednym z ważniejszych osiągnięć pracy. Wyniki dotyczące wykorzystania falowodu plazmonowego do wyeliminowania wycieku modów do podłoża opublikowano w Applied Physics Letters w 2009 r. Są one również przedmiotem zgłoszenia patentowego. Doktorantka przeprowadziła również odpowiednie symulacje teoretyczne rozkładu pola optycznego w laserze o starej konstrukcji i ulepszonej konstrukcji z dodatkową warstwą plazmonową, które potwierdziły skuteczność takiego podejścia.

W Rozdziale 5 dyskutowane są zagadnienia związane z wykorzystaniem laserów azotkowych w spektroskopii molekularnej i problemy przestrajania laserów za pomocą

zewnętrznej wnęki rezonansowej i temperatury. Układ przestrajania częstości laserów za pomocą zewnętrznej wnęki rezonansowej oparty został na ulepszonej konfiguracji Littrowa z dodatkowym zwierciadłem umożliwiającym stabilizację kierunku wiązki wyjściowej. Dla lasera emitującego w pasmie 400 nm uzyskano pracę na pojedynczym modzie podłużnym o szerokości linii 100 MHz w zakresie przestrajania 5.5 nm. Większy zakres przestrajania (~16 nm) uzyskano w przypadku strojenia temperaturą. Odbywa się to jednak kosztem gorszej jakości wiązki (praca wielomodowa i przeskoki modów). Kolejnym mankamentem tego typu przestrajania jest wzrost prądu progowego z temperaturą, szczególnie szybki gdy przestrajanie jest skutkiem wzrostu temperatury powyżej temperatury pokojowej.

Badane w pracy lasery wykorzystane zostały do detekcji  $\text{NO}_2$  za pomocą techniki opartej na pomiarze strat optycznych we wnęcie rezonansowej (Cavity Ring Down Spectroscopy). Eksperymenty te przeprowadzono we współpracy z zespołem prof. Tadeusza Stacewicza z Uniwersytetu Warszawskiego i zespołem prof. Zbigniewa Bieleckiego z Wojskowej Akademii Technicznej. Uzyskana detekcyjność, na poziomie 5 ppb, jest bardzo dobrym wynikiem pozwalającym realnie myśleć o konstrukcji komercyjnego urządzenia do detekcji śladowych ilości zanieczyszczeń gazowych.

Kolejnym zagadnieniem rozpatrywanym w pracy są wytwarzanie i właściwości diod superluminescencyjnych (Rozdział 6) i mini-matryc laserowych (Rozdział 7). Diody superluminescencyjne mogą znaleźć zastosowanie w tomografii optycznej i wyświetlaczach barwnych. Matryce laserowe mogą być perspektywicznym źródłem krótkofalowego promieniowania dużej mocy. Prace nad trójelementowymi matrycami laserowymi doprowadziły do wytworzenia elementów emitujących 2.5 W na długości fali 408 nm, które są kolejnym przyrządem o dużym potencjale aplikacyjnym. Przeprowadzone badania pola w strefie bliższej i pola w strefie dalekiej matryc pozwoliły na zrozumienie mechanizmu sprzęgania pola poszczególnych emiterów i konsekwencji na wyeliminowanie tego niekorzystnego w opinii doktorantki zjawiska. W tym miejscu należy jednak zwrócić uwagę na fakt, sprzęganie pola indywidualnych emiterów może być niepożądane jeśli celem jest uzyskanie maksymalnej mocy natomiast samo w sobie jest efektem korzystnym ponieważ prowadzi do synchronizacji fazowej (koherencji) indywidualnych emiterów i poprawia kierunkowość wiązki. Poza tym jest wątpliwe czy możemy używać terminu matryca w przypadku kiedy *de facto* mamy do czynienia z monolitycznym wielokrotnym emiterem. Powyższe uwagi w żadnym wypadku nie podważają wartości uzyskanych wyników i

powinny być rozumiane jako przyczynek do dyskusji o charakterze w dużej mierze terminologicznym.

Reasumując chciałbym podkreślić, że praca jako całość nawiązuje w sposób właściwy do dotychczasowych osiągnięć nauki w swojej dziedzinie. Autorka rozprawy przeprowadza prawidłową analizę stanu wiedzy w temacie, którym się zajmuje wykazując dobre zrozumienie fizyki laserów półprzewodnikowych i metod badania ich właściwości optycznych. Godne podkreślenia jest również konsekwentne dążenie do poprawy konstrukcji wybranych laserów pod kątem możliwości ich zastosowania w zaawansowanej spektroskopii molekularnej.

Praca mgr Katarzyny Holc napisana jest w sposób jasny i logiczny. Na szczególne podkreślenie zasługuje czytelność materiału ilustracyjnego. Generalna ocena pracy jest jednoznacznie pozytywna. Zawiera ona szereg oryginalnych wyników, niezwykle użytecznych dla optymalizacji konstrukcji i technologii wytwarzania azotkowych laserów półprzewodnikowych. Zwraca uwagę dojrzałość i głęboka wiedza fizyczna autorki i dostrzeganie skomplikowanych współzależności pomiędzy zjawiskami leżącymi u podstaw działania laserów półprzewodnikowych. Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autorki, potwierdzony szeregiem publikacji konferencyjnych i artykułów w czasopiśmie o obiegu międzynarodowym. Od strony eksperymentalnej praca stanowi istotny krok naprzód w rozwoju technik pomiarowych pola optycznego laserów i technik przestrajania długości fali.

**Mając na uwadze rzetelność i wielostronność przeprowadzonych badań eksperymentalnych, a także naukową wartość otrzymanych wyników wyrażam przekonanie, że praca mgr Katarzyny Anny Holc spełnia z naddatkiem wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Katarzyny Anny Holc do publicznej obrony pracy doktorskiej.**

