

Prof. dr hab. Piotr Perlin
Instytut Wysokich Ciśnień PAN
ul. Sokołowska 29/37
01-142 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

magistra inżyniera Artura Brody, zatytułowanej **Półprzewodnikowe lasery dyskowe - nowatorskie struktury i poszerzone możliwości spektralne**, napisanej pod kierunkiem naukowym dr hab. Jana Muszalskiego, w Instytucie Technologii Elektronowej.

WSTĘP

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Artura Brody dotyczy opracowania nowych typów półprzewodnikowych laserów dyskowych pompowanych optycznie (VECSEL – Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser). Nowatorstwo badań Autora polega na opracowaniu laserów zdolnych do emisji światła w wielu długościach fali i możliwości rekordowo szerokiego strojenia takich laserów. Proponuje on i demonstruje dwa rozwiązania. Pierwsze, oparte na warstwie aktywnej zawierającej dwa typy studni kwantowych oraz drugie polegające na wytworzeniu wnęki podtrzymującej laserowanie na dwóch różnych długościach fali. Laserowanie to jest możliwe dzięki wykorzystaniu pełnej szerokości widma wzmocnienia optycznego. Trzecim zagadnieniem poruszonym w tej pracy jest opracowanie lasera dyskowego bez zwierciadeł Bragga, przystosowanego do emisji bardzo wysokich mocy optycznych. Autor rozprawy podejmuje bardzo aktualną tematykę laserów dyskowych, znajdując w wielu aspektach nowe rozwiązania ważnych problemów optoelektronicznych.

OMÓWIENIE PRACY

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest wstępem do pracy, w którym Autor wprowadza pojęcie laserów dyskowych (laserów VECSEL) i podaje argumenty uzasadniające wagę tematyki, wskazując na gwałtowny rozwój dziedziny w ostatnich latach. W dalszej części opisuje zasadniczy cel pracy, a następnie przechodzi do omówienia zawartości rozprawy i jej kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi to gruntowne i dobrze napisane wprowadzenie do tematyki laserów VECSEL. Doktorant zaczyna od omówienia ogólnej koncepcji tych przyrządów. Opisuje kolejno ich strukturę, sposoby wytwarzania, montaż, problemy cieplne i na koniec charakteryzację. Opis charakteryzacji laserów dyskowych obejmuje pomiary ich

podstawowych parametrów optycznych oraz pomiary jakości wiązki i widma. Rozdział drugi ma charakter przeglądu stanu wiedzy, ale nie jest tylko przeglądem literaturowym. Autor traktuje ten rozdział jako wprowadzenie do metod i technologii używanych w Zakładzie Fotoniki Instytutu Technologii Elektronowej, w której doktorant wykonywał badania opisane w tej dysertacji.

Rozdział trzeci stanowi omówienie konstrukcji lasera VECSEL emitującego w dwóch długościach fali (980 nm, 1025 nm). Autor demonstruje, że użycie zwierciadła Bragga o „stop-band” powyżej 100 nm, daje możliwość uzyskania laserowania na dwóch typach studni kwantowych InGaAs. Studnie są umieszczone w strzałkach pola elektromagnetycznego i są rozdzielone barierą AlAs, uniemożliwiającą przelewanie się nośników do głębszej studni. Doktorant demonstruje, dobre parametry studni, wspólny próg laserowania dla obu długości fali. Wadą pozostaje mniejsza sprawność lasera.

Rozdział czwarty przedstawia inną koncepcję lasera, prowadzącą do emisji na dwóch różnych długościach fali. Precyzując, Autor konstruuje laser działający w dwóch długościach fali: 967 nm i 1018 nm. Laser ten posiada inną grubość warstw, co powoduje, że etalon powstały pomiędzy powierzchnią a zwierciadłem prowadzi do dodatkowego rezonansu i dwóch modów wnękowych. W zależności od temperatury, która może być zmieniana mocą lasera pompującego, badany laser może generować na jednej z dwóch częstotliwości, a w szczególnych warunkach na obu jednocześnie.

Autor demonstruje zarówno przełączalność lasera przy pomocy mechanicznej modulacji wiązki pompującej, jak i możliwość podwajania częstotliwości lasera VECSEL, co prowadzi do generacji światła zielonego i niebieskiego.

Rozdział piąty koncentruje się na konstrukcji lasera pozbawionego monolitycznych zwierciadeł Bragga. Konstrukcja taka jest optymalna z punktu widzenia odprowadzania ciepła, gdyż interfejsy zwierciadła Bragga prowadzą do wzrostu oporu termicznego struktury. Warstwa zawierająca studnie kwantowe jest skontaktowana z okienkami diamentowymi i zamknięta pomiędzy zwierciadłami o różnych odbiciowych powłokach dielektrycznych. Autor demonstruje charakterystyki, moc pompowania - moc emisji, wskazujące na sprawność konwersji około 30% i brak efektów termicznego przeięcia charakterystyki. Szacowana oporność cieplna przyrządu jest bardzo niska, rzędu 0.2 K/W.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie rozprawy.

UWAGI OGÓLNE DO ROZPRAWY

Przedstawiona rozprawa omawia nowe konstrukcje laserów VECSEL pompowanych optycznie. Lasery op-VECSEL uważane są obecnie za jedne z ciekawszych, nowych konstrukcji laserów półprzewodnikowych. Doktorant w jakimś stopniu kapitalizuje wiedzę

grupy (Zakładu Fotoniki ITE) na temat laserów emisji powierzchniowej typu VCSEL i VECSEL, ale też wychodzi poza podstawowe rozwiązania, eksplorując nowe idee.

Autor zaczyna od bardzo dobrego wprowadzenia do fizyki i konstrukcji laserów VECSEL. Rozdział pierwszy to bardzo dobry, przejrzysty wstęp dla czytelnika oraz referencja do dalszej części rozprawy. Jak wspomniałem, ambicją doktoranta jest wyjście tej rozprawy poza konwencjonalne struktury laserów VECSEL. Nowość proponowanych konstrukcji polega na uzyskaniu emisji w większej niż jedna długości fali. Poświęcone są temu rozdziały trzeci i czwarty. Modyfikowana jest albo struktura warstwy aktywnej (studnie kwantowe) albo struktura modowa (mody Fabry Perot). Oba podejścia kończą się sukcesem i otrzymaniem dobrej klasy laserów. W przypadku laserów ze zmodyfikowaną strukturą modów, możliwe jest sterowanie długością fali emisji (przeskok długości fali/modu) poprzez regulację temperatury. Ciekawym, acz standardowym efektem jest umieszczenie, we wnętrzu lasera, nieliniowego kryształu, umożliwiającego generację drugiej harmonicznej promieniowania, a tym samym operację lasera w świetle widzialnym. Konsekwencją bistabilnej natury lasera jest możliwość przełączania emisji pomiędzy niebieskim i zielonym, co jest interesującą możliwością z punktu widzenia systemów projekcyjnych RGB.

Końcowym akcentem rozprawy jest uzyskanie lasera VECSEL pozbawionego zwierciadeł DBR. Ta część pracy, wydaje się być przede wszystkim demonstracją dobrej jakości technik processingowych i montażowych, gdyż mamy tu do czynienia w technikami wafer bonding i usuwania podłoża.

Praca pokazuje wysoki poziom modelowania, epitaksji, procesingu, montażu i charakteryzacji, czyli wszystkich elementów składających się na technologię laserów.

UWAGI SZCZEGÓŁOWE DO ROZPRAWY

Przesłanie pracy jest bardzo klarowne, natomiast układ rozprawy już nie tak bardzo. Rozdział drugi miesza elementy wstępu literaturowego ze szczegółowymi opisami technologii rozwiniętej w Zakładzie Fotoniki ITE i własnymi rezultatami autora.

Niestety autor rozprawy od początku unika jasnej deklaracji czy jego wkład w prezentowane badania dotyczy wszystkich, czy tylko niektórych elementów prezentowanych tu technologii. Można odnieść wrażenie, że Autor zaangażowany był przede wszystkim w charakteryzację optyczną przyrządów.

Nowe konstrukcje laserów, widzimy w tej rozprawie jako obiekty gotowe, nie przechodzące przez proces optymalizacji. Autor koncentruje się na wynikach charakteryzacji optycznej, w tym odbicia i fotoluminescencji, oraz widm laserowych. Wyniki te potwierdzają założenia konstrukcyjne lasera. W tym sensie, nie ma tu niespodzianek, ale też nie widać zbyt wiele procesu badawczego. W zasadzie demonstrowana konstrukcja jest w pewnym sensie od razu udana.

Razi mnie brak systematyczności w opisie struktur w rozdziałach trzecim, czwartym i piątym. W każdym z przypadków spodziewałbym się dokładnego schematu (w formie rysunkowej) struktury i schematu montażu laserów. W przypadku lasera bez DBR, nie ma opisu jego montażu, który jest kluczową częścią tej technologii. Część tych opisów Autor

umieścić w rozdziale drugim, gdzie wydają się nieco poza kontekstem i trudne do odnalezienia.

Najbardziej „badawczą” częścią rozprawy jest analiza strojenia laserów z podwójnym rezonansem, pokazująca rekordowo duży obszar strojenia, wykorzystujący element dwójfotony, temperaturę chłodnicy i temperaturę obszaru aktywnego.

Konkludując, rozprawa dowodzi, że Autor porusza się w obrębie świetnie opanowanych zagadnień technologicznych i jeszcze lepiej zrozumianej fizyki, nie wchodząc jednak w obszar zbyt odległy od ekspertyzy posiadanej przez swoją grupę badawczą.

PODSUMOWANIE

Analizowana rozprawa, jest eleganckim opisem rozwiązania pewnych problemów konstrukcyjnych laserów typu VECSEL. Pokazuje siłę technologii i wiedzę doktoranta. Nie ulega wątpliwości, że magister Broda kończy realizację swoich badań, zdobywszy duże doświadczenie w materii laserów emisji powierzchniowych pompowanych optycznie i jest dobrze przygotowany do rozpoczęcia samodzielnych badań.

Rozprawa, mimo braków, jest interesująca i jest dobrym wprowadzeniem do problemów istotnych dla tej dziedziny technologii i badań.

Jej wadą jest koncentracja na charakteryzacji optycznej, która tylko potwierdza właściwą konstrukcję przyrządów oraz brak pokazania „learning curve” dokumentującej wysiłek Autora rozprawy w dojściu do opisywanych wyników.

Pan magister inżynier Artur Broda jest autorem dziewięciu prac, w tym pierwszym autorem dwóch, jednak tylko cztery z nich mają istotny czynnik oddziaływania (impact factor). Doktorant kilkakrotnie prezentował swoje wyniki na konferencjach międzynarodowych i jest autorem jednego zgłoszenia patentowego.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona tu rozprawa spełnia wymagania, stawiane pracom doktorskim (zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Artura Brody do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Warszawa, dnia 10 grudnia 2017

Piotr Perlin

