

Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Artura Brody pt.

„Półprzewodnikowe lasery dyskowe – nowatorskie struktury i poszerzone możliwości spektralne”

W pierwszej chwili pomysł lasera półprzewodnikowego pompowanego optycznie wzbudza zdziwienie, ponieważ oznacza utratę podstawowej zalety, jaką jest możliwość pompowania elektrycznego. Dalej, koncepcja lasera dyskowego z bardzo krótkim (rzędu mikrometrów) obszarem aktywnym na wzór lasera na ciele stałym wymaga skomplikowanego zewnętrznego rezonatora. Tu jednak kończą się wady: okazuje się, że wskutek silnej absorpcji międzypasmowej (w porównaniu z absorpcją na domieszkach w ciele stałym) rezonator może być stosunkowo prosty (bez wielokrotnych odbić), a zalety wynikające z krótkiego obszaru aktywnego i dużej powierzchni emitującej są istotne. Okazuje się też, że pompowanie optyczne dopuszcza interesujące modyfikacje konstrukcji obszaru aktywnego, prowadzące do specyficznych własności użytkowych przyrządów VECSEL, nieosiągalnych w konwencjonalnych (pompowanych elektrycznie) diodach laserowych. To jest istotą prac przedstawionych w rozprawie doktorskiej mgr inż. Artura Brody, dotyczących projektowania, konstrukcji i charakteryzacji kilku nowatorskich wersji VECSEL.

W Rozdziale 1.1 Autor skrótowo przedstawił zalety VECSEL (w stosunku do innych typów laserów), które stanowiły motywację dla podjęcia opisanych prac badawczych. Kategorycznie określił własności zastosowanych w pracy heterostruktur, jako pionierskie w skali światowej.

Tezę pracy sformułowaną w Rozdziale 1.2 jest, że poprzez odpowiednie modyfikacje heterostruktury można uzyskać nowe własności przyrządu, jak jednoczesna dwuczęstotliwościowa akcja laserowa z możliwością przełączania i strojenia w rekordowo szerokim zakresie oraz że możliwa jest konstrukcja VECSEL'a o nowych dla laserów półprzewodnikowych zakresach długości fali emitowanej (λ).

Teza ta jest udowadniania w Rozdziałach 3 – 4, stanowiących oryginalny wkład Autora, gdzie druga część tezy (o nowych zakresach λ) związana jest z zastosowaniem elementów nieliniowych wewnątrz rezonatora, co niekoniecznie jest wyłączną cechą VECSEL'i, ale można to rozumieć w ten sposób, że zewnętrzny rezonator jest nieodzowną częścią konstrukcji tych przyrządów. Poza tezę (?) znalazł się oryginalny Rozdział 5 opisujący skonstruowany VECSEL o poprawionych parametrach termicznych dzięki wyeliminowaniu półprzewodnikowego segmentu DBR.

Załączone na końcu publikacje (9) i materiały konferencyjne (11) dotyczące wyników badań zaprezentowanych w niniejszej rozprawie stanowią istotne uzupełnienie w przypadku niektórych fragmentów samej rozprawy. Wkład Autora w tych wieloautorских pracach jest zaznaczony w odpowiednich rozdziałach dysertacji.

Wcześniej, w Rozdziale 2.1, charakteryzując stan wiedzy i osiągnięć technicznych, Autor przedstawił własności użytkowe VECSEL'i w porównaniu z laserami różnych typów, nie tylko półprzewodnikowymi. Wynika z tego potencjalny zakres zastosowań.

Rozdziały 2.2 – 2.4 można uważać za opis dysponowanej bazy - projektowej, konstrukcyjnej i technologicznej dla dalszych, oryginalnych prac.

Rozdział 2.2 zawiera opis heterostruktury laserowej, w tym lustra Bragga (DBR). Rozważania na temat optymalizacji DBR są interesujące, ponieważ uwzględniają wszystkie aspekty technologii, jednak krótki opis procesów odbicia i konstruktywnej interferencji w lustrze (str. 8) wydaje się nie do końca poprawny, może częściowo z powodu założenia przypadku jak na Rys. 2.3a, że fala pada z ośrodka o niższym współczynniku załamania.

Dalej Autor omawia obszar aktywny heterostruktury - rozkład pola optycznego akcji laserowej i zagadnienia pompowania, w tym możliwości minimalizacji skutków defektu kwantowego poprzez

odprowadzenia ciepła w przypadku pompowania warstw absorbujących GaAs ($E_g = 1.43$ eV) laserem 808 nm (1.53 eV).

W Rozdziałach 2.3 – 2.4 Autor omawia projekt 'standardowej' heterostruktury VECSEL, problemy technologiczne (np. problem niedopasowania sieciowego i kompensacji naprężeń) oraz metody charakteryzacji. Omawiając zagadnienia pompowania wyjaśnia przewagę rozwiązania z pompowaniem optycznym względem elektrycznego (złączowego). Dalej omawiane są zagadnienia projektowania i konstrukcji kolimatora wiązki pompującej, a w części 2.3.4 – wpływu montażu struktur VECSEL i odprowadzania ciepła na stabilność mocy emitowanej i przestrajanie termiczne. Scharakteryzowane zostały stosowane w dotychczasowej praktyce metody montażu VECSEL; na ich podstawie Autor motywuje wybór techniki zastosowanej w laboratorium ITE.

Następnie w tej części, opisana jest szczegółowo metoda tzw. 'kapilarnego bondingu' - łączenia heterostruktury VECSEL z diamentowym 'heatspreaderem'. Zalety takiego montażu są oczywiste, jednak Autor zwraca też uwagę na pewne negatywne konsekwencje, jak tworzenie się wewnątrz-wnętkowego etalonu modyfikującego charakterystyki spektralne przyszłego przyrządu. Dalej w tej samej b. ważnej części 2.3.4, po wstępnej motywacji, opisane są techniki montażu, w tym 'DBR-free'. Obiektywny opis nie obrazuje, jak kolejne kroki są trudne, jednak dobrze świadczy o sprawności laboratoryjnej.

W Podrozdziale 2.3.5 opisane są znane z literatury konstrukcje VECSEL'i (wywodzące się od konstrukcji laserów dyskowych na ciele stałym), z lustrami DBR oraz DBR-free, z możliwością przestrajania przy pomocy filtru dwójtłomnego.

W Rozdziale 2.4 Autor opisał podstawowe parametry VECSEL'i zaprojektowanych i skonstruowanych w ITE do pracy na jednej długości fali. Jest to baza porównawcza dla opisu oryginalnych osiągnięć Autora. Przedstawione zostały osiągnięcia w tych 'konwencjonalnych' konstrukcjach:

- możliwość skalowania mocy emitowanej przez zmianę powierzchni pompowanej, z zachowaniem wysokiej jakości wiązki;
- jakość wiązki: $M^2 \cong 1.2$, naturalna polaryzacja wzdłuż kierunków z grupy [110];
- możliwość modyfikacji charakterystyki spektralnej (strojenia) poprzez wstawienie w układ rezonatora dodatkowych elementów.

W Rozdziale 3 przedstawione są oryginalne wyniki prac nad konstrukcją VECSEL umożliwiającą jednoczesną pracę na dwóch długościach fali (DW-VECSEL). Według wiedzy Autora jest to najprostsza z dotąd zaproponowanych konstrukcji, przy znacznym poziomie mocy emitowanej i znacznej separacji $\Delta\lambda$. Wkładem Autora są badania akcji laserowej. W rozprawie przedstawiony jest schemat dwusekcyjnej heterostruktury InGaAs/GaAs/AlGaAs/GaAs wraz z teoretycznymi rozkładami pola optycznego dla dwóch projektowanych długości fali $\lambda_s = 980$ nm i $\lambda_L = 1026$ nm, a następnie wyniki charakteryzacji (odbicia i PL) wytworzonej techniką MBE heterostruktury, świadczące o dobrej zgodności z projektem.

Następnie scharakteryzowany jest DW-VECSEL w układzie rezonatora liniowego zbudowany na bazie tej heterostruktury. Autor opisał oczekiwany (zgodny z tezą) wynik: emisję dwuczęstotliwościową w jednej wiązce z jednakowym poziomem pompowania progowego, z separacją spektralną $\Delta\lambda = 46$ nm.

Jako przyczynę stosunkowo niskiej sprawności konwersji promieniowania (rzędu 8%) Autor podaje zdefektowanie materiału epitaksjalnego wynikające z niedopasowania sieciowego (nie zastosowano w tej heterostrukturze warstw kompensujących naprężenia). Wydaje się jednak, że są inne, na razie nie rozpoznane, poważne przyczyny.

Rozdział 4 jest jednym z najważniejszych w rozprawie – opisuje, zdaniem Autora, konstrukcję całkowicie oryginalną (opisaną w dwóch artykułach, w których udział Doktoranta pierwszorzędny).

Po krótkim wstępie dotyczącym najogólniej zasady działania i potencjału aplikacyjnego S-VECSEL'i, Autor przechodzi do opisu koncepcji, a potem omawia wyniki charakteryzacji optycznej wykonanej heterostruktury, z której wynika (zdaniem Autora) kompletny jej obraz. Jednak dość skrótowy opis heterostruktury jest trochę trudno zrozumiały, pomocny byłby graficzny schemat

wiążący zmiany grubości warstw z przestrzennym i spektralnym 'ułożeniem' dwóch modów podłużnych. Niejasna jest definicja współczynnika przekrycia Γ (w artykule w Optics Express został tylko zacytowany), który w dysertacji przyjmuje wartości od 0 do ok 45 (?), a w ww. publikacji na bliźniaczym wykresie jest w zakresie 0 – 4. Skutkiem tego również wartości na osiach pionowych na Rys. 4.8 są niepewne. Jednak, pomijając usterki, niewątpliwie przedstawione metody charakteryzacji pozwalają ocenić heterostrukturę pod kątem jej przydatności dla dalszych prac.

Dalej Autor dość 'plastycznie' opisuje efekt przełączania częstotliwości, zaznaczając możliwość szybkiego kluczowania λ przy pomocy efektu cieplnego, co stawia ową szybkość pod znakiem zapytania. Jednak w następnym, eksperymentalnym rozdziale okazuje się, że może się to odbywać z częstotliwością rzędu 1 kHz, co już jest interesujące aplikacyjnie. Powstał oryginalny przyrząd przestrajany mocą pompy, z charakterystyką konwersji mocy 'typu N' (w zakresie T od 20 do 30 degC – Rys.44).

Z drugiej strony, interesująca byłaby możliwość poprawy sprawności konwersji również w tej strukturze.

W Rozdziale 4.4 opisane jest zastosowanie S-VECSEL'a z mikrowną dwurezonansową do przestrajania λ . Celem Autora było uzyskanie maksymalnie szerokiego zakresu przestrajania. Przedstawiony jest zoptymalizowany schemat lasera z rezonatorem w układzie V oraz sposób montażu heterostruktury zapewniający wymaganą kontrolę temperatury. Przestrajając układ temperaturowo (T chłodziwy 0 – 40 degC) i za pomocą filtru dwójłomnego (BRF) Autor uzyskał rekordowy zakres przestrajania $\Delta\lambda = 95$ nm (937 – 1032 nm). Autor skrótowo wyjaśnia przyczynę uzyskanego wyniku: decyduje (w przybliżeniu) odległość spektralna dwóch modów podłużnych mikrownki (maksimów wzmocnienia modowego Γg) i ich ewolucja temperaturowa (Rys. 4.8).

Widać, że zrealizowana została kolejna składowa tezy rozprawy. Choć Autor stwierdza (w publikacji w IEEE PTL i we Wnioskach 4.6), że otrzymana maksymalna moc akcji laserowej 135 – 160 mW (dla λ w pobliżu 960 nm) jest wystarczająca dla większości zastosowań w spektroskopii, to jednak dla dalszego rozwoju tej techniki przydałoby się wyjaśnienie, gdzie powstają straty rzędu 99% mocy pompy.

Rozdział 4.5 zawiera dowód następnej części tezy – o możliwości rozszerzenia zakresu długości fal emitowanych – poprzez zastosowanie wewnątrz układu rezonatora kryształu nieliniowego dla generacji drugiej harmonicznej. Jak wspomniano wcześniej, ta metoda może być stosowana dla wszystkich typów laserów z zewnętrznym rezonatorem, jednak Autor uzyskał tu bardzo szeroki zakres strojenia od 470 do 515 nm dzięki rekordowo szerokiemu 'pierwotnemu' zakresowi przestrajania układu S-VECSEL. Zastosowany został zmodyfikowany nieco rezonator w układzie V z wbudowanym kryształem nieliniowym i zmodyfikowanym lustrem łamiącym, które dzięki zastosowaniu innych pokryw stało się lustrem wyjściowym dla drugiej harmonicznej. Pomimo dodatkowego elementu pasywnego w rezonatorze, w układzie tym uzyskano większą sprawność konwersji niż w poprzednio omówionym układzie z przestrajaniem podstawowej harmonicznej (?).

W Rozdziale 5 przedstawione są wyniki prac nad konstrukcją VECSEL - DBR-free (tytuł Rozdziału jest nieco tautologiczny). We wstępnym opisie i interesującym zarysie historycznym istotna jest uwaga, że rezonans F-P w mikrownie bez DBR jest słabszy, czyli charakterystyki rezonansowe są szersze, dając możliwość stosunkowo szerokiego zakresu przestrajania - jak rozumiem – we wnęce z jednym modem podłużnym.

W części eksperymentalnej (Rozdziały 5.2, 5.3) pokazany jest schemat heterostruktury DBR-free i omówiony został układ VECSEL'a. Technologia otrzymywania półprzewodnikowej struktury DBR-free (usuwania podłoża GaAs i montażu w przekładkach diamentowych) została omówiona w Rozdz. 2.3.4. W układzie tym Autor uzyskał najwyższą sprawność konwersji (z możliwością dalszej poprawy), bez efektu termicznego zakrzywienia charakterystyk emisji (thermal rollover) w zakresie pompowania do 22 W, gdzie uzyskano moc maksymalną 3.3 W ($\lambda \cong 970$ nm). W swoim artykule (Opt. Quant. Electron.) Autor pokazuje też analogiczne charakterystyki dla 'referencyjnego' standardowego VECSEL'a z lustrem braggowskim, gdzie dla mocy pompy 22 W uzyskano 2.7 W ($\lambda \cong 970$ nm), z

efektem termicznego zakrzywienia zauważalnym dla mocy pompy powyżej 20 W, przy czym definitywny spadek mocy wystąpił powyżej 23 W.

Wolniejsze przestrajanie lasera DBR-free ze wzrostem mocy pompy w porównaniu z przestrajaniem standardowego VECSEL'a (Rys. 5.5) jest wyraźnym dowodem oczekiwanej redukcji rezystancji termicznej (R_{th}). Jednak oszacowane wartości R_{th} dla obu konstrukcji różniące się o ponad rząd wielkości budzą wątpliwości. Nieprecyzyjny jest wywód prowadzący do tych wyników, jak też nieprzekonywująca, zdaniem recenzenta, jest interpretacja charakterystyk emisji krawędziowej. Z drugiej strony, tak duża różnica wartości R_{th} powinna skutkować większą różnicą sprawności konwersji i emitowanych mocy maksymalnych porównywanych w artykule VECSEL'i przy tej samej mocy pompy.

Zatem fakt poprawy rezystancji termicznej lasera dzięki eliminacji lustra braggowskiego nie budzi wątpliwości i w tym sensie Autor udowodnił swoją tezę, jednak wydaje się, że do bardziej szczegółowych oszacowań można jeszcze wrócić.

W podsumowaniu, w rozdziałach 3 – 4 (+5) Autor udowodnił sformułowaną na wstępie tezę, uzyskując rekordowe możliwości kluczowania częstotliwości i przestrajania VECSEL'a dzięki oryginalnym modyfikacjom projektu heterostruktury (DW-VECSEL, S-VECSEL).

Rozprawa przedstawiona została w sześciu zasadniczych rozdziałach na 69 stronach, po których załączone są kopie publikacji Autora powstałych w związku z pracą (9 pozycji, w tym 5 w pismach z listy filadelfijskiej oraz 11 publikacji pokonferencyjnych). Bibliografię stanowią 124 pozycje obejmujące cały 20-letni okres istnienia VECSEL'i oraz wcześniejsze, w tym także niektóre publikacje powstałe w Zakładzie Fotoniki ITE.

Praca ma przejrzysty, wewnętrznie spójny układ, czyta się ją dobrze pomimo pewnej ilości błędów stylistycznych, które zostały omówione z Autorem. Pomijając wspomniane drobne mankamenty redakcyjne, Autor niewątpliwie osiągnął zadeklarowane cele pracy.

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A. Maląg