

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

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**magistra inżyniera Mateusza Dyksika, zatytułowanej:
"Spektroskopia fourierowska struktur międzypasmowych laserów kaskadowych."
napisanej pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. inż. Grzegorza Sęka i
promotora pomocniczego dr hab. inż. Marcina Motyki na Wydziale Podstawowych
Problemów Techniki, Politechniki Wrocławskiej.**

WSTĘP

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Mateusza Dyksika dotyczy wszechstronnej charakteryzacji metodami optycznymi struktur międzypasmowych laserów kaskadowych (ICL). Problematyka poruszana przez mgr Dyksika koncentruje się wokół laserów kaskadowych emitujących w średniej podczerwieni, preferencyjnie w falach dłuższych niż 6 μm . Przy pomocy takich technik badawczych jak temperaturowo zależna fotoluminescencja oraz modulacyjne fotoodbicie doktorant określa podstawowe przejścia optyczne, pasma defektowe oraz stabilność nośników w studniach kwantowych II rodzaju typu „w”. Trzeba podkreślić, że warstwa aktywna laserów ICL, jest prawdziwym „state of the art” współczesnej inżynierii kwantowych heterostruktur półprzewodnikowych. Ich optymalizacja wymaga nie tylko świetnego zrozumienia stanów elektronowych ale i skonfrontowania tych wyników z realnym światem struktur epitaksjalnych. Rozprawa ta na pewno ma wpływ na wybór strategii rozwoju laserów ICL średniej podczerwieni jest też źródłem informacji o możliwościach metod spektroskopii optycznej w optymalizacji tych struktur.

OMÓWIENIE PRACY

Rozprawa składa się ze wstępu i siedmiu rozdziałów.

Wstęp jest krótkim wprowadzeniem do pracy, w którym autor uzasadnia wybór tematyki i opisuje podstawowe zagadnienia będące przedmiotem tej rozprawy. Autor podzielił rozprawę na dwa podstawowe zagadnienia:

1 - badanie własności laserów kaskadowych na przejściach międzypasmowych (ICL – Interband Cascade Laser) pracujących w długościach fali $6\ \mu\text{m}$ i dłuższych,
2 - badanie możliwości modyfikacji obszaru aktywnego takich laserów w celu otrzymania promieniowania o specyficznych własnościach.

Rozdział 1

to przejrzyste wprowadzenie do fizyki półprzewodników stosowanych w konstrukcji emiterów średniej podczerwieni oraz innych klasycznych półprzewodników z grupy III-V. Autor omawia wpływ temperatury na przerwę energetyczną tych materiałów, prezentując również diagramy przerw energetycznych dla stopów potrójnych i rozważa problemy niedopasowania sieciowego i naprężeń. Ważną częścią Rozdziału 1 jest omówienie klasyfikacji studni kwantowych ze względu na typ nieciągłości pasm co stanowi problematykę niezbędną dla zrozumienia tej rozprawy. W dalszej części tego rozdziału doktorant omawia podstawowe rozwiązania równania Schrodingera dla studni kwantowej i w dużym skrócie przedstawia teorię przejść optycznych w półprzewodnikach.

Rozdział 2

koncentruje się na budowie lasera ICL (Interband Cascade Laser). Omawianym laserem jest przyrząd z warstwą emitującą opartą o studnie AlSb/InAs/GaInSb/AlSb (nieciągłość II rodzaju, struktura typu W) i supersieciami InAs/AlSb i GaS i AlSb transportującymi nośniki. Autor omawia wpływ szerokości elektronowej studni kwantowej z InAs na całki przykrycia i energię przejścia optycznego. W dalszej części rozdziału dyskutuje tworzenie falowodu lasera, rolę supersieci InAs/AlSb jako warstw okładkowych lasera, podkreślając, że dla długości fali emisji większych niż $6\ \mu\text{m}$ istnieje potrzeba zmiany konstrukcji okładek lasera na warstwy plazmonowe. W końcówce tego rozdziału autor opisuje „state of the art” laserów ICL, pokazując ich parametry, zastosowania i wyzwania stojące przed tą obecnie ważną technologią.

Rozdział 3

omawia techniki pomiarowe użyte w tej rozprawie. Autor koncentruje się szczególnie na opisie spektrometrii Fourierowskiej w podczerwieni. Omawia też fotoluminescencję i metody modulowanego odbicia (fotoodbicia). W końcówce rozdziału autor wprowadza mniej znaną i bardziej oryginalną dla jego grupy badawczej metodę „szybkiej spektroskopii różnicowej”.

Rozdział 4

rozpoczyna prezentację oryginalnych wyników autora, opisując badania charakterystyczne struktur laserów ICL wykonanych w technologii antymonkowej (podłoże GaSb) i technologii arsenkowej (podłoże InAs). W części 4.1.1 doktorant opisuje badania fotoluminescencyjne, dokładnie rzecz biorąc, tworzenie map fotoluminescencyjnych waferów laserowych, pod kątem jednorodności wytworzonych studni kwantowych. Autor wprowadza nową jak na mapowanie fotoluminescencji technikę Fourierowską. Autor bada dwie struktury ze studniami AlSb/InAs/GaInSb/InAs/AlSb, jedną na podłożu InAs drugą zaś na podłożu GaSb.

Uzyskane mapy położenia pików emisji, poszerzenie emisji oraz intensywności świecenia pokazują wysoką jednorodność struktur i brak fundamentalnych różnic między warstwami hodowanymi na InAs i GaSb.

W dalszej części rozdziału autor analizuje możliwość zastosowania silnie domieszkowanych warstw InAs działających jako okładki falowodu lasera. Taka konstrukcja jest szczególnie ważna dla laserów długofalowych. Doktorant przy pomocy odbicia światła i foto-odbicia wyznacza częstość plazmową elektronów w okładkach InAs:Si. Dodatkowo, badana jest jakość warstw plazmowych metodą pomiaru fotoluminescencji. Szerokość emisji jest stała w funkcji domieszkowania co doktorant interpretuje jako dowód na utrzymywanie się dobrej jakości strukturalnej. Spadek intensywności luminescencji w funkcji domieszkowania Si, doktorant przypisuje rekombinacji niepromienistej Auger, podając argumenty oparte na modelu ABC dla półprzewodnika zdegenerowanego.

W części 4.3 rozdziału, doktorant skupia się na charakteryzacji warstwy aktywnej lasera ze szczególnym uwzględnieniem studni kwantowych drugiego rodzaju AlSb/InAs/GaInb/InAs/AlSb wytworzonych na podłożu z InAs. Porównuje tu trzy struktury ze studniami o różnej grubości warstwy InAs i bada mechanizmy termicznie indukowanej utraty nośników poprzez ucieczkę lub/i rekombinację niepromienistą z tych studni. Używając metod spektroskopii fotoodbiciowej doktorant bada położenie energetyczne stanów w studni kwantowej w funkcji grubości warstwy InAs. Konkluduje brak obecności w widmie fotoodbicia stanów wzbudzonych i zgodną z modelowaniem zależność energii przejścia podstawowego od szerokości studni InAs.

Doktorant bada też termiczny zanik fotoluminescencji w trzech strukturach.

Wyodrębnia dla wszystkich struktur dwie energie aktywacji i przypisuje je różnym, opisanym wcześniej w literaturze, mechanizmom ucieczki (ucieczki i rekombinacji) dziur.

W części 4.4 rozdziału autor bada zmodyfikowaną konstrukcję studni typu „W”, w których warstwa barierowa GaInSb zostaje zastąpiona warstwą GaAsSb. Zmienia to stan naprężeń, umożliwiając przejście podstawowe z udziałem dziur lekkich co pozwala na lepszą kontrolę polaryzacji lasera. Doktorant porównuje konwencjonalną strukturę z nowym jej wariantem (warstwą GaAsSb). W tym przypadku bada widma fotoluminescencji tych struktur w funkcji temperatury. Zaobserwowano nowe pasmo w fotoluminescencji, przypisane stanom zlokalizowanym na interfejsie GaAsSb/InAs. Badania zaniku temperaturowego emisji pozwalają autorowi rozprawy wyznaczyć szereg charakterystycznych energii aktywacji i powiązać je z przejściami możliwymi w strukturze lasera.

W końcowej części rozdziału 4 doktorant szuka optymalnego kształtu struktury epitaksjalnej dla laserów ICL z pasywną synchronizacją modów. Lasery takie miałyby być wykonane w technologii laserów dwusekcyjnych, z odwróconą polaryzacją części absorbującej. Doktorant porównuje dwie wybrane struktury pod kątem kontrastu siły oscylatora przy zmianie pola elektrycznego.

Rozdział 5

stanowi krótkie podsumowanie prac.

Rozdział 6

jest opisem dorobku naukowego doktoranta.

Rozdział 7

bibliografia.

UWAGI OGÓLNE DO ROZPRAWY

Tematyka międzypasmowych laserów kaskadowych, jest ważna i interesująca z dwóch przyczyn. Jedną jest waga technologiczna tych przyrządów, przede wszystkim dla wytwarzania sensorów substancji organicznych dla systemów monitoringu środowiska i bezpieczeństwa. Z drugiej strony, dla fizyka, wyrafinowane struktury międzypasmowych laserów kaskadowych stanowią znakomite pole dla udoskonalania zarówno metod modelowania struktur jak też ich charakteryzacji. Rozdział 2 tej pracy stanowi przyjazne czytelnikowi wprowadzenie do tematy laserów ICL, przydatne na pewno następnym generacjom badaczy pracujących w tej dziedzinie. Jako najważniejsze i najbardziej oryginalne wyniki tej rozprawy można wymienić:

1. udział w rozwinięciu efektywnych technik spektroskopii Fourierowskiej, w tym szybkiej różnicowej metody pomiaru fotoodbicia,
2. opracowanie bezkontaktowej metody pomiaru koncentracji nośników w warstwach okładkowych lasera,
3. zbadanie własności optycznych studni kwantowych drugiego rodzaju AlSb/InAs/GaInb/InAs/AlSb, i określenie mechanizmów ucieczki termicznej nośników z takich struktur,
4. wykazanie istnienia stanów defektowych na interfejsie GaAsSb/InAs,
5. ocenę przydatności struktur laserowych pod kątem ich zastosowania w przyrządach z pasywną synchronizacją modów.

Doktorant w trakcie tej pracy musiał dogłębnie zrozumieć tematykę międzypasmowych laserów kaskadowych i stać się ekspertem w pomiarach optycznych struktur półprzewodnikowych.

UWAGI SZCZEGÓŁOWE DO ROZPRAWY

Rozprawa została napisana w formie „case studies”, czyli wybiera pewne istotne problemy, czy też pytania, związane z fizyką laserów kaskadowych i odpowiada na nie poprzez porównanie 2-3 struktur metodami spektroskopii optycznej. Nie wszystkie pytania wydają się równie ważne a uzyskane rezultaty nie skutkują tworzeniem nowych konstrukcji. Nie ma tu w zasadzie sytuacji w której doktorant prowadzi dłuższy proces badawczy, badając np. kolejne struktury zamawiane jako część procesu poznawczo optymalizacyjnego.

W Rozdziale 2, doktorant podaje dane pochodzące z rachunków modelowych tych struktur, w tym profili pasm, położenia poziomów i kształtu funkcji falowych. Są to np.: Rys. 10, 11, 12, 13, 14. Przy pomocy jakiego pakietu obliczeniowego były uzyskane te dane? Na ile doktorant był zaangażowany w rachunki teoretyczne struktur (modelowe)?

Rysunek 15 - czy został przekopiowany z publikacji? Jeśli tak to raczej powinien być wykonany przez doktoranta z cytowaniem wszystkich danych. To samo dotyczy Rysunków 16 i 17. Rysunek 18, jak rozumiem, jest dosłowną kopią z innej publikacji i raczej nie powinien zostać tu zamieszczony. Uważam, że rozprawie powinny się znajdować oryginalne wyniki doktoranta.

Rozdział 4.1 budzi moje wątpliwości. Nie wiem czy mapowanie fotoluminescencji, nawet przy użyciu spektroskopii Fourierowskiej, jest na tyle oryginalnym wynikiem, aby warto go było pokazywać w rozprawie. Z reguły jest to raczej kwestia techniczna za którą odpowiedzialna jest grupa epitaksjalna. W tym przypadku wynik pomiaru jest pozytywny lecz mało interesujący, wszystko jest jednorodne.

W dyskusji temperaturowego zaniku fotoluminescencji w plazmonowych warstwach okładkowych, doktorant używa modelu ABC rekombinacji w półprzewodnikach. Typowo parametr B a nie A określa rekombinację promienistą. Nie ma żadnego opisu modelu ABC i jego stosowalności w przypadku warstw z degeneracją gazu elektronowego.

Doktorant przypisuje energie aktywacji, otrzymane z zaników fotoluminescencji, konkretnym przejściom elektronowym lub dziurowym. Proces tej atrybucji jest niejasny. Doktorant powołuje się w tych momentach na literaturę. Jego własny udział w identyfikacji tych przejść wydaje mi się niejasny.

Wadą rozprawy jest niewielka ilość technik pomiarowych i w sumie niezbyt wielka ilość zmierzonych struktur (rzędu 10).

PODSUMOWANIE

Rozprawa jest interesującym wprowadzeniem do tematyki międzypasmowych laserów kaskadowych. Przedstawia kilka konkretnych przykładów zastosowania spektroskopii Fourierowskiej do rozwiązania problemów konstrukcyjnych tych laserów i określenia ich struktury. Przeprowadzenie opisanych badań wymagało od doktoranta biegłości eksperymentalnej ale też naprawdę dobrego zrozumienia skomplikowanej fizyki struktur kwantowych II rodzaju. Jestem przekonany, że jest to w tej chwili dobrze ukształtowany badacz, gotowy na rozpoczęcie samodzielnej działalności.

Doktorant ma bardzo dobry dorobek badawczy, na który składa się 16 publikacji i 6 prezentacji konferencyjnych. Doktorant był również kierownikiem projektu NCN Preludium.

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. Mateusza Dyksika do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Warszawa, dnia 12 stycznia 2019

Piotr Perlin

