

dr hab. inż. Tomasz Czyszanowski prof. PŁ
Instytut Fizyki Politechniki Łódzkiej
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź

Łódź, 18. 12. 2018

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Dyksika
p.t. Spektroskopia fourierowska struktur międzypasmowych laserów kaskadowych

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Dyksika została wykonana pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Grzegorza Sęka oraz dra hab. inż. Marcina Motyki jako promotora pomocniczego w Katedrze Fizyki Doświadczalnej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Rozprawa dotyczy badań struktur międzypasmowych laserów kaskadowych emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni. Lasery kaskadowe są obecnie bardzo prężnie rozwijaną gałęzią półprzewodnikowych emiterów światła spójnego głównie ze względu na fakt, iż tego typu struktury umożliwiają elastyczną inżynierię obszaru czynnego pozwalającą na konstrukcję struktur emitujących promieniowanie z szerokiego spektrum od 2 do 7 μm . Głównym konkurentem międzypasmowych laserów kaskadowych są kwantowe lasery kaskadowe, które umożliwiają emisję promieniowania w przedziale spektralnym od 4 do ponad 100 μm , jednak wymagają zasilania o znacząco większej mocy elektrycznej. Główne zastosowania praktyczne, które napędzają rozwój międzypasmowych laserów kaskadowych, związane są z zastosowaniem ich w systemach wykrywających śladowe ilości szkodliwych gazów w atmosferze. W przypadku konstruowania oraz optymalizacji laserów istotna jest informacja o budowie wewnętrznej struktury laserowej oraz poziomach energetycznych powstałych w obszarach kwantowych tych laserów.

Recenzowana praca poświęcona jest wykorzystaniu metod spektroskopii fourierowskiej do analizy własności struktur laserów kaskadowych wykonanych w technologii antymonkowej oraz arsenkowej.

Autor w recenzowanej rozprawie za pomocą wspomnianych metod:

- 1) analizuje jednorodność własności emisyjnych obszarów aktywnych znajdujących się na płytkach półprzewodnikowych wykonanych w technologii antymonkowej i arsenkowej,
- 2) szacuje poziom domieszkowania warstw silnie domieszkowanych
- 3) analizuje wpływ geometrii obszarów czynnych na długość fali emitowanego promieniowania

4) bada wpływ modyfikacji obszaru czynnego na polaryzację emitowanego promieniowania,

5) analizuje własności obszaru czynnego w celu wykorzystania w strukturze umożliwiającej pasywną synchronizację modów.

Praca składa się z 4 rozdziałów. W rozdziałach od 1 do 3 Autor wprowadza do tematyki zagadnień poruszanych w głównej części rozprawy opisując działanie międzypasmowego lasera kaskadowego oraz fourierowskiej spektroskopii w podczerwieni.

Rozdział 4 zawiera opis wyników eksperymentalnych wraz z ich interpretacją oraz analizą stanowiącą meritum rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 4.1 Autor prezentuje wyniki badań jednorodności obszarów czynnych w postaci studni kwantowych II rodzaju umieszczonych na dwóch dwucalowych płytkach. Jedna z płytek została wykonana na podłożu z GaSb, druga zaś na podłożu z InAs. Autor wykorzystał po raz pierwszy metodę spektroskopii fourierowskiej do zbadania przestrzennego rozkładu parametrów charakteryzujących własności emisyjne obszarów czynnych II rodzaju. Struktury kwantowe wykonane na dwucalowych płytkach o podłożach z GaSb oraz InAs wykazały jednorodność charakterystycznych parametrów (energia przejścia podstawowego, poszerzenia emisji, natężenia emitowanego promieniowania) na niemal całej powierzchni. Na podstawie uzyskanych wyników dla obu płytek Autor wyciąga wniosek, iż „technologia arsenkowa wytwarzania struktur laserów ICL jest komplementarna do technologii antymonowej”.

W kontekście zacytowanego wniosku konieczne jest doprecyzowanie, czy Autor miał na myśli fakt, iż udało się wytworzyć strukturę na podłożu z InAs o podobnych parametrach jak te uzyskiwane dla struktur na podłożach z GaSb, czy raczej, że przykład ten jest dowodem, iż obie technologie pozwalają na produkcje laserów spełniających równie wysoko określone normy?

W rozdziale 4.2 Autor proponuje bezinwazyjną metodę bazującą na Szybkiej Spektroskopii Różnicowej pozwalającą wyznaczać koncentrację swobodnych nośników w tak zwanych warstwach okładkowych lasera kaskadowego. Metoda ta służy określeniu koncentracji nośników w warstwach plazmonicznych, które charakteryzują się bardzo wysoką koncentracją swobodnych nośników umożliwiającą modyfikacje rzeczywistej części współczynnika załamania. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono poziomy koncentracji nośników w szeregu próbek. Zaobserwowana różnica pomiędzy koncentracją domieszki a koncentracją swobodnych nośników została zinterpretowana jako częściowe uwolnienie nośników ze stanów domieszkowych. Wniosek ten stałby się silniejszy, gdyby zostały pokazane oszacowane koncentracje swobodnych nośników w temperaturach, w których przebiegały eksperymenty. W dalszej części rozdziału Autor przeprowadza pomiar fotoluminescencji pokazując spadek jej intensywności wraz ze wzrostem koncentracji nośników, łącząc ten fakt z efektem Augera. Zaprezentowana metoda w przypadku potwierdzenia

swej dokładności może stanowić bardzo przydatne narzędzie do charakteryzacji silnie domieszkowanych warstw laserowych wykraczając swym zastosowaniem poza lasery badane w recenzowanej rozprawie.

W rozdziale 4.3 Autor przeprowadza analizę poziomów energetycznych oraz możliwych przejść energetycznych w studniach kwantowych II rodzaju wytworzonych na podłożu z InAs zaprojektowanych do emisji promieniowania o długości fali przekraczającej 5 μm . Przeprowadzona analiza wykluczyła możliwość ucieczki nośników przez wyższe stany związane w studni zaś badania termicznego zaniku fotoluminescencji zasugerowały możliwość utraty nośników dziurowych na skutek dwóch mechanizmów: 1) wychwyty nośników przez stan defektowy oraz 2) tunelowanie dziur poza obszar czynny.

W rozdziale 4.4 Autor porusza ciekawy problem analizy obszarów czynnych na bazie materiałów InAs/GaInSb, których struktura energetyczna pozwala na uzyskanie równie intensywnej emisji wymuszonej dla dwóch prostopadłych polaryzacji fali elektromagnetycznej. Przedstawiona analiza oprócz demonstracji oczekiwanego zjawiska wskazała, że i w przypadku tej konstrukcji oba mechanizmy zidentyfikowane w rozdziale 4.3 są odpowiedzialne za ucieczkę dziur z obszaru czynnego. Wskazuje to na konieczność dalszej optymalizacji struktury.

W rozdziale 4.5 Autor podjął złożone zagadnienie analizy obszaru czynnego spełniającego wymagania lasera z nasycającym absorberem pozwalającym na pasywną synchronizację modów. Obszar czynny takiej struktury powinien umożliwiać uzyskanie odpowiednio długich czasów życia nośników w stanie wzbudzonym w części absorbera i znacząco krótszych w części emitera. Autor utożsamiał różnicę czasów życia w obu częściach urządzenia z różnicą sił oscylatora w obu sekcjach urządzenia. Wykorzystanie w tym celu asymetrycznych studni kwantowe II rodzaju pozwoliło zaobserwować oczekiwane zjawisko przy asyście odpowiednio dobranych zewnętrznych pól elektrycznych.

Przedstawione wyniki w rozprawie, ich analizę i umiejętność interpretacji oceniam wysoko. Z uwagi na tematykę rozprawy przedstawione wyniki są skupione ściśle na badaniach prowadzonych przez doktoranta, jednak w większości stanowią one część pewnej całości i wrodzona dociekliwość czytelnika zmusza do zadania pytania o dalsze losy tychże badań. Jaki był zatem efekt optymalizacji silnie domieszkowanych warstw ograniczających, czy badania te przyczyniły się faktycznie do optymalizacji urządzenia i jego demonstracji? Czy badane obszary czynne umożliwiające emisję w rejonie dłuższych fal znalazły zastosowanie w działającym laserze? Czy dokonano demonstracji lasera z pasywną synchronizacją modów? Pytania te nie podważają kompletności badań przedstawionych w rozprawie ale są jedynie upustem ciekawości recenzenta.

W dalszej części recenzji przedstawiam listę kolejnych komentarzy i uwag.

Zgodnie z art. 13 pkt. 6 obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki rozprawa powinna zostać uzupełniona o streszczenie w języku angielskim.

Rozprawa mogłaby znacząco zyskać poprzez umieszczenie w jawny sposób w każdym rozdziale opisującym uzyskane wyniki informacji o publikacji, w której wyniki zostały przedstawione.

Autor nie wyjaśnił w zadawalający sposób mechanizmu wywołującego zmiany wartości funkcji fotoodbicia w zależności od energii padającego promieniowania na próbkę, ograniczając się jedynie do stwierdzenia „obecność pola elektrycznego łamie symetrię translacyjną kryształu. Da się wówczas wykazać, że zmiany funkcji dielektrycznej mają kształt trzeciej pochodnej niezaburzonej funkcji dielektrycznej w przypadku litego kryształu oraz pierwszej pochodnej funkcji dielektrycznej dla studni kwantowej” poczym następuje odniesienie do pracy [30]. Wydaje mi się, iż autor powinien opisać mechanizm rządzący tym zachowaniem w sposób równie przystępny jak pozostałe zagadnienia, które znalazły się w części wstępnej. Zwłaszcza, iż jest to główny mechanizm umożliwiający przeprowadzenie badań opisanych w rozprawie. Wyjaśnienia wymaga także znaczenie pochodnej fotoodbicia w funkcji energii dla wartości 0.

W rozdziale 3 Autor podaje jako zaletę Szybkiej Spektroskopii Różnicowej czas pomiaru, który może być mniejszy niż 2 minuty. Zabrakło informacji o czasie pomiaru metodą standardową.

Poza rozdziałem 4.1 nie zostało podane pochodzenie badanych struktur.

Rys. 44 – brak informacji w podpisie o wynikach dotyczących podłoża InAs

Rys. 45 – prawa oś pionowa powinno być współczynnik załamania

Wyniki opisane w rozprawie zostały opublikowane w 5 artykułach w czasopismach istotnych dla elektroniki kwantowej i fotoniki. Na szczególne wyróżnienie zasługuje publikacja wyników przedstawionych w rozdziale 4.1 w *Nanoscale Research Letters*. Pan Mateusz Dyksik jest ponadto współautorem 11 publikacji w tym jednej w *Applied Physics Letters*. Wyniki swoich prac referował podczas sześciu międzynarodowych konferencji. Był kierownikiem projektu badawczego PRELUDIUM oraz brał udział jako wykonawca w 5 innych projektach. Jest stypendystą Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia oraz Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w programie START.

Poza wymienionymi nielicznymi wątpliwościami, które nie wpływają na wysoką ocenę rozprawy, pragnę zauważyć, iż praca zredagowana jest starannie (za wyjątkiem nielicznych błędów edytorskich nie utrudniających zrozumienia pracy). Wyniki obliczeń przedstawione są w postaci czytelnych wykresów. Praca świadczy o gruntownej wiedzy Autora w dziedzinie nauk fizycznych, a w

szczegółności w dziedzinie elektroniki kwantowej, fotoniki i optoelektroniki. Dowodzi ona także dużej biegłości w zakresie metod eksperymentalnych, analizy danych i wiedzy matematycznej.

Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera ważne oryginalne wyniki badań, spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim i może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgra inż. Mateusza Dyksika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy po jej pomyślnej obronie.

Tomasz Czyszanowski
