

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

Łódź, 15. 04. 2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Emilii Dobromiły Pruszyńskiej-Karbownik
p.t. Analiza promieniowania generowanego przez kwantowe lasery kaskadowe w paśmie
średniej podczerwieni**

Rozprawa doktorska mgr inż. Emilii Dobromiły Pruszyńskiej-Karbownik została wykonana pod kierunkiem dra hab. Kazimierza Regińskiego w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie. Rozprawa dotyczy badania własności wiązki optycznej emitowanej przez lasery kaskadowe. 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 bardzo szerokiego spektrum od średniej po daleką podczerwień. Główne zastosowania praktyczne, które napędzają rozwój laserów kaskadowych, związane są z zastosowaniem ich w systemach wykrywających śladowe ilości szkodliwych gazów w atmosferze oraz w systemach telekomunikacyjnych w wolnej przestrzeni. W obu przypadkach bardzo ważnym parametrem jest jakość emitowanej wiązki, zarówno jej kształt jak i struktura spektralna.

Powyższe parametry wiązki są pochodną bardzo złożonych, nieliniowych procesów zachodzących wewnątrz lasera a doprowadzających do wzbudzenia wielu modów optycznych konkurujących o fotony generowane w procesie emisji wymuszonej. Wielość modów podłużnych i poprzecznych o różnej częstotliwości i różnych rozkładach przestrzennych może powodować silnie niestabilną akcję laserową objawiającą się dynamicznymi modyfikacjami emitowanej wiązki. Redukcja ilości wzbudzanych modów jest możliwa poprzez zmniejszenie rozmiarów lasera oraz poprzez modyfikację konstrukcji zapewniającą rezonans dla określonej ilości fal. Jednak ograniczanie liczby modów wiąże się z redukcją emitowanej mocy oraz ze wzrostem złożoności wytwarzanych struktur.

Recenzowana praca poświęcona jest opracowaniu metody badania wysoko rozbieżnych wiązek optycznych oraz eksperymentalnej i numerycznej analizie właściwości emitowanej wiązki przez

różnorodne lasery kaskadowe wytwarzane w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie. Autorka w recenzowanej rozprawie:

1) zaproponowała nową metodę badania pola bliskiego i struktury spektralnej emitowanej wiązki laserowej z wykorzystaniem profilometru goniometrycznego w połączeniu z numeryczną metodą analizy odwrotnej wiązek laserowych (MAOWL), a następnie przy wykorzystaniu tej metody przeprowadziła analizę:

2) statycznych i czasoworozdzielczych rozkładów przestrzennych emitowanej wiązki

3) rozkładów przestrzennych polaryzacji

Praca składa się z 11 rozdziałów. Część pierwsza obejmująca rozdziały od 1 do 6 poświęcona jest prezentacji zagadnienia, opisowi wykorzystywanych metod numerycznych oraz analizie metod eksperymentalnych. W szczególności w rozdziale 3 znajduje się opis MAOWL.

Rozdział 4 został poświęcony dokładnemu opisowi i porównaniu różnych metod służących do wyznaczania pola dalekiego. W rozdziale 5 Autorka przedstawiła budowę analizowanych laserów kaskadowych. W rozdziale 6 opisała szczegółowo budowę układu pomiarowego oraz przedstawiła kompleksową analizę błędów pomiarowych. Zwłaszcza ostatni rozdział zasługuje na wyróżnienie ze względu na wszechstronną analizę możliwych błędów powstałych w zaproponowanym układzie pomiarowym. Główna idea zaproponowanej metody polega na wyznaczeniu pola dalekiego z wykorzystaniem profilometru goniometrycznego, a następnie odtworzeniu rozkładu pola dalekiego za pomocą transformaty Fouriera na podstawie założonego rozkładu pola bliskiego w postaci sumy funkcji sinus. Minimalizacja różnicy pomiędzy wyznaczonym polem dalekim za pomocą transformaty Fouriera i za pomocą układu eksperymentalnego pozwala określić liczbę modów, ich względne natężenie, różnicę faz oraz w przypadku laserów jednomodowych pozwala określić emitowaną długość fali. Zaproponowana metoda jest nową i interesującą alternatywą dla charakteryzacji własności modowych i spektralnych lasera, która wymaga znajomości rozkładu pola dalekiego. Pewien niedosyt budzi brak weryfikacji poprawności zaproponowanej metody poprzez porównanie uzyskanych wyników z pomiarami eksperymentalnymi spektrum lasera. W rozdziale 10, umieszczonym w końcowej części rozprawy, znalazło się porównanie emitowanej długości fali przez szereg analizowanych laserów wyznaczonej przy użyciu spektroskopu fourierowskiego oraz za pomocą MAOWL co pokazało względną różnicę między długościami fali rzędu 0.5%. Zgodność na takim poziomie przemawia za uznaniem poprawności zaproponowanej metody w zastosowaniu do szacowania emitowanej długości fali.

Część druga pracy, tj. rozdziały 7 - 10, przynosi analizę własności wiązek emitowanych przez różne lasery kaskadowe badane przez Autorkę. W rozdziale 7 przedstawiono analizę rozbieżności emitowanej wiązki, która była określana za pomocą parametru M^2 wyznaczonego za pomocą metody

wykorzystującej przewężenie wiązki. Wykazano, że w przypadku laserów o największych aperturach optycznych wynoszących około 15 μm , parametr M^2 wyniósł nieco ponad 1 co sugeruje niemal gaussowski rozkład pola dalekiego, a to z kolei pozwala wnosić o jednomodowym charakterze emisji. Lasery o większym rozmiarze apertury odpowiednio 25 μm i 35 μm charakteryzowały się większymi wartościami parametru M^2 świadcząc o wielomodowej akcji laserowej. Niedostatkami omawianego rozdziału jest brak porównania przedstawianych wyników uzyskanych dzięki MAOWL z wynikami pokazującymi rzeczywistą strukturę modalną w celu weryfikacji wyznaczonej liczby modów. Kolejnym zagadnieniem wymagającym wyjaśnienia jest pogłębiona analiza zbieżności metody, która pokazywałaby zależność błędu metody od ilości użytych modów. Jest to istotne zwłaszcza w perspektywie faktu iż mody zostały wyrażone w postaci funkcji typu sinus wewnątrz przedziału o określonej szerokości. Taki zbiór funkcji stanowi bazę zupełną i umożliwia odzwierciedlenie każdej funkcji o równych wartościach na krańcach założonego przedziału przy użyciu dostatecznie wielu funkcji bazowych. Dlatego też otrzymana ilość modów nie musi być jedyną możliwą ilością, która dostatecznie precyzyjnie odzwierciedla kształt pola dalekiego. Podany przez Autorkę warunek o minimalnej ilości modów pozwalających na właściwe odzwierciedlenie pola dalekiego intuicyjnie wydaje się być słuszny, jednak brak jest szerszej analizy, która by to założenie potwierdzała.

Rozdział 8 stanowi opis analizy zmiany kierunku emisji wiązki w czasie, która wywołana jest poprzez konkurencję pomiędzy modami poprzecznymi. Metoda umożliwia rejestrowanie rozkładu pola dalekiego na podstawie którego przy wykorzystaniu MAOWL można wyznaczyć natężenia modów oraz ich wzajemne fazy w funkcji czasu. Autorka wyznaczyła przebiegi czasowe natężenia poszczególnych modów oraz ich faz dla szeregu laserów kaskadowych oraz dokonała interpretacji zmiany kierunku emisji na podstawie zaproponowanej metody. Wykonana analiza doprowadziła ją do wniosku, iż pole dalekie jest bezpośrednim efektem interferencji modów poprzecznych. Otwartymi problemami pozostają określenie częstotliwości analizowanych modów oraz ich odniesienie do wyznaczonej fazy modów. Nie został poruszony problem czy czasowa zależność mocy całkowitej zachowuje się w sposób oscylacyjny na co wskazywałaby przyjęta interpretacja związana z interferencją kilku modów o określonych częstotliwościach. Brak jest także odniesienia do faktu czy mogą interferować ze sobą w podobnych skalach czasowych mody poprzeczne związane z różnymi modami podłużnymi. Pomimo szeregu wątpliwości uważam ten rozdział za najbardziej wartościowy i na podstawie wyników uzyskanych przez Autorkę spodziewam się, iż zaproponowana metoda może w przyszłości stanowić cenne narzędzie służące do analizy fazy modów.

Rozdział 9 zawiera analizę polaryzacji modów emitowanych przez badane lasery kaskadowe. W szczególności badane są mody hybrydowe, których pole optyczne posiada składowe prostopadłe do obszaru czynnego (jest to typowy kierunek polaryzacji dla laserów kaskadowych) jak i składowe równoległe do obszaru czynnego, które nie biorą udziału w procesie rekombinacji wymuszonej. Autorka wykorzystując komercyjny pakiet do obliczeń numerycznych pola optycznego opartego na

algorytmach zawierających zarówno metodę elementu skończonego jak i metodę różnic skończonych wykonała serię obliczeń pola bliskiego w płaszczyźnie prostopadłej do obszaru czynnego w przypadku struktur o falowodzie ograniczonym przez boczne trawienie w kształcie prostokąta oraz półkola. W przypadku trawień prostokątnych nie zostały zaobserwowane mody hybrydowe, które zostały zaobserwowane w trawień o kształcie półkola. Autorka zauważyła, iż wraz ze wzrostem rzędu modu udział składowej pola równoległej do obszaru czynnego wzrasta. Wnioski płynące z rozważań teoretycznych w dużej mierze zostały potwierdzone przez wyniki eksperymentalne do uzyskania których wykorzystano MAOWL.

Rozdział 10 stanowi opis zastosowania technologicznego MAOWL. Autorka pokazała, iż jakość rozkładu pola dalekiego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wiązki zależy silnie od położenia struktury laserowej względem chłodnicy. Na podstawie swojej analizy wyznaczyła dopuszczalne przesunięcie położenia lustro lasera względem krawędzi chłodnicy w celu zachowania wysokiej jakości wiązki.

Poza powyższymi 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 Autorki w dziedzinie nauk technicznych, a w szczególności w dziedzinie optyki falowej i fizyki stosowanej. Dowodzi ona także dużej biegłości w zakresie metod eksperymentalnych, wiedzy matematycznej, wiedzy z zakresu metod numerycznych i programowania.

Mając na uwadze wielostronność przeprowadzonych badań eksperymentalnych i teoretycznych jak też ich praktyczną wartość wyrażam przekonanie, że praca mgr inż. Emilii Dobromiły Pruszyńskiej-Karbownik spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora i wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Tomasz Czyszanowski
