



Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

dr hab. inż. Michał Józwik, prof. uczelni
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki
Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska
ul. św. A. Boboli 8, pok. 513a, 02-525 Warszawa
telefon +48 (22)234 85 18, +48 604 432 709
e-mail: michal.jozwik@pw.edu.pl

Warszawa, 7 listopada 2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława GONTARA

p.t. *„Badania wpływu zjawiska niestabilności modów poprzecznych na parametry generacji lasera światłowodowego dużej mocy średniej”*

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Gontara, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Jan Jabczyński a promotorem pomocniczym dr inż. Łukasz Gorajek. Obaj promotorzy są pracownikami Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej i deklarują prowadzenie prac badawczych w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (AEEiTK).

Formalną podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo z dnia 19 września 2024 roku Dyrektora Instytutu Optoelektroniki WAT dr hab. inż. Krzysztofa Kopczyńskiego, prof. WAT, zawiadamiające o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Gontara przez Radę Dyscypliny Naukowej AEEiTK na posiedzeniu 19 września 2024 r.

Zgodnie z zapisami ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20.07.2018 r. (Dz.U. z 2023 r., poz. 742), rolą recenzenta jest stwierdzenie:

- 1) czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie jak i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- 2) czy przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- 3) czy osoba ubiegająca się o stopień naukowy doktora posiada wymagany dorobek naukowy.

W poniższej recenzji odnoszę się do tych zapisów ustawowych w kolejności i uzasadniam swoją opinię na każdy z tych trzech punktów.

Recenzowana rozprawa została przedstawiona w formie monografii liczącej 150 stron, na które składa się 11 stron wstępu, 2 strony z opisem celu i struktury pracy, 110 stron zawierających 5 merytorycznych rozdziałów, 5 stron podsumowania, 3 strony z wykazem publikacji autora pracy i 14 stron bibliografii.



Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

Pan mgr inż. Przemysław Gontar w swojej rozprawie doktorskiej stawia sobie 2 główne cele:

1. Charakteryzację wiązki laserowej dużej mocy pod kątem zastosowania w niszczeniu materiałów i transporcie mocy na dalekie odległości
2. Analizę numeryczną i eksperymentalną zjawiska niestabilności modów poprzecznych.

W obliczu wniosków płynących z przeglądu literaturowego i wykonaniu wstępnych badań zostały sformułowane tezy pracy bezpośrednio związane ze zjawiskiem niestabilności modów poprzecznych (ang. *transverse mode instability* – TMI):

1. *Efekt TMI stanowi podstawowy mechanizm ograniczający efektywną generację w modzie podstawowym w laserach światłowodowych dużej mocy średnich.*
2. *Nie istnieją skuteczne metody podniesienia progu występowania efektu TMI w układach laserów światłowodowych dużej mocy średnich pompowanych rezonansowo bez modyfikacji układu wzmacniacza końcowego.*

W mojej ocenie cele i tezy rozprawy zostały jasno sformułowane przez Autora, a realizacja zdefiniowanych celów i uzasadnienie tezy pracy wymagało wykonania szeregu badań naukowych opisanych w 5-ciu spójnych tematycznie rozdziałach rozprawy doktorskiej o następujących tytułach:

1. Mody poprzeczne w laserze włóknowym;
2. Charakteryzacja wiązki laserowej dużej mocy;
3. Zjawisko Niestabilności Modów Poprzecznych w światłowodzie;
4. Eksperymentalne wyznaczenie mocy progowej zjawiska TMI;
5. Tłumienie zjawiska TMI w światłowodzie.

Treść rozdziałów pokrótce została przedstawiona poniżej.

Rozdział 1 na początku opisuje strukturę światłowodu o skokowej zmianie współczynnika i typy modów poprzecznych z ich opisem matematycznym. Następnie przedstawia przybliżenie modu podstawowego za pomocą funkcji Gaussa i zagadnienia związane z propagacją i transformacją wiązki gaussowskiej. Zostają opisane również definicje średnicy wiązki laserowej i parametrów jakości optycznej wiązki laserowej. Na końcu rozdziału zaprezentowano parametr luminancji energetycznej źródła laserowego, jako istotny parametr w kontekście pracy.

Rozdział 2 zawiera opis budowy badanego iterbowego lasera włóknowego o mocy średniej do 10 kW oraz eksperymentów wraz z wynikami istotnymi w ocenie skuteczności w niszczeniu materiałów oraz transporcie mocy na dalekie odległości (między innymi: mocy wyjściowej, widma emisji, średnicy wiązki i parametru M^2).

Rozdział 3 poświęcono zjawisku niestabilności modów poprzecznych (ang. Transverse Mode Instabilities) w światłowodzie. Przedstawiono mechanizm prowadzący do sprzężenia między modami poprzecznymi, opisano przyczynę i warunki konieczne do wystąpienia zjawiska TMI. W dalszej części analizowano wpływ wybranych parametrów technologicznych włókna aktywnego na moc progową zjawiska TMI z użyciem modelu perturbacyjnego TMI. Poddano analizie dwie konfiguracje wzmacniacza pompowanego współbieżnie i przeciwbieżnie o długości fali pompy 976 nm i 1018 nm (druga konfiguracja zbliżona do LYb-10kW będącego



Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

przedmiotem badań w rozprawie). Wykorzystanie modelu perturbacyjnego pozwoliło na oszacowanie mocy progowej dla zjawiska TMI.

Rozdział 4 dotyczy eksperymentalnego wyznaczania mocy progowej zjawiska TMI. W pierwszej części przedstawiono literaturowy przegląd metod eksperymentalnych charakteryzacji zjawiska TMI. Druga część prezentuje użyte metody pomiarowe i otrzymane wyniki. Autor wykorzystuje trzy różne układy pomiarowe, a moc progowa TMI została wyznaczona za pomocą pięciu różnych metod. Zaproponowano własną definicję mocy progowej TMI i opracowano nową metodę pomiarową wyznaczenia mocy progowej TMI z wykorzystaniem standardowej kamery CMOS i analizie statystycznej parametrów rozkładu przestrzennego wiązki laserowej.

Rozdział 5 w pierwszej części zawiera literaturowy przegląd metod tłumienia zjawiska TMI z podziałem na pasywne i aktywne. W drugiej natomiast przedstawiono sposób na osłabienie zjawiska TMI w badanym źródle LYb-10kW polegający na wprowadzeniu różnej modulacji prądu pompy (sygnał sinusoidalny i prostokątny w zakresie zmian częstotliwości od 400 Hz do 5 kHz). Wyznaczona moc progowa zjawiska TMI zmalała wskutek modulacji o około 1kW. Natomiast dla odpowiednich częstotliwości modulacji siła fluktuacji rozkładu poprzecznego wiązki laserowej maleje, co może pozytywnie płynąć na zastosowanie lasera przy wyższych mocy wyjściowych.

Kolejną częścią pracy jest podsumowanie zawierające najważniejsze treści i wyniki rozprawy oraz Dodatek A: Wykaz publikacji naukowych autora. Bibliografia zawiera dane źródłowe 182 pozycji literaturowych. Są one poprawnie wybrane do omawianego zagadnienia w pracy, a stosowane odwołania właściwie prowadzą do źródła. Formatowanie danych o pozycjach literaturowych jest bez zarzutu: jednorodne w formie i zawiera niezbędne informacje, w tym (gdzie to było możliwe) hipernik z cyfrowym identyfikatorem DOI.

Nie wnoszę uwag krytycznych dotyczących układu pracy ani poprawności językowej. Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie z użyciem właściwego języka, odpowiedniego do specjalistycznych opracowań naukowych i technicznych. Wykorzystanie materiału graficznego jest bardzo dobre. Schematy są czytelne i właściwie oznaczone. Wyniki zaprezentowano z należytą starannością, na wykresach opisując osie i podając jednostki, a gdzie to było wskazane podając błędów w postaci odchylenia standardowego lub przedstawiając aproksymowane i dopasowywane krzywe. Szkoda, iż pomimo prowadzonych szeroko zakrojonych prac eksperymentalnych nie zdecydowano się na pokazanie żadnej fotografii np. poddawanego badaniu lasera czy też zestawianych układów pomiarowych, które w rozprawie są przedstawiane schematycznie. Bardzo ciekawy wstęp poprzedzający pracę mógłby również zostać wzbogacony ilustracjami.

Uważam również, że zawartość merytoryczna rozprawy i sposób ujęcia tematu przez Autora spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zaprezentowanie wiedzy teoretycznej znakomicie wprowadza czytelnika w tematykę i skupia uwagę wokół aktualnie rozpatrywanego zjawiska. Część teoretyczna przeplatana jest prezentacją badań własnych prowadzonych w szerokim zakresie wraz z zaprezentowanymi wynikami opatrzonymi trafnym,



Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

choć niekiedy bardzo zwartym komentarzem. **Umożliwia mi to potwierdzenie, iż rozprawa doktorska prezentuje nie tylko ogólną, ale poszerzoną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie jak i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Rozprawa stanowi udokumentowanie posiadania szerokiej i pogłębionej specjalistycznej wiedzy z zakresu nauk inżyniersko-technicznych przez Doktoranta, w zakresie techniki laserowej, a w szczególności istoty budowy i działania lasera światłowodowego dużej mocy średniej i wpływu niestabilności modów poprzecznych (ale też i innych czynników np. temperatury) na parametry generacji wiązki laserowej oraz wykorzystania technik symulacji numerycznych i badania zjawisk oraz parametrów generowanej wiązki. Lasery włóknowe o mocy powyżej 1 kW znajdują zastosowanie w obróbce materiałów oraz w broni skierowanej energii. Szczególne miejsce znajdują tam wysokowydajne lasery światłowodowe Yb^{3+} z długością emitowanej fali 1,07 μm . Stosowany na wyjściu systemu elastyczny światłowód umożliwia łatwe i bezpieczne doprowadzenie wiązki laserowej we właściwe miejsce i łatwiejszą integrację lasera w systemach funkcjonalnych. Oprócz czynników zewnętrznych (atmosferycznych) związanych z eksploatacją wiązki w dalekich odległościach od źródła istotą przydatności lasera jest generacja wiązki i utrzymywanie jej parametrów. Zarówno uzyskiwane poziomy mocy jak i jakość samej wiązki ściśle związane są z szeregiem zjawisk badanych w niniejszej rozprawie, zebranych wokół tematyki niestabilności modów poprzecznych. Samo zjawisko TMI jest procesem złożonym. Zależy od wielu czynników i w symulacjach numerycznych jest przedstawiane stosując szereg uproszczeń. Dotychczasowo stosowane w literaturze wyrażenia na moc progową zjawiska TMI nie znajdują odzwierciedlenia w danych eksperymentalnych. **Stanowi to przedmiot recenzowanej rozprawy a wynikiem jest oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego** w postaci podziału na części opisywanych w rozdziałach rozprawy. Najważniejsze oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy to:

- 1) Sformułowanie nowej definicji mocy progowej zjawiska TMI;
- 2) Opracowanie nowej metody pomiarowej do wyznaczenia mocy progowej zjawiska TMI;
- 3) Opracowanie zestawu metod pomiarowych (uwzględniając konfigurację, rozwiązania sprzętowe i algorytmiczne) do charakteryzacji różnych parametrów wiązki laserowej dużej mocy.

Autor udowodnił obie postawione tezy. Teza, iż efekt TMI stanowi podstawowy mechanizm ograniczający efektywną generację w modzie podstawowym, została poparta wynikami pomiarów parametru M^2 , wykazującego nagły wzrost wartości powyżej 4kW oraz wynikami pomiarów średnicy wiązki pod niskim obciążeniem cieplnym, która również wzrastała w pobliżu 4kW. Druga teza mówiąca o braku skutecznych metod podniesienia progu występowania efektu TMI w układach laserów światłowodowych dużych mocy średnich pompowanych rezonansowo bez modyfikacji układu wzmacniacza końcowego została przedstawiona w oparciu o doniesienia literaturowe i udowodniona poprzez autorskie wyniki uzyskane przy modulacji mocy pompy w celu tłumienia efektu TMI. Doktorant przedstawił uzyskane wyniki w przekonujący sposób.



Politechnika Warszawska

Wydział Mechatroniki

Chętnie poznałbym jednak więcej szczegółów zaprezentowanego stanowiska doktoranta, który proponuje uszczegółowienie modelu TMI o efekty dynamicznej wymiany energii. Prace publikowane w ostatnich latach przez M. Zervasa pokazują potencjał tych działań.

Drugim zagadnieniem, które prosiłbym o skomentowanie i przedstawienie w czasie publicznej obrony to analiza środka ciężkości przekroju wiązki laserowej. Rozrzut zmian współrzędnych środka ciężkości jest rejestrowany przez detektor położenia wiązki. Zmiany są jednak bardzo niewielkie. Prosiłbym o komentarz/oszacowanie stabilności położenia środka ciężkości wiązki dla niezmienniej, niezaburzonej mocy lasera wskutek drgań mechanicznych, fluktuacji powietrza oraz zmian temperatury.

Jestem przekonany, że przedstawione w rozprawie rozważania i wyniki prac przyczynią się do ustandaryzowania procedur pomiarowych i zniesienia niejednoznaczności w rozumieniu mocy progowej zjawiska TMI. Uzyskana wiedza znajduje bezpośrednie wykorzystanie w układach laserowych dużej mocy stosowanych w niszczeniu materiałów i transporcie mocy na dalekie odległości.

Dorobek publikacyjny Pana mgr. inż. Przemysława Gontara w zamieszczonym do rozprawy dodatku A obejmuje 10 artykułów naukowych z lat 2019-2023 i 7 publikacji pokonferencyjnych. W jednym z wymienionych artykułów Pan Gontar jest autorem na 1-szej pozycji, w pozostałych jest współautorem wraz z promotorem i promotorem pomocniczym. Z kolei, spis prac naukowych wykazanych w bazie Scopus obejmuje 22 pozycje z 61 cytowaniami (na dzień 6.11.2024) i h-indeks = 5. Warty podkreślenia jest fakt, iż artykuł p.t.: „Impact of atmospheric turbulence on coherent beam combining for laser weapon systems” opublikowany w czasopiśmie Defence Technology w 2021 roku zdobył aż 25 cytowań. Baza Web of Science wykazuje 16 publikacji, 69 cytowań, w tym 51 cytowań obcych, h-indeks = 5. Wspomniany powyżej artykuł zdobył sumarycznie 23 cytowania. Potwierdza to trzeci wymagany ustawowo aspekt, że **mgr inż. Przemysław Gontar, jako osoba ubiegająca się o stopień naukowy doktora, posiada wymagany dorobek naukowy.**

W ramach podsumowania stwierdzam, iż przedłożona do oceny rozprawa spełnia wymogi zawarte w Art. 186 i 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 742) w aspektach zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Automatyka, Elektrotechnika, Elektronika i Technologie Kosmiczne, umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej, wymaganego dorobku naukowego, a przede wszystkim oryginalnego rozwiązania problemu technicznego. Wobec powyższego stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie do obrony publicznej.

Michał Jorwił