

Warszawa, 06.11.2024

Prof. dr hab. Yuriy Stepanenko
Instytut Chemii Fizycznej
Polskiej Akademii Nauk
Kasprzaka 44/52
01-224 Warszawa

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Gontara

pod tytułem:

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

Rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Gontara pt. „Badania wpływu zjawiska niestabilności modów poprzecznych na parametry generacji lasera światłowodowego dużej mocy średniej” stanowi wartościowy wkład do badań nad ograniczeniami wynikającymi z efektów nieliniowych, szczególnie zjawiska niestabilności modów poprzecznych (TMI) w laserach światłowodowych dużej mocy. Zjawisko TMI odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu stabilności i jakości wiązek laserowych wysokiej mocy, a tym samym wyznacza granice mocy wyjściowej lasera. W pracy doktoranta znajduje się analiza teoretyczna i eksperymentalna TMI, a także propozycje metod tłumienia niestabilności, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia rozwijania nowoczesnych technologii laserowych dla przemysłu, medycyny i technologii wojskowej.

Struktura i zawartość pracy

Rozprawa jest podzielona na wstęp, pięć rozdziałów merytorycznych oraz podsumowanie. Każdy z rozdziałów przedstawia kolejne aspekty problematyki badawczej, począwszy od teorii, poprzez modelowanie i analizę parametrów wiązki, aż po badania eksperymentalne i metody tłumienia TMI. Praca wyróżnia się starannością przygotowania, a zawarte w niej rozważania są dobrze uzasadnione oraz bogato udokumentowane. Przejdźmy do bardziej szczegółowego omówienia poszczególnych rozdziałów.

Określenie tez badawczych i ich weryfikacja

Tezy pracy zostały jasno sformułowane i precyzyjnie określają cel badawczy, którym jest analiza wpływu zjawiska niestabilności modów poprzecznych na parametry generacji lasera światłowodowego dużej mocy oraz poszukiwanie metod tłumienia tego zjawiska. Autor sformułował szczegółowe hipotezy dotyczące progowych wartości mocy TMI oraz efektywności zastosowanych metod tłumienia. W oparciu o wybrane modele teoretyczne oraz metody eksperymentalne doktorant konsekwentnie realizuje przyjęte założenia, co pozwala uznać tezy za dobrze uzasadnione i odpowiednio dobrane do tematu pracy.

Przegląd literatury

Autor przeprowadził dokładny przegląd literatury obejmujący badania nad TMI oraz nad metodami stabilizacji wiązek laserowych dużej mocy. W pracy znalazły się odniesienia do kluczowych publikacji, które przedstawiają zarówno teoretyczne, jak i eksperymentalne podejścia do rozwiązania problemu TMI.

W toku przeprowadzonych badań doktorant z powodzeniem wykazuje zasadność przyjętych tez badawczych, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach eksperymentalnych, które potwierdzają wpływ modów poprzecznych na ograniczenie mocy wyjściowej lasera oraz pokazują możliwości efektywnego tłumienia TMI poprzez modulację prądu pompy. Rezultaty uzyskane w pracy są spójne z postawionymi hipotezami i stanowią wartościowy wkład do badań nad stabilnością wiązek laserowych.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z trybami poprzecznymi w światłowodach, szczególnie w kontekście ich znaczenia dla stabilności wiązki laserowej. Autor przybliży matematyczny opis modów hybrydowych LP z wykorzystaniem funkcji Bessela, co jest klasycznym podejściem w analizie rozkładu modów w światłowodach. Taki model stanowi solidną podstawę teoretyczną do dalszej analizy wpływu TMI na parametry wiązki. Rozdział ten pozwala zrozumieć znaczenie modów poprzecznych w kontekście propagacji energii w światłowodach dużej mocy i przygotowuje grunt pod bardziej zaawansowane rozważania.

Drugi rozdział koncentruje się na omówieniu podstawowych parametrów opisujących jakość wiązki laserowej, w tym parametru M^2 . Autor przeprowadził analizę mocy wyjściowej, widma emisji oraz jakości optycznej wiązki laserowej generowanej przez system LYb-10kW. Wyniki zostały przedstawione w formie wykresów i tabel, co znacznie ułatwia ich interpretację. Warto zaznaczyć, że parametry wiązki laserowej zostały opisane w kontekście ich przydatności do zastosowań praktycznych, co nadaje pracy wymiaru aplikacyjnego. Należy również zauważyć, że pomiar parametru M^2 nie był zgodny z normą ISO 11146. Zastosowanie tej normy w przyszłych badaniach mogłoby podnieść wiarygodność wyników, a także zwiększyć ich porównywalność z innymi pracami w tej dziedzinie.

W trzecim rozdziale autor przechodzi do omówienia zjawiska niestabilności modów poprzecznych (TMI), które ogranicza moc wyjściową lasera i wpływa na jakość wiązki. W rozdziale

szczegółowo omówiono przyczyny TMI, uwzględniając efekty nieliniowe oraz interakcje między modem podstawowym a modami wyższych rzędów. Autor posługuje się modelem perturbacyjnym TMI, który pozwala przeanalizować wpływ parametrów włókna na moc progową występowania TMI. Model ten stanowi podstawę dla eksperymentalnych i teoretycznych badań progów mocy TMI w rozdziałach kolejnych.

Czwarty rozdział poświęcony jest eksperymentalnym badaniom progowej mocy TMI w systemie laserowym LYb-10kW. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem trzech różnych układów pomiarowych, co pozwala na walidację wyników oraz zwiększa ich wiarygodność. Takie podejście świadczy o wysokiej precyzji badań, które zostały przeprowadzone starannie, z uwzględnieniem technicznych wyzwań wynikających z braku ustandaryzowanej metody pomiaru mocy progowej TMI. Autor osiągnął wyniki, które stanowią wartościowy wkład do wiedzy na temat TMI i jego progów w laserach światłowodowych dużej mocy.

W piątym rozdziale autor omawia możliwe metody tłumienia zjawiska TMI, koncentrując się na modulację prądu pompy jako technice, która może pomóc w poprawie stabilności wiązki. Wyniki eksperymentalne pokazują, że modulacja prądu pompy jest obiecującą metodą tłumienia TMI, choć wymaga dalszej optymalizacji i testowania w różnych konfiguracjach systemu laserowego. Rozdział ten podkreśla praktyczny wymiar badań i potencjalne możliwości zastosowania proponowanych metod tłumienia w szerokim zakresie aplikacji.

Wartość naukowa pracy

Praca mgr. inż. Gontara stanowi solidny i wartościowy wkład naukowy, zawierając zarówno analizy teoretyczne, jak i wyniki eksperymentalne, które pozwalają na pełniejsze zrozumienie problematyki TMI w laserach światłowodowych dużej mocy. Autor wykazuje się szeroką znajomością literatury przedmiotu oraz umiejętnością samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych. Wyniki przedstawione w pracy są cennym wkładem do rozwoju

technologii laserowej i mogą mieć szerokie zastosowanie w przemyśle oraz innych sektorach, w których kluczowe jest uzyskiwanie stabilnych wiązek o dużej mocy.

Uwagi do doktoranta

1. W pracy opisano pomiar parametru M^2 , jednak nie przeprowadzono go zgodnie z normą ISO 11146, która określa międzynarodowy standard zapewniający spójność i dokładność pomiarów jakości wiązki laserowej. Sugeruję, aby w przyszłych badaniach uwzględnić tę normę, co zwiększyłoby porównywalność wyników i ich przydatność w kontekście praktycznym.

2. Światłowody typu ROD, a także lasery impulsowe, cechują się o rząd niższym progiem TMI w porównaniu z tradycyjnymi światłowodami. Proszę o opinię doktoranta na temat przyczyn tego zjawiska oraz możliwych sposobów jego złagodzenia, szczególnie w kontekście zastosowania technik stabilizujących, takich jak modulacja prądu pompy.

3. Większość publikacji doktoranta dotyczy innej tematyki, mianowicie spójnego składania wiązek laserowych, co jest wartościowym obszarem badań, jednak różnym od głównej tematyki rozprawy. W pracy wskazano jedynie jedną publikację doktoranta dotyczącą TMI (oznaczoną jako [6]). Proszę o wyjaśnienie, z czego wynika ograniczona liczba publikacji z zakresu TMI, oraz o informacje, czy planowane są dalsze publikacje wyników zaprezentowanych w rozprawie.

4. Praca nie zawiera ani nie wspomina analizy opartej o nieliniowy model nasycenia wzmocnienia oraz wyczerpania pompowania (Gain saturation and pump depletion nonlinear model). Model ten jest istotny przy wysokich mocach wyjściowych lasera, gdzie nieliniowości mogą wpływać na stabilność wiązki i próg TMI. Czy rozważał Pan włączenie tego typu modelu do swoich

badania? Rozszerzenie analiz o te czynniki mogłoby zwiększyć precyzję wyników oraz umożliwić dokładniejsze prognozowanie zachowania impulsowych laserów dużej mocy.

Rozprawa mgr. inż. Przemysława Gontara zasługuje na wyróżnienie ze względu na jej wysoki poziom merytoryczny, staranność wykonania oraz istotny wkład w badania nad niestabilnością modów poprzecznych w laserach światłowodowych dużej mocy. Praca charakteryzuje się dobrze ugruntowaną podstawą teoretyczną oraz wynikami eksperymentalnymi, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie praktyczne. Szczególnie wartościowe są przeprowadzone przez doktoranta eksperymenty oraz propozycje metod tłumienia TMI, które mają potencjał poprawienia stabilności wiązki laserowej i zwiększenia jej zastosowań w przemyśle oraz technologii obronnej.

Rekomenduję uznanie tej pracy za wyróżniającą się, gdyż spełnia wysokie standardy naukowe, wykazuje głęboką znajomość tematu i może przyczynić się do dalszego rozwoju technologii laserów światłowodowych.

Yuriy Stepanenko