

dr hab. inż. Grzegorz Soboń, prof. uczelni  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
[grzegorz.sobon@pwr.edu.pl](mailto:grzegorz.sobon@pwr.edu.pl)

Wrocław, dn. 5.11.2024 r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Gontara

zatytułowanej:

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

### 1. Wprowadzenie

Zjawisko niestabilności modów poprzecznych (ang. *transverse mode instability*, TMI) stanowi obecnie główne ograniczenie skalowania wyjściowej mocy średniej wzmacniaczy światłowodowych przy zachowaniu dobrej jakości wiązki. TMI ogranicza moc wyjściową układów laserowych do poziomu kilkuset watów lub kilku kilowatów (w zależności od konstrukcji układu), co ogranicza możliwości ich stosowania w aplikacjach wymagających dużej mocy i dobrej jakości wiązki. Jest to zagadnienie stosunkowo nowe, które zostało po raz pierwszy opisane w literaturze w 2011 roku przez grupę z Jenu. Przedłożona mi do oceny praca doktorska poświęcona jest w całości zagadnieniu TMI, ze szczególnym naciskiem na problem eksperymentalnego wyznaczenia mocy progowej, przy której pojawiają się efekty niestabilności wiązki. W tym kontekście, praca mgr inż. Przemysława Gontara bardzo dobrze wpisuje się w bieżący nurt badań wzmacniaczy i laserów światłowodowych dużej mocy. Praca została zrealizowana w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, pod opieką prof. dra hab. inż. Jana Jabczyńskiego oraz dra inż. Łukasza Gorajka.

### 2. Zawartość pracy

Praca liczy łącznie 150 stron i podzielona jest na 5 głównych rozdziałów merytorycznych. Struktura jest poprawna i logiczna, nie przesadnie rozdrobniona, nieco odbiegająca od typowej dla tego typu dysertacji, gdzie część eksperymentalna jest wyraźnie oddzielona od części wprowadzającej. Tutaj, rozdziały eksperymentalne są poprzedzone rozdziałami teoretycznymi, zawierającymi wstęp i opis poruszanych zagadnień. Bibliografia liczy 182 pozycje. W dużej mierze są to odnośniki do artykułów naukowych opublikowanych po 2010 roku. Należy więc podkreślić, że Autor przeprowadził bardzo dogłębną i szczegółową analizę źródeł i niewątpliwie ma duże rozeznanie w aktualnym stanie wiedzy.

Rozdział 1 stanowi wstęp do zagadnienia propagacji światła w światłowodzie. Znajdziemy tutaj opis matematyczny modów poprzecznych i wprowadzenie podstawowych pojęć, takich jak częstotliwość znormalizowana. Poruszane są również podstawowe kwestie związane z oceną jakości wiązek laserowych różnymi miarami, takimi jak  $M^2$  i BPP.

Rozdział 2 zawiera wyniki eksperymentalne charakteryzacji użytego przez doktoranta lasera światłowodowego firmy IPG (LYb-10kW). W tym celu doktorant skonstruował odpowiedni układ optyczny, mający za zadanie stłumienie wiązki laserowej do poziomu umożliwiającego pomiar jej parametrów z użyciem dostępnych technik. Zmierzono parametry takie jak moc wyjściowa, spektrum, czy też profil wiązki. Należy podkreślić wyjątkową staranność i drobiazgowość (w pozytywnym sensie tego słowa) autora w przeprowadzaniu pomiarów wiązki.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi zjawiska TMI i podsumowuje prawdopodobnie całą bieżącą wiedzę na ten temat, poczynszyszy od wyjaśnienia mechanizmów powstawania TMI, po szczegółowe wyjaśnienie fizyki stojącej za transferem energii między modem podstawowym a modami wyższych rzędów. Opis przeprowadzony jest głównie na bazie prac naukowców z Jeny (J. Limpert i in.). Rozdział zawiera też wyniki modelowania numerycznego (na podstawie modelu perturbacyjnego TMI). Model ten umożliwi m.in. określenie mocy progowej zjawiska TMI, choć jest dość uproszczony i, jak stwierdza Autor, wyniki powinny być *brane z pewnym dystansem* (strona 73).

Rozdział 4, najobszerniejszy i najważniejszy dla całej pracy, poświęcony porównaniu różnych metod wyznaczenia progu występowania zjawiska TMI. Rozdział rozpoczyna się od przedstawienia istniejących metod pomiarowych, takich jak bezpośrednia analiza rozkładu wiązki z użyciem kamery, analiza rozkładu mocy w wiązce, czy analiza fluktuacji środka ciężkości wiązki. Następnie, Autor wyznaczył za pomocą kilku znanych metod próg występowania TMI w swoim laserze. Rozdział kończy podsumowanie, zawierające porównanie wyników oraz liczne wnioski i spostrzeżenia Autora.

Rozdział 5 poświęcony jest minimalizacji zjawiska TMI w światłowodach. Zawiera opis znanych metod osłabiania efektu TMI oraz wyniki badań własnych Autora, dotyczące wykorzystania techniki modulacji mocy pompującej.

### 3. Wartość naukowa prezentowanych rezultatów

Za najbardziej wartościowe i oryginalne w pracy uważam wyniki uzyskane w Rozdziale 4.2, tj. dotyczące porównania metod wyznaczenia mocy progowej występowania zjawiska TMI. W literaturze brak jest ustandaryzowanych metod pomiarowych tego zjawiska. W swoich pomiarach Autor wykorzystał kilka układów eksperymentalnych. Pierwsza metoda polega na rejestracji fluktuacji mocy wiązki laserowej przechodzącej przez małą aperturę. Dla stabilnej wiązki moc będzie stała w czasie. W przypadku wystąpienia TMI, zarejestrowane zostaną fluktuacje mocy na fotodetektorze. W układzie tym Autor wyznaczył próg TMI na dwa sposoby: obliczając odchylenie standardowe fluktuacji sygnału detektora, oraz na podstawie analizy widmowej sygnału zarejestrowanego przez fotodetektor. W obu przypadkach dodatkowo zbadano wpływ apertury na uzyskiwane wyniki (zmieniano szerokość apertury w zakresie 4,5 – 6,5 mm). Za szczególnie interesującą uważam technikę widmową, która umożliwia nie tylko wyznaczenie progu, ale i dokładniejszą analizę samego zjawiska TMI, m.in. dynamikę transferu energii między modami. Druga z metod polega na bezpośredniej obserwacji rozkładu poprzecznego wiązki przy użyciu profilometru wyposażonego w kamerę CMOS. Również i w tym przypadku można wyznaczać próg TMI wg różnych kryteriów, np. obserwując zależność średniego pola powierzchni wiązki od mocy wyjściowej lasera, lub analizując środek ciężkości wiązki laserowej. Trzecią analizowaną możliwością jest zastosowanie detektora typu PSD (ang. *position sensing detector*). W tym przypadku rejestrowana jest trajektoria środka ciężkości wiązki laserowej. Dla wiązki z TMI, rozrzut centroidu wiązki da się aproksymować elipsą. Autor zaproponował wyznaczenie progu TMI poprzez obliczenie pola powierzchni tej elipsy, a także poprzez obliczenie odchylenia standardowego promienia wodzącego środka ciężkości wiązki dla różnych mocy lasera. Mając do dyspozycji pięć zupełnie różnych kryteriów określenia progu wystąpienia zjawiska TMI, należy się spodziewać, że każde z nich da inny rezultat. W przypadku metody opartej na fotodiodzie z przesłoną, stosując kryterium odchylenia standardowego przebiegu czasowego mocy uzyskano wartość progową TMI równą 3,55 kW. Analiza widmowa



sygnału z fotodiody dała wartość 3,41 kW. Stosując metodę opartą na kamerze CMOS, obliczono próg TMI wynoszący 3,86 kW. Metody oparte na detektorze PSD dają bardzo podobne rezultaty. W przypadku obu badanych parametrów (tj. pola powierzchni elipsy oraz odchylenia standardowego promienia wodzącego środka ciężkości) ustalono, że próg wynosi 3,84 kW.

Na podstawie przeprowadzonych badań, Autor stwierdza, że zastosowanie matrycy CMOS do bezpośredniej analizy profilu wiązki jest najmniej czułą metodą, ze względu na ograniczony zakres dynamiczny matrycy i stąd nieczułość na niewielkie fluktuacje mocy. Jednakże, bardzo podobny wynik uzyskano z użyciem detektora PSD. Zdecydowanie niższy (bo aż o ok. 300-400 W) próg wyznaczono z użyciem fotodetektora z przesłoną, co oznaczałoby, że ta metoda jest najczulsza i najbardziej rygorystyczna. Niestety Autor w swoich rozważaniach ograniczył się do podsumowania uzyskanych wyników oraz opisanie wad i zalet poszczególnych metod, a nie pokusił się o jednoznaczne stwierdzenie, która metoda jest jego zdaniem najlepsza i powinna być stosowana jako standard. Niemniej jednak, uważam przedstawione wyniki za wartościowe. Tego typu jednoznaczne, rzetelne porównanie różnych technik pomiarowych w jednakowych warunkach jest rzeczą bardzo cenną i wnoszącą nową, oryginalną wiedzę w obszarze techniki laserowej.

Na szczególną uwagę zasługuje ponadprzeciętna staranność w wykonywaniu pomiarów. Na podstawie lektury pracy, recenzentowi ujawnia się obraz pracowitego i sumiennego badacza, silnie zmotywowanego, który cierpliwie przeprowadza kolejne serie pomiarowe, analizując niezliczone ilości danych. Wszystkie pomiary wykonano niezwykle drobiazgowo, dbając o każdy szczegół układu eksperymentalnego. Prezentowane wyniki często zawierają choćby słupki błędów, co nie jest powszechną praktyką w prezentowaniu wyników pomiarów. Sama praca stanowi świetnie napisane kompendium na temat TMI, podsumowujące bieżący stan wiedzy, czego z pewnością brakowało w literaturze w języku polskim.

Na dorobek naukowy Autora składa się 10 publikacji w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej oraz 7 publikacji w materiałach pokonferencyjnych (m.in. SPIE, IEEE, Optica). Niestety żadna z 10 publikacji naukowych nie dotyczy bezpośrednio zagadnień poruszanych w pracy doktorskiej (wyniki z pracy nie zostały nigdzie opublikowane). Analizując tytuły wystąpień konferencyjnych można stwierdzić, że kilka z nich dotyczy doktoratu. Jest to dość zaskakujący stan rzeczy, gdyż zdaniem recenzenta, wyniki zaprezentowane w podrozdziale 4.2 z pewnością są publikowalne.

#### 4. Uwagi i pytania do pracy

Podczas lektury pracy narodziły się następujące pytania i uwagi merytoryczne:

1. We wprowadzeniu, Autor często porównuje różne parametry laserów światłowodowych do laserów gazowych (np. strona 10) lub na ciele stałym (np. strona 3), z oczywistych względów podkreślając zalety laserów światłowodowych. Brakuje natomiast odniesienia do laserów dyskowych, które również osiągają moce rzędu 10-20 kW, mogą pracować w reżimie impulsowym oraz CW, i nie są obciążone takimi zjawiskami jak TMI.
2. Pomiar widma optycznego lasera (Rys. 2.8) powinien zostać wykonany analizatorem widma optycznego (OSA) w szerszym zakresie spektralnym i lepszą dynamiką. W wykonanym pomiarze dynamika wynosi zaledwie 25 dB, w związku z tym niemożliwe jest ocenienie czy w wyjściowej wiązce nie zawiera się częściowo moc pompująca (a takie stwierdzenie pojawia się w pracy). Ponadto, widoczne jest poszerzenie spektralne przy najwyższej mocy lasera, a pomiar jest ograniczony do długości fali 1100 nm. Interesujące byłoby sprawdzenie jak bardzo poszerzone jest spektrum lasera w tym przypadku.
3. W rozdziale 2.3 Autor prezentuje wyniki pomiaru  $M^2$  wiązki podkreślając, że nie korzysta z oprogramowania producenta, aby mieć lepszą kontrolę nad obliczeniami współczynnika jakości wiązki. Czy w związku z tym przeprowadzono porównanie wartości  $M^2$  uzyskanych wg obliczeń Autora, a tymi wygenerowanymi przez oprogramowanie?



4. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego w układzie eksperymentalnym z Rys. 4.7 użyto fotodetektora sprzężonego ze światłowodem? Taki detektor komplikuje układ, wprowadzając dodatkowe stopnie swobody (kwestia wprowadzenia światła do włókna). Wydaje się, że łatwiejsze byłoby użycie detektora objętościowego.
5. Pomiar przedstawiony na Rys. 4.11 (analiza częstotliwościowa przebiegu mocy na detektorze w pomiarze progu TMI) jest bardzo wartościowy, i w mojej opinii powinien być przeprowadzony dla większej liczby punktów pomiarowych (tj. więcej niż trzech ustawień mocy lasera), w szczególności w okolicach progu TMI. Dodatkowo, sugerowałbym przybliżenie zakresu 0 – 2 kHz, gdyż na tak przedstawionym rysunku nie da się dostrzec szczegółów. Uwaga do rysunku 4.11: w tekście na stronie 89 znajduje się stwierdzenie, że obserwowany jest wzrost widmowej gęstości energii do 30 kHz, przy czym widmo na Rys. 4.11 ograniczone jest do 20 kHz. Ponadto, w tekście na końcu strony 88 znajduje się błąd (powinno być 7,65 kW zamiast 6,6 kW).
6. Dlaczego nie zastosowano mniejszych apertur niż 4,5 mm w przypadku pomiarów progu TMI w konfiguracji z detektorem i aperturą? Czy zastosowanie mniejszej apertury nie poprawiłoby czułości pomiaru?
7. Pewną wątpliwość budzi sposób sformułowania tezy. W pracy postawiono dwie tezy:
  - *Efekt TMI stanowi podstawowy mechanizm ograniczający efektywną generację w modzie podstawowym w laserach światłowodowych dużych mocy średnich.*
  - *Nie istnieją skuteczne metody podniesienia progu występowania efektu TMI w układach laserów światłowodowych dużych mocy średnich pompowanych rezonansowo bez modyfikacji układu wzmacniacza końcowego.*

Tak sformułowane tezy są dość dyskusyjne: pierwszą z nich można uznać za udowodnioną jeszcze przed podjęciem badań przez doktoranta. Sposób sformułowania drugiej tezy jest dość ryzykowny. Raczej należałoby ją ująć jako: znane metody podniesienia progu występowania TMI są nieskuteczne w przypadku braku możliwości ingerencji w układ wzmacniacza.

Pewną dyskusyjną kwestią jest również to, czy metoda aktywna polegająca na dynamicznym wzbudzaniu modów poprzecznych (zaproponowana przez grupę z Jeny, opisana w rozdziale 5.1.2) jest metodą wymagającą *modyfikacji układu wzmacniacza końcowego*. Moim zdaniem nie – gdyż konstrukcja wzmacniacza pozostaje bez zmian, a kompensacja TMI polega na wprowadzaniu do światłowodu wiązki o odpowiednim profilu.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż praca jest przygotowana wyjątkowo starannie pod względem edycyjnym. Na szczególne uznanie zasługuje jakość i czytelność rysunków, staranność językowa, i brak większych błędów redakcyjnych czy typograficznych. Mimo usilnych starań, znalazłem jedynie kilka błędów w całej pracy:

1. Strona 1: „T. H. Maimana” zamiast „Mainmana”
2. Urwane zdanie w podpisie Tabeli 1: „W wypadku techniki CBC parametr  $M^2$ , ze względu na niegaussowski kształt wypadkowej wiązki laserowej [59].”
3. W całej pracy pozostawiono wiszące jednoliterowe spójniki oraz przyimki na końcach (tzw. sierotki), co w języku polskim jest uchybieniem typograficznym.
4. W pracy zastosowano bardzo małe marginesy (zarówno górne/dolne jak i boczne), co utrudnia czytanie pracy.

Należy podkreślić, iż powyższe uwagi edytorskie nie umniejszają walorów naukowych dysertacji.

## 5. Podsumowanie

Podsumowując, praca mgr inż. Przemysława Gontara przedstawia oryginalne wyniki naukowe, wnoszące nową wiedzę do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika

i Technologie Kosmiczne. Autor rozwiązał postawione problemy naukowe i osiągnął stawiane cele. Badania zostały zrealizowane rzetelnie, a praca pozbawiona jest błędów merytorycznych czy większych uchybień. Moja ogólna ocena przedstawionej do recenzji pracy jest **pozytywna**. W mojej opinii, praca spełnia zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, może być zatem podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Autora do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

*Grzegorz Golob*