

Dr hab. inż. Alicja Anuszkiewicz  
Instytut Systemów Elektronicznych  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa  
alicja.anuszkiewicz@pw.edu.pl

Warszawa, 09.10.2023r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Zbigniewa Łaszczycha**  
**pt.: „Generacja ultrakrótkich impulsów w laserach światłowodowych opartych na sztucznych**  
**nasycalnych absorberach”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Zbigniewa Łaszczycha została wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Grzegorza Sobonia, prof. Politechniki Wrocławskiej. Badania przedstawione w rozprawie były finansowane ze środków projektu First TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (POIR.04.04.00-00-434D/17-00) oraz częściowo z projektu Wspólne Przedsięwzięcie z Województwem Lubelskim Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (POIR.04.01.01-00-0024/19).

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów i obszernego spisu literatury liczącego 321 pozycji. Doktorant prezentuje również podsumowanie swojego dorobku naukowego, w szczególności podaje trzy publikacje związane z tematyką rozprawy o łącznej wartości współczynnika *impact factor* 11,5 oraz liczne wystąpienia konferencyjne (10), gdzie występuje jako pierwszy autor. Na uwagę zasługuje również współautorstwo jeszcze 4 prac w czasopiśmie z *impact factor* od 3,56 do 11,86 wychodzących tematycznie poza zakres rozprawy. Łączna długość pracy to 147 stron.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy, a kolejne dwa rozdziały (Rozdział 2 i 3) zawierają kluczowe informacje na temat propagacji i generacji ultrakrótkich impulsów laserowych w światłowodach oraz ich generacji. W Rozdziale 3 skupiono się głównie na wyjaśnieniu czym są nasycalne absorbery, jakie są ich rodzaje oraz wady i zalety. Ponadto przedstawiono w klarowny sposób dyspersyjne reżimy synchronizacji modów podłużnych lasera oraz opisano szumy własne w laserach femtosekundowych. Wstęp teoretyczny zawiera nieliczne nieścisłości i błędy, np. miarą dwójłomności fazowej, a nie grupowej jest współczynnik  $B$ , będący różnicą fazowych, a nie grupowych współczynników załamania (str. 22), czy fakt, że dwójłomność modowa jest wypadkową kształtu rdzenia jak i asymetrii płaszcza mikrostrukturalnego, a nie jak to sugeruje Autor tylko asymetrii płaszcza (str. 23) w kontekście włókna z literatury nr [57]. Ponadto przykład włókna fotonicznego z nasycalnym absorberem w mikrostrukturze płaszcza, a nie w powietrznym rdzeniu został przedstawiony na str. 34.

Z kolei na str. 39 napisano: „W praktyce stosuje się stosunkowo niesymetryczne sprzęgacze [...] w celu zmniejszenia  $I_{NAS}$ .” Czym jest parametr  $I_{NAS}$ ? Co oznacza w tym zdaniu słowo „stosunkowo”?

Kolejne rozdziały 4-6 stanowią oryginalną część rozprawy i związane są z badaniami eksperymentalnymi trzech konfiguracji oscylatorów F9L opartych na NALM (*ang. Nonlinear Amplifying Loop Mirror*): oscylatora z objętościowym przesuwnikiem fazy i całkowicie światłowodowego oscylatora femtosekundowego obydwu z NALM z aktywnym włóknem erbowym (~1560 nm) oraz oscylatora z NALM z aktywnym włóknem tulowym (~1985 nm).

Najistotniejszą część rozprawy stanowi Rozdział 4, w którym dokonano szczegółowej analizy pracy oscylatora F9L opartym na NALM z objętościowym przesuwnikiem fazy, gdzie zastosowano nowatorskie podejście do pomiaru sygnału wyjściowego nie tylko na wyjściu port 1, tradycyjnie traktowanym jako wyjście z oscylatora, ale również na wyjściu, tzw. odrzucanym (port 2). Pokazano szczegółowe badania w funkcji mocy pompującej, identyfikując progi dla pracy samowzbudnej wieloimpulsowej oraz próg dla pracy jednoimpulsowej. Ponadto przeanalizowano możliwość zarządzania dyspersją oscylatora i asymetrią pętli NALM, tj. pokazano jak pracuje oscylator w reżimie solitonów konwencjonalnych (normalna dyspersja wypadkowa układu), solitonów dyssypujących (anomalna dyspersja wypadkowa) oraz w pobliżu zera dyspersji wypadkowej (dyspersja zbalansowana), co nazywane jest po polsku solitonami oddychającymi (*ang. breathing solitons*). Bardzo szczegółowo opisano widma z przedziału wypadkowych dyspersji, jednak dla zakresu  $> -0,010 \text{ ps}^2$ , nie przedstawiono przykładowych charakterystyk widmowych odzwierciedlających ten opis. Ponadto opisano konieczność zwiększania mocy pompującej dla układów z coraz krótszym włóknem SMF, ale nie podano ile wynosiła ona dla prezentowanych widm odpowiadających rosnącej wartości GDD w układzie. Jaki jest charakter tego wzrostu? Na rys. 38 skale poziomu mocy dla portu 1 i portu 2 są różne, co utrudnia porównanie widm. Różnica skal dla fazy na rysunkach 40 i 41 również występuje. Autor wspomina ponadto, że przebieg fazy spektralnej jest płaski, ale nie podaje wartości liczbowych, które o tym świadczą. Niemniej jednak uzyskane wyniki pozwoliły doktorantowi wyznaczyć eksperymentalne przedziały reżimów pracy oscylatora w funkcji wypadkowej dyspersji wnęki, co zostało uzasadnione szerokim opisem widm i ich składowych. Ponadto pokazano czas trwania, energię oraz szerokość połówkową impulsu zmierzonego na porcie 1 i porcie 2 i ich porównanie dla wszystkich badanych reżimów wnęki.

Następnie zastosowano kompresor wewnątrz wnęki oscylatora i pokazano możliwość pracy w trzech stanach oznaczonych A, B i C i różnice w kształcie impulsów pomiędzy portem 1 i 2 w reżimie solitonów dyssypujących. Przebadano również możliwość przestrajania widma, co jest bardzo ważnym wynikiem badawczym i zostało opublikowane w jednym z artykułów doktoranta [246] w czasopiśmie *Optics & Laser Technology* (IF=5). Drobne uwagi mam jednak do rys. 46, gdzie jednostki na osi y są nieadekwatne. Autor zmierzył również szum amplitudowy dla reżimu solitonów dyssypujących.

Wartości trudno porównać, jeżeli wziąć pod uwagę ponowne zróżnicowanie skal na rys. 62. Ponadto podanie chociażby szacowanych błędów pomiarowych dla szumu potwierdziłoby, że wykazane różnice pomiędzy wartościami dla portu 1 i 2 są charakterystyczne dla tego reżimu pracy oscylatora. Warto jednak zauważyć, że wykonane pomiary szumu amplitudowego i porównanie ich dla obu portów jest nowatorskie i nie było jak dotąd opisywane w literaturze. W podsumowaniu Rozdziału 4 Autor powinien z dumą ponownie zacytować swoją pracę [246], zwłaszcza, że już na tym etapie rozprawy potwierdza dwie postawione w niej tezy.

Rozdział 5 dość skrótowo prezentuje oscylator F9L z NALM całkowicie światłowodowy, ale ze względu na użyte komponenty pracujący jedynie w reżimie solitonów konwencjonalnych. Czy możliwe jest zbudowanie takiego układu pracującego w pozostałych reżimach wnęki? Natomiast, wracając do wyników przedstawionych w Rozdziale 4, jakie są uzyskiwane średnie moce wyjściowe i moce szczytowe impulsu w tym samym reżimie wnęki w układzie z objętościowym przesuwnikiem fazy w porównaniu z rozwiązaniem all-fiber, mając również na uwadze moc pompującą?

W rozdziale 6 doktorant rozszerzył swoje badania układu F9L z NALM na inny zakres spektralny poprzez zastosowanie aktywnego włókna tulowego i uzyskał generację impulsów femtosekundowych dla długości fali 1985 nm. Zmierzono progi mocy dla pracy wielo- i jednoimpulsowej oraz przeanalizowano przebiegi czasowe. Ponadto zastosowano włókno do kompensacji dyspersji we wnęce i skracano je, aby ponownie przebadać właściwości układu dla trzech reżimów pracy oscylatora. Warto zauważyć, że jako pompy użyto stworzonego przez doktoranta lasera pracy ciągłej na długości fali 1565 nm o mocy wyjściowej 1,86 W (pompowanie na 976 nm). Bardzo ważną częścią Rozdziału 6 jest analiza pracy wieloimpulsowej, która pokazuje pełną dynamikę tego układu i zwraca uwagę na brak tak szerokiej analizy w literaturze. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale są kluczowe dla zrozumienia zasad działania laserów impulsowych na długości fali w pobliżu 2  $\mu\text{m}$ .

Rozdział 7 jest podsumowaniem rozprawy mgr inż. Zbigniewa Łaszczycha. Doktorant zwraca uwagę na swoje oryginalne osiągnięcia, które z nadmiarem potwierdzają postawione w rozprawie tezy. Warto zauważyć, że prace przedstawione w rozprawie stanowią bazę do dalszych badań oscylatorów w konfiguracji F9L z NALM na inne zakresy spektralne, co z pewnością przyczyni się do poszerzenia stanu wiedzy w dziedzinie generacji ultrakrótkich impulsów w egzotycznych zakresach widma.

Rozprawa opisuje nowatorskie badania z zakresu optyki nieliniowej, w szczególności w kontekście konstrukcji i analizy laserów femtosekundowych PM. Wszystkie przebadane w rozprawie układy pozwoliły uzyskać impulsy femtosekundowe, przy czym najkrótsze impulsy uzyskano na wyjściu port 1 układu F9L z objętościowym przesuwnikiem fazy, tj. 75 fs w reżimie solitonów oddychających (Rozdział 4.2). W tym samym reżimie impulsy z płaską fazą ( $\pm 2$  rad) i czasem trwania poniżej 90 fs zmierzono na obu wyjściach oscylatora, co potwierdza możliwości kształtowania impulsów na obu wyjściach poprzez dobór dyspersji wypadkowej wnęki. Pokazano też nowatorskie sposoby przestrajania długości fali

impulsów pikosekundowych poprzez zastosowanie kompresora wewnątrz wnęki. Kluczowa jest również analiza szumowa na obu wyjściach oscylatora, która potwierdza zależność wartości szumu amplitudowego od wypadkowej dyspersji wnęki. Warto podkreślić, że w literaturze dopiero od niedawna podejmuje się temat analizy szumów amplitudowych w układach PM, jednak badania są prowadzone głównie na wnękach z aktywnym włóknem iterbowym i jedynie w wybranym reżimie dyspersyjnym.

Moja merytoryczna ocena rozprawy jest bardzo wysoka, ponieważ tematyka rozprawy wpisuje się w najnowsze trendy w optyce nieliniowej. Rozprawa podejmuje zagadnienia, które dość oszczędnie są opisywane w literaturze dla układów PM i znacznie poszerza wiedzę na temat możliwości sterowania właściwościami generowanych impulsów femtosekundowych. Poprzez szeroką analizę eksperymentalną uzyskano i zweryfikowano wyniki, które znacznie wypełniają luki w literaturze oraz pokazują, że szersze spojrzenie na dynamikę układów F9L pozwala w pełni zrozumieć zasadę ich działania i rozwijać ich możliwości optymalizacyjne w różnych kierunkach – czasów trwania oraz ilości generowanych impulsów, ich średniej mocy wyjściowej czy możliwości przestrajania centralnej długości fali. Uzyskane wyniki są bardzo ważne w kontekście rozwijania nowoczesnych źródeł laserowych, np. do tzw. zasiewania, czy źródeł pracujących w zakresie 2  $\mu\text{m}$ .

Mgr inż. Zbigniew Łaszczych wykazał się kreatywnością w formułowaniu i rozwiązywaniu problemów naukowych. Ponadto zakres przeprowadzonych eksperymentów wraz z wnikliwą analizą wyników potwierdzają Jego szeroką wiedzę z zakresu optyki nieliniowej, laserów światłowodowych oraz optyki ultrakrótkich impulsów. Przedstawione badania stanowią istotny wkład w rozwój technik generacji i badania dynamiki impulsów femtosekundowych o czym pośrednio świadczą publikacje doktoranta w czasopismach z rankingu *Journal Citation Reports*.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa zawiera oryginalne wyniki naukowe i może być podstawą uzyskania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w świetle wymagań formalnych stawianych przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85). Wnoszę więc o dopuszczenie mgra inż. Zbigniewa Łaszczycha do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki inżynieryjno-techniczne. Ponadto ze względu na nowatorską tematykę rozprawy oraz dorobek publikacyjny Autora związany z rozprawą wnoszę wniosek o jej wyróżnienie.

9 października 2023

  
Dr hab. inż. Alicja Anuszkiewicz