

prof. dr hab. Inż. Jan Jabczyński  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Instytut Optoelektroniki

## Recenzja rozprawy doktorskiej

dla Rady Naukowej Dyscypliny : AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE  
KOSMICZNE” Politechniki Wrocławskiej

### Tytuł rozprawy: **Generacja ultrakrótkich impulsów w laserach światłowodowych opartych na sztucznych nasycalnych absorberach**

Autor rozprawy: mgr inż. Zbigniew Łaszczych

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Zbigniewa Łaszczycha obejmuje pierwsze trzy rozdziały wprowadzające w tematykę oraz trzy kolejne rozdziały merytoryczne, w których autor przedstawia własne wyniki badań. Praca ma **charakter głównie eksperymentalny**, dotyczy to zarówno opracowania wielu układów impulsowych laserów światłowodowych, jak i ich kompleksowych badań z wykorzystaniem unikalnej aparatury pomiarowej.

Pomimo bardzo ogólnego tytułu rozprawy, Autor w części merytorycznej ograniczył się do badań laserów z nieliniowym zwierciadłem wzmacniającym w konfiguracji cyfry 9 (NALM-f9) zrealizowanych na włóknach aktywnych domieszkowanych jonami Er (r.4 i r.5) oraz Tm (r.6). Podstawowa koncepcja NALM zaproponowana po raz pierwszy w 1990 r. przez M.E. Fermanna [1], zyskała duże zainteresowanie i stała się przedmiotem bardzo licznych prac na świecie, co przedstawione zostało m.in. w r. 2. i 3. dysertacji. Przeprowadzona tu **analiza stanu wiedzy i źródeł literaturowych** jest imponująca (ponad 300 pozycji). W r.3. Autor omawia w przystępny sposób metody generacji ultrakrótkich impulsów, podstawy fizyczne powstawania różnych typów solitonów w laserach światłowodowych, ich charakterystyki szumowe, wpływ dyspersji, oraz schematy sztucznych nasycalnych absorberów (ASA) stosowanych w laserach światłowodowych, w tym konfigurację NALM-f9, stanowiącą podstawową architekturę przedstawionych w kolejnych rozdziałach układów eksperymentalnych. Analizy tu przedstawione stanowią punkt wyjścia do opisu i zrozumienia wyników eksperymentalnych przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Należy dodać, że zespół promotora, w którego skład wchodzi doktorant, ma bardzo wysoką pozycję w tej tematyce w świecie naukowym, ich prace są śledzone na bieżąco, o czym świadczy choćby fakt, że ich artykuł nt. NALM-f9 [2] z 2021 r. egzemplifikujący tezę nr 1 znalazł już kilkanaście cytowań.

W rozdziałach 4., 5. i 6. Autor przedstawił kolejno 6 różnych układów NALM-f9 w laserach erbowych z dodatkowymi zewnętrznymi elementami (NRPBS, kompresor), w wersji w pełni światłowodowej (r.5) oraz w laserach tulowych (r.6). O **oryginalności rozprawy** stanowi realizacja konfiguracji NALM-f9 na światłowodach domieszkowanych Er oraz Tm wraz z eksperymentalnym wykazaniem prawdziwości obu tez rozprawy.

Jak pokazano w literaturze przedmiotu oraz w samej pracy, prawie zawsze obserwowane są różne sygnały na portach wyjściowych NALM-f9, odpowiadające obu kierunkom obiegu wiązek w pętli wzmacniającej. Dotyczyć to może amplitudy sygnału, widma generacji, kształtu i czasów trwania impulsów oraz charakterystyk szumowych. Parametry te zależą m.in. od poziomu pompowania, asymetrii pętli oraz zastosowanych w niej dodatkowych elementów dyspersyjnych.



## Obie tezy rozprawy:

*T1: Zastosowanie NALM-f9 pozwala na płynne przestrajanie charakterystyk ASA, który wspiera samowzbudną pracę w reżimie synchronizacji modów w szerokim zakresie reżimów dyspersyjnych i różnych zakresach spektralnych.*

*T2: Zastosowanie NALM-f9 pozwala na generację z dwóch portów wyjściowych impulsów o zbliżonych parametrach czasowo-spektralnych, lecz różnych charakterystykach szumowych.*

dotyczą bardzo specyficznych własności ultraszybkich laserów światłowodowych w konfiguracji NALM-f9. Autor udowadnia je na przykładach własnych wyników eksperymentalnych.

Prawdziwość **pierwszej z nich** wykazana jest w r. 4., gdzie pokazano możliwości przestrajania parametrów generacji (długości fali, widma, typu solitona) poprzez zmianę poziomu pompowania (r. 4.2.3), zmianę asymetrii pętli rezonatora (r. 4.2.4), wewnątrz-rezonatorową kompresję na siatce dyspersyjnej (r. 4.3) oraz z wykorzystaniem włókna do kompensacji dyspersji (r. 4.4). Wykazano ponadto, że poprzez właściwy dobór asymetrii NALM-f9 możliwe jest uzyskanie solitonów o czasie trwania 75 fs ograniczonych jedynie pasmem wzmocnienia erbu, przy czym parametry generacji obserwowane na obu portach są wtedy zbliżone. Teza ta potwierdzona została ostatnio w 2023 r. w pracy [3], przy czym należy zaznaczyć, że autorzy tej pracy powołują się na pracę [2] przedstawioną w r. 4.

**Drugą z tez** egzemplifikuje fakt występowania różnych procesów szumowych towarzyszących generacji pewnych typów solitonów obserwowanych na różnych portach (co pokazano w r. 4.3.6 dla układu NALM-f9 z dodatkową kompensacją dyspersji, oraz w r. 5 dla układu zrealizowanego w całości w technice światłowodowej). Być może nie ma to znaczenia praktycznego, wnosi jednak wkład w wiedzę nt. generacji impulsowej w laserach światłowodowych i świadczy o oryginalności rozprawy.

Ostatnia część pracy (r. 6) poświęcona jest pompowanemu laserem włóknowym Er:Yb ultraszybkemu laserowi w konfiguracji NALM-f9 na włóknach domieszkowanych jonami Tm. Również w tym przypadku obserwowana jest duża asymetria parametrów generacji na obu portach. Zademonstrowano tu możliwość zmiany parametrów generacji poprzez skracanie długości światłowodu kompensującego dyspersję, co kolejny raz dowodzi poprawności tezy nr 1. Należy podkreślić, że uzyskano tu impulsy ograniczone transformacyjnie o b. niskich szumach, zatem układ ten nadaje się znakomicie jako subpikosekundowe źródło zadające do wzmacniaczy laserowych, lub bezpośrednich zastosowań w nauce i technice.

Praca napisana jest zwięzłym, przystępnym językiem zarówno w części wstępnej (r. 1-3) jak i w części zasadniczej (r. 4-6). Autor nie ustrzegł się jednak paru pomyłek czy usterek językowych, stylistycznych oraz merytorycznych np. we wzorze (3.17), czy komentując wzór (3.24). Autor komentuje w pracy wyniki eksperymentalne, wskazując na możliwe mechanizmy fizyczne powodujące taki rezultat. Jak to bywa w eksperymencie, często jesteśmy zaskakiwani wynikami i próbujemy dobudować teorię a posteriori. Jak wiadomo, część działań eksperymentalnych jest nieodwracalna /niszcząca/, celowe byłoby przewidzieć wynik i dobierać parametry np. długość, parametry włókna, typ kompensatora itp. do konkretnego zadania. Brakuje mi w pracy pogłębionej analizy czy modelowania prowadzącego do konstrukcji lasera o założonych parametrach generacji lub jego optymalizacji. Uzyskane wyniki eksperymentalne dotyczą z reguły pracy o nie wysokich przekroczeniach progowych, powyżej pewnej wartości mocy pompującej generacja w reżimie synchronizacji modów „się rozjeżdża” chociaż z reguły jest to sytuacja odwracalna. Interesujące byłoby określenie (teoretyczno–eksperymentalne?) granicznych parametrów energetycznych impulsów oraz sprawności możliwych do uzyskania w układach laserów NALM-f9.

Doświadczenie w innych obszarach techniki laserowej wskazuje na istotny wpływ jakości technicznej stosowanych elementów (m.in. strat rozproszeniowych, domieszek, odbić pasożytniczych itp.). W pewnym stopniu mamy tu sytuację podobną, w r. 4. korzysta się także z elementów

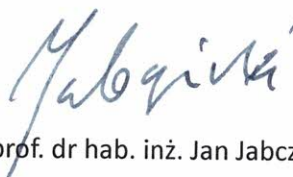
objętościowych (dzielniki PBS, zwierciadła, kolimatory, siatki dyfrakcyjne itp.), w laserach w pełni światłowodowych jakoś spawów, rozproszenia, absorpcja we włóknach mogą także odgrywać istotną rolę. Stąd pytanie o wpływ ww. czynników na parametry generacji lasera w konfiguracji NALM-f9. Ponadto ciekawe byłoby zamknięcie portu nr 2 i wstrzyknięcie wstecz wiązki do rezonatora, jak to stosuje się czasami w konwencjonalnych laserach ciała stałego z rezonatorem pierścieniowym. Czy doktorant przeprowadził takie eksperymenty i z jakimi wynikami ?

Oceniając **przydatność rozprawy do zastosowań**, najwyżej oceniam wyniki uzyskane w r. 5 i r. 6. W praktycznych układach laserowych optymalizacja konstrukcji powinna zmierzać do uzyskania założonych parametrów tylko w jednym porcie, natomiast wiedza nt. podziału energii, różnych charakterystyk generacyjnych w obu portach ma bardzo partykularne znaczenie, trudno to uogólnić, a każda konfiguracja jest inna.

Autor wykazał się wysokim poziomem wiedzy fizycznej, umiejętnościami konstruowania praktycznych układów fotoniki światłowodowej, oraz znakomitym warsztatem pomiarowym. Pomimo wspomnianych wyżej uwag krytycznych, a także pewnych usterek redakcyjnych, **oceniłam pracę bardzo wysoko**.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Zbigniewa Łaszczucha spełnia kryteria oryginalności rozwiązania problemu naukowego i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej sformułowane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Mając powyższe na uwadze wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Zbigniewa Łaszczucha do publicznej obrony.

Stwierdzam ponadto, że Autor spełnia formalnie wymagania sformułowane w zasadach wyróżniania..... par. 1c. Doktorant wykazał się znakomitym warsztatem naukowym zarówno pod względem analiz fizycznych, jak i implementacji eksperymentalnej i pomiarowej, a uzyskane wyniki stanowią nowość naukową, o czym świadczą liczne cytowania artykułu [2], wnioskuje więc o **wyróżnienie pracy**.

  
prof. dr hab. inż. Jan Jabczyński

#### Cytowane artykuły:

- [1]. M.E Fermann, et al., „Nonlinear amplifying loop mirror,” *Opt. Lett*, 15(13), 1990
- [2]. Z. Łaszczuch, G. Soboń, „Dispersion management of a nonlinear amplifying loop mirror-based Erbium-doped fiber laser”, *Opt. Express*, 29(2) 2690-2702, 2021
- [3]. H. Zhang et al., „Observation of Wavelength Tuning in a Mode-Locked Figure-9 Fiber Laser,” *Photonics* , 2023, 10, 184. <https://doi.org/10.3390/photonics10020184>

