



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Warszawa, 28.08.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Zbigniewa Łaszczycha

***pt. „Generacja ultrakrótkich impulsów w laserach światłowodowych opartych
na sztucznych nasycalnych absorberach”***

Podstawa formalna przygotowania niniejszej recenzji to pismo od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziejzica, z dnia 21 lipca 2023 r.

1. Zasadność podjęcia tematu i ocena rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. Zbigniewa Łaszczycha obejmuje tryby pracy oraz charakterystykę światłowodowych laserów femtosekundowych z synchronizacją modów podłużnych za pomocą sztucznych absorberów nasycalnych. Celem pracy było poszerzenie stanu wiedzy o możliwościach zastosowania takich absorberów w praktycznych przyrządach laserowych generujących impulsy femtosekundowe o pożądanym parametrach. Doktorant przeprowadził systematyczne badania zjawiska synchronizacji modów podłużnych wewnątrz rezonansowej lasera, w którym ośrodkiem aktywnym był światłowód erbowy albo tulowy, w warunkach zmiennych parametrów układu, tj. wypadkowa dyspersja, głębokość modulacji absorbera nasycalnego, lub moc lasera pompującego. Przedmiotem badań były charakterystyki wyjściowe w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie widmowej dla bardzo szerokiego zakresu konfiguracji wewnątrz laserowej. Wspólną, łączną cechą badanych układów laserowych był rodzaj absorbera nasycalnego, który każdorazowo mieścił się w grupie tzw. nieliniowych zwierciadeł wzmacniających (NALM), a na architekturę rezonatora dobrane były wyłącznie komponenty utrzymujące zdeterminowany stan polaryzacji



(PM). Praca ma charakter ściśle eksperymentalny. W badaniach doktorant wykorzystywał zarówno podstawowe metody takie jak pomiary charakterystyk spektralnych, jak i bardziej zaawansowane techniki m.in. autokorelację, korelację częstotliwościowo-rozdzielczą (ang. frequency-resolved optical gating, FROG), oraz analizę widmową w zakresie fal radiowych służącą do pomiarów szumu badanych laserów.

Sztuczne nasycalne absorbery NALM oraz architektura PM wyznaczają obecnie standard w technologii laserów generujących ultrakrótkie impulsy. Rozległość przestrzeni parametrów oscylatora oraz odpowiadających im stanów pracy jest znaczna i nie znajduje jednak odzwierciedlenia w literaturze recenzowanej. Producenci przyrządów komercyjnych na ogół nie dzielą się tą wiedzą, ponieważ nie leży to w ich interesie. Brak systematycznej charakteryzacji impulsów laserowych na różnych dostępnych wyjściach wnęki laserowej w zależności od wypadkowej dyspersji oraz sposobów jej kształtowania powoduje, że pomimo dostępności komercyjnej przyrządów oraz dobrze uargumentowanej przewagi architektury PM i sztucznych nasycalnych absorberów nad materiałowymi absorberami nasycalnymi, znany jest jedynie niewielki wycinek możliwych kombinacji parametrów wnęki pozwalających na osiągnięcie pożądanych charakterystyk wyjściowych lasera. To z kolei ogranicza tempo rozwoju nowych przyrządów wykorzystujących pasmo 1,56 mikrona, ale przede wszystkim nowe pasmo 2,0 mikrona związane ze światłowodami domieszkowanymi jonami tulu lub holmu.

Doktorant trafnie zdiagnozował ograniczenia wynikające z bieżącego stanu wiedzy w obszarze światłowodowej optyki ultraszybkiej, u której podstaw znajdują się lasery femtosekundowe. Tezy pracy sformułowane są jasno a zakres zrealizowanych badań odpowiada ich treści, tzn. doktorant przeprowadził badania możliwości przestrajania charakterystyk absorbera, a zakres tych parametrów pozwalających na pracę samowzbudną oscylatora istotnie był badany bardzo szeroko. Realizacja badań wymagała od doktoranta opanowania wielu różnych metod pomiarowych w dziedzinie optycznej, radiowej a także w dziedzinie czasu. Należy tu zwrócić uwagę, że pomiary



impulsów laserowych o czasie trwania kilka rzędów wielkości krótszych niż czasy narastania i opadania odpowiedzi najszybszych przetworników analogowo-cyfrowych są dość subtelne a ich opanowanie w stopniu pozwalającym na wykonywanie miarodajnych pomiarów wymaga czasu, cierpliwości oraz zrozumienia różnych aspektów powiązanych zjawisk fizycznych.

Osobną stroną realizacji badań w ramach przedstawionej pracy było opanowanie technologii światłowodowych laserów femtosekundowych. Należy tu zaliczyć projektowanie wnęk oscylatorów, dobór komponentów światłowodowych oraz objętościowych i budowę rezonatorów laserowych, często z wykorzystaniem zaawansowanych przyrządów związanych z obróbką światłowodów i budową torów optycznych o bardzo małym marginesie niedokładności wzajemnego ustawienia elementów optyki objętościowej.

Doktorant zrealizował cel pracy i zebrał w jej trakcie wyniki, które pozwoliły na dowiedzenie obydwu jej tez. W układach hybrydowych oscylatorów NALM z ośrodkiem wzmacniającym w postaci światłowodu i z ramieniem liniowym zbudowanym z elementów optyki objętościowej scharakteryzował pracę w trybie solitonowym, solitonu oddychającego i solitonu dyssypującego. Dyspersja wnęki była w tych badaniach kształtowana w różny sposób, m.in. poprzez zmianę długości włókien komercyjnych tworzących NALM, poprzez zastosowanie kompresora wewnątrz-wnękowego jak również poprzez zastosowanie światłowodu specjalnego do kompensacji dyspersji, który powstał w toku realizacji badawczego projektu konsorcjalnego, w którym udział brał doktorant. Poza charakterystyką samych impulsów femtosekundowych osiągalnych w badanych układach laserowych, doktorant badał również możliwość przestrajania centralnej długości fali laserów, prowadził badania porównawcze impulsów obserwowanych na wyjściach lokalizowanych w różnych sekcjach wnęki laserowej, badał możliwości zmiany stanu pracy lasera poprzez zmianę pasma filtra spektralnego wewnątrz wnęki, a ponadto zbadał właściwości szumowe laserów, które – poza czasem trwania impulsu i jego energią – są kluczowym parametrem pracy z punktu widzenia wielu społecznie ważnych zastosowań, np. w technikach



nieinwazyjnego obrazowania in-vivo tkanek. Zakres zmienności parametrów i charakterystyk badanych układów laserowych oraz spójność wyводу logicznego i przejrzystość prezentacji wyników w całej pracy budzi uznanie.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Manuskrypt rozprawy zawiera 147 stron, przy czym treść rozprawy z wyłączeniem spisu literatury, publikacji, projektów i wystąpień konferencyjnych liczy 116 stron. Rozprawę podzielono na 7 rozdziałów, włączając w to wstęp i podsumowanie pracy. Rozdziały 4, 5 i 6 (a także zakończenie umieszczone w Rozdziale 7) zostały poświęcone omówieniu i prezentacji oryginalnych wyników badań doktoranta. W pracy znajduje się 81 kolejno numerowanych rysunków.

Rozdział 1 stanowiący wstęp, zawiera również cel i tezy pracy. W Rozdziale 2 doktorant zawarł opis podstaw fizycznych propagacji ultrakrótkich impulsów laserowych w światłowodach. Zwraca uwagę fakt, że podczas omawiania konkretnych zjawisk czy koncepcji (np. teoria pola solitonu, str. 58) autor odwołuje się do źródłowych publikacji w periodykach recenzowanych, a nie do podręczników, co świadczy o dogłębnym przestudiowaniu obszaru zagadnień związanych z pracą. W rozprawie zacytowano łącznie ponad 300 pozycji literaturowych (nie licząc źródeł w postaci np. stron internetowych z dokumentacją). Rozdział 3 jest drugim rozdziałem poświęconym omówieniu zagadnień stanowiących podstawę stanu wiedzy dla rozprawy – tutaj omówione zostały zagadnienia generacji ultrakrótkich impulsów laserowych, włączając w to metody synchronizacji modów podłużnych, typy i konstrukcje absorberów nasycalnych, dyspersyjne tryby pracy laserów z synchronizacją modów oraz zagadnienia związane z szumem w takich laserach. Całość jest przedstawiona w bardzo uporządkowany sposób, co sprawia, że ta część rozprawy jest cenna również jako swego rodzaju podręcznik dla młodych naukowców rozpoczynających pracę naukową w dziedzinie rozprawy. Co ważne, doktorant powołuje się w tym rozdziale nie tylko na recenzowaną literaturę źródłową często



sprzed kilku czy kilkunastu lat, ale także na publikacje z 2022 i 2023 roku, co świadczy o aktualności i dynamice podjętej przed doktoranta problematyki badawczej.

Od strony językowej można zwrócić uwagę, że doktorant podjął się nietatwego zadania opisu po polsku stanu wiedzy opanowanej i przekazywanej na ogół w języku angielskim. Trzeba podkreślić, że w znakomitej części doktorant wywiązał się z tego zadania z sukcesem, choć można znaleźć w rozprawie przykłady niespodziewanego przekładu, np. „fale szelmowskie” (str. 61, dotyczy skąd inąd fascynującego zjawiska w języku angielskim określanego jako „rogue waves”, inne spotykane tłumaczenie na język polski to „fale rozbójnicze”).

Rozdziały 4, 5 i 6 zawierają wyniki badań własnych autora. Na samym wstępie należy zauważyć dbałość doktoranta o możliwość odtworzenia wyników przeprowadzonych badań, która znajduje wyraz w podaniu szczegółowej listy wykorzystanej aparatury oraz w szczegółowo opisanych parametrach budowy badanych rezonatorów. Powyższa uwaga dotyczy każdego z ww. rozdziałów pracy. W Rozdziale 4. doktorant pracował z erbowymi oscylatorami światłowodowymi NALM w konfiguracji cyfry 9 (ang. *figure 9 laser*), w których ramię liniowe było zrealizowane za pomocą elementów objętościowych. Pozwoliło to na bardzo wszechstronne zbadanie możliwości kształtowania parametrów pracy lasera: doktorant badał zmiany symetrii ramion wnęki, wpływ obecności kompresora wewnątrz wnęki, wpływ pasma filtra spektralnego, czy też możliwość zarządzania dyspersją za pomocą światłowodu specjalnego do kompensacji dyspersji. Na uwagę zasługuje odniesienie się doktoranta do wyników badań grupy chińskiej (str. 68,69 rozprawy, Rozdział 4), która podobnie jak doktorant, badała oscylator NALM z objętościowym przesuwnikiem fazy i uzyskała podobne (choć nieco słabsze) parametry pracy. Ponownie – świadczy to o aktualności i dużej dynamice badań w obszarze wiedzy, której dotyczy rozprawa. Rozdział 4 jest jednym z najdłuższych w rozprawie, liczy około 30 stron. W znacznie krótszych rozdziałach 5 i 6 doktorant zawarł opis badań odpowiednio całkowicie światłowodowego oscylatora erbowego oraz oscylatora tulowego, zrealizowanego w konfiguracji całkowicie światłowodowej albo mieszanej (światłowodowo-objętościowej). W szczególności,



w Rozdziale 5 doktorant odniósł się do wyników pomiarów szumu osiągniętych w Rozdziale 4 dla podobnej konfiguracji lasera, ale zrealizowanego w architekturze mieszanej, wskazując na przewagi obydwu rozwiązań, np. prostota budowy układu „all-fiber” kosztem nieco zwiększonego poziomu szumu w porównaniu do układu mieszanego, w którym z kolei można dobrać charakterystykę absorbera z kryterium minimalizacji szumu. Tego typu zestawienia dla laserów typu omawianego w rozprawie bardzo trudno znaleźć w recenzowanej literaturze, co potwierdza zasadność podjętego tematu, a ponadto świadczy o ciągłości logicznej w omawianiu wyników badań własnych przez doktoranta.

W zakończeniu pracy, zawartym w Rozdziale 7 doktorant dokonał zwięzłego usystematyzowania osiągniętych wyników i wskazał w jego ocenie najważniejsze osiągnięcia w pracy badawczej opisanej w rozprawie. Wspomniana ponowna systematyzacja wyników nie była zwykłym powtórzeniem a koniecznością, wzięwszy pod uwagę rozległy zakres badań – zwłaszcza tych opisanych w Rozdziale 4. Dobór wyników potraktowanych jako najważniejsze jest właściwy z punktu widzenia odniesienia się do tej pracy, które są w ten sposób ostatecznie udowodnione.

3. Uwagi nt. strony edytorskiej rozprawy

Rozprawa została przygotowana niezwykle starannie, rysunki są czytelne, czcionka na rysunkach pozwala na komfortową lekturę również tych części manuskryptu. W tekście znajdują się nieliczne niedoskonałości (np. literówki, średnio jedna na kilkanaście stron pracy), które w żaden sposób nie utrudniają lektury i na ogół nie powodują zmiany znaczenia. Wyjątki od tej „reguły” są oczywiste i nie powodują niejasności, jest to np. określenie „50 fs po dekompresji” na stronie 52 (autor prawdopodobnie miał na myśli „rekompresję”, co jest logicznie zgodne z treścią Ref. 222), albo w podpisie rysunku 60, gdzie mowa jest o stanie B, podczas gdy z dyskusji w tekście wynika, że chodzi o stan C pracy lasera. Na rys. 33b) zauważyłem ponadto brak opisu jednostki na osi odciętych wykresu wewnętrznego, podobnie na stronie 79 pominięto jednostkę GDD dla wartości $-0,037$. Te nieliczne edytorskie niedociągnięcia



nie wpływają na prawdziwość i jasność wyników badań i wniosków autora z przeprowadzonych badań, co sprawia że nie wpływają one na ogólną ocenę rozprawy.

4. Uwagi do doktoranta

Motywowany zainteresowaniem tematyką a także wynikami rozprawy, chciałbym serdecznie prosić doktoranta o przedyskutowanie następujących kwestii.

- a) Czy prezentacja wyników wartości fazy dla opóźnień powyżej około 4 ps wokół centrum impulsu $t = 0$ s ma znaczenie praktyczne? Dotyczy to rysunków 52c,d; 54c,d oraz 56c,d.
- b) Jakie było źródło zakłóceń mechanicznych w rezonatorze całkowicie światłowodowym omawianym w Rozdziale 5 (strona 103)? Dlaczego miały one wpływ na charakterystykę szumową przyrządu i czy da się ten wpływ zminimalizować?

5. Podsumowanie

Doktorant zaplanował i zrealizował ambitny plan badań w aktualnym obszarze badawczym, który pozostaje w bieżącym kręgu aktywnego zaangażowania wielu grup badawczych na świecie. Realizacja badań wymagała szerokiego rozpoznania stanu wiedzy oraz opanowania wielu umiejętności, w tym projektowania i budowy precyzyjnych torów optycznych oraz wykorzystania specjalistycznej aparatury i zaawansowanych metod diagnostycznych dla zjawisk, które są zaliczane do najkrótszych, które ludzkość potrafi generować, badać i wykorzystywać. Postać przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej, jak również stan dorobku publikacyjnego i konferencyjnego doktoranta świadczy o tym, że nie tylko wiedzę i umiejętności te nabył, ale również sprawnie i skutecznie się nimi posługuje. Badania zjawisk optyki ultraszybkiej to badania subtelne w których łatwo „zejść na manowce”. Uniknięcie takiego scenariusza – potwierdzone uzyskaniem wyników rozprawy w tak



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

bogatym zakresie potwierdza, że doktorant nabył dojrzałość badawczą, którą musi charakteryzować się dobry eksperymentator.

W mojej ocenie rozprawa doktorska pana mgr. Zbigniewa Łaszczucha pt. „Generacja ultrakrótkich impulsów w laserach światłowodowych opartych na sztucznych nasycalnych absorberach” **spełnia z wyraźną nawiązką** zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stanowi podstawę do nadania stopnia naukowego doktora. **Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Ponadto, dorobek naukowy doktoranta spełnia z wyraźną nawiązką kryterium określone w paragrafie 1 lit. c) Uchwały nr 221/09/RDN02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 27 września 2021 r. w sprawie zaopiniowania Zasad wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. W szczególności publikacja naukowa Z. Łaszczuch, G. Soboń (doktorant oraz promotor) „Dispersion management of a nonlinear amplifying loop mirror-based erbium-doped fiber laser,” Optics Express 29(2), 2690-2702 (2021), która ukazała się w prestiżowym i ogólnie uznawanym w środowisku naukowym optyki ultraszybkiej za opiniotwórcze, 140 pkt. na liście MEiN, zawiera bardzo znaczącą część wyników rozprawy, a od 2021 r. do dnia ukończenia niniejszej recenzji była cytowana 16 razy (z wyłączeniem cytowań własnych). Świadczy to o znaczącym oddziaływaniu wyników rozprawy na środowisko naukowe. **Na tej podstawie wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.**

Mariusz Klimczak