

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Szewczyk

pt.: „Spectral conversion of ultrashort laser pulses in nonlinear optical fibers”.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Szewczyk p.t. „Spectral conversion of ultrashort laser pulses in nonlinear optical fibers”. Funkcję promotora doktoratu pełnił dr hab. inż. Grzegorz Soboń.

Recenzja została opracowana na prośbę dr hab. inż. Ireneusza Jabłońskiego, prof. uczelni, Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Politechniki Wrocławskiej.

1. Wstęp i tematyka pracy

Źródła koherentne w zakresie średniej podczerwieni są obiektem intensywnych badań, wynikających z potrzeb w zakresie metrologii i biomedycyny. W szczególności dotyczy to obrazowania biomedycznego, wymagającego stabilnych źródeł o dużym stopniu koherencji. Obecne poszukiwania, jak słusznie zauważa Autorka, dotyczą długości fali 1300 nm i 1700 nm, a jak wiadomo w tych zakresach nie ma wydajnych (1,3 μm) lub brak (1,7 μm) przejść laserowych w obrębie poziomów energetycznych lantanowców. W efekcie poszukuje się rozwiązań bazujących na światłowodach fotonicznych PCF (ang. Photonic-Crystal Fiber) i ich unikalnych właściwościach kształtowania dyspersji i pola modu, co w połączeniu z obecnie dostępnymi laserami femtosekundowymi pozwala na wykorzystanie efektów nieliniowych do generacji wąskopasmowych impulsów w zakresach niedostępnych w klasycznych układach. Efekty nieliniowe umożliwiają generację impulsów, przesuniętych spektralnie, ale także ich poszerzenie (SC) i kontrakcję (SPM). Optymalizacją efektów nieliniowych w celu uzyskania w pełni światłowodowych wąskopasmowych źródeł dedykowanych na zakres średniej podczerwieni zajmowała się mgr inż. Olga Szewczyk.

2. Cel rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej była analiza teoretyczna, opracowanie i praktyczna weryfikacja możliwości konstrukcji nowych źródeł promieniowania laserowego pracujących w zakresie 1,6-2,0 μm , opartych o wykorzystanie efektu konwersji spektralnej, występującej w procesie pompowania impulsowego nieliniowych światłowodów mikrostrukturalnych (PCF). Motywacją do podjęcia tej tematyki było poszukiwanie źródeł do zastosowań obrazowania biomedycznego, pracujących przy długości fali 1700 nm. Doktorantka zaproponowała następującą tezę pracy doktorskiej:

1. Przesunięte spektralnie solitony generowane w reżimie dyspersji anomalnej mogą mieć również dobrą stabilność jak impulsy supercontinuum generowane w zakresie normalnym i mogą być używane jako źródła do zadawania tulowych wzmacniaczy światłowodowych.
2. Zjawisko samo-przesunięcia częstotliwości solitonu (ang. SSFS - Soliton Self-Frequency Shift) umożliwia generowanie przesuniętych spektralnie wąskopasmowych solitonów.

W celu udowodnienia tezy pracy zaproponowano realizację następujących zagadnień badawczych obejmujących:

1. Analizę zjawiska konwersji widmowej w krzemionkowym światłowodzie mikrostrukturalnym przy pompowaniu laserami światłowodowymi domieszkowanymi iterbem i erbem.
2. Charakterystykę szumów efektów nieliniowych dla samo-przesunięcia częstotliwości solitonu (SSFS) generowanego we włóknie z dyspersją anomalną i supercontinuum (SC) we włóknie z dyspersją normalną.
3. Analizę numeryczną efektu kompresji spektralnej w światłowodzie o zmiennej dyspersji.
4. Budowę układu źródła laserowego o wąskiej linii emisyjnej, przestrajanego w zakresie długości fali 1650-1900 nm z możliwością wzmocnienia.

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, a Doktorantka na każdym etapie analizuje wyniki symulacji i pomiarów, wyciągając wnioski skutkujące kolejnym krokiem badawczym.

Uważam, że teza i zakres pracy zostały sformułowane prawidłowo, wychodzą one naprzeciw wskazanym wyzwaniom badawczym i aplikacyjnym (np. źródła OCT) oraz znajdują się w obrębie dyscypliny naukowej Doktorantki.

3. Układ pracy

Rozprawa doktorska, została napisana w klasycznej formie w postaci opracowania, liczącego 124 strony i podzielonego na 6 rozdziałów obejmujących wprowadzenie (rozd. 1), część teoretyczną (rozd. 2) i eksperymentalną (rozd. 3-5), zakończoną wnioskami zamieszczonymi w rozdz. 6. Dodatkowo wyeksponowano takie elementy jak: spis skrótów, streszczenie, bibliografię (193 pozycje) oraz dorobek naukowy Doktorantki.

W rozdziale 2 zawarto podstawy teoretyczne na temat propagacji ultrakrótkich impulsów w światłowodzie, uwzględniając w szczególności wpływ efektów nieliniowych i dyspersji na charakterystyki czasowe i spektralne impulsu. W konsekwencji scharakteryzowano właściwości włókna PCF, w szczególności reżim dyspersji normalnej i anomalnej, i ich wpływ na efekty nieliniowe samo-przesunięcie częstotliwości solitonu (SSFS) i superkontinuum, podając przykłady przeprowadzonych symulacji numerycznych czasowo-spektralnych impulsu. Kolejno opisano metodykę charakteryzacji krótkich impulsów laserowych, stosowanych w rozprawie, obejmujących dyspersyjną transformatę Fouriera (DFT), pomiar koherencji (pulse-to-pulse), technikę FROG (ang. Frequency Resolved Optical Gating) oraz analizę szumów amplitudowych. W rozdziale 3 Doktorantka przechodzi do realizacji celów pracy i analizuje efekt pompowania światłowodu mikrostrukturalnego włóknowym laserem iterbowym i erbowym, uzyskując możliwość strojenia spektralnego generowanych solitonów oraz charakteryzując ich parametry jakościowe. Na tej podstawie formułuje kolejne zadanie (rozd. 4) porównując właściwości emisyjne wzmacniacza tulowego zadawanego dwoma różnymi źródłami SSFS oraz superkontinuum. Źródła te projektuje wykorzystując dwa światłowody PCF o zadanych charakterystykach dyspersyjnych pompowanych w reżimie odpowiednio anomalnym (SSFS) i normalnym (ANDi-SC), analizując ich charakterystyki spektralne, koherencję i pomiar szumu (SNR). Właściwości te skłaniają Autorkę do budowy układu zadawania wzmacniacza tulowego źródłem superkontinuum i SSFS (generacja laserem EDFL). Analizuje uzyskane widma w dziedzinie czasu i częstotliwości, dyskutując ich cechy wynikające z procesów przejść emisyjnych T_m i właściwości źródeł zadających. Z tego też względu w rozdziale 5 proponuje uzyskanie wąskiej linii emisyjnej ($\sim 1,7 \mu\text{m}$), wykorzystując efekt kompresji spektralnej impulsu we włóknie o zmiennej dyspersji. Doktorantka opracowała

model numeryczny na podstawie którego przedstawiła symulacje konstrukcji włókien składających się z odcinków o różnej długości, uzyskując kompresję linii emisyjnej poniżej 1 nm. Wygenerowane solitony w zakresie $\sim 1,7 \mu\text{m}$ zostały następnie wzmocnione w układzie wzmacniacza tulowego uzyskując parametry aplikacyjne w technice obrazowania OCT.

Uważam, że tak przedstawiony układ rozprawy jest przemyślany i logiczny, co jednoznacznie pozwala na ocenę osiągnięć mgr inż. Olgi Szewczyk.

4. Ocena pracy

4.1 Oryginalność i zdolności doktoranta do formułowania zadań i prowadzenia dyskusji naukowej

Oryginalność pracy z punktu widzenia optymalizacji i uzyskania wąskopasmowego ($\sim 1 \text{ nm}$) źródła przestrajanego w zakresie $\sim 1,6\text{-}1,9 \mu\text{m}$, jako potencjalnego zastosowania w diagnostyce OCT, w opinii recenzenta, nie polega dyskusji. Jednak najważniejsze osiągnięcia Doktorantki dotyczą przeprowadzonych symulacji i pomiarów parametrów impulsów propagowanych w światłowodach mikrostrukturalnych, prowadzących do budowy układów generacji tego typu solitonów. Punktem wyjścia było wykorzystanie efektu samo-przesunięcia częstotliwości solitonu w zaprojektowanym włóknie PCF o anomalnej dyspersji powyżej długości fali 945 nm (rys. 3.1) i zastosowanie laserów światłowodowych domieszkowanych iterbem (YDFL, $\lambda = 1,04 \mu\text{m}$) i erbem (EDFL, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$) do generacji przestrajalnych solitonów, odpowiednio w zakresie $1,42\text{-}1,67 \mu\text{m}$ i $1,70\text{-}1,95 \mu\text{m}$ (rys. 3.5). Doktorantka pokazała możliwość przestrajania generacji solitonu zmieniając moc lasera wprowadzaną do włókna PCF i uzyskując wydajność konwersji ok. 30%, koherencję $V = 0,9$ (EDFL) oraz współczynnik ekstynkcji polaryzacji (PER) równy 14 dB ($\lambda = 1460 \text{ nm}$) i 27 dB ($\lambda = 1900 \text{ nm}$). Nadto, zaprezentowała możliwość generacji solitonów w zakresie $1,95 \mu\text{m} - 2,07 \mu\text{m}$ stosując różne długości włókna PCF odpowiednio 150 cm – 275 cm. W efekcie scharakteryzowany został pierwszy światłowód PCF o strukturze zoptymalizowanej dla dwóch długości fali lasera pompującego. Doktorantka ocenia uzyskane wyniki, stwierdzając przydatność przestrajalnych źródeł solitonowych z punktu widzenia zastosowań spektroskopowych. Na tej podstawie przechodzi do analizy zagadnienia postawionego w tezie pracy dotyczącego uzyskania impulsu o natężeniu, stabilności i poziomie szumu porównywalnym ze źródłami uzyskiwanymi w układach ANDi-SC. W pracy Autorka proponuje, że solitony mogą być lepszym źródłem do zastosowań w spektroskopii niż źródła szerokopasmowe generowane w zakresie normalnym dyspersji (ANDi-SC), dokonując szczegółowego porównania źródła SSFS i ANDi-SC. Oryginalność tego podejścia polega na opracowaniu dwóch światłowodów PCF z dyspersją normalną i anomalną (rys. 4.3) o bardzo zbliżonej strukturze (rys. 4.2) oraz budowy układu oscylatora erbowego – wspólnego dla dwóch rodzajów światłowodów (rys. 4.5). Uzyskano źródła o zakresie spektralnym do $2,1 \mu\text{m}$ o dużym stopniu koherencji $V = 0,8\text{-}1$ ($1,8\text{-}2,1 \mu\text{m}$, ANDi) i $0,9$ ($1,7\text{-}1,9 \mu\text{m}$, SSFS) i wartości SNR odpowiednio 190 i powyżej 200. W konsekwencji, oba źródła użyto do zadawania światłowodowego wzmacniacza tulowego (T DFA) otrzymując dla źródła ANDi-SC impulsy o długości 92 fs, mocy 350 mW i energii 2,8 nJ, a w przypadku źródła SSFS ($\lambda = 1,950 \mu\text{m}$) odpowiednio: 80 fs, 405 mW i 3,24 nJ. Na uwagę zasługuje budowa układu T DFA oraz charakteryzacja impulsów w dziedzinie czasu i częstotliwości z uwzględnieniem ich obrazowania techniką FROG (rys. 4.12 - 4.13). Ponadto

dokonano charakteryzacji zintegrowanej wartości parametru RIN mającego wartość dla solitonów i SC porównywalną z pompującym laserem femtosekundowym EDFL $\sim 0,022\%$. Przy czym dla wzmocnionych źródeł wartość parametru zintegrowanego RIN wyniósł około $0,150\%$. Doktorantka wyjaśniła pochodzenie wzrostu tego parametru analizując wartość RIN dla dwóch laserów pompujących 1550 nm i 980 nm pracujących w reżimie fs i CW. W ten sposób udowodniła postawioną tezę, że solitony generowane w reżimie dyspersji anomalnej mają równie dobre parametry (a nawet nieco lepsze – tabela 4.2) jak źródło supercontinuum generowane w zakresie normalnej dyspersji.

Wniosek ten pozwolił na dalszy etap badań, czyli realizację układu kompresji solitonów SSFS konieczną z punktu widzenia zastosowań OCT. Doktorantka kierując się publikacją N. Nishizawa (Optics Express vol.18, No. 11) opracowała model pozwalający na wyznaczenie parametrów solitonu na podstawie zmiennej wartości średniej współczynnika dyspersji β_2 , wykazując możliwość uzyskania impulsów o szerokości spektralnej $0,6\text{ nm}$ ($\lambda = 1730\text{ nm}$, rys. 5.3). Kolejno dokonała weryfikacji analitycznej modelu proponując 5 konfiguracji włókna CPF o różnych długościach odcinków jednomodowych (SMF) i z przesuniętą dyspersją (DSF) o łącznej długości od 100 do 400 m , uzyskując średnią wartość dyspersji β_2 ok. $-35\text{ ps}^2/\text{km}$. Ostatecznie w tabeli 5.2 zaproponowała optymalną konstrukcję włókna CPF (822 m , $\beta_2 = -39\text{ ps}^2/\text{km}$, $\lambda = 1730\text{ nm}$), analizując wpływ wartości poszerzenia czasowego impulsu oraz wartości rzędu solitonu na jego szerokość spektralną ($0,6\text{ nm}$) przy wprowadzonej mocy równej 170 W . Doktorantka przeprowadziła weryfikację eksperymentalną tych wyników budując układ (rys. 5.10) w konfiguracji włóknowej (all-fiber) dbając jak poprzednio o kształt impulsu i moc oscylatora EDFL. Zmierzone charakterystyki spektralne wygenerowanych solitonów SSFS przed i po kompresji, miały szerokość spektralną w zakresie $0,43\text{--}1,11\text{ nm}$, osiągając stopień kompresji odpowiednio $37,2$ i $13,5$. Należy tu podkreślić zgodność wyników eksperymentalnych i symulacji szerokości spektralnej solitonów dla centralnej długości fali 1652 , 1730 i 1839 nm , pokazane na rys. 5.13. Ostatecznie Doktorantka zaprezentowała możliwość wzmocnienia wygenerowanych solitonów w układzie wzmacniacza tulowego skonfigurowanego dla długości fali 1750 nm . Udowodniła w ten sposób możliwość budowy źródeł typu sweep-source” uzyskując maksymalną moc wynoszącą 446 mW dla długości fali 1770 nm .

Na podstawie powyższego stwierdzam, że tematyka rozprawy dotyczy istotnego problemu badawczego i aplikacyjnego konstrukcji nowych ($\lambda \sim 1750\text{ nm}$) wąskopasmowych ($<1\text{ nm}$) źródeł do zastosowań w obrazowaniu biomedycznym OCT. Proponowane rozwiązanie jest oryginalne, a Doktorantka formułuje i dyskutuje każdy etap swoich osiągnięć i kierunków badań w oparciu o aktualną literaturę.

4.2 Znaczenie i osiągnięcia pracy doktorskiej

Znaczenie wyników badań przedstawionych w dysertacji dotyczy zarówno aspektu naukowego jak i aplikacyjnego. Mocną stroną przeprowadzonych badań naukowych są symulacje numeryczne, weryfikowane eksperymentalnie, prowadzące do zbudowania w pełni światłowodowego wąskopasmowego źródła do zastosowań w nowym oknie diagnostycznym położonym około 1700 nm . Do osiągnięć pracy zaliczam:

1. Zaprezentowanie światłowodu PCF o strukturze zoptymalizowanej (ZDW~950 nm) dla dwóch długości fali pompowanego laserami YDFL i EDFL oraz porównanie właściwości wygenerowanych solitonów. Wyniki opublikowano w Journal of Lightwave Technology.
2. Dokonanie porównania parametrów źródeł generowanych w dwóch światłowodach PCF o dyspersji anomalnej (ZDW = 1,3 μm , SSFS) i normalnej (dla $\lambda < 2 \mu\text{m}$, ANDi-SC), wzbudzanych jednocześnie tym samym impulsowym laserem erbowym (50 fs, 125 MHz). Uzyskanie lepszych parametrów w przypadku solitonów (SNR > 200, węższe linie $\sim\lambda = 1,9\mu\text{m}$). Zastosowanie źródeł SSFS i ANDi-SC do zadawania włóknowego wzmacniacza tulowego, uzyskując odpowiednio impulsy o długości 80 fs i 92 fs oraz mocy 405 mW i 350 mW. Wyniki opublikowano w Optics Express.
3. Opracowanie modelu i analiza numeryczna światłowodów o zmiennej dyspersji umożliwiających uzyskanie kompresji spektralnej solitonu w zakresie 1,3-11,5 nm ($\lambda=1730\text{nm}$). Propozycja oryginalnej konstrukcji włókna o wartości średniej dyspersji zależnej od długości światłowodu, składającego z różnych odcinków włókien DSF zespawanych ze sobą na przemian z włókami SMF (CPF- comb-profile fiber). Uzyskanie kompresji solitonów o szerokości połówkowej 0,43-1,11 nm, generowanych a zakresie spektralnym 1622-1900 nm.
4. Uzyskanie wzmocnienia skompresowanych solitonów w pełni światłowodowym układzie wzmacniacza TDFA pracującego w zakresie 1650-1850 nm, uzyskując wartość 446 mW ($\lambda\sim 1750 \text{ nm}$). Osiągnięcia 3 i 4 opublikowano w Optics & Laser Technology.

5. Uwagi wynikające z lektury rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Szewczyk została zrealizowana poprawnie. Zaplanowano kompleksowe podejście do rozwiązania problemu badawczego przestrajalnych źródeł impulsowych w zakresie średniej podczerwieni, realizując konkretną potrzebę konstrukcji źródła (~1,7mm) o cechach wymaganych w technice OCT. Doktorantka zrealizowała pracę w oparciu o najnowszą literaturę i współpracę w ramach projektów pomiędzy wyróżniającymi jednostkami badawczymi Wydziałem Podstawowych Problemów Techniki, Politechniki Wrocławskiej, Laboratorium Technologii Światłowodów UMCS i firmą Fibrain. Zwróciłem uwagę na następujące aspekty dyskusyjne, które nie wpływają na wysoki poziom merytoryczny pracy:

1. Proszę o komentarz różnic szerokości połówkowych generowanych solitonów przy pompowaniu laserami iterbowym i erbowym (rys. 3.5). Ponadto w przypadku pompowania EDFL powyżej 100 mW zaobserwowano spadek wydajności konwersji (rys. 3.6a), dla układu YDFL wartości te są mniej rozbieżne?
2. Proszę o komentarz do zjawiska „soliton trapping” w kontekście poszerzenia się pasma solitonu w kierunku dłuższych fal – rys. 3.11 (oś szybka).
3. Czy można mówić o wpływie absorpcji włókna PCF w zakresie 1,8-2 μm na generację solitonów w tym zakresie spektralnym (rys. 4.1)?
4. Opis parametrów technologicznych wytworzenia włókien PCF jest lakoniczny i można by było go pominąć (nie jest przedmiotem doktoratu), ale brakuje informacji na temat symulacji numerycznych tych włókien i kształtowania profilu dyspersji.

5. Czy mniejsze natężenie źródła superkontinuum i niższą wartość SNR (rys. 4.6 i 4.9-10) w stosunku do solitonów można traktować jako zasadniczą zaletę źródeł SSFS?
6. Drobne błędy edycyjne np. opis rys. 3.11 i 4.4., równanie 5.2.

6. Dorobek i doświadczenie naukowe

Doktorantka w załączniku do rozprawy zawarła informacje na temat swojej aktywności naukowej związanej z doktoratem, obejmującej: 3 artykuły z współczynnikiem wpływu IF (Optics & Laser Technology, Optics Express i Journal of Lightwave Technology), 2 publikacje konferencyjne EPJ Web of Conferences indeksowane w Scopus, 8 referatów (np. Europhoton, EOS Annual Meeting, PKOpto, STL, Opto) i 5 posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz 1 zgłoszenie patentowe („Pasywny nieliniowy moduł światłowodowy”, 2022). Tematyka wszystkich pozycji jest związana z rozprawą doktorską, a wskazane 3 publikacje IF (2021-2023) były cytowane już 7 razy. Praca doktorska była realizowana w ramach 3 projektów: NCN Preludium (kierownik O. Szewczyk) oraz dwóch NCBR we współpracy z UMCS i Fibrain Sp. z o.o. Ponadto Doktorantka uczestniczyła w innych projektach, szkołach naukowych (Europhoton Summer School, All-Stars Virtual Siegman School, ELISS Summer School 2019) i odbyła 3-tygodniowy staż w Umeå University. Osiągnięcia były zauważone za granicą na OPTICA IONS Ireland 2021 Conference (Best Oral Presentation) i w macierzystej jednostce (2 razy Nagroda Rektora PWr i Dziekana Wydziału). Doktorantka zamierza kontynuować badania nad optymalizacją źródła dla OCT oraz realizacji konwersji widmowej we włóknach fluorkowych wzbudzanych długością fali 2 mm.

Konkluzja

Osiągnięcia zaprezentowane w pracy doktorskiej mgr inż. Olgi Szewczyk pozwalają mi jednoznacznie stwierdzić, że spełnia ona warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz.U.2020 poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Mając na uwadze wysoki poziom naukowy pracy, dodatkowo udokumentowany publikacjami JCR i współpracą w ramach projektów, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Kraków, 9.10.2023 r.

Dominik Doroz