

Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgra Mattii Longobucco

Study of Solitonic Steering of Femtosecond Pulses in Soft Glass Dual-Core Optical Fibers

Rozprawa doktorska mgra Mattii Longobucco została wykonana pod kierunkiem prof. dra hab. Ryszarda Buczyńskiego oraz dra Ignáca Bugára, jako promotora pomocniczego, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Dotyczy ona badania propagacji krótkich impulsów w dwurdzeniowym światłowodzie (DCF — Double-Core Fiber) wykonanym ze szkła o silnych właściwościach nieliniowych. Impulsy te mają charakter solitonów i, w zależności od ich mocy, możliwe jest zablokowanie ich propagacji w jednym z rdzeni zamiast okresowego transferu energii, jak to ma miejsce w standardowych falowodach sprzężonych o właściwościach liniowych.

Struktury DCF mają zastosowanie w wielu obszarach z dziedziny fotoniki — sensorach światłowodowych, laserach włóknowych, telekomunikacji optycznej. W szczególności, opisane w pracy zjawiska dotyczą optycznego przełączania impulsów świetlnych i mają zastosowanie w multiplekserach i demultiplekserach. Propagacja solitonów i ich przełączanie pomiędzy rdzeniami w takich światłowodach były badane już wcześniej w strukturach opartych na kryształach fotonicznych z rdzeniami powietrznymi (PCF — Photonic-Crystal Fibers), do czego doktorant odniósł się w rozprawie. Jednakże istnienie wnęk powietrznych w światłowodach PCF powoduje, że bardzo trudno utrzymać ich jednorodność podczas procesu wytwarzania i, w efekcie, efektywność przełączania propagowanych pulsów nie jest zbyt wysoka. Z tego powodu przedmiotem recenzowanej pracy są światłowody nieposiadające wnęk powietrznych, wykonane z dwóch rodzajów miękkiego szkła. Charakteryzują się one większą jednorodnością i symetrią, co korzystnie wpływa na ich parametry optyczne. Ponadto zastosowanie rdzeni szklanych daje szersze pole manewru w zakresie dobrania pożądanej dyspersji materiałowej, co ułatwia lepsze dostrojenie parametrów światłowodu.

W świetle powyższego, mogę stwierdzić, że podjęta tematyka jest istotna i przedstawione badania są w wystarczającym stopniu nowatorskie i oryginalne. Sama rozprawa doktorska prezentuje i udowadnia trzy tezy:

1. światłowody dwurdzeniowe ze szkieł miękkich mogą posłużyć jako ośrodki do sterowanego energią przełączania solitonów femtosekundowych w zakresie bliskiej podczerwieni (1560 nm);
2. zoptymalizowane światłowody DCF umożliwiają osiągnięcie wysokiego kontrastu samoprzełączania solitonów w szerokim zakresie spektralnym do długości fali 1700 nm;
3. w zaprezentowanych światłowodach negatywne efekty asymetrii rdzeni mogą zostać zniwelowane przez nieliniowy efekt Kerra, co pozwala na poprawę efektywności przełączania w zakresie długości fali 1560 i 1700 nm.

Twierdzenia te podparte są szczegółową analizą teoretyczną i eksperymentalną dwóch generacji nieliniowych światłowodów DCF. Przedstawione w rozprawie wyniki zostały wcześniej opublikowane

w siedmiu recenzowanych artykułach naukowych, z których w sześciu doktorant jest pierwszym autorem. Uważam to za bardzo dobry dorobek. We wstępie do każdego rozdziału rozprawy wymienione zostały publikacje zawierające przedstawione w nim treści, co potwierdza, że zostały one już wcześniej zweryfikowane przez niezależnych recenzentów.

Sama rozprawa zawiera wyodrębnioną treść wstępną, cztery rozdziały stanowiące jej zasadniczą część oraz podsumowanie. W wstępie doktorant prezentuje tezy pracy oraz uzasadnia znaczenie podjętej tematyki oraz uzyskanie wyników. W tym miejscu pewien niedosyt budzi bardzo pobieżne przedstawienie potencjalnych zastosowań badanych struktur — zostały one jedynie skrótowo wymienione. Nie kwestionując wartości naukowej przedstawionych wyników, odczuwam brak nieco bardziej wnikliwego zgłębienia korzyści (choćby potencjalnych), jakie mogłyby wynikać z wdrożenia opisanych przełączników światłowodowych.

Rozdział pierwszy rozprawy prezentuje obszerną teorię powstawania i propagacji solitonów w światłowodach nieliniowych. Jak doktorant sam przyznaje, rozdział ten ma charakter odtwórczy, ale w bardzo wyczerpujący sposób prezentuje podstawy teoretyczne dla wyników przedstawionych w dalszej części pracy. Składa się on z pięciu sekcji. Pierwsza z nich opisuje proces formowania solitonów. Druga zawiera teorię propagacji solitonu w światłowodzie ze wskazaniem konkretnych zjawisk na nią wpływających. Ponadto w tej sekcji zdefiniowane jest istotne pojęcie rzędu solitonu (*soliton number*). Sekcja 1.3 opisuje propagację impulsów w dwurdzeniowym światłowodzie i formułuje formalizm teorii modów sprzężonych. Tutaj też jest opisane zjawisko rozczepienia solitonów, które negatywnie wpływa na propagację impulsów i — w moim rozumieniu — jest podstawową przyczyną ograniczenia długości światłowodu, w której można zaobserwować zjawisko przełączania. Kolejna sekcja opisuje wpływ efektów nieliniowych i energii solitonów na ich samopułapkowanie — zjawisko, które stanowi główny przedmiot badań prezentowanych w rozprawie. Ostatnia sekcja rozdziału pierwszego jest krótką prezentacją dwurdzeniowych światłowodów PCF.

Rozdziały od drugiego do czwartego stanowią oryginalny wkład doktoranta. W rozdziale drugim zaprezentowana jest numeryczna analiza właściwości materiałów stanowiących potencjalne kandydatury do wykonania silnie nieliniowych dwurdzeniowych światłowodów (sekcje 2.1 i 2.2), których konkluzją był wybór szkieł PBG-08 na rdzeń i UV-710 jako płaszczy. Sekcja 2.3 opisuje numeryczną analizę propagacji w różnych strukturach światłowodów dwurdzeniowych (PCF i DCF) bez uwzględnienia efektów nieliniowych. Szczególną wagę przyłożono określeniu dyspersji propagowanego światła w zakresie długości fali 1000 – 3000 nm oraz wyznaczeniu drogi sprzężenia obu rdzeni. Właściwa propagacja solitonów przedstawiona została w sekcji 2.4, gdzie zilustrowane są rozkłady czasowe impulsów na długości światłowodu w trzech przypadkach: światłowodów PCF z rdzeniami powietrznym i szklanym oraz światłowodu DCF bez wyróżnionej struktury kryształu fotonicznego. Pierwsza ilustracja tej sekcji — 2.15 — stanowi niejako legendę i wyjaśnienie jaki sposób należy interpretować kolejne wykresy. Jest to duże ułatwienie pomagające w zrozumieniu zaprezentowanych dalej wyników. Te jasno pokazują, że zastosowanie światłowodu PCF wykonanego z dwóch rodzajów szkieł nie jest w stanie zapewnić jednoznacznej kumulacji propagowanej energii w jednym z rdzeni i co za tym idzie, efektywnego przełączania propagowanego impulsu. Dopiero w przypadku światłowodu DCF udało się uzyskać wysoki kontrast przełączania przy mniejszych mocach niż w przypadku światłowodu PCF z rdzeniem powietrznym.

Także w rozdziale drugim opisana jest skrótowo technologia wykonania światłowodów PCF i DCF. Uważam ten opis za ważny i potrzebny, jednakże odbiega on tematycznie od reszty rozdziału. W mojej

ocenie byłoby znacznie lepiej, gdyby rozpoczynał on rozdział trzeci poświęcony badaniom eksperymentalnym. Przedstawione w sekcji 2.5 pomiary asymetrii rdzeni mają bezpośrednie przełożenie na wyniki zaprezentowane w rozdziale trzecim.

Rozdział ten opisuje pomiary właściwości liniowych i nieliniowych światłowodów DCF. W sekcji 3.1 wyznaczono drogę sprzężenia rdzeni dla długości fali 1560 nm, a w sekcji 3.3 zanalizowano proces przełączania impulsu pomiędzy rdzeniami. Także w tej sekcji porównano wyniki eksperymentalne z prostym modelem teoretycznym. Zbadano dwie generacje światłowodów i zadowalający kontrast przełączania otrzymano jedynie dla generacji drugiej, która cechowała się mniejszą asymetrią rdzeni. W sekcji 3.4 przeprowadzono analogiczne eksperymenty dla długości fali 1700 nm, która pozwoliła na zaobserwowanie pożądaných efektów także w światłowodzie pierwszej generacji.

Zarówno rozdział drugi jak i trzeci poświęcone były zjawisku samoprzełączania impulsów uzależnionego od ich mocy. Rozdział czwarty opisuje eksperymentalne badanie przełączania wymuszonego, gdzie poza propagowanym solitonem, światłowod pobudzany jest impulsem sterującym o znacznie mniejszej długości fali. Od jego mocy uzależniony jest efekt przyporządkowania impulsu do jednego z rdzeni światłowodu. W tym przypadku uzyskano bardzo wysoki kontrast przełączania dla długości fali 1560 nm.

Rozdział piąty jest podsumowaniem całości wyników. Ponadto praca zawiera dodatek opisujący metodę numeryczną zastosowaną do uzyskania wyników zaprezentowanych w rozdziale drugim.

Rozprawa jako całość jest rzetelną analizą teoretyczną i eksperymentalną zjawiska przełączania impulsów solitonowych w światłowodach dwurdzeniowych. Przedstawiona teoria i wyniki świadczą o dogłębnym zrozumieniu tematu przez doktoranta i poświadczają jego warsztat naukowy. W pracy zacytowane zostały 293 artykuły naukowe, co stanowi bardzo bogate zestawienie literatury. Metodyka zastosowana w obliczeniach numerycznych oraz badaniach eksperymentalnych została dobrze przedstawiona (szczegółowo w dodatku) i nie budzi zastrzeżeń. W części numerycznej doktorant wykonał najpierw obliczenia dla światłowodu PCF z rdzeniami powietrznymi, które były rozpatrywane już wcześniej przez innych badaczy. Dopiero w następnym kroku podjął się on analizy nowych struktur. Prace eksperymentalne zostały przeprowadzone przy wzięciu pod uwagę ograniczeń technologicznych (np. występowanie nieintencjonalnej asymetrii rdzeni) oraz ograniczeń aparatury pomiarowej.

Pomimo, że jakość naukowa przedstawionych badań nie budzi wątpliwości, w kilku miejscach pojawiają się wątpliwości, które nie zostały przez autora wyjaśnione. Całość przeprowadzonych analiz zakładała, że w światłowodzie może propagować się tylko jeden mod dla zadanej długości fali. Nigdzie jednak nie zostało potwierdzone, że tak jest w istocie. W sekcji 2.3 zaprezentowano szereg wykresów, których celem było porównanie właściwości dyspersyjnych światłowodów o różnych parametrach. Odniosłem jednak wrażenie, że parametry te zostały dobrane nieco chaotyczne i brak w nich wyraźnej metodyki. W rozdziale trzecim jedynie analiza właściwości liniowych światłowodów została przeprowadzona dla pobudzania każdego z rdzeni niezależnie. Sama propagacja solitonów była analizowana już tylko dla pobudzenia jednego z nich. Brakuje porównania wyników dla drugiego przypadku, bądź jasnego uzasadnienia dlaczego nie zostały one przedstawione.

W rozdziałach trzecim i czwartym pokazano, że zadowalające efekty przełączania solitonów pomiędzy rdzeniami występują tylko dla konkretnych długości światłowodu. Zabrakło jednak jasnego wyjaśnienia dlaczego tak się dzieje. Teoria przedstawiona w rozdziale pierwszym pozwala na pewne

domysły w tym zakresie, jednakże oczekiwałbym rzetelnej analizy wyników eksperymentalnych bezpośrednio w odniesieniu do nich. Brak ten uważam za jeden z największych mankamentów rozprawy. Rozdział czwarty bardzo elegancko opisuje i wyjaśnia rolę fali sterującej dla kontroli przełączania impulsu pomiędzy rdzeniami w oparciu o różnicę efektywnego współczynnika załamania rdzeni i jego zmianę pod wpływem wiązki sterującej. Nie rozumiem jednak dlaczego analogiczne zjawisko nie występuje w przypadku impulsu samosterującego opisanego w rozdziale trzecim. Jeżeli ono ma miejsce, to nie zostało to tak jasno opisane i wyjaśnione jak w rozdziale czwartym. W temacie opisanym w rozdziale czwartym nie rozumiem jeszcze jednego — jeżeli wiązka sterująca niweluje asymetrię rdzeni, to powinniśmy obserwować periodyczny a nie jednokrotny transfer energii pomiędzy rdzeniami. Brakuje mi dogłębnego wyjaśnienia dlaczego nie ma to miejsca w zaprezentowanych wynikach. Ponadto w podsumowaniu rozdziału doktorant pisze, że poprawa symetrii rdzeni zwiększy sprawność i kontrast przełączania impulsów. W moim rozumieniu opisywany efekt wymaga aby rdzenie cechowały się pewnym stopniem asymetrii, w związku z czym bardziej symetryczna struktura może cechować się gorszymi parametrami.

Od strony redakcyjnej praca prezentuje się poprawnie. Jej układ jest zgodny z ogólnie przyjętymi zasadami i całość jest w większości czytelna. Rażą jednak częste drobne błędy interpunkcyjne i językowe — niektóre powtarzane kilkakrotnie (np. *softwares*, *purpose* zamiast *propose*, *Personal Investigator* zamiast *Principal Investigator*) — oraz typograficzne (nadmiarowe myślniki w polskim streszczeniu). Pojedyncze odnośniki do równań i rysunków są niepoprawne (np. na str. 73 mowa o strukturze przedstawionej na rysunku 2.12, a powinno być 2.11; na str. 67 jest odniesienie do dodatku 4.4 podczas gdy w pracy jest on oznaczony jako *Appendix A*). Na znacznej części ilustracji użyte liternictwo jest zbyt drobne i przez to nieczytelne. Także skala wykresów niekiedy dobrana jest w sposób utrudniający zilustrowanie wniosków opisanych w tekście pracy — na przykład wykresy dyspersji dla różnych struktur przedstawione w sekcji 2.3 dużo łatwiej byłoby porównywać między sobą, gdyby ich zakresy były identyczne.

W całej rozprawie bardzo intensywnie wykorzystane są różnego rodzaju akronimy, co nieco utrudnia czytanie osobom, które nie posługują się nimi na co dzień. Na plus jednak należy zaliczyć zestawienie wszystkich najważniejszych skrótów zamieszczone pod koniec pracy, które w znacznej mierze rozwiązuje ten problem. Za nadmiarowe jednak uważam skracanie krótkich i zwięzłych terminów, takich jak *modulation instability* czy *coupling length*, szczególnie gdy nie są one używane wielokrotnie w pojedynczym akapicie.

Podsumowując, stwierdzam, że autor wykazał swoją wysoką wiedzę w zakresie fizyki światłowodów i optyki nieliniowej oraz skutecznie zademonstrował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Sama rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego kontroli propagacji impulsów światła w światłowodach dwurdzeniowych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne, w głównej mierze mające charakter marginalny lub polemiczny, w niewielkim jedynie stopniu obniżają moją wysoką ogólną ocenę przedstawionych badań. W związku z tym, potwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Mattii Longobucco spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.


dr hab. inż. Maciej Dems, prof. ucz.