

dr hab. inż. Karol Tarnowski
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: karol.tarnowski@pwr.edu.pl
tel: +48 71 320 44 41

Wrocław, 11.05.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:
„*Study of solitonic steering of femtosecond pulses*
***in soft glass dual-core optical fibers*”**
mgr. Mattii Longobucco

Rozprawa doktorska mgr. Mattii Longobucco podsumowuje przeprowadzone badania przełączania impulsów femtosekundowych. Rozważane przełączanie jest kontrolowane energią impulsów a zachodzi między rdzeniami światłowodu dwurdzeniowego. Badania prowadzono wykorzystując specjalnie wytworzone światłowody dwurdzeniowe wykonane ze szkła miękkich o wysokiej nieliniowości. Praca powstała na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Ryszarda Buczyńskiego, który pełnił rolę promotora, oraz dr. Ignąca Bugára, który pełnił rolę promotora pomocniczego.

Zagadnienia poruszone w pracy wpisują się w tematykę nieliniowej optyki światłowodowej, która jest nieustannie rozwijającym się obszarem badań. Duże zainteresowanie środowiska wiąże się z oczekiwanymi zastosowaniami w zakresie optycznego ultraszybkiego przetwarzania informacji. W tym świetle zagadnienia rozważane przez Autora są aktualne i wpisują się w intensywnie prowadzone badania w tej tematyce. Świadczy o tym fakt opublikowania wyników uzyskanych w ramach rozprawy w licznych publikacjach w czasopiśmie naukowych o wysokim impact factor (IF). Mgr Mattia Longobucco jest współautorem siedmiu artykułów naukowych opublikowanych w latach 2019-2021 w czasopiśmie z dziedziny optyki (liczby cytowań za bazą Scopus):

- [1] **M. Longobucco**, J. Cimek, L. Curilla, D. Pysz, R. Buczynski I. Bugar, „All-optical switching based on soliton self-trapping in dual-core high-contrast optical fibre,” *Optical Fiber Technology*, 51:48–58 (2019);
11 cytowań, 3 cytowania obce;
- [2] **M. Longobucco**, P. Stajanca, L. Curilla, R. Buczynski, I. Bugar. „Applicable ultrafast all-optical switching by soliton self-trapping in high index contrast dual-core fibre,” *Laser Physics Letters*, 17:025102 (2020);
5 cytowań, 1 cytowanie obce;

- [3] V. H. Nguyen, L. X. The Tai, I. Bugar, **M. Longobucco**, R. Buczynski, B. A. Malomed, M. Trippenbach, „Reversible ultrafast soliton switching in dual-core highly nonlinear optical fibers,” *Optics Letters*, 45:5221-5224 (2020);
7 cytowań, 1 cytowanie obce;
- [4] **M. Longobucco**, I. Astrauskas, A. Pugžlys, N. T. Dang, D. Pysz, F. Uherek, A. Baltuska, R. Buczynski, I. Bugar, „Broadband self-switching of femtosecond pulses in highly nonlinear high index contrast dual-core fibre,” *Optics Communications*, 472:126043 (2020);
5 cytowań;
- [5] **M. Longobucco**, J. Cimek, D. Pysz, R. Buczynski, I. Bugar. „All-optical switching of ultrafast solitons at 1560 nm in dual-core fibers with high contrast of refractive index,” *Optical Fiber Technology*, 63:102514 (2021);
3 cytowania, 1 cytowanie obce;
- [6] **M. Longobucco**, I. Astrauskas, A. Pugžlys, N. T. Dang, D. Pysz, F. Uherek, A. Baltuska, R. Buczynski, I. Bugar, „High contrast all-optical dual wavelength switching of femtosecond pulses in soft glass dual-core optical fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, 39(15):5111-5117 (2021);
1 cytowanie;
- [7] **M. Longobucco**, I. Astrauskas, A. Pugžlys, N. T. Dang, D. Pysz, F. Uherek, A. Baltuska, R. Buczynski, I. Bugar, „Complex study of solitonic ultrafast self-switching in slightly asymmetric dual-core fibers,” *Applied Optics*, 60(32):10191-10198 (2021).

Mgr Mattia Longobucco jest pierwszym autorem w sześciu wymienionych artykułach, co wskazuje na pierwszoplanową rolę Autora w tych pracach. Według bazy Journal Citation Reports współczynniki IF czasopism mieszczą się w przedziale [1,980; 4,142]. Łączny IF opublikowanych prac wynosi 18,966, co daje średnią wartość 2,709.

Główna część rozprawy liczy 136 stron i zawiera 4 rozdziały oraz kończące rozprawę konkluzje. Po głównej części Autor umieścił listę swoich publikacji oraz wystąpień konferencyjnych, podziękowania, dodatek zawierający opis metody rozdzielonego kroku z transformatą Fouriera (*split-step Fourier method*), spisy skrótów, rysunków i tabel oraz bibliografię liczącą 293 pozycje. Tekst uzupełnia rozbudowane wprowadzenie zawierające: streszczenia w językach angielskim i polskim, opis celów i tez, wstęp oraz spis treści. Układ dokumentu zawierającego łącznie 194 strony jest dość złożony, mimo wszystko czytelny.

Wprowadzenie pozwala czytelnikowi szybko odnaleźć się w tematyce rozprawy. Mgr Mattia Longobucco przedstawił cel pracy, którym było zbadanie możliwości przełączania solitonowego impulsów femtosekundowych we, w pełni szklanych, dwurdzeniowych światłowodach o innowacyjnych konstrukcjach. Autor postawił 3 tezy: (i) w światłowodzie dwurdzeniowym, w pełni szklanym, ze szkła miękkich można uzyskać kontrolowane przełączanie solitonów w zakresie bliskiej podczerwieni, (ii) dzięki optymalizacji konstrukcji

światłowodu można uzyskać wysoki kontrast przełączania w szerokim zakresie spektralnym, (iii) wpływ asymetrii rdzenia na efektywność sprzęgania można łagodzić dzięki nieliniowości Kerra. Następnie opisał przyjęte kierunki i metody prowadzenia badań, które prowadziły do potwierdzenia tez rozprawy. W dalszej części wprowadzenia opisano strukturę rozprawy.

W rozdziale 1 (liczącym 50 stron) Autor przedstawia zjawiska związane z nieliniową propagacją światła w światłowodach oraz wielkości wykorzystywane do ich opisu. Następnie skupia się na procesach prowadzących do tworzenia się solitonów optycznych oraz zjawiskach towarzyszących ich propagacji. Opisuje także zasadę działania nieliniowego sprzęgacza kierunkowego, wykorzystując dwa podejścia teoretyczne bazujące na: (i) supermodach światłowodu dwurdzeniowego, (ii) teorii modów sprzężonych. Następnie przedstawia układ sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera wykorzystywany w symulacjach nieliniowej propagacji impulsów w rozważanych światłowodach. W końcowej części rozdziału opisuje stan wiedzy w zakresie przełączania impulsów femtosekundowych w światłowodach dwurdzeniowych. Wskazuje dotychczasowe ograniczenia utrudniające praktyczną realizację opisywanego sterowania, w szczególności konieczność jednoczesnego i precyzyjnego spełnienia warunków dotyczących właściwości liniowych oraz nieliniowych, a także konieczność wytworzenia włókien o wysoce symetrycznych rdzeniach. Ostatecznie wyjaśnia swoje nadzieje na pokonanie tych ograniczeń związane z technologią mikrostrukturalnych światłowodów w pełni szklanych wytwarzanych ze szkła miękkich.

Rozdział ten zawiera wyczerpujące wprowadzenie teoretyczne oraz obszernie podsumowanie przeglądu literatury obejmującego 254 pozycje. Dzięki takiemu wprowadzeniu czytelnik ma możliwość w pełni docenić wagę wyników prezentowanych w dalszej części rozprawy. Jednocześnie Autor nie uniknął pewnych błędów i zbyt dużych uproszczeń. W mojej ocenie największym mankamentem jest brak jednostek przy wprowadzaniu wielkości fizycznych. Podanie jednostek pozwoliłoby uniknąć poniższych błędów lub nieścisłości:

- wielkość A w równaniu (1.1) nie jest amplitudą obwiedni pola elektrycznego (które wyraża się w V/m), chociaż jest do pola elektrycznego proporcjonalna,
- jednostką współczynnika tłumienia α w równaniu (1.36) jest 1/m, a nie w dB/km jak podano w tekście; wielkość α można łatwo przeliczyć na tłumienie wyrażone w dB/km (α_{dB}), jednak w rozprawie nie podano jawnie tej zależności,
- opisując dyspersję trzeciego rzędu na stronie 14, Autor porównuje wielkości, których jednostki są różne „ $\beta_3 < \beta_2$ ”, „ $\beta_3 \approx \beta_2$ ”,
- błędne wyrażenie w równaniu (1.63).

Ponadto, dostrzegłem następujące drobne błędy:

- w równaniu (1.41) jest: „ $= f_R$ ”; powinno być „ $+ f_R$ ”,
- na stronie 35, powtórzona definicja wielkości δ_0 , brak definicji wielkości δ_1 .

W rozdziale 2 (liczącym 42 strony) Autor omawia procedurę optymalizacji konstrukcji dwurdzeniowego światłowodu w pełni szklanego. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale zostały opublikowane w trzech artykułach (*Optical Fiber Technology* w 2019 [1], *Laser*

Physcis Letters w 2020 [2] oraz *Optical Fiber Technology* w 2021 [5]). Mgr Mattia Longobucco wybrał parę szkieł wieloskładnikowych, wytworzonych w Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki Sieci Badawczej Łukasiewicz, o zbliżonych właściwościach reologicznych, zbliżonych współczynnikach rozszerzalności cieplnej, a jednocześnie dużej różnicy współczynników załamania i wysokim nieliniowym współczynnikiem załamania. Następnie określił wymagania jakie powinny spełniać projektowane konstrukcje oraz zaprojektował zoptymalizowane światłowody w pełni szklane z wybranych szkieł miękkich. Przewagą opracowanych konstrukcji nad opisanym w literaturze włóknem o mikrostrukturalnym płaszczu zawierającym kanały powietrzne jest możliwość uzyskania bardziej symetrycznych rdzeni, a co za tym idzie większej efektywności sprzęgania modów prowadzonych w obu rdzeniach. W dalszej części rozdziału Autor opisuje przeprowadzone symulacje numeryczne propagacji nieliniowej światła. Symulacje posłużyły ocenie skuteczności przełączania impulsów o różnych długościach fal (w zakresie 1400 nm – 1800 nm) oraz różnych czasach trwania (w zakresie 75 fs – 150 fs). Największą skuteczność przełączania – mierzoną wielkością SC_E , zdefiniowaną równaniem (2.6) – uzyskano dla impulsów o długości fali 1500 nm i czasie trwania 75 fs na dystansie propagacji 43 mm, przy czym energie pozwalające na przełączanie impulsów wynoszą 53 pJ oraz 65 pJ. Rozdział zamyka opis metod wytwarzania zaprojektowanych światłowodów dwurdzeniowych.

Wyniki przedstawione w tym rozdziale są efektem systematycznych symulacji numerycznych, które pozwoliły zyskać wgląd w dynamikę zjawisk nieliniowych prowadzących do przełączania impulsów. Jednakże, pewne kwestie poruszone w tym rozdziale powinny być szerzej wyjaśnione. Autor wspomina o możliwości włączania opracowanych światłowodów ze szkieł miękkich do standardowych układów telekomunikacyjnych (s. 52, s. 81). W mojej ocenie ta kwestia mogłaby być bardziej szczegółowo rozwinięta, gdyż właściwości szkieł miękkich znacząco różnią się od właściwości szkieł wykorzystywanych obecnie w sieciach światłowodowych. Pewna niekonsekwencja dotyczy też współczynnika wypełnienia (filling factor), który jest wprowadzony początkowo bez definicji (s. 59), następnie jest określany jako Λ/r (s. 61, rys. 2.8), ostatecznie jego wartość (94%) odpowiada stosunkowi $2r/\Lambda$ (s. 63).

W rozdziale 3 (liczącym 26 stron) przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem specjalnie wytworzonych światłowodów dwurdzeniowych. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale zostały opublikowane w trzech artykułach (*Optics Letters* w 2020 [3], *Applied Optics* w 2021 [7], *Optics Communications* w 2020 [4]). Autor opisuje eksperymenty liniowe służące charakteryzacji wytworzonych włókien optycznych, a następnie eksperymenty nieliniowe pokazujące skuteczne przełączanie impulsów między rdzeniami przy pompowaniu na długościach fal 1560 nm oraz 1700 nm. Jednocześnie, eksperymentalnie wyznaczone energie impulsów pozwalające na ich przełączanie są znacząco większe niż energie wyznaczone numerycznie w rozdziale 2. Autor analizuje tę rozbieżność i wyjaśnia, że większa energia impulsów jest konieczna do przełączania impulsów ze względu na ograniczoną efektywność sprzęgania, która wynika z niedoskonałości wytworzonego włókna, co wprowadza asymetrię jego struktury.

W omawianym rozdziale zauważyłem następujące błędy:

- s. 96 – zgodnie z rys. 3.2 okres oscylacji wynosi około 14 mm,
- s. 103 – wielkości β_1 oraz β_2 nie są stałymi propagacji.

W rozdziale 4 (liczącym 10 stron) mgr Mattia Longobucco przedstawia zmodyfikowany koncept przełączania impulsów. Podejście to wykorzystuje dwa impulsy o różnych długościach fal, z których jeden pełni rolę impulsu sygnałowego, a drugi rolę impulsu sterującego. Obecność impulsu sterującego pozwala skompensować różnicę efektywnych współczynników załamania modów w obu rdzeniach wynikającą z asymetrii struktury. W ten sposób zwiększa się efektywność sprzęgania. Zaprezentowane wyniki zostały opublikowane w artykule (*Journal of Lightwave Technology* w 2021 [6]). Opisane w rozdziale podejście stanowi ciekawą i skuteczną próbę rozwiązania problemu asymetrii światłowodu. Pewien niedosyt pozostawia brak symulacji numerycznych odpowiadających opisanemu eksperymentowi.

Podsumowując, rozprawa dokumentuje wiedzę Autora w dyscyplinie oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wyniki przedstawione w rozprawie opisują oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że prace przeprowadzone w ramach rozprawy obejmują zarówno symulacje numeryczne jak i prace eksperymentalne. Jednocześnie wymienione niedoskonałości pracy nie rzutują na wagę osiągnięć mgr. Mattii Longobucco. W związku z powyższym oceniam rozprawę pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuje także o wyróżnienie rozprawy mgr. Mattii Longobucco za skuteczną demonstrację kompensacji asymetrii rdzeni w konfiguracji dwóch impulsów (sterującego i sygnałowego). W tej konfiguracji uzyskano lepszą jakość przełączania, niż w układzie bazującym na samoprzełączaniu impulsu. Ponadto zniekształcenia impulsu sygnałowego są minimalne, a przełączanie zachodzi na krótkim (14 mm) odcinku światłowodu. Wszystkie wyniki rozprawy stanowią istotny wkład w rozwój technik optycznego ultraszybkiego przetwarzania informacji.



dr hab. inż. Karol Tarnowski