

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
***Controlling energy transfer in high-index contrast multicore soft-glass fibers***  
**autorstwa mgr. Le Xan The Tai**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Le Xan The Tai została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. Marka Trippenbacha oraz promotora pomocniczego dr. Nguyen Viet Hunga. Jest ona związana z zagadnieniami dotyczącymi efektów w wielordzeniowych włóknach światłowodowych zbudowanych z miękkiego szkła wykazującego wysoki kontrast współczynnika załamania.

Przedstawiona dysertacja została złożona w klasycznej formie książkowej i liczy 158 stron. Składa się ona z 5-u zasadniczych rozdziałów, streszczeń w języku angielskim i polskim, wstępu oraz wniosków końcowych. Ponadto, na końcu dysertacji Autor umieścił dodatek opisujący i krótko omawiający stosowaną przez niego metodę numeryczną nazywaną „Split-Step Fourier Method”, oraz listy używanych przez niego akronimów, tabel i ilustracji zawartych w pracy. Oprócz tego, rozprawę kończy bibliografia dotycząca tematów omawianych w pracy. Jeśli idzie o tę ostatnią, można tam znaleźć nie tylko pozycje książkowe związane z tematyką rozprawy, ale również oryginalne artykuły opublikowane w czasopismach naukowych, często o dużym uznaniu wśród środowiska naukowego. Kandydat umieścił też tam odnośniki do dwóch prac, których jest współautorem. Zostały one opublikowane w wiodących czasopismach Optics Letters oraz Chaos, Solitons and Fractals. Należy tu też dodać, że Doktorant jest współautorem jeszcze dwóch prac, które nie zostały ujęte w bibliografii, opublikowanych w Optics Letters oraz Optics Express. Zaprezentował też plakat na konferencji IOS 2019 w Szczyrku oraz wygłosił referat na konferencji 12th International Conference on Photonics and Applications 2022 w Wietnamie (jest też współautorem artykułu pokonferencyjnego opublikowanego w wydawnictwie SPIE). Wszystkie one dotyczą tematyki poruszanej w rozprawie. Wszystko to pokazuje, że tematyka dysertacji leży w jednym z głównych nurtów badań w zakresie fizyki światłowodów.

Wracając do omówienia poszczególnych rozdziałów składających się na przedstawioną rozprawę, pierwszy z nich ma charakter wprowadzający do zagadnień poruszanych w dysertacji. Przedstawia on podstawowe zagadnienia dotyczące nieliniowych efektów optycznych, koncentrując się

na efektach drugiego rzędu oraz trzeciego rzędu, głównie związanych z nieliniowością Kerra. Następnie Autor prezentuje jak nieliniowe równanie Schrödingera pozwala opisać rozchodzenie się impulsów światła w światłowodach, w tym światłowodach o podwójnym rdzeniu oraz w sprzęgaczach optycznych. Podaje też podstawowe informacje związane z solitonami rozchodzącymi się we włóknach. Na końcu rozdziału Autor prezentuje skrótowo podstawy tematyki światłowodów typu kryształów fonicznych.

Rozdział drugi p.t. *Optical switching in symmetrical dual-core highly nonlinear optical fibers* dotyczy pierwszego etapu planu badawczego Doktoranta. Część zaprezentowanych tam wyników została opublikowana w pracy *Optics Letters* **45**: 5221 (2020), której Doktorant był drugim z 7-u współautorów. Przedstawione tam rozważania dotyczą przełączania optycznego w symetrycznych światłowodach fonicznych z podwójnymi rdzeniami, wykazującymi silne nieliniowości optyczne. Autor koncentruje się na sytuacji gdy jedna wiązka światła zostaje wprowadzona do jednego z wejść układu światłowodowego. Bada i znajduje on warunki, dla których mamy do czynienia ze stabilną transmisją światła. Znajduje też wartości progowe parametrów opisujących układ – mowa tu o progach pomiędzy oscylacjami, przełączaniem a samo-pułapkowaniem w obu kanałach transmisji. Zostały tu też uwzględnione efekty wewnętrznej dyspersji. Co istotne, otrzymane przez Kandydata wyniki teoretyczne wykazują dużą zgodność z rezultatami rzeczywistych eksperymentów.

W rozdziale trzecim zatytułowanym *Self-trapping and switching in asymmetrical dual-core highly nonlinear fibers*, Doktorant kontynuuje rozważania dotyczące światłowodów z podwójnym rdzeniem omawianych wcześniej. Koncentruje się on na sytuacji gdy rdzenie nie są identyczne. Zakłada, że femtosekundowe impulsy są wprowadzane do jednego rdzenia i stara się zidentyfikować przejścia między różnymi reżimami dynamicznymi, gdy obserwujemy oscylacje międzyrdzeniowe, samouwięzienie w rdzeniu poprzecznym i zatrzymanie impulsu w rdzeniu wzbudzonym. Pokazuje, że obserwowane przejścia mają charakter solitonów i mogą być kontrolowane przez energię impulsów. Autor bada również wpływ asymetrii i nieliniowości we włóknach oraz szerokości impulsu na dynamikę układu. Ponownie, jak w poprzednim rozdziale, wykazano tu wysoką zgodność pomiędzy przeprowadzonymi eksperymentami a uzyskanymi wynikami symulacji. Wyniki tutaj przedstawione zostały opublikowane w pracy *Chaos, Solitons and Fractals* **167**: 113045 (2023), w której mgr Le Xuan The Tai jest drugim z dziesięciu autorów.

Rozdział czwarty p.t. *Control of dual-wavelength switching in asymmetric dual-core fiber* stanowi rozszerzenie dyskusji przedstawionej w poprzedniej części rozprawy, tym razem na przypadek gdy mamy do czynienia z dwoma czasowo synchronizowanymi impulsami o różnych częstościach

skierowanymi do tego samego rdzenia włókna. Impuls dla większej długości fali (1560 nm, 75 fs) funkcjonuje tam jako impuls sygnałowy, który jest nośnikiem informacji, natomiast ten dla krótszej fali (1030 nm, 270 fs) i wyższej energii jest impulsem sterującym. W rozdziale tym pokazano, że dzięki użyciu takiej czasowo zsynchronizowanej pary impulsów o odpowiednio dobranej energii impulsu sterującego, wewnątrzkanałowe niedopasowanie współczynnika załamania światła jest kompensowane, co prowadzi do przełączania sygnału z rdzenia wzbudzonego na niewzbudzony z pomijalnymi zniekształceniami. Doktorant wykorzystał tu model opisany za pomocą trzech równań, który pozwolił mu na wyjaśnienie kompensacji asymetrii poprzez istnienie nieliniowości, prowadzący do poprawienia efektywności procesu przełączania. Wykazał też, że w przypadku istnienia umiarkowanych nieliniowości oba impulsy zmieniają się w niskim stopniu, podobnie jak widmo impulsu sygnałowego oraz wykazują nietrywialną zależność od opóźnienia pomiędzy impulsami. W tym miejscu chciałbym zadać pytanie jak Autor rozprawy rozumie stwierdzenie o jednoczesności impulsów gdy mamy do czynienia z różnymi ich długościami oraz częstotliwościami, zwłaszcza w kontekście dyskutowanego opóźnienia pomiędzy nimi. Mam nadzieję, że Pan mgr Le Xuan The Tai wyjaśni ten szczegół podczas obrony, tym bardziej, że takiego wyjaśnienia brakuje w rozprawie. Zaprezentowane tu wyniki zostały opublikowane w pracy *Opt. Lett.* **49**:149 (2024) – Doktorant jest tu pierwszym z 11-u współautorów.

Ostatni, piąty rozdział złożonej rozprawy, zatytułowany *PT-symmetry in dual-core photonic crystal fibers* prezentuje wyniki opublikowane w pracy *Optics Express* **32**:1562 (2024) (Doktorant jest tu drugim z siedmiu współautorów). Rozważane są tu, tak jak poprzednio, włókna z podwójnym rdzeniem zbudowane na bazie kryształów fotonicznych, w których mamy zbilansowane wzbudzenia i tłumienia. Włókna te zostały zaprojektowane z wykorzystaniem oprogramowania komercyjnego (między innymi oprogramowania *Lumerical*), a następnie przeprowadzono symulacje rozchodzenia się impulsów światła w takich włóknach. W ramach tych symulacji rozwiązano też uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera i znaleziono takie parametry włókna jak efektywny współczynnik załamania rdzeni, stałe propagacji, oraz współczynnik sprzężenia i parametr nieliniowości pojawiającej się we włóknie. Korzystając z oprogramowania *Lumerical* obliczono też profil dyspersji włókien z pojedynczym rdzeniem (opowiadającym pojedynczym rdzeniom we włóknie przy założonej długości fali 1000 nm) oraz straty dla każdego z rdzeni osobno. Na końcu rozdziału dyskutowana jest rola i wpływ dyspersji na sprzężanie wewnątrz kanału oraz współczynnika pompowania/strat na stabilność rozchodzenia się impulsów. Zaprezentowane w rozdziale wyniki wskazują na istnienie dwóch rodzajów propagacji w projektowanym włóknie. Są to: propagacja podczas której pojawiają się oscylacje energii impulsu pomiędzy kanałami wzbudzenia i strat (stan *PT*-symetryczny) oraz niestabilna dynamika

propagacji połączona ze silnym wzmocnieniem w obu kanałach gdy symetria typu  $\mathcal{PT}$  jest złamana. Są to bardzo ciekawe wyniki, które mogą stać się początkiem dalszych poszukiwań w omawianej tu tematyce. Jednakże chciałbym w tym miejscu zwrócić uwagę na brak pogłębionej dyskusji dotyczącej pojawiającej się w układzie symetrii typu  $\mathcal{PT}$ . Autor zaprezentował tam wprawdzie dwa wykresy przedstawiające zależności maksymalnych wartości części rzeczywistych wartości własnych od współczynnika wzmocnienia/strat dla różnych wartości współczynnika sprzężenia oraz odstrojenia, jednak brakuje tam informacji na temat tego czego są to wartości własne i jak zostały one znalezione. Ponadto, na początku rozdziału Doktorant wspomina prace innych autorów związane z układami opisanymi przez hamiltoniany wykazujące symetrię typu  $\mathcal{PT}$ , ale brak jest tu powiązania i dyskusji prezentowanych w rozprawie wyników z formalizmem hamiltonianów  $\mathcal{PT}$ -symetrycznych.

Po zapoznaniu się ze złożoną dysertacją, mogę z stwierdzić, że uzyskane oraz przedstawione tam wyniki są oryginalne oraz bardzo ciekawe. Są one interesujące z różnych względów, gdyż mogą zainteresować nie tylko czytelników zajmujących się efektami fizycznymi pojawiającymi się w światłowodach, ale też specjalistów z dziedziny praktycznych zastosowań tychże. Właśnie to, oraz fakt powiązania teoretycznych rozważań zaprezentowanych w rozprawie z sytuacjami eksperymentalnymi, wskazuje na wartość uzyskanych przez Kandydata rezultatów. Uzyskując oraz właściwie interpretując zaprezentowane w swojej dysertacji wyniki, Pan mgr Le Xan The Tai pokazał, że potrafi zastosować do rozwiązywania postawionych przed nim problemów odpowiedni aparat obliczeniowy. Potrafi też w swojej pracy badawczej skutecznie wykorzystać różne koncepcje i modele fizyczne.

Do obowiązków recenzenta należy też wspomnieć o niedociągnięciach znalezionych w dysertacji. Dotyczą one przede wszystkim usterek edytorskich znalezionych w dysertacji. Należy tu podkreślić, że oceniana rozprawa zastała złożona w klasycznej formie książkowej. W związku z tym należy pamiętać, że jej forma powinna się istotnie różnić od tej, jakie posiadają artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie. Tymczasem układ i sposób prezentacji wyników przypomina te ostatnie. W wielu miejscach mamy nawet do czynienia z metodą kopiuj/wklej i całe fragmenty artykułów zostały przekopiowane z wymienionych wcześniej prac, których Doktorant jest współautorem. Przykładowo por. pierwszy akapit sekcji Introduction w pracy *Optics Express* 32:1562 (2024). Wprawdzie artykuł ten ukazał się dopiero w tym roku, ale pan mgr Le Xan The Tai powinien umieścić odpowiedni odnośnik w dysertacji, nawet gdy nie był on jeszcze opublikowany np. jako *private communication* lub preprint. Podobna sytuacja dotyczy rysunków i wykresów prezentowanych w rozprawie. Dodatkowo, jeśli idzie o Rys. 3.5 - 3.10, to brak jest tam opisu

parametru  $\alpha$  pojawiającego się na poziomych osiach diagramów paskowych. Generalnie, Autor powinien poświęcić więcej uwagi na wyjaśnienie wszystkich kroków obliczeniowych oraz istotnych punktów w przeprowadzonych przez niego rozważaniach i wyprowadzeniach. Na podstawie tekstu dysertacji trudno też jest stwierdzić, co jest udziałem Doktoranta w przeprowadzonych badaniach – wszak wszystkie wspomniane wcześniej prace są wieloautorskie oraz w większości przypadków zawierają elementy teoretyczne jak i doświadczalne. Dlatego chciałbym podczas obrony usłyszeć od Pana mgr. Le Xan The Tai wyraźne wyjaśnienie dotyczące tej kwestii. Widać też, że Autor ma pewne problemy z cytowaniem innych prac (również własnych) i umieszczaniu do nich odnośników w odpowiednich miejscach. Przykładowo, w I rozdziale, który ma charakter wprowadzający, pierwsze cytowanie prac innych autorów pojawia się dopiero na str. 31 przed wzorem 1.90, a drugie na stronie 37 za wzorem 1.127. Oczywiście jest, że Doktorant nie jest twórcą przedstawianych tu teorii. Czytelnik rozprawy powinien jednak uzyskać informacje gdzie można znaleźć użyte przez Autora materiały źródłowe niezbędne do dalszych studiów. Generalnie, można byłoby uniknąć wielu z wymienionych tu niedociągnięć, gdyby Pan mgr Le Xan The Tai zdecydował się na formę złożonej pracy składającej się z opublikowanych artykułów wraz z odpowiednim, krótkim przewodnikiem. Chciałbym jednak podkreślić, że wymienione tu uwagi w niczym nie umniejszają wartości uzyskanych i zaprezentowanych przez Doktoranta rezultatów.

Na końcu moich uwag, chciałbym podczas obrony usłyszeć od Kandydata opis jego dalszych planów badawczych związanych z przedstawioną w rozprawie tematyką, tym bardziej, że brak jest takiej informacji na przykład ~~we~~ wnioskach końcowych rozprawy.

Podsumowując, mogę z przyjemnością stwierdzić, że recenzowana rozprawa autorstwa Pana mgr. Le Xan The Tai spełnia wszystkie ustawowe oraz zwyczajowe wymagania stawiane takim dysertacjom. Omawiane w rozprawie wyniki są oryginalne, interesujące oraz wartościowe z punktu widzenia przyszłych badań teoretycznych oraz doświadczalnych w zakresie optyki, również optyki stosowanej. Zostały one opublikowane w czasopismach o wysokiej randze i uznaniu. W mojej opinii mogą one być inspiracją dla przyszłych eksperymentatorów. Sposób prezentacji i dyskusji uzyskanych przez Doktoranta rezultatów jest jasny i czytelny, czyniąc ocenianą rozprawę pomocnym źródłem informacji przy studiowaniu zagadnień pokrewnych z tymi, omawianymi w dysertacji. Biorąc to wszystko pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wiesław Leoński