

prof. dr hab. Mirosław Brewczyk  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet w Białymstoku  
Białystok

Białystok, 13 lutego 2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Le Xuan The Tai pt.  
„Controlling energy transfer in high-index contrast multicore soft-glass fibers ”**

Praca doktorska pana mgr. Le Xuan The Tai zawiera wyniki badań wykonanych przez doktoranta pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka Trippenbacha oraz dr. Nguyen Viet Hung. Napisana jest w języku angielskim, składa się z pięciu rozdziałów, podsumowania, dodatku, listy rysunków oraz listy tabel. Całość liczy 158 stron. Spis literatury obejmuje około 87 pozycji. Rozprawa oparta jest na wynikach zawartych w dwóch artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. W obu mgr Le Xuan The Tai jest drugim autorem, niestety, brakuje oświadczenia autora rozprawy o wkładzie własnym. Wyniki zawarte w rozdziale czwartym można odnaleźć w preprincie arXiv:2312.00145 znajdującym się w elektronicznym archiwum naukowym arXiv. Piąty rozdział to materiał, który zapewne jest przygotowywany do opublikowania.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr Le Xuan The Tai bada własności całkowicie optycznych sprzęgaczy opartych na dwurdzeniowych światłowodach wykonanych z miękkiego szkła. Optyczne sprzęgacze modelowane są z wykorzystaniem układu sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera. Numeryczne wyniki porównywane są z danymi zebranymi w trzech różnych eksperymentach przeprowadzonych głównie w Zakładzie Fotoniki Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w oparciu o światłowody wytworzone w laboratorium Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych. Badano wpływ asymetrii rdzeni na efektywność przełączania sygnału między rdzeniami oraz metody kompensacji tejże asymetrii. Okazuje się, że modelowanie działania sprzęgacza w oparciu o układ nieliniowych równań Schrödingera działa zaskakująco dobrze.

W pierwszym rozdziale Autor rozprawy wprowadza nas w świat optyki nieliniowej, pojawiają się równania opisujące propagację wiązki światła w falowodach wykazujących nieliniowość trzeciego rzędu. W przybliżeniu wolno zmiennej obwiedni równania te przybierają postać nieliniowego równania Schrödingera. W najprostszej wersji mamy do czynienia z równaniami solitonowymi, których analityczne rozwiązania zostały znalezione w latach siedemdziesiątych przez Zakharova i Shabata. Jedno z nich, reprezentujące jasny soliton, jest eksploatowane w dalszej części pracy doktorskiej. W kolejnym kroku Autor przedstawia układ dwóch sprzężonych falowodów mający realizować optyczny sprzęgacz. Wyprowadzone zostały równania opisujące propagację impulsów w dwurdzeniowych włóknach. Mgr Le Xuan The Tai przytacza znane w literaturze rozwiązania takich równań, aczkolwiek ograniczone do najprostszyc przypadków. Tym niemniej, ilustrują one jakościowo możliwość przełączania sygnału między rdzeniami. W ostatniej sekcji rozdziału pierwszego Autor omawia światłowody fotoniczne, podając krótką historię rozwoju światłowodów fotonicznych, ich rodzaje oraz optyczne parametry. Przekonuje czytelnika o

potencjalnie dużych możliwościach tego typu włókien. Rozdział pierwszy rozprawy zawiera dużą liczbę wzorów i równań. Niestety, Autor nie uniknął błędów. Wspomnę o problemie znaku występującego przed drugą pochodną czasową w równaniach ruchu, np. w przejściu od równania (1.112) do (1.115). Razi także równanie (1.140). W oparciu o to równanie nie widzę w jaki sposób miałyby pojawić się sprzężenie między rdzeniami obecne w równaniu (1.144).

Kolejne dwa rozdziały rozprawy doktorskiej mgr. Le Xuan The Tai skojarzone są z kolejnymi artykułami włączonymi do rozprawy. W drugim rozdziale dyskutowane są wyniki zawarte w artykule „Reversible ultrafast soliton switching in dual-core highly nonlinear optical fibers” opublikowanym w *Optics Letters* w 2020 roku. W pracy tej analizowany jest liniowo sprzężony układ dwóch symetrycznych falowodów. Badane jest zachowanie impulsu wprowadzonego do jednego z kanałów w funkcji jego energii. Rozumiem, że Autor rozprawy odpowiedzialny był za analizę wyników doświadczenia przeprowadzonego w Zakładzie Fotoniki Uniwersytetu Warszawskiego, analizę dokonaną w oparciu o numeryczne rozwiązywanie układu sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera. Uzyskano dobrą zgodność między doświadczeniem i opisem teoretycznym. Odkryte zostały trzy reżimy zachowania impulsu propagującego się w światłowodzie. Okazuje się, że impuls może pozostać spulapkowany w rdzeniu do którego został wprowadzony bądź w drugim rdzeniu, możliwe jest także periodyczne przełączanie impulsu między rdzeniami. Odpowiedź układu w funkcji parametrów (szerokości i amplitudy) wprowadzonego impulsu podsumowana jest na rysunku 2.14. Gdy rośnie amplituda impulsu to, o ile jego szerokość jest odpowiednio mała, obserwujemy proste przejście od fazy przełączania impulsu do fazy pułapkowania najpierw w kanale pierwotnie pustym a później w kanale do którego impuls został wprowadzony. Autor rozprawy błędnie identyfikuje ten przypadek jako mający miejsce przy dużej szerokości impulsu ( $\eta < 1$ ). Gdy szerokość impulsu jest duża to odpowiedź układu jest bardziej skomplikowana. Autor próbuje tłumaczyć powyższe zachowanie, chyba byłby bardziej przekonujący ilustrując swoje argumenty odpowiednimi rysunkami.

Okazuje się, że są jednak pewne różnice pomiędzy teorią i doświadczeniem. Przejścia pomiędzy poszczególnymi obszarami określającymi zachowanie impulsu zachodzą przy trochę innych wartościach energii impulsu. Autor rozprawy uważa, że za te różnice odpowiedzialne są dodatkowe efekty – tu powołuje się na pozycję bibliograficzną nr 16. Rozumiem, że żadna próba analizy numerycznej oparta o zmodyfikowany o wspomniane dodatkowe efekty układ nieliniowych równań Schrödingera nie została podjęta. W innym miejscu rozdziału drugiego, z kolei, Autor omawiając rysunek 2.10 twierdzi, że liniowe efekty determinują moment przełączenia sygnału między rdzeniami. Ta argumentacja nie jest według mnie przekonująca.

W rozdziale trzecim Autor rozprawy przybliży czytelnikowi wyniki zawarte w artykule „Self-trapping and switching of solitonic pulses in mismatched dual-core highly nonlinear fibers” opublikowanym w *Chaos, Solitons and Fractals* w 2023 roku. Artykuł ten jest naturalną kontynuacją wcześniejszego. Tym razem Autor wprowadza asymetrię do dwurdzeniowego światłowodu polegającą na rozróżnieniu rozmiarów geometrycznych obu rdzeni. Wcześniejsze prace sugerowały, że asymetria rdzeni w falowodzie może być korzystna, pozwalając na zwiększenie efektywności przełączania sygnału między rdzeniami. Z drugiej strony asymetria nie może być zbyt duża tak aby nie uległo zniszczeniu sprzężenie między rdzeniami. Z tego właśnie powodu, aby pracować w reżimie małej asymetrii, w

doświadczeniu zdecydowano się użyć włókien wykonanych z miękkiego szkła a nie włókien fotonicznych.

Autor rozprawy rozwiązywał numerycznie układ równań opisujący propagację impulsu w asymetrycznym dwurdzeniowym falowodzie. Podobnie jak w przypadku sprzęgacza działającego w oparciu o symetryczne rdzenie można zidentyfikować jakościowo różne reżimy pracy, w których mamy do czynienia z uwięzieniem sygnału w dowolnym z rdzeni bądź z oscylacjami między rdzeniami. Pojawia się dodatkowa faza, w której energia impulsu w obu kanałach jest porównywalna i lekko oscyluje wzdłuż kierunku propagacji. Szczegółowa analiza wsparta jest analitycznymi rozwiązaniami znalezionymi w uproszczonej, zlinearyzowanej wersji modelu. Z rozwiązań tych wynika, że częstość oscylacji przełączania sygnału rośnie z wartością parametru niedopasowania oraz że kontrast związany z przełączaniem sygnału maleje ze wzrostem wartości parametru niedopasowania.

Autor badał wpływ parametru niedopasowania oraz parametrów charakteryzujących impuls na dynamikę pracy sprzęgacza. Podobnie jak w przypadku symetrycznych rdzeni uzyskano zadowalającą zgodność z doświadczeniem. Autor znalazł optymalne wartości parametru niedopasowania oraz parametrów charakteryzujących impuls, które prowadzą do maksymalizacji efektywności przełączania sygnału między rdzeniami. W pewnym zakresie parametrów charakteryzujących impuls praca sprzęgacza w obecności asymetrii wydaje się być bardziej stabilna niż w przypadku symetrycznych rdzeni.

Niewątpliwie analiza propagacji sygnału w asymetrycznym światłowodzie wymagała od Autora szczegółowego przebadania odpowiedzi układu, odpowiedzi zależnej od wielu parametrów. Było to z pewnością czasochłonne zadanie z numerycznego punktu widzenia. Godny uwagi jest fakt, że symulacje numeryczne pozostają w dobrej zgodności z doświadczeniem co świadczy o poprawności modelu zastosowanego do opisu układu.

W kolejnym rozdziale mgr Le Xuan The Tai kontynuuje badania propagacji sygnału w asymetrycznym światłowodzie. Analizowany jest ciekawy pomysł kompensacji asymetrii rdzeni poprzez wprowadzenie do kanału wzbudzanego dodatkowego silnego impulsu kontrolnego. Jeśli impuls kontrolny propaguje się tylko w jednym rdzeniu to zmieniając energię impulsu kontrolnego oraz opóźnienie czasowe między impulsami kontrolnym i sygnałowym można, dzięki nieliniowości, zneutralizować wpływ asymetrii na propagację impulsu. Jak pokazuje Autor, rozwiązując numerycznie tym razem układ trzech nieliniowych równań Schrödingera, jest to droga postępowania pozwalająca na optymalizację efektywności przełączania impulsu. Podobnie jak w poprzednich badaniach Autor uzyskuje zgodność z wynikami eksperymentalnymi.

Ostatni rozdział, w przeciwieństwie do poprzednich, zawiera wyłącznie rozważania teoretyczne. Tym razem, mgr Le Xuan The Tai bada propagację impulsu w dwurdzeniowym fotonicznym światłowodzie z symetrią PT. Układy z symetrią PT, choć składają się z otwartych podukładów, swoim zachowaniem przypominają układy zamknięte – opisane są niehermitowskim hamiltonianem, który ma rzeczywiste wartości własne. Propozycja przedstawiona w tym rozdziale realizuje układ z symetrią PT poprzez rozróżnienie rdzeni falowodu. W jednym z nich sygnał jest wzmacniany, w drugim tłumiony. Oba rdzenie wykonane są ze szkła fosforanowego, jeden z nich domieszkowany jest iterbem, drugi miedzią bądź oba są domieszkowane iterbem. Istotne jest aby wzmocnienie i straty w obu

rdzeniach kompensowały się całkowicie. Sprzęgacz mający pracować w takich warunkach wymaga oczywiście wcześniejszego wprowadzenia do kanału wzmacniającego dodatkowego impulsu, jak w laserze światłowodowym, którego zadaniem jest kumulacja energii w rdzeniu wzmacniającym.

W analizie przeprowadzonej w ostatnim rozdziale istotna jest symetria PT, nieliniowość ośrodka pozostaje na drugim planie. Własnością układów z symetrią PT jest to, że zmieniając wartość jednego z parametrów układu symetria PT może zostać złamana. Istnieje zatem punkt graniczny oddzielający obszar wartości parametrów dla których symetria PT jest zachowana od obszaru, w którym symetria PT jest łamana i pojawiają się zespolone wartości własne hamiltonianu. Autor znajduje punkty graniczne badając stabilność rozwiązań numerycznych. W obszarze niestabilnym w kanale wzmacniającym propagujący się impuls narasta eksponencjalnie, podczas gdy w drugim kanale zanika do zera. W przypadku liniowym punkty graniczne wyznaczone są poprzez analizę części rzeczywistych wartości własnych, w oparciu o równanie (5.16). Autor, niestety, nie podaje szczegółów tej analizy, choć prezentuje jej wyniki na rys. 5.9. Brakuje jednak wartości niektórych parametrów aby w pełni docenić rys. 5.9.

Jeśli symetria PT jest zachowana to propagacja impulsu jest stabilna co ilustruje rys. 5.5, górny wiersz. Symetria PT jest łamana gdy energia impulsu jest odpowiednio duża (przekracza 430 pJ) co prowadzi do niestabilności co, z kolei, pokazuje dolny wiersz. Nie wydaje mi się, aby jednostką czasu na rys. 5.5 była femtosekunda. Opisy lewej i prawej kolumny rys. 5.5 też nie są poprawne.

Na zakończenie chciałbym podkreślić, że praca doktorska mgr. Le Xuan The Tai dotyczy ważnej i aktualnej tematyki badawczej. Dwurdzeniowe światłowody mogą być wykorzystane jako całkowicie optyczne sprzęgacze. Mgr Le Xuan The Tai pisząc rozprawę wykazał się znajomością optyki nieliniowej. Wyniki przedstawione przez mgr. Le Xuan The Tai opublikowane zostały w międzynarodowych czasopiśmie o dużej renomie. Praca doktorska zawiera nieliczne błędy, o niektórych wspomniałem analizując poszczególne rozdziały rozprawy.

Podsumowując, uważam, że praca doktorska mgr. Le Xuan The Tai spełnia, pomimo drobnych zastrzeżeń, wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana mgr. Le Xuan The Tai do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

  
Mirosław Brewczyk