

Warszawa, 4 czerwca 2021

Prof. dr hab. inż. Mirosław Karpierz

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Dobrakowskiego
pt. „Badanie właściwości liniowych i nieliniowych oraz dwójtomności
strukturalnych światłowodów dla zastosowań w źródłach ultrakrótkich
impulsów laserowych”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominika Dobrakowskiego dotyczy światłowodów mikrostrukturalnych zaprojektowanych i wykonanych w celu generacji superkontinuum o wysokim stopniu koherencji oraz do przesyłania impulsów dużej mocy bez ich znaczących zniekształceń. Wzrost znaczenia technik fotonicznych powoduje, że udoskonalanie istniejących oraz opracowywanie nowych geometrii tego typu światłowodów stanowi jedno z ważniejszych zagadnień i wyzwań mających duże znaczenie aplikacyjne. Znaczący wkład w tych badaniach ma zespół kierowany przez prof. Ryszarda Buczyńskiego, w którym istotną rolę pełni dr hab. Mariusz Klimczak, promotor pracy. Doktorant miał sformułowaną nowatorską tematykę pracy i możliwość współpracy z doświadczonym zespołem w znakomicie wyposażonych laboratoriach. Dobrze wykorzystał te możliwości wykazując się wiedzą i pomysłowością. Badania były współfinansowane w ramach projektu TEAM-NET oraz First TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej a także w ramach programu PRELUDIUM Narodowego Centrum Nauki. W rezultacie powstała rozprawa zawierająca kompleksową analizę poczynając od stworzenia modeli i zaawansowanych symulacji numerycznych do eksperymentalnej weryfikacji wyników w zaprojektowanych i wytworzonych w tym celu światłowodach. Wyniki częściowo zostały już opublikowane w 6 artykułach w renomowanych czasopismach optycznych z listy JCR (łącznie cytowane już kilkadziesiąt razy, w tym dwa z nich mają po kilkanaście cytowań w ciągu dwóch lat) oraz zaprezentowane na 9

konferencjach naukowych. Mgr inż. Dominik Dobrakowski oprócz tego jest współautorem 4 artykułów w czasopismach JCR oraz 2 wystąpień konferencyjnych.

Rozprawa jest bardzo obszerna (liczy 127 stron, poprzedzona dodatkowo kilkunastoma wstępnymi stronami) z wyraźnym wskazaniem, które z wyników są oryginalnym wkładem doktoranta. Cel pracy sformułowany został jako zaprojektowanie i wytworzenie światłowodów dwóch rodzajów: przeznaczonych do efektywnej generacji superkontinuum oraz do transmisji ultrakrótkich impulsów laserowych z zachowaniem ich jednolitej struktury spektralno-czasowej. Teza pracy została natomiast podzielona na trzy części, odpowiadające trzem różnym strukturom światłowodowym analizowanym w kolejnych trzech rozdziałach rozprawy.

W rozprawie znalazł się rozbudowany rozdział przedstawiający wprowadzenie do teorii i metod badawczych. Zawiera w zasadzie najważniejsze informacje niezbędne dla osób zajmujących się optyką, aby wytłumaczyć niuanse przeprowadzonych badań. Autor nie uniknął tu potknięć związanych z dużą trudnością przy skrótowym opisie różnych zagadnień, m.in. przy stosowaniu jednolitych oznaczeń (jak choćby niepotrzebne wprowadzenie na początku rozróżnienia na długość fali w ośrodku i w próżni, a potem, tak jak wszyscy, konsekwentne stosowanie już tylko długości próżniowej), pominięciu niektórych założeń (np. przy wyprowadzaniu równania falowego), czy stosowanej terminologii (m.in. nieliniowość typu Kerra dotyczy jedynie zmian współczynnika załamania, natomiast nieliniowość wynikająca z obecności podatności nieliniowej trzeciego rzędu obejmuje też inne zjawiska, np. mieszanie czterech fal). Zdarzają się też nieścisłości, które mogą wprowadzić w błąd. Tak jest w rozdziale 2.3, gdzie od początku jest mowa o stałej propagacji modu światłowodu, czyli zgodnie z tym we wzorze (2-57) n powinno być efektywnym współczynnikiem załamania (ale efektywny współczynnik załamania zostaje wprowadzony dopiero we wzorze (2-62)). W opisie brakuje mi też bardziej szczegółowego wytłumaczenia na czym polega spójność czasowa w superkontinuum, dla szerokich widmowo impulsów rozumiana inaczej niż klasycznie dla źródeł pracy ciągłej. Powyższe uwagi nie umniejszają jednak wrażenia, że praca napisana jest starannie a liczba nieścisłości jest daleko poniżej wartości uznawanej za niepokojącą.

Cel pracy w postaci wytworzenia światłowodu do generacji superkontinuum o wysokiej spójności czasowej postanowiono zrealizować poprzez zoptymalizowanie światłowodu ze szklanym rdzeniem i wysokiej nieliniowości, z normalną dyspersją (aby wyeliminować zjawiska nieliniowe wprowadzające stochastyczną fazę) i utrzymującą polaryzację (aby wyeliminować dyspersję polaryzacyjną). Szczególny nacisk w rozprawie położono na ten ostatni warunek, gdyż nie był do tej pory dostatecznie szeroko analizowany zarówno pod kątem optymalizacji generacji superkontinuum jak i dostępnych technologii wytwarzania mikrostrukturalnych światłowodów utrzymujących polaryzację. W rozprawie zaproponowano dwa podejścia do tego zagadnienia. Pierwsze, opisane w rozdziale 3., dotyczyło wytworzenia dwójłomnego światłowodu poprzez wytworzenie naprężeń w rdzeniu tak jak światłowodach bow-tie oraz poprzez eliptyczną deformację struktury. Wykorzystano do tego wytwarzany wcześniej światłowód strukturalny o siedmiu pierścieniach sześciokątnych inkluzji, wykonany ze szkła krzemianowych. Doktorant stworzył model naprężeń, przeprowadził symulacje numeryczne obu światłowodów, wziął udział w procesie technologicznym produkcji a na koniec przeanalizował wyniki eksperymentalne, które okazały się bardzo obiecujące. Wykazano, że w szczególności struktura z naprężeniami poprawia spójność superkontinuum i obniża jego szumy. Namawiałbym do kontynuowania tych prac: skoro wynik symulacji sugeruje, że wpływ na dwójłomność naprężeń i eliptycznej deformacji są przeciwne, to ich połączenie w ortogonalnych kierunkach mogłoby efekt wzmocnić.

Dalsze prace w tym temacie skupiły się na drugim podejściu, w ocenie Autora bardziej perspektywicznym, wiążącym się z zastosowaniem dwójłomnego nanostrukturyzowanego rdzenia składającego się z naprzemiennie ułożonych warstw szkła o różnych współczynnikach załamania. Tego typu nanostrukturyzowany rdzeń był już wcześniej wytworzony i zbadany, jednak nie był wykorzystywany do zjawisk nieliniowych. Mgr inż. Dominik Dobrakowski przeprowadził szereg analiz bazujących na obliczeniach numerycznych optymalizujących tego typu strukturę w światłowodzie analogicznym do rozważanego w poprzednim rozdziale. Wyniki sugerują, że w tego typu strukturze generacja superkontinuum może dawać szersze widmo o równie dobrej koherencji. Niestety zaprojektowany światłowód nie został jeszcze wytworzony i wyniki te nie zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Symulacje przeprowadzone zostały również dla innego światłowodu, wykonanego ze szkła

krzemionkowych (w rdzeniu domieszkowanych germanem) z mikrostrukturą płaszcza zawierającą otwory powietrzne. Światłowód taki ma lepiej dopasowany kształt modu do innych układów optycznych, niestety ma mniejszą nieliniowość i niestety nie został jeszcze wytworzony i przebadany doświadczalnie.

Ciekawym natomiast rezultatem powyższych analiz jest wykazanie, że tego typu struktura rdzenia ma dla ortogonalnych polaryzacji nie tylko różne wartości efektywnego współczynnika załamania ale też różne wartości nieliniowości. Źródłem dwójłomności nieliniowości jest różna powierzchnia ortogonalnych modów (efektywny współczynnik nieliniowości jest do niej odwrotnie proporcjonalny), ale też różnica w rozkładzie pól modowych, a co za tym idzie różnica w przekrywaniu pola w warstwach dla obu szkielestów zastosowanych do wytworzenia struktury warstwowej (przy różnych ich wartościach współczynnika nieliniowego). Ten drugi efekt dla analizowanych światłowodów okazał się nawet bardziej znaczący.

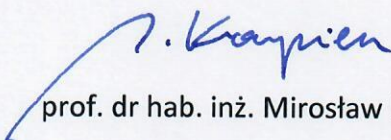
Ostatnia część pracy zawiera wyniki analizy światłowodów przeznaczonych do transmisji krótkich impulsów o dużej mocy szczytowej. Właściwym do tych celów są światłowody z rdzeniem powietrznym a dla zapewnienia jak najmniejszej deformacji impulsów powinny to być światłowody jednomodowe. Wybrane zostały tu światłowody antyrezonansowe z okrągłymi kapilarami rozmieszczonymi symetrycznie wokół środka. Pierwsza z rozważanych struktur zawierała 6 takich kapilar, przy czym dwie umieszczone naprzeciw siebie zostały powiększonymi w celu wytworzenia dwójłomności. Światłowody takie zostały zaprojektowane, wykonane i przebadane a uzyskane wyniki potwierdziły znaczną dwójłomność fazową. Inny światłowód antyrezonansowy, z siedmioma kapilarami, został przebadany pod kątem transmisji femtosekundowych impulsów. Wykazano, że w takim światłowodzie impulsy nawet na odległościach 3 metrów ulegają tylko nieznacznej deformacji, gdy w wyniku zagięcia światłowodu tłumione są mody wyższych rzędów. Oba wyniki są bardzo obiecujące, lecz wymagają kontynuacji prac, zapowiadanych zresztą przez Doktoranta.

Podsumowując, rozprawa zawiera szereg rzetelnie przeprowadzonych badań mających na celu wytworzenie optymalnych światłowodów mikrostrukturalnych na potrzeby optyki nieliniowej i krótkich impulsów światła. Są one ważne i mają duży aspekt nie tylko

poznawczy ale przede wszystkim aplikacyjny. Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami w tworzeniu modeli matematycznych, obliczeniach numerycznych a także stosowaniu różnorodnych technik pomiarowych. Rozprawa napisana jest starannie i zawiera interesujące wnioski oraz obszerną i prawidłowo dobraną bibliografię.

Spośród uzyskanych wyników na szczególne wyróżnienie zasługuje wykazanie anizotropii nieliniowości w światłowodzie z nanostrukturyzowanym rdzeniem. Anizotropia nieliniowości jest znanym zjawiskiem, ale w analizowanej strukturze efekt ten nie był oczywisty. Dodatkowo co istotne, został zaproponowany w wyniku rozważań teoretycznych a nie przypadkowo wykryty w eksperymencie.

Mając na uwadze rzetelność przeprowadzonych badań i dużą naukową a szczególnie praktyczną wartość otrzymanych wyników uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie magistra inżyniera Dominika Dobrakowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie z uwagi na wysoki poziom i zawartość wnioskuje dodatkowo o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.


prof. dr hab. inż. Mirosław Karpierz