

Toruń, 25 lipca 2018

dr hab. Sylwia Zielińska-Raczyńska, prof. UTP
Instytut Matematyki i Fizyki
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
Bydgoszcz

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Stępniewskiego
pt. „Generacja superkontinuum z zakresie podczerwieni w światłowodach
fotonicznych wykonanych z wieloskładnikowych szkieleń tlenkowych”**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Grzegorza Stępniewskiego pod tytułem „Generacja superkontinuum z zakresie podczerwieni w światłowodach fotonicznych wykonanych z wieloskładnikowych szkieleń tlenkowych” jest analiza eksperymentalna dyspersyjnych właściwości włókien światłowodowych, w których występuje nieliniowość, w kontekście efektywności możliwości generacji w tych układach superkontinuum w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Ta doświadczalna analiza została wsparta numerycznymi symulacjami właściwości dyspersyjnych i nieliniowego poszerzenia propagującego w ośrodku impulsu. Praca powstała na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod opieką profesora dr. hab. inż. Ryszarda Buczyńskiego, a promotorem pomocniczym został dr hab. inż. Mariusz Klimczak. Temat pracy jest związany z możliwością propagacji impulsów w światłowodach wykonanych ze szkieleń krzemianowych zawierających tlenki metali ciężkich i weryfikacją tezy, czy takie włókna fotoniczne pozwalają na efektywną generację szerokiego widma superkontinuum w czasie pompowania impulsowymi laserami światłowodowymi o określonej długości fali. W pracy przedstawiono także analizę wpływu temperatury na generację superkontinuum w dwóch różnych rodzajach włókien nieliniowych. Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera nowe, oryginalne wyniki opublikowane w latach 2013-16 w 4 artykułach – w *Laser Physics*, *Optics Letters* oraz w *Optical Material Express*. Tematyka pracy wpisuje się w prężnie rozwijający się obecnie nurt badań nad źródłami światła w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, co łączy się z ich praktycznymi aplikacjami.

Rozprawa, napisana w języku polskim, liczy 181 stron, składa się z dziewięciu rozdziałów, zawiera listę używanych symboli, akronimów oraz bogatą, liczącą 147 pozycji, bibliografię. Materiał przedstawiony w rozprawie jest znacznie szerszy niż to, co znalazłam w ww. publikacjach. Doktorant wykonał imponujący wysiłek, aby wszechstronnie zaprezentować zagadnienia, którymi zajmował się w swej rozprawie, a nie po prostu przepisać zawartość opublikowanych już prac, co niestety często się zdarza. Z informacji zawartych w pracy wynika, że w chwili jej złożenia Doktorant był współautorem 13 publikacji z tzw. listy filadelfijskiej i 4 publikacji w materiałach pokonferencyjnych. Jego osiągnięcia publikacyjne do chwili pisania tej recenzji wzrosły do 16 prac, które były cytowane 89 razy (wg bazy Web of Science na dzień 25.07.2018). Jest to znaczny dorobek, z pewnością wystarczający do przeprowadzenia procedury doktorskiej.

W swojej pracy Doktorant rozważał trzy zagadnienia badawcze:

- pierwsze z nich obejmuje badanie nieliniowych włókien fotonicznych ze szkła wieloskładnikowego z domieszkami metali ciężkich i możliwości generacji w tych ośrodkach superkontinuum w bliskiej i średniej podczerwieni;
- kolejne dotyczyło problemu możliwości uzyskania płaskiej charakterystyki dwójłomności i dyspersji dla szerokiego spektrum fali w bliskiej podczerwieni w zależności od strukturyzacji rdzenia;
- trzecie związane było z przeanalizowaniem wpływu wzrostu temperatury na zmianę dyspersji, a tym samym na możliwości wpływu zmian termicznych na generację superkontinuum.

Każde z tych zagadnień zostało rzetelnie przebadane.

Rozprawa rozpoczyna się Wstępem, w którym Doktorant wprowadza czytelnika w tematykę generacji superkontinuum w światłowodach. Tematyka ta łączy ze sobą optykę falowodową i nieliniową. We Wstępie Doktorant zarysował historyczny rozwój obu tych dziedzin, a także przedstawił plan swej rozprawy, jej cele i tezy. W tej części Autor przedstawił także podsumowanie swoich osiągnięć naukowych związanych z realizacją pracy doktorskiej.

W rozdziale drugim Doktorant omówił liniowe właściwości optyczne światłowodów (propagacja modów, ich efektywne pole, dyspersja, dwójłomność i apertura numeryczna) oraz opisał zagadnienie propagacji fali elektromagnetycznej w falowodzie cylindrycznym, przedstawił nieliniowe zjawiska optyczne, takie jak samomodulacja fazy, mieszanie czterech fal, rozpraszanie Ramana czy solitony optyczne. Zajął się także mechanizmami wytwarzania superkontinuum dla dyspersji normalnej i anomalnej. Muszę odnotować, że w szczególności sekcja 2.3 jest napisana niezwykle rzetelnie, a opis powstawania i propagacji solitonów oraz efektów nieliniowych jest pouczający i ma spore walory dydaktyczne.

Rozdział trzeci Autor poświęcił zaprezentowaniu metodyki badań, którą wykorzystywał w pracy. Ponieważ zasadniczo ma ona charakter doświadczalny, rozwijanie stosowanych metod numerycznych nie było jej celem. Niezbędne do weryfikacji otrzymanych wyników pomiarowych obliczenia numeryczne, mające na celu określenie właściwości dyspersyjnych badanych struktur oraz analizę procesu poszerzenia impulsu propagującego się w światłowodzie, wykorzystywały komercyjne oprogramowanie Lumerical Mode Solution, pozwalające na wyznaczanie parametrów liniowych światłowodów, zaś dla nieliniowych stosowano programy ze środowiska Matlaba, bazujące na teoretycznym modelu opracowanym przez Promotora pomocniczego. Wnikliwie omówiono metody pomiaru dyspersji chromatycznej, tłumienności, efektywnego pola modu, apertury numerycznej, a także grupowej dwójłomności modowej. Z przedstawionych w tym rozdziale informacji można śmiało stwierdzić, iż Autor z dużą biegłością i obyciem stosuje te metody; sprawnie i z widocznym wyczuciem opisuje poszczególne elementy optyczne i dyskutuje ich wpływ na przeprowadzanie i rezultaty pomiarów.

W kolejnych dwóch rozdziałach Doktorant przedstawił wyniki badań mających na celu określenie właściwości liniowych oraz nieliniowych światłowodów ze szkła wieloskładnikowego na bazie tlenków metali ciężkich oraz szkła tellurowego o sześciokątnej strukturze płaszcza. Dla obu ośrodków przeprowadził pomiary tłumienności, dyspersji i efektywnego pola modu. Wykonując analizę

numeryczną poszerzenia impulsu określił mechanizmy fizyczne odpowiedzialne za generację superkontinuum. W przypadku pierwszego światłowodu ze szkła krzemianowego z tlenkami metali ciężkich pokazano, że głównym mechanizmem poszerzenia impulsu jest mieszanie czterofalowe oraz niestabilność modulacyjna. Dla włókna fotonicznego ze szkła tellurowego, które charakteryzuje się dużym liniowym oraz nieliniowym współczynnikiem załamania, pompowanego impulsami femtosekundowymi wygenerowano szerokie widmo superkontinuum. Autor wykazał, że za poszerzenie impulsu odpowiadają w tym przypadku zjawiska związane z generacją solitonów i przesunięciem ich częstotliwości w kierunku podczerwieni, wywołane wymuszonym rozpraszaniem Ramana. Badania Doktoranta prowadzą do wniosku, że odpowiednia strukturyzacja włókna z wieloskładnikowego szkła na bazie tlenku telluru pozwala na otrzymanie płaskiej charakterystyki dyspersji w zakresie anomalnym oraz umożliwia efektywną generację superkontinuum w bliskiej podczerwieni.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki eksperymentów mających na celu optymalizację charakterystyki dyspersyjnej światłowodu z włókna ze szkła ołowiowego o zmodyfikowanej strukturze fotonicznej. Zaprojektowano do tego celu szklano-powietrzne włókno fotoniczne, bazujące na heksagonalnej strukturze płaszcza z otworami powietrznymi o zmiennej średnicy. Eksperyment, polegający na pobudzaniu włókien laserem impulsowym, potwierdził możliwość uzyskania szerokiego widma superkontinuum. Ponadto obliczenia numeryczne potwierdziły możliwość generacji superkontinuum przy pompowaniu w zakresie dyspersji anomalnej i normalnej. Dzięki temu Autor mógł uzasadnić swój wniosek, że odpowiednia strukturyzacja włókna z wieloskładnikowych szkielek tlenkowych umożliwia uzyskanie płaskiej dyspersji w zakresie anomalnym i pozwala efektywnie generować superkontinuum w bliskiej i średniej podczerwieni.

Rozdział siódmy zawiera wyniki badań właściwości optycznych światłowodu, w którym anizotropia została uzyskana poprzez odpowiednią periodyczną strukturyzację rdzenia ze stałą sieci mniejszą niż długość fali. Otrzymano niską wartość dyspersji w zakresie anomalnym, a stosunkowo wysoki współczynnik nieliniowości włókna umożliwił generację superkontinuum w bliskiej podczerwieni za pomocą lasera impulsowego. Zauważyć trzeba, że uzyskano superkontinuum o dość wąskim widmie, co zapewne wynika z faktu słabego sprzężenia promieniowania pompującego i światłowodu. Niemniej, przeprowadzona obszerna analiza właściwości włókien anizotropowych ze strukturyzowanym rdzeniem pozwoliła uzasadnić stwierdzenie, że strukturyzacja pozwala na uzyskanie płaskiej charakterystyki dwójłomności i dyspersji w szerokim zakresie długości fali w bliskiej podczerwieni.

W rozdziale ósmym Doktorant przeanalizował wpływ efektów termicznych na właściwości dyspersyjne i generację superkontinuum we włóknach przeznaczonych do zastosowań nieliniowych. W eksperymentach wyznaczył współczynniki temperaturowe zmiany długości fali odpowiadającej zeru dyspersji dla różnych światłowodów: krzemionkowego i krzemianowego zawierającego tlenki metali ciężkich. Wyniki pomiarowe, potwierdzone symulacjami komputerowymi, pokazały, że wpływ temperatury na dyspersję nie jest znaczny, a więc zmiana temperatury światłowodu nie wpływa w znaczący sposób na generację promieniowania superkontinuum. Jest to ciekawe stwierdzenie, które może prowadzić do ważnych konsekwencji aplikacyjnych.

W rozdziale dziewiątym Autor w sposób zwięzły podsumował swoje badania, uzyskane wyniki i przedstawił wypływające z nich wnioski.

Do obowiązków recenzenta należy także wskazanie błędów i niedociągnięć pojawiających się w pracy. Mogę z przyjemnością stwierdzić, że nie jest ich dużo. Praca została zredagowana starannie, choć w kilku miejscach znalazły się drobne błędy, które nie wpływają na moją wysoką ocenę przedstawionej dysertacji. Oto one:

- równanie 2.22 wyraża odwrotność prędkości grupowej V_{gr} ;
- równanie 2.35 to przybliżenie, nie równość (czynnikiem to $10/\ln(10)$), podobnie (2.36), w którym występuje inna stała;
- ostatni akapit sekcji 2.2.4 przedstawia nieco mylące porównanie wielkości w różnych jednostkach (dB/km oraz dB/m);
- czasami brakuje kilku odnośników literaturowych (np. dane szkła pod wzorem 2.51; problem ten występuje także w innych częściach pracy);
- równanie (2.45) jest przybliżeniem, a więc równanie (2.46) również;
- ostatni akapit 2.3.2: kluczowa jest chyba nie sama długość impulsu, a jego szczytowa moc? Ogólnie, w pracy pojęcia „małe” „duże” „długie” „krótkie” są często używane bez konkretnych liczb;
- brakuje wyjaśnienia lub odnośnika literaturowego skąd biorą się wzory (2.56);
- równanie (2.68) – co oznacza indeks dolny przy pochodnej? (np. w (2.67) jest standardowy, górny);
- sekcja 2.3.9, dotycząca generacji superkontinuum, jest mało wyczerpująca, mimo iż dotyczy procesu stanowiącego centralny element rozprawy;
- nad równaniem (3.12) jest uwaga: „Warto podkreślić, że z przyczyn technicznych nie ma możliwości dokładnego pomiaru odległości między matrycą CCD a czołem włókna, dlatego też rejestrację zdjęć plamki wykonano dla kilku względnych odległości.” Odległość czego względem czego? Każda odległość jest względna.
- Rys. 4.6 – skąd bierze się duża liczba ostrych pików w wynikach numerycznych? Autor pisze, że nieściśłości mogą wynikać z różnic między rzeczywistą a obliczoną krzywą dyspersji. Ta używana w symulacji nie jest dostatecznie gładka?

W podsumowaniu należy stwierdzić, że całość materiału stanowi spójną i ciekawą prezentację, która została napisana przejrzystie i z dbałością o szczegóły doświadczalne oraz teoretyczno-numeryczne. Część pracy zawierająca opis metod numerycznych jest rzetelna. Jak podkreśla sam autor, jest to tylko narzędzie pomocnicze w analizie wyników otrzymanych w ramach rozprawy. Metody badawcze są dobrze, szczegółowo opisane. Uzyskując zaprezentowane wyniki pan mgr inż. Grzegorz Stępniewski pokazał, że potrafi skutecznie wykorzystywać opanowany przez niego warsztat badawczy, zarówno eksperymentalny jak i numeryczny. Stosując go, czyni to nie tylko z biegłością, ale także z wyczuciem używanych metod. Co warto podkreślić, Doktorant udowodnił, że jest w stanie w sposób klarowny zaprezentować oraz zinterpretować uzyskane wyniki.

Kończąc, mogę stwierdzić, że recenzowana rozprawa autorstwa Pana mgr. inż. Grzegorza Stępniewskiego **spełnia z nawiązką zarówno ustawowe jak i zwyczajowe warunki stawiane takim dysertacjom.**

Wnoszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Dodatkowo zgłaszam wniosek o wyróżnienie.

Uzasadnienie wyróżnienia.

Rozprawa prezentuje ważne wyniki badań związanych z generacją superkontinuum we włóknach nieliniowych w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Doktorant pokazał, że w sposób spójny potrafi zaprojektować i wykonać eksperyment oraz zinterpretować jego rezultaty, porównując je z wynikami otrzymanymi z przybliżonych modeli teoretycznych. Wysoki poziom badań, rzetelność uzyskanych wyników, ich wieloaspektowy opis dają podstawę do wnioskowanie o wyróżnienie.

Ymir Niekke - Rempe