

Politechnika Białostocka

Wydział Elektryczny

Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłowej

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej Pani mgr Tanvi Karpate**

**pt. „Nonlinearity shaping in specialty tellurite glass optical fibers ”**

Recenzja została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, prof. dr hab. Wojciecha Satuły z dnia 14.10.2022 r.

### **Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pani mgr Tanvi Karpate dotyczy ważnego zagadnienia związanego z możliwością kształtowania nieliniowości w specjalnych konstrukcjach światłowodów wytworzonych ze szkła tellurowych, znajdujących zastosowanie zarówno w szerokopasmowym odstrojeniu solitonu w zakresie krótkofalowej podczerwieni (SW-IR), generacji superkontinuum o niskim poziomie szumów, jak również nieliniowej konwersji impulsów laserowych w dziedzinie czasu. Podjęta przez doktorantkę tematyka jest próbą odpowiedzi na pewne ograniczenia związane z wykorzystywanymi dziś komercyjnie włóknami fonicznymi wykonanymi z SiO<sub>2</sub>, oraz pokazuje aktualność zjawiska nieliniowości w obszarze badań nad nowymi materiałami i strukturami optycznymi, dynamicznie rozwijaną przez uznane grupy badawcze w kraju i na świecie.

Recenzowana rozprawa stanowi spójny tekst napisany w języku angielskim, obejmujący streszczenie w j. angielskim i polskim, podziękowania, spis treści, spis rysunków i tabel, wprowadzenie, 5 rozdziałów zasadniczych, podsumowanie oraz załączniki. Zawiera również spis 175 cytowanych publikacji. Całość tekstu zawarta jest na 133 stronach.

Wprowadzenie do rozprawy stanowi szczegółowy opis postawionych celów i hipotez naukowych związanych z tematyką pracy wraz z krótkim uzasadnieniem wybranej metody ich weryfikacji. Można tu również odnaleźć informację na temat struktury dysertacji. W rozdziale 2 autorka przedstawia podstawy propagacji fali optycznej w światłowodach oraz opisuje metody charakteryzacji ich podstawowych właściwości. Następnie omawia postęp technologiczny światłowodów fonicznych (PCF) oraz zwraca uwagę na kluczową rolę możliwości kształtowania dyspersji włókien PCF, która jest istotna przy badaniu zjawisk nieliniowych. W swoich rozważaniach doktorantka skupia się na nieliniowej propagacji impulsów promieniowania optycznego w światłowodach mikro- i nanostrukturalnych. W tym miejscu na uwagę zasługuje obszerny opis modeli analitycznych dotyczących oddziaływaniu silnych impulsów optycznych z ośrodkiem o nieliniowym charakterze. W ramach szczegółowych studiów literaturowych Pani mgr Tanvi

Karpate poprawnie definiuje luki badawcze, które stały się motywacją do podjęcia badań w ramach niniejszej dysertacji. Rozdział 3 dotyczy technologii uzyskiwania szkieł tellurowych oraz wytwarzania z nich specjalnych konstrukcji światłowodów. W ramach badań własnych oraz w oparciu o doświadczenie zespołu badawczego, autorka wyselekcjonowała dwa składy chemiczne szkieł tellurowych o niewielkiej różnicy współczynników załamania światła (istotne przy projektowaniu światłowodów typu GRIN), które następnie scharakteryzowała pod kątem stabilności termicznej – istotnej z punktu widzenia wytwarzania światłowodów, oraz właściwości optycznych – ważnych przy uzyskaniu przesunięcia solitonu w zakresie od 1,5  $\mu\text{m}$  do 2,4  $\mu\text{m}$  czy generacji supercontinuum powyżej 1.9  $\mu\text{m}$ . W rozdziale opisała również metodologię wytwarzania światłowodów specjalnych, zwaną jako stack-and-draw, dzięki której wytworzono (i) światłowod z zawieszonym rdzeniem, (ii) 2 światłowody fotoniczne o heksagonalnym rozkładzie siedmiu pierścieni otworów wokół rdzenia, z czego w jednym wprowadzono dodatkowe otwory w celu podtrzymania stanu polaryzacji, oraz (iii) nanostrukturyzowane włókno typu GRIN. Kolejne 3 rozdziały dotyczą badań własnych autorki, w których na podstawie obliczeń numerycznych w programie Lumerical przeprowadzona została optymalizacja każdej struktury oraz przedstawione zostały wyniki wykonanych pomiarów. Rozdział 4 Doktorantka poświęca badaniu zjawiska samoistnego przesunięcia częstotliwości solitonu w światłowodzie z zawieszonym rdzeniem wytworzonym z wyselekcjonowanego szkła tellurowego, gdzie w wyniku wzbudzenia impulsami femtosekundowymi przy długości fali w paśmie 1560 nm, uzyskuje przestrajanie o szerokości 68.5THz. W kolejnym 5 rozdziale Pani mgr Tanvi Karpate skupia się na możliwości uzyskania niskoszumnej generacji supercontinuum przy wykorzystaniu autorskiego włókna fotonicznego podtrzymującego polaryzację w stosunku do włókna bez wymuszonej dwójłomności oraz z całkowicie normalną dyspersją chromatyczną. Rozdział 6 zawiera wyniki badań Autorki nad nieliniową dynamiką propagacji promieniowania prowadzącą do quasi-okresowego czasowego przekształcenia impulsów femtosekundowych w nanostrukturyzowanym wielomodowym światłowodzie o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła. Podsumowanie przeprowadzonych prac projektowych oraz eksperymentalnych autorka zamieszcza w rozdziale 7. Syntetycznie wskazuje na najważniejsze osiągnięcia pracy oraz przedstawia możliwości dalszego poszerzenia wiedzy dotyczącej generacji superkontinuum w krótkofalowym zakresie podczerwieni (SWIR) przy wykorzystaniu materiałów o wysokiej nieliniowości. Ponadto, podaje możliwe zastosowania opracowanych włókien ze szkieł tellurowych w optycznej tomografii komputerowej czy mikroskopii konfokalnej. Swoje rozważania doktorantka odnosi do aktualnej literatury przedmiotu dysertacji. Zdecydowana większość cytowanych prac pochodzi z renomowanych wydawnictw naukowych i dotyczy zagadnień związanych z technologią światłowodów oraz wykorzystaniem zjawiska nieliniowości w specjalnych strukturach falowodowych. Wykorzystane w dysertacji materiały źródłowe potwierdzają, iż Pani mgr Tanvi Karpate posiada zdolność do selektywnej i wnikliwej analizy w tematyce kształtowania nieliniowości w światłowodach specjalnych.

Układ pracy jest logiczny i przemyślany, co potwierdza zdolności doktorantki do analitycznego myślenia oraz stawiania odpowiednich wniosków na każdym etapie prac eksperymentalnych. Na

wyróżnienie zasługuje też szata graficzna dysertacji. Przedstawione rysunki, wykresy oraz tabele są wykonane starannie i czytelnie, co sprzyja w interpretacji wyników prac eksperymentalnych.

Niemniej jednak, jak w każdej pracy złożoność tematyki prowadzi do powstania kilku błędów, które dla porządku pozwolę sobie wymienić:

- Str. 39 – na rys 3.1 brak wyjaśnienia czy  $a$  to promień czy średnica otworu?
- Str. 43 – błąd w indeksowaniu  $\text{Na}_2\text{O}$
- Str. 47 – błędny zapis wartości  $n_2$ , brak indeksu przy  $n_2$
- Str. 57 – w podpisie tabeli są parametry strukturalne a są to raczej geometryczne
- Rys. 4.8, 4.9 – brak opisu osi OY
- Rys. 5.1b – brak wyników, w legendzie jest 5 pozycji, a na wykresie 4
- Rys. 6.6 – brak opisu osi OY

Oczywiście wskazane niedociągnięcia nie wpływają na zawartość merytoryczną pracy, a jedynie wskazują na pewne niedociągnięcia natury technicznej.

### **Ocena merytoryczna**

Recenzowana rozprawa ma charakter projektowo-eksperymentalny, której celem jest analiza kształtowania nieliniowości w specjalnych konstrukcjach światłowodów wytworzonych ze szkielek tellurowych. Na wstępie pracy Pani mgr Tanvi Karpate stawia trzy tezy badawcze:

*1. Kształtowanie nieliniowości w światłowodach specjalnych wytworzonych z wysoce nieliniowych szkielek tellurowych umożliwia znaczące poszerzenia pasma przestrajania solitonów Ramana, w krótkofalowym zakresie podczerwieni SWIR, bez konieczności stosowania złożonych systemów laserowych o wysokiej mocy, jak w przypadku istniejących rozwiązań wykorzystujących światłowody krzemionkowe.*

*2. Kształtowanie nieliniowości w światłowodach specjalnych wytworzonych z wysoce nieliniowych szkielek tellurowych umożliwia uzyskanie światłowodów charakteryzujących się spójną generacją superkontinuum o szerokości oktawy bez podatności na szum dynamiki solitonowej w warunkach określonego stanu polaryzacji.*

*3. Wielomodowa propagacja nieliniowa może być wykorzystana do kształtowania laserowych impulsów femtosekundowych w odniesieniu do ich właściwości czasowych, spektralnych jak również przestrzennych z wykorzystaniem specyficznych parametrów wejściowych w światłowodzie o dedykowanym gradientowym rozkładzie współczynnika załamania.*

Na udowodnienie każdej z tez doktorantka poświęca trzy kolejne rozdziały w części praktycznej dysertacji. Swoje rozważania rozpoczyna od analiz numerycznych, na podstawie których opracowuje konstrukcję światłowodu z zawieszonym rdzeniem z wysoce nieliniowych szkielek tellurowych, dobierając odpowiednio rozmiar rdzenia - 1,4  $\mu\text{m}$ , grubość pręseł oraz ilość i rozmiar otworów powietrznych.

W oparciu o uzyskane wyniki symulacji Pani mgr Tanvi Karpate przeprowadza pomiary samoistnego przesunięcia częstotliwości solitonu w krótkim odcinku (5,6 cm) wytworzonego światłowodu, na podstawie których wykazuje zdolność do przestrojenia widma solitonu w zakresie 68.5 THz, w funkcji średniej mocy wejściowej nie przekraczającej 300 mW, **co jest rekordowym osiągnięciem w porównaniu do danych opublikowanych w literaturze światowej**. Niewątpliwie uzyskany zakres przestrajania byłby nie możliwy bez wykorzystania specjalnie wyselekcjonowanego szkła tellurowego, charakteryzującego się dużą nieliniowością oraz szerokim oknem transmisji sięgającym w zakresie podczerwieni do 3  $\mu\text{m}$ . Ponadto, wysoka nieliniowość szkieł tellurowych umożliwiło autorce wykorzystanie w pomiarach znacznie niższych mocy promieniowania pompującego w porównaniu do struktur opartych na krzemionce. Na wyróżnienie zasługuje również fakt, iż na podstawie przeprowadzonych pomiarów doktorantka potwierdziła poprawność przeprowadzonej analizy numerycznej nieliniowej propagacji impulsu w zaprojektowanym światłowodzie z wykorzystaniem uogólnionego jednowymiarowego nieliniowego równania Schrödingera (GNLSE). Ponadto, jako ważny element poznawczy doktorantka zweryfikowała dynamikę nieliniowej propagacji uzyskując efektywne rozstrojenie solitonu przy wykorzystaniu impulsów laserowych o generacji przy długości fali w paśmie 1900 nm. W wyniku przeprowadzonych obserwacji doktorantka wykazała, iż zwiększenie przerwy pomiędzy długością fali dyspersji zerowej (ZDW) włókna a długością fali impulsu obejmującego powoduje ograniczenie w poszerzeniu i przesunięciu solitonu wynikające z niższej nieliniowości oraz różnych wartości dyspersji chromatycznej w odniesieniu do długości fali w paśmie 1560 nm. Tym samym potwierdziła optymalny wybór długości fali impulsów femtosekundowych niezbędny do uzyskania szerokiego samoprzesunięcia częstości solitonu w opracowanym światłowodzie. Jako aspekt praktyczny należy też dodać, iż zaproponowane rozwiązanie jest w pełni kompatybilne z komercyjnymi układami laserów i wzmacniaczy światłowodowych.

Kolejnym zagadnieniem naukowym poruszonym przez autorkę w rozdziale 5 dysertacji jest ograniczenie szumu kwantowego w generacji superkontinuum w zakresie podczerwieni uzyskane w światłowodach fonicznych charakteryzujących się normalną dyspersją chromatyczną. W oparciu o model matematyczny doktorantka opracowała dwie struktury jednomodowych światłowodów fonicznych o heksagonalnym rozmieszczeniu otworów powietrznych oraz różnej dwójłomności. Przeprowadzenie systematycznej analizy wpływu parametrów geometrycznych (okres siatki, średnica otworów, ilość pierścieni) zaproponowanych struktur na profil dyspersji oraz strat rozproszeniowych struktury otworów (*confinement losses*) umożliwiło doktorantce wybór optymalnej konstrukcji włókna o heksagonalnym rozłożeniu dwóch pierścieni otworów o różnej średnicy, wewnętrzna  $d_1 = 0,5 \mu\text{m}$  a zewnętrzna  $d_2 = 0,8 \mu\text{m}$  oraz stałej siatki  $= 1,3 \mu\text{m}$ . Na podstawie pomiarów dyspersji oraz dwójłomności uzyskała dużą zgodność rezultatów symulacji z wynikami eksperymentu, co potwierdza uzyskanie wysokiej stabilności procesu technologicznego. Pomiary spójnej generacji superkontinuum w opracowanych włóknach fonicznych zaowocowały uzyskaniem szerokiego widma emisji w zakresie 1100 nm do 2300 nm, powstałego w wyniku zjawiska samomodulacji fazy przy długości fali pompy równej 1560 nm. Wykorzystując technikę

dyspersyjnej transformacji Fouriera (DFT) Pani mgr Tanvi Karpate określiła w czasie rzeczywistym wpływ stanu polaryzacji impulsu pompującego na zmiany poziomu szumu impuls-po-impulsie w pełnej oktawie widma superkontinuum. Tym samym doktorantka **potwierdziła, iż ograniczenie polaryzacyjnej niestabilności modulacyjnej (PMI) w opracowanym światłowodzie na drodze wymuszonej dwójłomności umożliwia znaczący wzrost stosunku sygnału do szumu (SNR). W mojej opinii jest to istotne osiągnięcie naukowe uzyskane przez doktorantkę w autorskiej konstrukcji światłowodu fonicznego podtrzymującego polaryzację.**

Ostatnim analizowanym przez Panią mgr Tanvi Karpate aspektem naukowym dotyczącym nieliniowości w światłowodach specjalnych jest badanie możliwości uzyskania poszerzenia impulsu femtosekundowego w nanostrukturyzowanym wielomodowym światłowodzie o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania światła (GRIN). W tym celu w oparciu o wybrane dwa rodzaje szkieł tellurowych doktorantka zaprojektowała autorską strukturę preformy złożonej z 10267 prętów szklanych o średnicy 0,5mm, która po przeciągnięciu spełnia warunek  $\lambda/5$  dla pojedynczego pręcika, tym samym zapewnia paraboliczny ciągły rozkład współczynnika załamania. Autorka wykazała, iż wytworzone włókno charakteryzuje się nieliniową dynamiką propagacji promieniowania prowadzącą do quasi-okresowego czasowego przekształcenia impulsu wejściowego w zakresie dyspersji normalnej. Na podstawie analizy widm uzyskanych na wyjściu światłowodu o długości 23,5 mm zaobserwowała istotne poszerzenie spektralne impulsu o szerokości 300 fs przy długości fali generacji 1030 nm, w funkcji mocy wejściowej od 6mW do 32mW, wynikające głównie z samomodulacji fazy (SPM). Badania dynamiki czaso-przestrzenno-spektralnej wytworzonego włókna pozwoliło doktorantce na obserwacje zmian dynamiki propagacji impulsu nie będącej efektem samooczyszczenia modów, jak w przypadku impulsów laserowym o długim czasie trwania. W celu weryfikacji zjawisk odpowiedzialnych za przekształcanie widma autorka przeprowadziła szczegółową i systematyczną analizę dynamiki przy wykorzystaniu metody FROG oraz XFROG, na podstawie której wykazała, iż obserwowane zmiany pochodzą od względnej akumulacji fazy impulsu laserowego podczas propagacji wzdłuż światłowodu, a zarazem są zgodne z naprzemiennym wpływem ujemnej wartości dyspersji prędkości grupowej (GVD) i samomodulacji fazy (SPM) z dodatnią wartością dyspersji prędkości grupowej. Ponadto, doktorantka na skutek wzbudzenia wytworzonego światłowodu impulsami laserowymi o czasie 350fs, uzyskała silną generację widma superkontinuum w zakresie od 790 nm do 2900 nm, zarówno w obszarze dyspersji normalnej, jak i anomalnej. Tym samym Pani mgr Tanvi Karpate **udowodniła unikalną właściwość nanostrukturyzowanych światłowodów typu GRIN wytworzonych ze szkieł tellurowych, polegającą na szerokim zakresie możliwości zmian cech spektralnych, przestrzennych i czasowych ultrakrótkich impulsów laserowych.**

Podsumowując przedstawione w dysertacji wyniki symulacji oraz badań eksperymentalnych należy dodać, iż podjęta przez Panią mgr Tanvi Karpate tematyka jest ambitnym i ważnym obszarem badań naukowych. Autorka dzięki systematycznej analizie uzyskanych wyników pomiarów potwierdziła istotę rozważnego zagadnienia, jakim jest wykorzystanie nieliniowości szkieł wieloskładnikowych w układach

kształtowania impulsów femtosekundowych znajdujących zastosowanie w wielu płaszczyznach współczesnej fotoniki.

### **Uwagi merytoryczne do dyskusji**

W analizowanych przykładach możliwości wykorzystania światłowodów z zawieszonym rdzeniem oraz fonicznych wykonanych ze szkła tellurowych do kształtowania widma impulsu laserowego Pani mgr Tanvi Karpate używa lasera o długości fali 1560 nm i wybranym czasie trwania impulsu 90 fs. Ponieważ, w zakresie dyspersji anomalnej kształtowanie widma zdominowane jest przez generację solitonów, a także niestabilność modulacyjną (MI), które w przypadku impulsów o dłuższym czasie trwania powodują znaczące poszerzenie spektralne widma, chciałem zapytać czy doktorantka analizowała wpływ czasu trwania impulsu lasera na przesunięcie solitonu? Jak według doktorantki czas trwania impulsu wpłynie na stabilność czasową w opracowanych strukturach światłowodów?

Kolejną interesującą mnie kwestią jest dobór długości samego włókna. W każdym z analizowanych przykładów do pomiarów doktorantka używa różnej długości światłowodów. Czym podyktowany jest wybór określonej długości włókna i czy Pani mgr Tanvi Karpate przeprowadzała pomiary samoistnego przesunięcia częstości solitonu dla różnych odcinków światłowodów?

### **Wnioski końcowe**

Biorąc pod uwagę zakres pracy i jej wysoki poziom merytoryczny uważam, iż recenzowana dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego dotyczącego kształtowania nieliniowości w światłowodach specjalnych i jest znaczącym, autorskim opracowaniem Pani mgr Tanvi Karpate, które w odniesieniu do dyscypliny naukowej nauki fizyczne, potwierdza uzyskanie przez Autorkę pracy ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętności do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym stwierdzam, iż rozprawa doktorska Pani mgr Tanvi Karpate pt. „Nonlinearity shaping in specialty tellurite glass optical fibers ” **spełnia wymagania**, o których mowa w art. 13 ust 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tj. Dz.U. z 2017 r . poz. 1789) oraz w art. 179 ust.1 i 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, (Dz.U. z 2018r. poz 1669 z późn.zm) i **wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Tanvi Karpate do publicznej obrony.**

