

Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
wacław.urbańczyk@pwr.edu.pl



Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Siwickiego pt. „Badanie stabilności i szerokości spektralnej widma superkontinuum w całoszklanych włóknach fotonicznych w zakresie dyspersji normalnej”

Rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Siwickiego została wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Ryszarda Buczyńskiego, a promotorem pomocniczym był dr inż. Mariusz Klimczak, obaj z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Badania o charakterze symulacyjnym i eksperymentalnym przedstawione w ramach rozprawy koncentrują się na właściwościach superkontinuum generowanego w trybie dyspersji normalnej w światłowodach fotonicznych wytworzonych ze szkieł wieloskładnikowych, w szczególności na jego stabilności i szerokości spektralnej.

Warto podkreślić, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. W ostatnich latach obserwuje się narastające zainteresowanie źródłami światła tego typu, gdyż, w przeciwieństwie do superkontinuum generowanego w trybie dyspersji anomalnej, charakteryzują się one spójnością czasową, dużą stabilnością spektralną oraz krótkim czasem trwania impulsu (rzędu pojedynczych ps). Takie cechy umożliwiają zastosowania superkontinuum generowanego w zakresie dyspersji normalnej w szybkiej spektroskopii czasowej, technice OCT, w telekomunikacji, a także do detekcji gazów. Pierwsze prace dotyczące tej tematyki pokazywały możliwość generacji superkontinuum w zakresie dyspersji normalnej w fotonicznych światłowodach krzemionkowych w przedziale widmowym sięgającym w granicy długofalowej $1,5\div 2\text{ }\mu\text{m}$. Badania prowadzone obecnie na świecie koncentrują się na poszerzeniu zakresu generacji superkontinuum poprzez zastosowanie światłowodów wykonanych z innych materiałów (szkła typu ZBLAN, chalkogengowe, tellurowe, z tlenków metali ciężkich, fosforanowe i krzemianowe z tlenkami metali ciężkich), które charakteryzują się oknem transmisji przesuniętym do średniej podczerwieni, a także większym współczynnikiem nieliniowości niż szkło krzemionkowe. Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Bartłomieja Siwickiego wpisuje się w ten aktualny nurt badań. Wyniki uzyskane w ramach rozprawy były przedmiotem 5 publikacji w czasopismach z Listy Filadelfijskiej (*Opt. Express*-1, *J. Opt.*-2, *Opt. Eng.*-1, *Opt. Fiber Tech.*-1), przy czym w trzech artykułach Pan Bartłomiej Siwicki jest pierwszym współautorem. Jest także współautorem 4 innych artykułów i 8 komunikatów konferencyjnych pośrednio związanych z tematyką rozprawy. Publikacje te były już cytowane 37 razy wg Web of

Science (bez autocytowań), co potwierdza fakt, że wyniki uzyskane w ramach rozprawy zostały dostrzeżone przez międzynarodowe środowisko naukowe.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, 4 załączników i wykazu cytowanej literatury (115 pozycji) o łącznej długości 186 stron. Rozdział 1. stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy i zawiera ogólne informacje o światłowodach fotonicznych, a także definiuje cele i tezy rozprawy. W rozdziale 2. przedstawiono podstawy teoretyczne zjawisk nieliniowych zachodzących w światłowodach, a także wyjaśniono zasadę działania światłowodów fotonicznych. W rozdziale 3. omówiono zjawisko dyspersji chromatycznej w światłowodach fotonicznych, przedstawiono metodę projektowania dyspersji w szklanych światłowodach fotonicznych wykonanych ze szkieleł wieloskładnikowych, sposoby wytwarzania takich światłowodów oraz właściwości szkieleł stosowanych do ich wytwarzania. W rozdziale 4. przedstawiono wyniki symulacji liniowych właściwości badanej klasy światłowodów zmierzające do uzyskania optymalnego profilu dyspersji normalnej. Przeanalizowano wpływ geometrii światłowodu oraz dyspersji materiałowej szkieleł na wypłaszczenie dyspersji chromatycznej i wyselekcjonowano najlepsze struktury, które były następnie badane pod kątem efektywności procesu generacji superkontinuum przy różnych warunkach pompowania. Rozdział 5 zawiera wyniki badań eksperymentalnych obejmujące pomiary dyspersji chromatycznej w wytworzonych światłowodach fotonicznych oraz badania widm superkontinuum wygenerowanych przy użyciu różnych warunków pompowania. Stosowano dwie różne pompy o centralnej długości fali 1550 nm i 1560 nm i odpowiednio o energii impulsu 12 nJ i czasie trwania 75 fs oraz o energii impulsu 7 nJ i czasie trwania 400 fs. Przeprowadzono także eksperymenty nieliniowe z pompą o centralnej długości fali 2160 nm, mocy szczytowej impulsu 60 MW i czasie trwania 60 fs. Wyniki przedstawione w tym rozdziale potwierdzają prawdziwość pierwszej tezy rozprawy stwierdzającej, że w światłowodach fotonicznych wytworzonych ze szkieleł wieloskładnikowych możliwe jest uzyskanie widma superkontinuum w zakresie dyspersji normalnej o szerokości ponad oktawy, przy pompowaniu laserem z zakresu bliskiej podczerwieni. Warto podkreślić, że w przypadku pompowania laserem o centralnej długości fali 2160 nm długofalowa krawędź generowanego widma sięgała granicy okna transmisyjnego stosowanych szkieleł (2,7 μm).

W rozdziale 6. przedstawiono analizę spójności czasowej i stabilności spektralnej uzyskanych widm superkontinuum. Badania te miały charakter zarówno numeryczny, jak i eksperymentalny, ponadto zostały przeprowadzone dla różnych warunków pompowania. Uzyskane wyniki potwierdzają prawdziwość drugiej tezy rozprawy stwierdzającej, że widma superkontinuum wygenerowane w zakresie dyspersji normalnej w szklanych światłowodach fotonicznych charakteryzują się dobrą spójnością czasową i stabilnością spektralną. W rozdziale 7. podsumowano najważniejsze wyniki rozprawy i przedstawiono perspektywy dalszych badań.

Moje uznanie budzi niezwykle szeroki zakres przeprowadzonych badań, które obejmują zaawansowane symulacje właściwości liniowych i nieliniowych światłowodów fotonicznych, szczegółową analizę właściwości dyspersyjnych, optymalizację warunków pompowania, opanowanie technologii wytwarzania i wytworzenie światłowodów fonicznych o zoptymalizowanej strukturze, przeprowadzenie złożonych pomiarów dyspersji chromatycznej, badania eksperymentalne widm superkontinuum dla różnych warunków pompowania i wreszcie badania eksperymentalne i symulacyjne spójności czasowej oraz stabilności spektralnej generowanych widm. Tak szeroki zakres tematyczny rozprawy wskazuje, że Autor posiada wyjątkowo dużą wiedzę i praktyczne umiejętności związane z problematyką światłowodową, które obejmują złożone procesy technologiczne umożliwiające wytwarzanie światłowodów fotonicznych, metody pomiarowe do ich charakteryzacji oraz metody numeryczne do symulacji ich właściwości liniowych i nieliniowych. Dotychczas, żaden z autorów recenzowanych przeze mnie doktoratów dotyczących tematyki światłowodowej nie wykazał się tak szerokim zakresem kompetencji.

Strona redakcyjna budzi pewne zastrzeżenia. Rozprawa jest za długa i niepotrzebnie porusza wątki poboczne, które i tak przedstawiane są w sposób powierzchowny. Na przykład, nie da się na dwóch stronach omówić wszystkich subtelności metody różnic skończonych stosowanej w symulacjach parametrów liniowych lub metody rozwiązywania uogólnionego nieliniowego równania Schroedingera (GNLSE). Lepiej po prostu odesłać czytelnika do odpowiednich monografii. Ponadto, utworzony przez Autora i konsekwentnie stosowany w całej rozprawie termin całoszklane światłowodowy foniczny brzmi moim zdaniem trochę sztucznie w języku polskim.

W trakcie czytania rozprawy nasunęło mi się kilka uwag o charakterze merytorycznym. Po pierwsze, w tabeli na stronie 63 podano wyznaczone eksperymentalnie współczynniki Sellmeiera dla szkieł wytworzonych w ITME. Na ich podstawie przeprowadzono symulacje właściwości dyspersyjnych światłowodów w zakresie od 0,8 do 5 μm . W pracy brakuje oceny błędów obliczonej numerycznie dyspersji, wynikających z niedokładności przybliżenia Sellmeiera, czego można się spodziewać w tak szerokim zakresie spektralnym. Po drugie, część eksperymentalna zawiązana z generacją widm superkontinuum dla różnych warunkach pobudzenia nosi znamiona pewnej przypadkowości, co prawdopodobnie związane jest z utrudnionym dostępem do stosowanych laserów impulsowych. Na przykład, generację superkontinuum w światłowodzie referencyjnym (NL21B) i zoptymalizowanym (NL38B) dla długości 1550 i 1560 nm przeprowadzono z użyciem laserów o istotnie różnych czasach trwania impulsów, odpowiednio 75 fs i 400 fs. Trudno interpretować wyniki eksperymentalne uzyskane przy zmianie kilku parametrów jednocześnie. Autor uważa, że szersze spektralnie superkontinuum powstaje w światłowodzie referencyjnym na skutek

jego bardziej płaskiej charakterystyki dyspersyjnej. Moim zdaniem główną przyczyną jest jednak znacznie krótszy czasowo impuls lasera zastosowanego do pompowania włókna referencyjnego.

Trzecia uwaga dotyczy wniosków wynikających z pomiarów stabilności spektralnej widm wygenerowanych we włóknie referencyjnym (NL21B) pompowanym laserem o czasie trwania impulsu 390 fs, których wyniki pokazano na rys.6.10a. Autor sugeruje, że poziom szumu zawierający się w przedziale $\pm 10\%$ świadczy o dobrej stabilności generowanego widma. Moim zdaniem jest to bardzo duży poziom szumu, co potwierdzają wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych dla takich samych warunków pobudzenia, w których szum jest praktycznie niewidoczny. Ciekaw jestem co jest przyczyną tak znacznej rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i eksperymentem?

Powyższe uwagi nie wpływają jednak na ogólnie wysoką ocenę merytoryczną rozprawy. Na podkreślenie zasługuje aktualna tematyka, szeroki zakres przeprowadzonych badań i ich zdecydowanie aplikacyjny charakter. Autor uzyskał szereg wartościowych wyników, z których najważniejsze to:

- a) optymalizacja przebiegu dyspersji normalnej w szklanych światłowodach fonicznych poprzez odpowiedni dobór ich geometrii i szkieł wieloskładnikowych zastosowanych do ich wytworzenia;
- b) opracowanie technologii i wytworzenie zaprojektowanych światłowodów o dyspersji normalnej;
- c) wygenerowanie superkontinuum w wytworzonych światłowodach o szerokości ponad oktawy w zakresach 950÷2350 nm oraz 1100÷2700 nm przy pompowaniu laserem o centralnej długości fali równej odpowiednio 1550/1560 nm i 2160 nm;
- d) potwierdzenie wysokiej spójności czasowej i stabilności spektralnej uzyskanych widm.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa zawiera istotne wyniki naukowe i może być podstawą nadania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Siwickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a także o wyróżnienie rozprawy ze względu na wysoką wartość naukową uzyskanych wyników.


Prof. dr hab. inż. Waclaw Urbańczyk

Wrocław, 10 sierpnia 2016 r.