

ŚWIATŁOWODY FOTONICZNE

Tomasz Szuster

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki.

Streszczenie. W artykule przedstawione są światłowody fotoniczne. Pierwszym zagadnieniem jest budowa fotonicznych włókien oraz mechanizmy propagacji fali świetlnej. W dalszej części artykułu przedstawione są możliwości w dziedzinie włókien dwójłomnych. Następnie poruszony jest aspekt kontroli dyspersji chromatycznej, optyki nieliniowej i laserów dużej mocy. Artykuł zamyka rozdział o włóknach z powietrznym rdzeniem.

Słowa kluczowe: światłowod fotoniczny, fotoniczna przerwa wzbroniona, kontrola dyspersji, zjawiska nieliniowe, lasery włóknowe.

Photonic Crystal Fibers

Abstract. The article is about photonic crystal fibers. First are mentioned building of photonic crystal fibers and ways of light wave guiding. In the next part of article are presented abilities in birefringent optical fibers. Later are described control of chromatic dispersion, nonlinear optics and high power lasers. The last section of article is about hollow core photonic crystal fibers.

Keywords: photonic crystal fibers, photonic band-gap, control of chromatic dispersion, nonlinear optics, fiber lasers.

Wstęp

Pod koniec dwudziestego wieku naukowcy opracowali i wytworzyli nowy typ włókna optycznego – światłowod fotoniczny (*Photonic Crystal Fiber* PCF). Włókna takie pozwalają na modyfikację rozkładu współczynnika załamania światła poprzez wprowadzenie do ich struktury sieci powietrznych otworów. Możliwości w zakresie kształtowania charakterystyki współczynnika refrakcji pozwalają na otrzymanie bardzo różnych właściwości fizycznych włókien, przy jednoczesnym braku ingerencji w skład chemiczny szkła z jakiego wytwarzany jest światłowod. Podstawowym materiałem do produkcji światłowodów PCF jest niedomieszkowane szkło kwarcowe, jednak w wielu aplikacjach korzystniejsze jest wykorzystanie do produkcji włókien materiałów o innych właściwościach fizycznych.

Światłowody fotoniczne to nowa klasa optycznych włókien, które między innymi działają na zasadzie kryształów fotonicznych. Jedną z ważniejszych właściwości kryształów fotonicznych jest możliwość występowania fotonicznego pasma energii wzbronionej. Termin światłowody fotoniczne obejmuje oprócz światłowodów posiadających fotoniczną przerwę wzbronioną, również światłowody działające na zasadzie zmodyfikowanego wewnętrznego odbicia oraz światłowody Bragga. Generalnie wszystkie te rodzaje włókien posiadają rdzeń (pełny lub pusty) otoczony mikrostrukturalnym płaszczem. Najprostszy fotoniczny płaszcz to dwuosiowy lub jednoosiowy, okresowy, wolny od defektów materiał z własną, dobrze zdefiniowaną dyspersją i pasmową strukturą. Te własności określają zachowanie się prowadzonych modów, które formowane są w rdzeniu włókna będącym defektem w idealnej strukturze sieci kryształu fotonicznego[10].

1. Mechanizmy propagacji fali świetlnej w światłowodach fotonicznych

W światłowodach mikrostrukturalnych występują dwa mechanizmy propagacji. Prowadzenie fali na zasadzie zmodyfikowanego całkowitego wewnętrznego odbicia (TIR) oraz fotonicznej przerwy wzbronionej (PBF). Pierwszy sposób polega na wykorzystaniu dwuwymiarowego fotonicznego kryształu jako odpowiednika płaszcza w konwencjonalnych światłowodach, wybierając materiał rdzenia z większym współczynnikiem załamania niż efektywny współczynnik załamania fotonicznego płaszcza. Mechanizm zmodyfikowanego całkowitego wewnętrznego odbicia opiera się na podobnych zasadach jak w zwykłych włóknach, jednakże właściwości jakie posiadają te światłowody są bardzo różne. Przykładem może być bezwarunkowa jednodomowość. Oznacza to, że we włóknie możliwa jest propagacja tylko i wyłącznie jednego modu bez względu na to jaką wartość ma długość rozpatrywanej fali.

Zachowanie to można wytłumaczyć poprzez przedstawienie struktury powietrznych otworów jako filtra modowego lub „sita”. Mod podstawowy jest formowany w rdzeniu włókna, a struktura pierwszych pierścieni otworów stanowi barierę ograniczającą rozprzestrzenianie się obszaru propagacji fal na część fotonicznego płaszcza. Z drugiej strony rozmiary modów wyższego rzędu są mniejsze i mogą się one przedostać przez szczeliny. Gdy stosunek d/A (d – średnica powietrznego otworu, A – odległość pomiędzy środkami otworów), która określa udział powietrznych otworów w fotonicznym płaszczu wzrasta, kolejne mody zostają uwięzione. Odpowiednio zaprojektowana geometria przekroju poprzecznego gwarantuje, że propagowany jest tylko podstawowy mod. Występuje to, jak pokazały bardziej szczegółowe badania, dla współczynnika wypełnienia $d/A < 0,4$. Wykorzystując tę własność, możliwe jest zaprojektowanie światłowodów jednodomowych z bardzo dużą średnicą pola modu, które mogą być wykorzystane do budowy światłowodowych wzmacniaczy i laserów. Ponadto poprzez domieszkowanie rdzenia w celu zmniejszenia jego współczynnika załamania, można zapobiec prowadzeniu światła przy falach krótszych niż pewne progowe wartości [7, 16].

Drugim sposobem propagacji światła jest mechanizm działający na zasadzie fotonicznej przerwy wzbronionej, która jest optycznym odpowiednikiem występujących w półprzewodnikach energetycznych pasm wzbronionych. Przerwa fotoniczna określa zakres długości fali, dla których światło nie może się rozchodzić w światłowodzie. Można powiedzieć, że w takim przypadku struktura włókna staje się idealnym zwierciadłem dla pewnych długości fal. W przypadku tego typu propagacji nie jest konieczne, aby struktura płaszcza miała niższy współczynnik załamania światła od rdzenia. Jednakże pierwsze tego typu światłowody mogły przewodzić światło jedynie w szkle kwarcowym, które ma większy współczynnik załamania. Prowadzenie modów w powietrzu stało się możliwe, gdy technologia osiągnęła rozwój pozwalający na wytworzenie większych otworów powietrznych. Dzięki temu, fotoniczna przerwa wzbroniona powstaje w miejscu umożliwiającym propagację światła w powietrznym rdzeniu a uniemożliwiającym mu wydostanie się do płaszcza [10].

2. Dwójłomne światłowody fotoniczne

Wielka różnorodność rozmieszczenia sieci powietrznych otworów dostarcza szerokie możliwości kontroli rozkładu różnicy współczynników załamania pomiędzy rdzeniem i fotonicznym płaszczem. Od czasu, gdy światłowody fotoniczne ze szkła kwarcowego okazały się pod wieloma względami lepsze od światłowodów konwencjonalnych, znacznie wzrosła liczba ich aplikacji w wielu dziedzinach nauki i techniki. Możliwości kształtowania struktury światłowodów PCF pozwalają na projektowanie włókien posiadających pożądaną dwójłomność, charakterystykę dyspersji, rozmiary rdzenia, liczbę modów czy też

aperturę numeryczną.

Mikrostrukturalne światłowody o wysokiej dwójłomności (HB PCF) są włóknami, w których dwa ortogonalnie spolaryzowane mody prowadzone są we włóknie jednomodowym z różnymi prędkościami. Włókna takie używane są często do utrzymania polaryzacji w przyrządach i układach optycznych. Prowadzony mod podlega dwójłomności, gdy struktura fotoniczna posiada zaburzoną symetrię osiową. Zmiana geometrii struktury powietrznych otworów, pozwala na wytworzenie poziomów dwójłomności przewyższających wielokrotnie wartość dwójłomności konwencjonalnych światłowodów. Należy podkreślić, że tradycyjne światłowody utrzymujące polaryzację, takie jak „bow tie”, z eliptycznym rdzeniem lub „Panda”, składają się z co najmniej dwóch różnych szkieł, które mają inne współczynniki rozszerzalności termicznej, co powoduje dużą zależność dwójłomności od temperatury. Inaczej jest ze światłowodami fonicznymi, w których osiągalna dwójłomność nie jest wrażliwa na zmianę temperatury, co jest ważną cechą w wielu aplikacjach.

3. Dyspersja chromatyczna światłowodów fonicznych

Kolejną zaletą światłowodów fonicznych jest możliwość projektowania charakterystyki dyspersji chromatycznej. Zdolność fal o różnych długościach do przemieszczania się z różną prędkością jest bardzo istotnym czynnikiem w projektowaniu systemów telekomunikacyjnych. Ciąg impulsów świetlnych niesie cyfrowe informacje. Każdy z nich rozszerza się pod wpływem dyspersji chromatycznej powodując rozmycie sygnału. Wartość dyspersji chromatycznej zmienia się wraz z długością fali, przechodząc przez zero przy $1,3\mu\text{m}$ w światłowodach konwencjonalnych. We włóknach fonicznych dyspersja może być kontrolowana i kształtowana z niespotykaną do tej pory swobodą. Spowodowane jest to dużą różnicą współczynników załamania pomiędzy szkłem kwarcowym a powietrzem oraz różnorodnością rozmiarów i kształtów otworów, jak również ich rozmieszczeniem [2, 6].

4. Światłowody foniczne o dużej nieliniowości

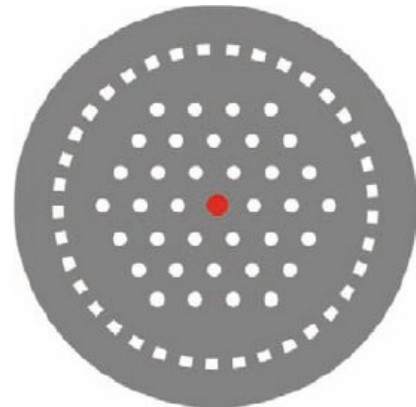
Światłowody foniczne o odpowiedniej strukturze są medium, które znajduje również zastosowanie w dziedzinie optyki nieliniowej. Są to tak zwane światłowody NL PCF czyli włókna foniczne o wysokiej nieliniowości. Istotną własnością włókien PCF jest możliwość otrzymania wartości efektywnego współczynnika załamania światła znacznie wyższego niż w konwencjonalnych światłowodach. Dzieje się tak poprzez zwiększanie średnicy powietrznych otworów lub zmniejszeniu rozmiarów rdzenia światłowodu. Dzięki temu światło jest wtłoczone do rdzenia ze szkła kwarcowego powodując silne uwięzienie modów co prowadzi do zwiększenia gęstości mocy w rdzeniu i w następstwie wzmocnienia efektów nieliniowych. Ponadto wiele z nieliniowych eksperymentów wymaga włókien o specjalnej charakterystyce dyspersji chromatycznej. W konsekwencji włókna foniczne są z powodzeniem wykorzystywane do realizacji nieliniowych urządzeń światłowodowych. Jednym z ważnych przykładów jest generacja superkontinuum, czyli tworzenie szerokiego ciągłego spektrum przy pomocy impulsów dużej mocy w nieliniowym ośrodku. Termin superkontinuum nie określa jednego zjawiska ale raczej bogactwo nieliniowych efektów, które w połączeniu prowadzą do skrajnego rozszerzenia widma. Decydującymi czynnikami do generacji superkontinuum są dyspersja nieliniowego medium, odpowiednia do długości pompowanej fali, długość impulsu, moc szczytowa oraz nieliniowość światłowodu i co za tym idzie długość odcinka włókna wykorzystywanego do generacji. Ponieważ nieliniowe efekty zaangażowane w poszerzenie

spektralne są silnie zależne od dyspersji ośrodka, to właściwe jej kształtowanie może znacznie zmniejszyć wymaganą moc.

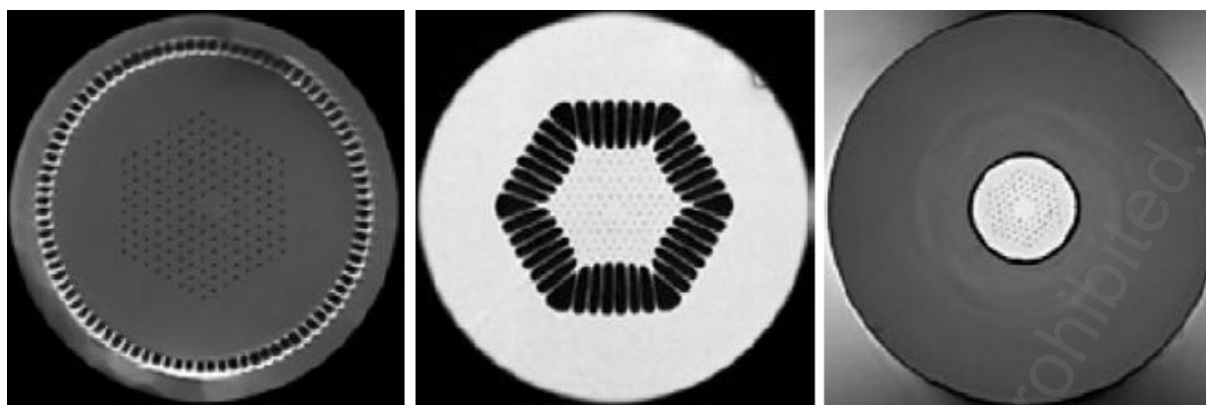
Szersze spektrum może być osiągnięte, gdy impulsy są pompowane blisko długości fali o zerowej wartości dyspersji chromatycznej [3, 15, 18, 19].

5. Włókna foniczne o dużej średnicy pola modu

Całkiem odmiennym typem włókien PCF są światłowody o dużej średnicy pola modu - LMA (*Large Mode Area*), składające się ze struktury powietrznych otworów o trójkątnej sieci przestrzennej, gdzie rdzeń jest zdefiniowany jako brakujący otwór. Średnica rdzenia może być zdefiniowana jako $d_{rdzenia} = 2\Lambda - d$ i odpowiada odległości pomiędzy krawędziami przeciwległych otworów w strefie rdzenia. Gdy stosunek $d/\Lambda < 0,4$ światłowód foniczny o trójkątnej strukturze otworów wykazuje jednodomowość bez względu na długość fali. Światłowody o dużej średnicy pola modu są wykorzystywane przede wszystkim do aplikacji wymagających przetwarzania wielkich mocy. Duża gęstość mocy skupiona w rdzeniu o małych rozmiarach może powodować negatywne skutki związane z uszkodzeniem struktury światłowodu oraz ze znacznym wpływem nieliniowości materiału. Ograniczenia te niwelowane są w przypadku, gdy wykorzystane zostają światłowody o dużym polu modu. W szczególności włókna tego typu znajdują zastosowanie przy emisji w ultrafiolecie i w paśmie fal widzialnych, do laserów włóknistych, wzmacniaczy optycznych oraz do generacji i propagacji wiązek o dużej mocy w celu spawania lub cięcia elementów [12]. Konwencjonalne włókna aktywne, wykorzystywane do konstrukcji laserów i wzmacniaczy są światłowodami, w których rdzeń został domieszkowany pierwiastkami ziem rzadkich. Światłowody foniczne do propagacji dużej mocy są projektowane jako dwupłaszczowe struktury, gdzie drugi region z niskim współczynnikiem załamania działa jak płaszcz dla dużego rdzenia, w który pompuje się światło. Centrum takiego rdzenia stanowi znacznie mniejszy, domieszkowany rdzeń sygnałowy. W odniesieniu do bardziej tradycyjnych konstrukcji, dwupłaszczowe włókna pozwalają osiągnąć większą powierzchnię pompowania i większą aperturę numeryczną. Daje to możliwość pompowania światłowodów za pomocą relatywnie tańszych wielomodowych diod. Fale wprowadzone do płaszczu przenikają do rdzenia, w którym podlegają konwersji do dobrej jakości wiązki laserowej. Jednakże warto podkreślić, że gdy rozważa się transmisję dużej mocy, konieczna jest optymalizacja parametrów włókna takich jak apertura numeryczna, średnica rdzenia oraz długość włókna w celu osiągnięcia wydajnego sprzężenia z pompowanym światłem, redukcji nieliniowości, silnej konwersji pompowanego światła i dobrych współczynników termicznych. Światłowody foniczne mogą propagować pojedynczy mod o średnicy pola powyżej $40\mu\text{m}$. Pozwala to na użycie ich, jako włókien aktywnych, w urządzeniach dużej mocy. Model dwupłaszczowego



Rys. 1. Model dwupłaszczowego włókna fonicznego [7]
Fig. 1. An air clad Photonic Crystal Fiber [7]



Rys. 2. Mikroskopowe zdjęcia przekrojów poprzecznych światłowodów fotonicznych ze szkła krzemionkowego z powietrznym płaszczem [7]
Fig. 2. Microscope Pictures of the cross-section of three different air-clad Photonic Crystal Fibers. [7]

fotonicznego włókna pokazany jest na rys. 1. Prezentowane włókno posiada strukturę pozwalającą na propagację modów o dużej średnicy pola, ma w centrum domieszkowany rdzeń i prowadnicę w postaci zewnętrznego pierścienia otworów [8, 13, 17].

6. Światłowody fotoniczne z powietrznym rdzeniem

Kolejnym typem światłowodów fotonicznych są włókna z powietrznym rdzeniem (PCF HC – *Hollow Core*), włókna takie wykazują niską nieliniowość oraz wysoki próg wytrzymałości na duże natężenia światła. Efekty te związane są ze sposobem prowadzenia modów w powietrznym rdzeniu oraz z tym, że światło w niewielkim stopniu propaguje w szkłe. W konsekwencji są potencjalnymi kandydatami do przyszłych systemów telekomunikacji światłowodowej. Inne zastosowania, być może bliższe realizacji w praktyce, które z powodzeniem wykorzystują korzyści jakie niesie propagacja fali świetlnej w powietrzu, to prowadzenie włóknem ciągłej fali o dużej mocy, propagacja nanosekundowych impulsów laserowych wielkiej mocy użytecznych przy cięciu, spawaniu, pomiarach prędkości, chirurgii laserowej oraz generacji impulsów THz [1,5]. Ponadto włókna *Hollow Core* są odpowiednie do przeprowadzania nieliniowych procesów w gazach, które wymagają dużego natężenia światła, długiej drogi oddziaływania oraz odpowiedniego profilu poprzecznego wiązki. Na przykład, we włóknie fotonicznym z rdzeniem wypełnionym wodorem, próg wymuszonego rozpraszania Ramana jest o rząd wielkości mniejszy niż otrzymany w innych eksperymentach [8]. Na podobnej zasadzie można wykrywać i monitorować śladowe ilości gazów lub wzmacniać moc emitowaną z komórek gazowych laserów. Możliwe jest również przemieszczanie stałych elementów wewnątrz włókna przy pomocy ciśnienia promieniowania świetlnego. Przykładowo wystarczy tylko 80mW mocy światła z lasera argonowego (centralna długość fali $\lambda_c = 514\text{nm}$), żeby przetransportować 5 μm polistyrenową kulkę wzdłuż 15cm włókna fotonicznego z powietrznym rdzeniem o średnicy 20 μm [4,14, 20].

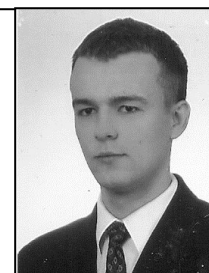
7. Wnioski

Światłowody fotoniczne mają ogromny zakres zastosowań. Jest to dziedzina stosunkowo nowa i wraz z poznawaniem i badaniem struktur światłowodów fotonicznych, będą powstawać nowe bardziej zaawansowane rozwiązania. Rozwój technologii wytwarzania pozwoli udoskonalić mikrostrukturę otrzymywanych włókien, a co za tym idzie polepszyć ich parametry. Dzięki szerokiemu zainteresowaniu środowisk badawczych można być pewnym, że światłowody fotoniczne będą się rozwijać jeszcze intensywniej oraz znajdą zastosowanie w wielu aplikacjach.

Literatura

- [1] Ebendorff-Heidepriem H., Furusawa K.: *Fundamentals and Applications of Silica and Nonsilica Hollow Fibers*, The International Society for Optical Engineering, 2004 Vol. 5350.
- [2] Ferrando A., Silvestre E.: *Designing the Properties of Dispersion-Flattened Photonic Crystal Fibers*, Optics Express, 2001, Vol. 9, pp. 687-697.
- [3] Harrington J. A.: *Infrared Fiber Optics*, Handbook of Optics Vol. IV *Fiber Optics and Nonlinear Optics*, Optical Society of America, 2001.
- [4] Kelley P. L., Kaminow I. P.: *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [5] Limpert J., Schreiber T.: *High-Power Air-Clad Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Laser*, Optics Express, 2003, Vol. 11, pp. 818-823.
- [6] Patela S.: *Dyspersja Światłowodów*, Politechnika Wroclawska, 2003.
- [7] Poli F., Cucinotta A.: *Photonic Crystal Fibers Properties and Applications*, Springer, 2007.
- [8] Portier C., Fatom J.: *Experimental Investigation of Brillouin and Raman Scattering in a 2SG Sulfide Glass Microstructured Chalcogenide Fiber*, Optics Express, 2008, Vol. 16, pp. 9398-9404
- [9] Price J. H. V., Monro T. M.: *Non-Silica Microstructured Optical Fibers for Mid-IR Supercontinuum Generation from 2 μm - 5 μm* , 2006, International Society for Optical Engineering, Vol. 6102, pp. 54-68.
- [10] Russell P. St. J.: *Photonic-Crystal Fibers*, Journal of Lightwave Technology, 2006, Vol. 24, pp. 4729-4749.
- [11] Sanghera J. S., Aggarwal I. D.: *Infrared Fiber Optics*, CRC Press, 1998.
- [12] Schülzgen A., Li L.: *Single-Frequency Fiber Oscillator with Watt-Level Output Power Using Photonic Crystal Phosphate Glass Fiber*, Optics Express, 2006, Vol. 14, pp. 7087-7092.
- [13] Siuzdak J.: *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, 1999.
- [14] Stępień R., Jędrzejewski K.: *Active Fluoride Glasses for Laser Applications*, Opto-Electronics Review, 2000, Vol. 8, pp. 137-146.
- [15] Takushima Y.: *High Average Power, Depolarized Super-Continuum Generation Using a 1.55- μm ASE Noise Source*, Optics Express, 2005, Vol. 13, pp. 5871-5877.
- [16] Van Eijkelenborg M. A., Argyros A.: *Recent Progress in Microstructured Polymer Optical Fibre Fabrication and Characterization*, Optical Fiber Technology, 2003, Vol. 9, pp. 199-209.
- [17] Villatoro J., Kreuzer M. P.: *Photonic Crystal Fiber Interferometer for Chemical Vapor Detection with High Sensitivity*, Optics Express, 2009, Vol. 17, pp. 1447-1453.
- [18] Xia Ch., Kumar M.: *Power Scalable Mid-Infrared Supercontinuum Generation in ZBLAN Fluoride Fibers with up to 1.3 Watts Time-Averaged Power*, Optics Express, 2007, Vol. 15, pp. 865-871.
- [19] Xiong Ch.: *Nonlinearity in Photonic Crystal Fibres*, University of Bath, Department of Physics, 2008.
- [20] Zajac A., Świderki J.: *Lasery włóknowe dużej i średniej mocy – problemy konstrukcyjne i wybrane aplikacje*, X Konferencja Naukowa Światłowody i Ich Zastosowania, Krasnobród 2006, Wydawnictwo Liber Duo s.c., str. 469-505.

Mgr inż. Tomasz Szuster
e-mail: szustertomasz@gmail.com



Tomasz Szuster jest studentem studiów doktoranckich na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się przede wszystkim w dziedzinie światłowodów. Tomasz Szuster otrzymuje stypendium ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.