



Światłowody fotoniczne

WALDEMAR GRABIEC

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Światłowody fotoniczne stanowią nową klasę włókien optycznych, charakteryzujących się wieloma nowymi, niezwykle interesującymi właściwościami. Jedną z nich jest możliwość kształtowania parametrów włókna poprzez modelowanie parametrów jego geometrii na etapie poprzedzającym proces produkcji.

W artykule przedstawiono ideę działania światłowodów fotonicznych, ich klasyfikację, budowę oraz własności, które są przydatne głównie pod kątem aplikacji telekomunikacyjnych.

Słowa kluczowe: światłowody mikrostrukturalne, światłowody fotoniczne, kryształy fotoniczne, fotoniczna przerwa wzbroniona

Symbole UKD: 535.8; 621.39

1. Wprowadzenie

Światłowody swoje miejsce w telekomunikacji znalazły we wczesnych latach 70. ubiegłego stulecia. Pomimo upływu kilkadziesiąt lat, uważane są one ciągle za najefektywniejsze medium transmisyjne i znajdują szerokie zastosowanie we wszystkich rodzajach sieci telekomunikacyjnych, w tym również w dynamicznie rozwijanych sieciach teleinformatycznych. Zasadniczym obszarem zastosowań światłowodów w roli medium transmisyjnego są sieci szkieletowe i teletransmisja dalekosiężna.

Wykształciło się więc pojęcie telekomunikacji optycznej określanej również mianem **optotelekomunikacji**, jednoznacznie kojarzące się ze spektakularnymi osiągnięciami współczesnej nauki (głównie elektroniki i fotoniki) w dziedzinie technik informacyjnych.

Telekomunikacja optyczna w ostatnim czasie przechodzi okres bardzo dynamicznych przemian. Powodem tego jest przede wszystkim lawinowy wzrost transmisji danych, głównie internetowych. Niezwykle dynamiczny rozwój sieci

Internet spowodował, iż zaistniała nagle potrzeba transmitowania ogromnej ilości informacji. W związku z tym, w ostatnim czasie obserwuje się szybkie wprowadzanie do eksploatacji teletransmisyjnych systemów pracujących ze zwielokrotnieniem falowym DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Jednocześnie dąży się do realizacji całkowicie optycznych (*all optical*) sieci transportowych OTN (*Optical Transport Network*), w których wszystkie operacje na przenoszonym sygnale (multipleksacja, regeneracja, komutacja itp.) przeprowadzane byłyby wyłącznie w jego domenie optycznej z pominięciem stratnych konwersji optyczno-elektrycznych.

Zmiany te wymuszają podejmowanie szeregu prac badawczo-rozwojowych, mających na celu tworzenie bardziej wydajnych i efektywniejszych optycznych urządzeń sieciowych oraz włókien światłowodowych.

W drugiej połowie lat 90. dwudziestego wieku zakończono prace nad światłowodami o całkowicie nowej filozofii działania. Ta nowa klasa światłowodów nosi nazwę **światłowodów fonicznych** PCF (*Photonic Crystal Fibers*). W chwili obecnej włókna PCF komercyjnie oferowane są już przez szereg firm światowych, np. [14]. Pomimo, iż światłowody te są praktycznie jeszcze na etapie poznawania i badań, ze względu na swoje niezwykle ciekawe właściwości bardzo szybko znajdują możliwość zastosowań w wielu dziedzinach nauki i techniki.

Niniejszy artykuł ma charakter informacyjno-zapoznawczy. Przedstawiono w nim klasyfikację, budowę i mechanizm działania światłowodów fonicznych. Przytoczona klasyfikacja światłowodów fonicznych z pewnością nie jest ostateczna. Prace ciągle trwają i z pewnością będą pojawiać się nowe rodzaje i odmiany włókien. W artykule scharakteryzowano te własności i parametry światłowodów fonicznych, które są istotne z punktu widzenia ich możliwości transmisyjnych. Poruszono również zagadnienie produkcji światłowodów PCF, co samo w sobie jest tematem nowatorskim i niezwykle interesującym.

2. Istota fonicznego pasma wzbronionego i kryształy foniczne

Działanie światłowodów PCF oparte jest głównie na zjawisku fizycznym noszącym nazwę **fonicznej przerwy wzbronionej** PBG (*Photonic Band Gap*). W związku z tym poniżej przedstawiona zostanie — ze względu na ograniczoną objętość artykułu — w sposób bardzo pobieżny idea tego zjawiska. Dokładniejszy opis zjawiska PBG można znaleźć w literaturze, np. [1, 2].

Koncepcja fonicznego pasma wzbronionego zaproponowana została przez amerykańskich naukowców: Eli Yablonovitcha i Sajeev Johna. Celem ich prowadzonych niezależnie badań było uzyskanie optycznych struktur materiałowych, które miałyby podobny wpływ na poruszające się w nich fotony, jak półprzewodniki na elektrony. Innymi słowy, chodziło o wytworzenie materiałów stanowiących swoiste *półprzewodniki światła*.

W 1987 roku Yablonovitch wykazał, że jest możliwe uzyskanie materiału, który posiadałby wzbronioną przerwę energetyczną dla fotonów. Materiały te określono mianem kryształów fotonicznych (fotonowych, optycznych) — *photonic crystals*. Występowanie pasma wzbronionego w znanych nam półprzewodnikach związane jest z falowymi własnościami elektronów. W krzemie i innych materiałach półprzewodnikowych odległości między atomami wynoszą ok. 0,25 nanometra. Kryształy fotoniczne mają podobne struktury, lecz przedstawione w znacznie większej skali. Jednym słowem, kryształy fotoniczne stanowią struktury periodyczne, w których fala elektromagnetyczna o częstotliwościach z pewnego zakresu bez względu na swój kierunek nie może się propagować. Te przedziały częstotliwości (długości fal) stanowią tzw. *fotoniczne pasmo wzbronione*.

W obrazowy sposób można wyobrazić sobie taki kryształ fotoniczny jako blok specjalnego szkła z wywierconymi cylindrycznymi kanałami o średnicy 400 nanometrów, tworzącymi regularną matrycę. Fala świetlna wchodząca do takiego „dziurawego” obiektu będzie się częściowo załamywać, a częściowo odbijać od licznych powierzchni stanowiących granicę ośrodków — szkła i powietrza. Fale nakładające się na siebie będą wzmacniały się lub wygaszały, przy czym zależeć to będzie od pewnych parametrów, takich jak: długość i kierunek rozchodzenia się fali, wartość współczynnika załamania szkła, średnica otworków, odległość między nimi i sposób ich rozmieszczenia [3]. Jako ciekawostkę należy podać, że pionierskie prace nad uzyskaniem kryształów fotonicznych w praktyce polegały właśnie na wytwarzaniu takich bloków z tysiącami odpowiednio rozmieszczonych otworów, nawierczanych przy pomocy wiertarek sterowanych alfanumerycznie. W 1991 Yablonovitch po latach badań i prób uzyskał materiał wykazujący istnienie pasma wzbronionego dla fali świetlnej. Na cześć odkrywcy uzyskany kryształ fotoniczny nazwano *jablonowitem*.

Kryształy fotoniczne posiadają wiele ciekawych (wręcz egzotycznych) własności. Między innymi pozwalają na propagację dozwolonych modów z bardzo małymi stratami i zmianę kierunków propagacji pod bardzo ostrymi kątami.

Nie sposób w tym miejscu nie wspomnieć o fakcie, że ze zjawiskiem fotonicznej przerwy wzbronionej mamy do czynienia niemal na co dzień. Przyroda wytwarza bowiem periodyczne struktury fotoniczne na skrzydłach niektórych odmian motyli, dzięki czemu możemy podziwiać charakterystyczne świetliste zielone lub niebieskie plamy („oczy”). Zawdzięczają one swą piękną barwę zjawisku dyfrakcji na strukturach fotonicznych zlokalizowanych na łuskach skrzydeł. Zjawisko fotonicznej przerwy wzbronionej występuje również w strukturze opalu, kamienia szlachetnego odznaczającego się dzięki temu zjawisku pięknymi, mieniącymi się barwami.

W obu ww. przypadkach mamy do czynienia z tzw. niepełną fotoniczną przerwą wzbronioną, wynikającą z rozchodzenia się światła w pewnych kierunkach.

Odkrycie materiałów z fotoniczną przerwą wzbronioną jest niewątpliwie jednym z największych osiągnięć fotoniki końca ubiegłego stulecia. Kryształy fotoniczne znalazły już szereg zastosowań. Najważniejsze z nich to: wytwarzanie włókien optycznych, realizacja diod emitujących światło charakteryzujących się

dużą wydajnością, fotoniczne układy scalone, technika laserowa. Niezwykle intensywnie prowadzone są prace związane z wykorzystaniem kryształów fotonicznych w produkcji włókien światłowodowych, czyli światłowodów fotonicznych.

3. Klasyfikacja, budowa i zasada pracy światłowodów fotonicznych

Światłowody fotoniczne PCF (*Photonic Crystal Fibers*) stanowią podgrupę tzw. światłowodów mikrostrukturalnych (*microstructured fibers*), których klasyfikację przedstawia rysunek 1.

Zaprezentowano najczęściej przytaczaną w literaturze klasyfikację światłowodów mikrostrukturalnych. Zamieszczono również widoki poprzecznych przekrojów poszczególnych typów włókien. Przytoczona klasyfikacja obejmuje te rodzaje światłowodów PCF, które są już dostępne na rynku w postaci gotowego produktu. Światłowody Bragga, zaliczane do światłowodów mikrostrukturalnych, nie będą w niniejszym artykule omawiane.

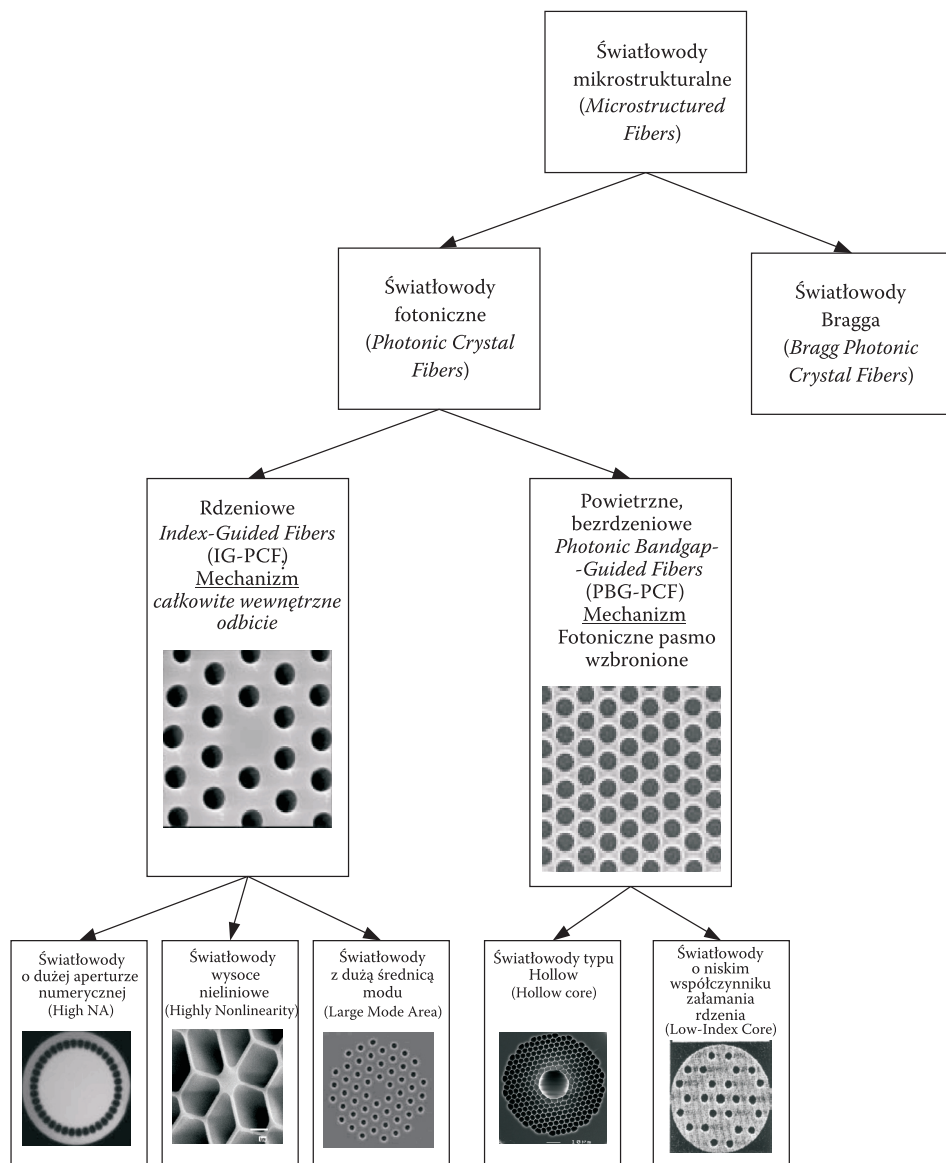
Na rysunku 2 przedstawiono w sposób poglądowy różnicę w budowie włókna światłowodu konwencjonalnego i fotonicznego.

Konwencjonalne włókno światłowodowe stanowi układ dwóch ośrodków optycznych (rdzeń i płaszcz) charakteryzujących się różnymi współczynnikami załamania (rys. 2a). Fala świetlna propaguje się w rdzeniu (mającym wyższy współczynnik załamania niż płaszcz) wskutek istnienia zjawiska całkowitego wewnętrznego załamania TIR (*Total Internal Reflection*) występującego na granicy ośrodków.

Światłowody fotoniczne posiadają natomiast strukturę dwuwymiarowego kryształu fotonicznego z defektem wprowadzonym podczas produkcji. Defekt ten stanowi rdzeń światłowodu będący obszarem propagacji fali świetlnej. W uproszczeniu, powoduje on „uwięzienie” fali świetlnej — nie pozwala jej na wydostanie się na zewnątrz. W rzeczywistości światłowodów PCF stanowi uporządkowaną mikrostrukturę (matrycę) otworków powietrznych (*air holes*) biegnących wzdłuż jego długości, posiadających określoną średnicę, układ geometryczny i rozmieszczenie względem siebie.

Wprowadzany do struktury defekt może mieć różny charakter (rys. 3).

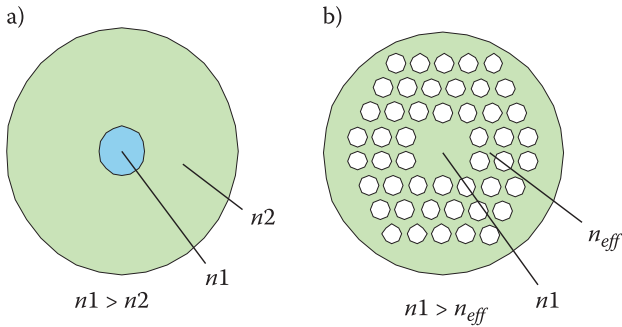
Pierwsze wyprodukowane światłowody PCF posiadały defekt typu *high-index* (rys. 3a), co spowodowane było głównie ówczesnymi możliwościami technologicznymi. W rozwiązaniu tym centralny otwór zastąpiony został litym materiałem (krzemionką), tworzącym rdzeń światłowodu (*solid-core*). W tego typu włóknach rdzeń charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania w porównaniu ze średnim (efektywnym) współczynnikiem załamania otaczającego go płaszczem utworzonego z matrycy otworków powietrznych. Propagacja światła bazuje więc na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia, podobnie jak ma to miejsce w światłowodach konwencjonalnych. Poprzez zmianę parametrów otworków powietrznych możemy wpływać na wielkość efektywnego współczynnika załamania w płaszczu. Opisany powyżej typ światłowodu PCF



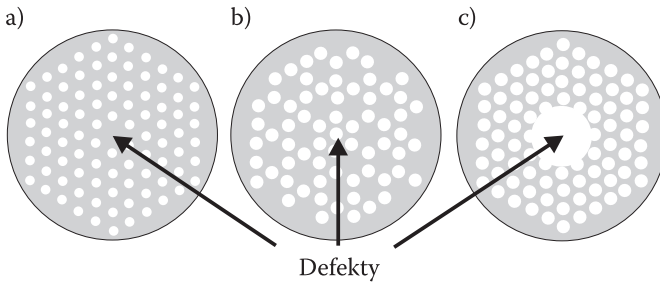
Rys. 1. Klasyfikacja światłowodów mikrostrukturalnych

określany jest w literaturze jako **IG-PCF** (*Index-Guiding PCF*), co można przetłumaczyć jako: *światłowod fotoniczny z prowadzeniem indeksowym*.

Innym rozwiązaniem są światłowody z defektem typu *low-index* oraz *air-index* (rys. 3b,c). Posiadają one wydrążony rdzeń (*air-core*), wypełniony powietrzem oraz obszar otworków w krzemionce, który pełni rolę płaszczka. Światłowody fotoniczne



Rys. 2. Światłowod konwencjonalny (a) i fotoniczny (b): n_1 — współczynnik załamania rdzenia; n_2 — współczynnik załamania płaszcz; n_{eff} — efektywny współczynnik załamania płaszcz



Rys. 3. Rodzaje defektów wprowadzone podczas produkcji światłowodów fotonicznych: a) defekt typu *high-index*; b) defekt typu *low-index*; c) defekt typu *air-index*

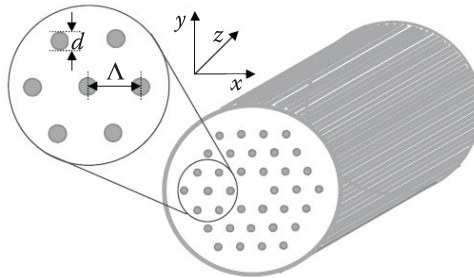
z defektem typu *low-index* określane są jako *honeycomb* („plaster miodu”). W światłowodach z rdzeniem powietrznym propagujące się mody uwięzione są w rdzeniu o **obniżonym** współczynniku załamania (w stosunku do płaszcz) wskutek istnienia efektu fotonicznej przerwy wzbronionej (PBG). Istnieje więc tutaj sytuacja odwrotna niż w opisanych wcześniej światłowodach IG-PCF (czy też światłowodach konwencjonalnych), gdzie rdzeń charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania niż płaszcz. Mechanizm propagacji światła w światłowodach z pustym rdzeniem (powietrznym) bazuje na konstruktywnej interferencji odbitych fal optycznych i nie dopuszcza do propagacji fali świetlnej w płaszczu, która „zmuszona” jest niejako do propagowania się w rdzeniu. Fala świetlna przemieszcza się w pustym rdzeniu tworząc swoistą rurę, odbijając się od jej ścian (granicy z płaszczem) wzdłuż całej długości włókna. Ten rodzaj światłowodów fotonicznych określany jest jako **PBG-PCF** (*Photonic Bandgap PCF*), czyli światłowod fotoniczny oparty na zjawisku fotonicznej przerwy wzbronionej.

Powyższe mechanizmy prowadzenia (propagacji) światła determinują odmienną naturę i właściwości światłowodów fotonicznych [1, 4].

W dalszej części artykułu zostaną przedstawione podstawowe (z punktu widzenia optotelekomunikacji) właściwości światłowodów fotonicznych: IG-PCF i PBG-PCF.

Parametry i własności optyczne światłowodów PCF determinuje głównie ich geometria, określana przez następujące wielkości (rys. 4):

- średnica otworków powietrznych — d ,
- odległość między sąsiednimi otworkami (tzw. stała siatki) — Λ ,
- rozmieszczenie otworków względem siebie (stosunek d/Λ).



Rys. 4. Parametry geometryczne światłowodu fotonicznego

3.1. Właściwości światłowodów typu IG-PCF

Właściwości światłowodów IG-PCF, opartych na całkowitym wewnętrznym odbiciu, pod wieloma względami przypominają właściwości światłowodów konwencjonalnych ze skokowym współczynnikiem załamania (*Step-Index Fiber*). Wiele nowych, w porównaniu ze światłowodami konwencjonalnymi, właściwości wynika głównie z dwuwymiarowej struktury płaszczka oraz z faktu istnienia stosunkowo dużej różnicy (kontrastu) współczynników załamania rdzenia i płaszczka. Wpływa to w znaczący sposób m.in. na liczbę prowadzonych modów, dyspersję oraz aperturę numeryczną.

3.1.1. Propagacja w światłowodach IG-PCF

W konwencjonalnym światłowodzie skokowym liczba prowadzonych modów wyznaczona jest poprzez tzw. częstotliwość znormalizowaną, którą określa zależność:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{core}^2 - n_{silica}^2}, \quad (1)$$

gdzie: λ — długość fali;

a — promień rdzenia;

n_{core} — współczynnik załamania rdzenia;

n_{silica} — współczynnik załamania płaszczka (czysta krzemionka).

Dla częstotliwości znormalizowanej $V < 2,405$ konwencjonalny światłowod propaguje jeden mod (jest światłowodem jednomodowym). Jednakże tryb pracy jednomodowej określony jest tylko dla pewnego przedziału długości fali zdeterminowanego przez długość fali odcięcia λ_c . Dla fal krótszych od λ_c mamy do czynienia z propagacją wielu modów (praca wielomodowa).

W przypadku światłowodów IG-PCF istnieje możliwość prowadzenia **zawsze** jednego modu bez względu na długość fali. Warunek ten dotyczy zakresu przepuszczalności szkła kwarcowego. Zjawisko pracy jednomodowej dla tych światłowodów obserwowano dla geometrii włókna, gdzie otwórki powietrzne płaszcza tworzyły siatkę trójkątną, będąc jednocześnie odpowiednio rozmieszczone, zachowując stosunek: $d/\Lambda \leq 0,41$ [5].

Konstruując światłowody PCF z zachowaniem stosunku d/Λ poniżej pewnej wartości (wartość 0,41 dla siatki trójkątnej [6]), uzyskamy włókno mogące prowadzić tylko jeden mod fali optycznej. Pomimo że teoretycznie podczas projektowania światłowodu propagującego jeden mod każda wartość d/Λ jest możliwa do zaakceptowania, to zakres pracy jednomodowej w szerokim zakresie propagowanych fal uzyskuje się dla wartości stosunku $d/\Lambda = 0,15 \div 0,45$.

Warunek „jednomodowości” związany jest jedynie ze względnym stosunkiem parametrów geometrycznych światłowodu PCF (d , Λ), daje więc to możliwość wytwarzania jednomodowych światłowodów IG-PCF o bardzo dużych (w porównaniu z długością fali) polach modu i dużych średnicach rdzenia, osiągających nawet wartość 30 μm [7].

Światłowody takie charakteryzuje bardzo mała nieliniowość oraz duża odporność na uszkodzenie. Nadają się więc do zastosowań w telekomunikacji (systemy zwielokrotnienia optycznego DWDM), gdzie przy zachowaniu dużej liniowości mogą przenosić duże moce optyczne, bez występowania przeników energii między kanałami optycznymi.

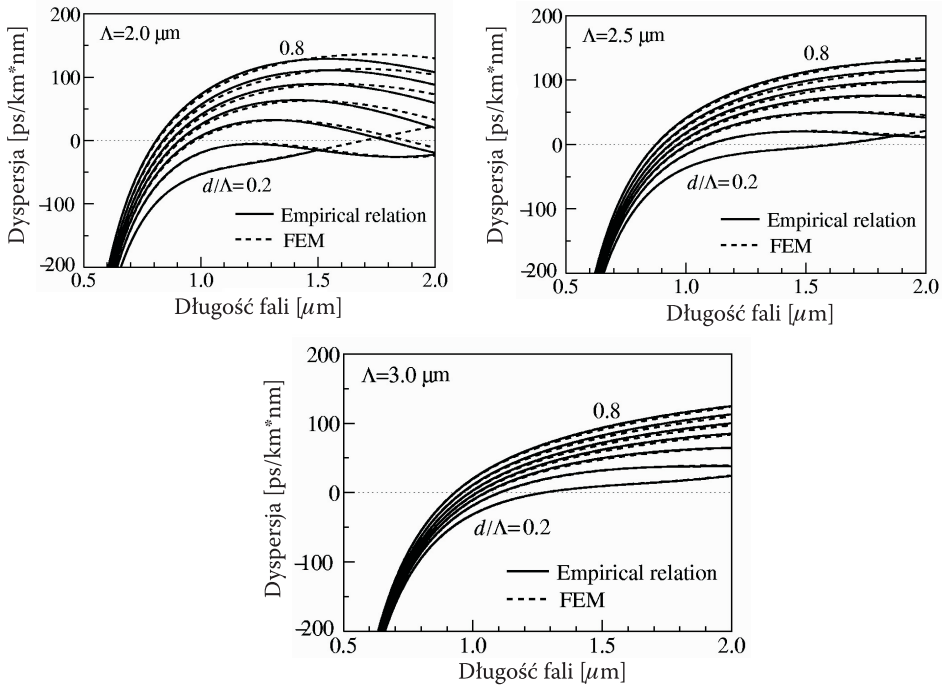
Należy w tym miejscu zaznaczyć, że jednomodowe światłowody IG-PCF znajdują zastosowanie m.in. przy konstrukcji sensorów (czujników) szeregu wielkości nieelektrycznych oraz czujników zaburzeń mechanicznych. Jest to w chwili obecnej bardzo intensywnie badany obszar aplikacji światłowodów PCF.

3.1.2. Dyspersja światłowodów IG-PCF

Należy z całą świadomością stwierdzić, że dyspersja jest jednym z najistotniejszych parametrów światłowodów, znacznie ograniczających ich możliwości transmisyjne.

Dyspersja chromatyczna, będąca sumą dyspersji materiałowej i falowodowej, z powodu „rozmycia” transmitowanych impulsów ogranicza wykorzystanie światłowodów jednomodowych do przesyłania sygnałów o dużych przepływnościach.

Rysunek 5 przedstawia charakterystyki dyspersji w funkcji długości fali dla światłowodów IG-PCF, wyznaczone eksperymentalnie oraz obliczone metodą elementów skończonych FEM (*Finite Element Method*) przy różnych wartościach stosunku d/Λ [8].



Rys. 5. Dyspersja chromatyczna jako funkcja długości fali dla trzech wartości okresu siatki

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk, przebiegi dyspersji chromatycznej w dużym stopniu zależą od parametrów geometrycznych światłowodu. Zwiększanie średnicy otworków w płaszczu (wzrost stosunku d/Λ) powoduje przesuwanie się punktu zerowej dyspersji w kierunku fal krótszych. Dla konwencjonalnych włókien światłowodowych zerowa wartość dyspersji przypada dla długości fali $1,28 \mu\text{m}$. W przypadku światłowodów fotonicznych możliwe jest uzyskanie zarówno ujemnej, jak i dodatniej dyspersji dla tej długości fali. Na uwagę zasługuje również fakt osiągnięcia przez dyspersję stałych wartości dla zakresu fal dłuższych.

Bardzo interesującą odmianą światłowodów IG-PCF są włókna o wysokiej nieliniowości. Prowadzą one światło w cienkim rdzeniu krzemionkowym, otoczonym mikrostrukturalną powłoką, utworzoną z dużych, periodycznie ułożonych otworków powietrznych (patrz: klasyfikacja światłowodów mikrostrukturalnych przedstawiona na rysunku 1).

Tego typu włókna optyczne posiadają zerową wartość dyspersji na długości fali $1,55 \mu\text{m}$ (tzw. trzecie okno optyczne wykorzystywane w telekomunikacji) i mogą znaleźć zastosowanie w telekomunikacji do budowy regeneratorów optycznych 2R (*Reamplification, Reshaping*), wzmacniaczy parametrycznych, konwerterów długości fali i przełączników optycznych. Poprzez zmianę profilu włókna możliwe jest projektowanie zarówno wielkości, jak i znaku dyspersji. Dobierając odpowiednią

średnicę rdzenia, można przesuwac w szerokim zakresie długości fal punkt, przy którym dyspersja ma wartość zerową.

3.1.3. Apertura numeryczna światłowodów IG-PCF

Sprawność wprowadzania światła do włókna związana jest ściśle z wartością jego apertury numerycznej NA (*Numerical Aperture*), która zależy od współczynników załamania rdzenia i płaszczka. Apertura numeryczna określona jest następującą zależnością:

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{silica}^2}, \quad (2)$$

gdzie: n_{core} — współczynnik załamania rdzenia;
 n_{silica} — współczynnik załamania płaszczka.

Duża różnica współczynników załamania występująca pomiędzy krzemionką a powietrzem umożliwia realizację wielomodowych światłowodów IG-PCF o dużej aperturze numerycznej większej od 0,7, czyli włókien o dużych średnicach rdzeni. Z tego powodu światłowody IG-PCF charakteryzują się dobrymi własnościami przy wprowadzaniu do nich fali świetlnej (proces ten jest prostszy w realizacji) i mogą być z powodzeniem wykorzystywane do zbierania i transmisji sygnałów optycznych dużej mocy [4]. Również i te cechy światłowodów IG-PCF czynią je bardzo przydatnymi do wykorzystania w telekomunikacji optycznej.

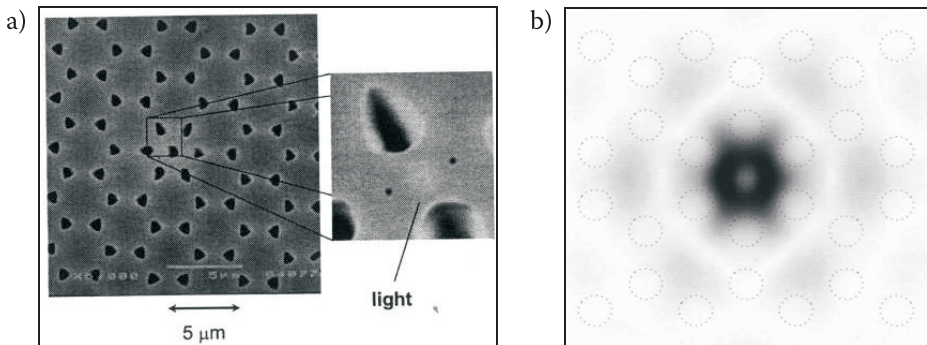
3.3.4. Straty transmisyjne światłowodów IG-PCF

Straty mocy optycznej są jednym z najważniejszych parametrów uwzględnianych w transmisji optycznej. Związane są one przede wszystkim z tłumiennością jednostkową włókna światłowodowego. W światłowodach konwencjonalnych straty te spowodowane są głównie rozproszeniem Rayleigha, bazującym na zjawisku lokalnej fluktuacji współczynnika załamania szkła kwarcowego. Minimalna wartość tłumienia jednostkowego osiągnięta dla tych światłowodów wynosi około 0,2 dB/km dla długości fali $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. W przypadku światłowodów PCF o przewodzeniu indeksowym straty rzędu ułamka dB/km były już podawane w literaturze [9]. Są one ograniczone przez rozproszenie od otaczających otworków powietrznych (*confinement loss*) i trudno się spodziewać, aby ich wartość spadła poniżej wartości strat uzyskiwanych w światłowodach konwencjonalnych. Dodatkowo, ujawniają się straty makrozgięciowe, które determinują zakres spektralny pracy światłowodu. W celu uniknięcia tych strat przyjmuje się, że stosunek d/Λ powinien być większy od 0,25, a okres siatki Λ nie powinien być mniejszy niż 2λ .

3.2. Właściwości światłowodów z foniczną przerwą wzbronioną (PBG-PCF)

3.2.1. Propagacja w światłowodach PBG-PCF

Rysunek 6 przedstawia mikroskopowy obraz przekroju włókna światłowodu PBG-PCF typu *honeycomb*. Światłowód ten posiada defekt typu *low-index* w postaci otworu o małej średnicy, umieszczonego w tle regularnej struktury heksagonalnej, tworzącej płaszcz. Badania wykazały, że w rzeczywistości energia umiejscawia się w obszarach krzemionki między otworkami powietrznymi (rys. 6b). Światłowód taki określany jest w literaturze jako PBG-PCF ze „stałym rdzeniem”, gdyż światło propaguje się de facto w litej krzemionce. Należy zwrócić uwagę na fakt, że środek światłowodu, czyli otwór powietrzny, prowadzi tylko niewielką (w praktyce ok. 6%) część fali świetlnej. Spowodowane jest to głównie występowaniem zjawiska wymuszonego tunelowania energii [10]. Ponadto, duża część energii pola umiejscowiona jest w otworkach powietrznych płaszczu i dzięki temu można uzyskać stosunkowo duży współczynnik nieliniowości [11].



Rys. 6. Światłowód PBG-PCF typu *honeycomb*: fotografia (a) [10]; rozkład pola magnetycznego (b) [12]

3.3.2. Dyspersja światłowodów PBG-PCF

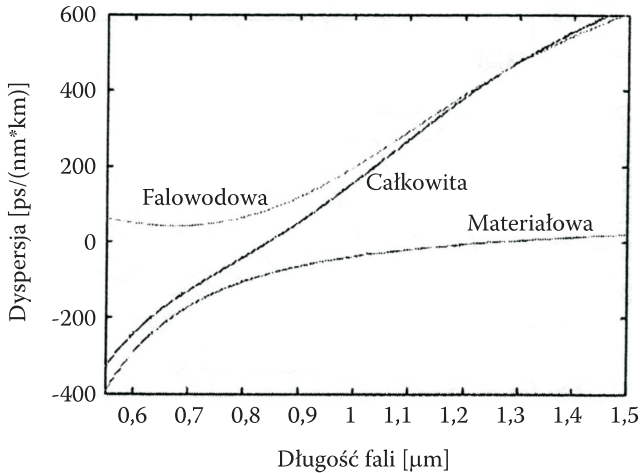
W światłowodach PBG-PCF, podobnie jak w opisanych wcześniej światłowodach z przewodzeniem indeksowym (IG-PCF) pewne parametry można kształtować już na etapie projektowania włókna. W zależności od geometrii struktury światłowodu, możliwe jest uzyskanie wielu ciekawych i wartościowych z punktu widzenia opto-telekomunikacji, parametrów. Tak jest również w przypadku dyspersji. Rysunek 7 przedstawia przebieg dyspersji w funkcji długości fali dla światłowodu o stałej sieci $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, średnicy otworków i rdzenia odpowiednio $d_{cl} = d_{co} = 0,4 \Lambda$.

Analizując powyższe charakterystyki, można dostrzec dwie bardzo istotne właściwości:

- bardzo wysoka dyspersja falowodowa, osiągająca wartość nawet $600 \text{ ps}/(\text{km} \times \text{nm})$ dla propagacji jednomodowej; umożliwia to realizację procesu kontroli dyspersji,

- wysoka dyspersja, pozwalająca na jej kompensację dla krótkich długości fal, poniżej $1,28 \mu\text{m}$.

Dla danych z rysunku 7 zerowa wartość dyspersji jest osiągnięta przy długości fali $\lambda = 850 \text{ nm}$. Jednakże przez skalowanie wymiarów światłowodu (parametrów geometrycznych włókna) punkt „zera dyspersji” może zostać przesunięty do zakresu światła widzialnego.



Rys. 7. Dyspersja dla światłowodu o stałej sieci $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, średnicy otworków i rdzenia odpowiednio $d_{cl} = d_{co} = 0,4 \Lambda$

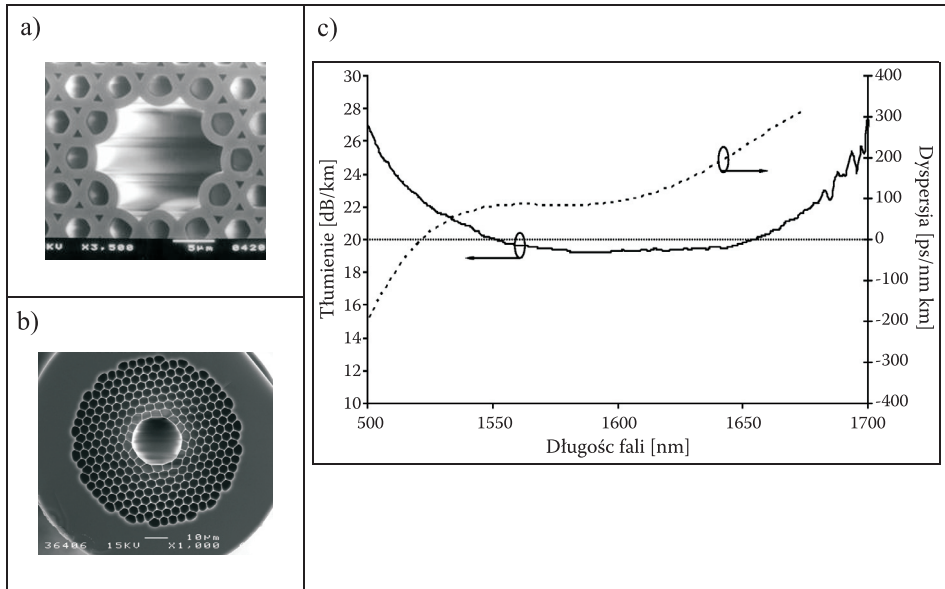
Kolejną, bardzo atrakcyjną cechą omawianych włókien jest możliwość uzyskania płaskiej charakterystyki dyspersji w szerokim zakresie długości fal.

3.2.3. Straty transmisyjne światłowodów PBG-PCF

W światłowodach z pustym (powietrznym) rdzeniem najmniejsze opisane w literaturze tłumienie wynosi $1,7 \text{ dB/km}$ dla długości fali $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [13] i tutaj granica minimalnych strat nie została jeszcze ustalona [1].

Na rysunku 8 przedstawiono typowe charakterystyki tłumienia i dyspersji (linia przerywana) dla światłowodów fotonicznych PBG-PCF z pustym rdzeniem.

Pomimo że światłowody typu PBG-PCF mają około dziesięciokrotnie większe tłumienie niż światłowody z przewodzeniem indeksowym IG-PCF, wraz z rozwojem technologii ich produkcji oczekuje się znacznego spadku wartości tego parametru nawet poniżej wartości charakterystycznej dla szkła krzemionkowego. W przypadku omawianych światłowodów fala świetlna propaguje się w pustym rdzeniu, czyli *de facto* w powietrzu.



Rys. 8. Światłowody PCF typu *hollow-core*: pierwszy wyprodukowany (a); nowszy — fotografia (b) [13]; typowe charakterystyki spektralne tłumienia i dyspersji chromatycznej (c) [14]

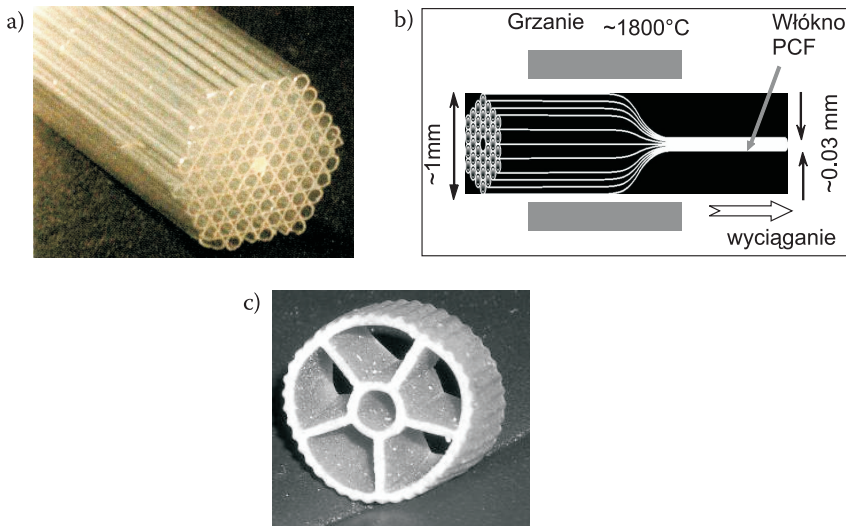
4. Wytwarzanie światłowodów fotonicznych

Biorąc pod uwagę budowę oraz wymiary geometryczne włókien PCF, można stwierdzić, że technologia ich produkcji jest nowatorska, złożona i jednocześnie niezwykle interesująca.

Dominującą metodą produkcji światłowodów fotonicznych jest metoda składania i wyciągania (*stack-and-draw*) [14]. Polega ona na układaniu prętów i rurek wykonanych ze szkła kwarcowego (krzemionki) wewnątrz rurki kwarcowej o większej średnicy i tworzeniu w ten sposób struktury stanowiącej preformę (rys. 9a). Budowa preformy określa matrycę (rozmieszczenie) otworków dla końcowego produktu, czyli włókna światłowodu. Defekty, w których prowadzona jest fala świetlna realizuje się w taki sposób, że rdzeń w światłowodach IG-PCF określa się poprzez zastąpienie rurki litym prętym kwarcowym, natomiast w przypadku światłowodów PBG-PCF usuwana jest rurka lub ich grupa.

Preforma umieszczana jest w tzw. *wieży*, gdzie jest stapiana w temperaturze ok. 2000°C i wyciągana do średnicy równej 1 mm z rozmieszczonymi wokół otworkami posiadającymi średnicę 0,05 mm. Utworzona jest w ten sposób tzw. *preforma pośrednia*, która w kolejnym kroku procesu wyciągana jest do rozmiarów końcowych włókna. W produkcie końcowym odległości między otworkami (Λ) wynoszą najczęściej $1 \div 4 \mu\text{m}$, podczas gdy średnica otworków (d) wynosi zaledwie $4 \mu\text{m}$.

Alternatywną metodą produkcji światłowodów PCF jest metoda wyciskania (*extrusion method*). Polega ona na wyciskaniu preformy krzemionkowo-powietrznej przez specjalną maskę, której kształt określa strukturę światłowodu (matrycę otworków powietrznych) (rys. 9c). Metoda wyciskania stosowana jest głównie w przypadku produkcji struktur światłowodów fotonicznych niemożliwych do osiągnięcia (wymagania co do kształtu i wymiarów otworków powietrznych) przy zastosowaniu opisanej wyżej metody, polegającej na składaniu preformy.



Rys. 9. Metoda produkcji światłowodów PCF — „układanie i wyciąganie”: układanie preformy (a); wyciąganie (b); metoda wyciskania — widok preformy (c)

5. Podsumowanie

Światłowody fotoniczne są niewątpliwie jednym z najbardziej spektakularnych osiągnięć współczesnej optoelektroniki. Pomimo że są one ciągle jeszcze na etapie poznawania i badań, odkryte dotychczas ich właściwości są bardzo obiecujące. Pozwalają one przypuszczać, iż ta nowa klasa światłowodów znajdzie szereg zastosowań w różnych dziedzinach techniki. Z pewnością najistotniejszą własnością światłowodów PCF jest możliwość kształtowania ich parametrów transmisyjnych poprzez modelowanie ich geometrii. Umożliwia to projektowanie właściwości włókna światłowodowego „na biurku” dzięki wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania. Wiele ośrodków badawczych na świecie (w tym i w Polsce) zajmuje się badaniem własności tej nowej klasy światłowodów. Pomimo że ceny światłowodów fotonicznych są jeszcze stosunkowo wysokie (złożoność technologii), należy mieć nadzieję, że w miarę wzrostu zainteresowania produktem będą

one sukcesywnie spadać. Niniejszy artykuł ma charakter zapoznawczy. Dokonano w nim krótkiej charakterystyki światłowodów fotonicznych, uwytłumiając zaledwie niewielką część ich niezwykle ciekawych własności. Starano się zwrócić uwagę na te ich właściwości, które są korzystne głównie pod kątem zastosowań w telekomunikacji optycznej. Światłowody PCF stanowią obiecującą alternatywę dla ich konwencjonalnych „starszych braci”. Jak się wydaje, szeroko obecnie rozwijane systemy DWDM mogą być obszarem potencjalnych ich zastosowań.

Na koniec należy również wspomnieć o fakcie, iż światłowody PCF są szeroko badane pod kątem aplikacji sensorowych (pomiar temperatury, ciśnienia, naprężeń itp.) oraz w systemach zabezpieczeń, jako czujniki do określenia miejsca zaburzenia. W tym ostatnim przypadku wykazują się one większą efektywnością niż światłowody konwencjonalne.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 25.09.2006 r.

LITERATURA

- [1] J. C. KNIGHT, *Photonics crystal fibers*, Nature, 424, 2003, 847.
- [2] J. C. KNIGHT, J. BROENG, T. A. BIRKS, P. ST. J. RUSSELL, *Photonic band gap guidance in optical fibers*, Science, 288, 1998, 1476.
- [3] E. YABLONOVITCH, *Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics*, Physical Review Letters, vol. 58, 1987, 2059-2062.
- [4] J. LAEGSGAARD et al., *Photonic Crystal Fibers*, Proceedings SBMO/IEEE MTT-S 2003, 2003, 259.
- [5] T. A. BIRKS et al., *Endlessly single mode photonic crystal fibers*, Opt. Lett., 22, 1997, 961.
- [6] R. F. CREAGAN et al., *Single mode photonic band gap guidance of light in air*, Science, 285, 1999, 1537.
- [7] J. C. BAGGET et al., *Comparative study of large-mode holey and conventional fibers*, Opt. Lett., 26, 2001, 1048.
- [8] K. SAITOH, M. KOSHIBA, *Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers*, Opt. Express, 13, 2004, 267-274.
- [9] K. TAJIMA et al., *Ultra low loss and long length photonic crystal fibers*, OFC, 2003.
- [10] P. RUSSELL, *Photonics Crystal Fibers*, Lectures, Wittenberg, 2002.
- [11] J. LAEGSGAARD et al., *Mode areas and field energy distribution in honeycomb photonic bandgap fibers*, J. Opt. Soc. Am. B, 20, 2003, 2037.
- [12] J. BROENG et al., *Photonic Crystal Fibers: A new class of Optical Waveguides*, Optical Fiber Technology, 5, 1999, 305.
- [13] MANGAN et al., OFC, 2004, paper PDP24.
- [14] Crystal Fibre A/S: www.crystal-fibre.com.

W. GRABIEC

Photonic crystal fibers

Summary. Photonic crystal fibers (PCFs) are a new class of fiber optics that are characterized by a set of new interesting features. One of them is the possibility of shaping the fiber parameters through modelling its geometry before a production process. The idea of PCFs operation, their structures and

features in the light of using them in telecommunication applications are presented as well. Short characteristic of manufacturing methods of PCFs are also presented here.

Keywords: microstructured fibers, photonic crystal fibers, photonic crystals, photonic band gap

Universal Decimal Classification: 535.8; 621.39