

WŁÓKNA FOTONICZNE ZE SZKIEŁ WIELOSKŁADNIKOWYCH

Dariusz Pysz, Ryszard Stępień, Kazimierz Jędrzejewski, Ireneusz Kujawa

Struktury o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania światła (np. regularnie rozmieszczone otwory) pozwalają na wytwarzanie włókien optycznych nowej generacji (włókna foniczne typu PCF - photonic crystal fibre), których własności transmisyjne mogą być modyfikowane poprzez zmiany parametrów struktury, a nie jedynie parametry materiałowe. Umożliwia to wytwarzanie włókien o własnościach nieosiągalnych w przypadku klasycznych światłowodów (np. jednorodność w całym zakresie transmisji materiału i przy dużych średnicach rdzenia - powyżej 20 μm). W ITME prowadzone są prace badawczo-technologiczne nad włóknami fonicznymi. Opracowana została metoda ich wytwarzania z wieloskładnikowych szkielek krzemianowych. Pozwala ona na wytwarzanie włókien o różnej budowie „sieci krystalicznej” (trójkątna, kwadratowa) i modyfikację ich parametrów w bardzo szerokim zakresie. Wykorzystując tę metodę otrzymano włókno typu PCF o symetrii sześciokątnej, średnicy rdzenia 8,5 μm i średnicy zewnętrznej 120 μm wykazujące zdolność transmisji światła z zakresu 400 – 160 nm.

1. WSTĘP

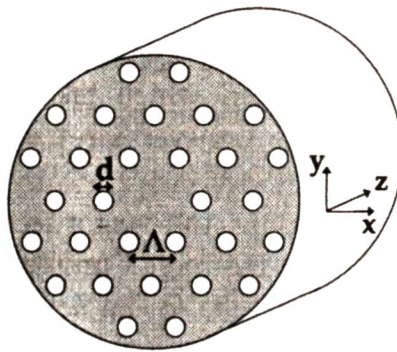
Praca dotyczy nowego zagadnienia w optoelektronice, jakim jest możliwość wytwarzania tzw. „kryształów fonicznych”. Są to struktury charakteryzujące się periodyczną modulacją współczynnika załamania światła (w 1, 2 lub 3 wymiarach) z okresem zbliżonym do długości fali świetlnej. Występuje tutaj daleko posunięta analogia między propagacją fotonu, a propagacją elektronu w kryształach (ośrodku o periodycznym potencjale). Między innymi występuje foniczna przerwa zabroniona w zakresie możliwych do propagacji częstości fali świetlnej.

Własności dwuwymiarowych struktur fonicznych umożliwiają wytwarzanie włókien światłowodowych nowej generacji (włókna o strukturze krystalicznej). W tym przypadku strukturę periodyczną tworzą otwory regularnie roz-

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133,
01-919 Warszawa, e-mail: pysz-d@sp.itme.edu.pl

mieszczące (np. sieć trójkątna) we włóknie szklanym (Rys.1). Rolę otworów może pełnić inny materiał dielektryczny, ale wskazana jest duża różnica współczynników załamania. Wprowadzenie defektu w postaci braku otworu (węzła sieci) umożliwia propagację światła w tym obszarze w oparciu o dwa efekty:

1. Całkowite wewnętrzne odbicie od strefy multikapilarowej (obszar o obniżonym efektywnym współczynniku załamania) - włókna krystaliczne (PCF).
2. Odbicie Bragga od obszaru periodycznego - dla struktur z przerwą zabronioną.



Rys.1. Włókno o strukturze krystalicznej (PCF) [5].

O tym, z którym efektem mamy do czynienia decydują parametry strukturalne: rodzaj sieci krystalicznej, odległości między otworami i ich średnice.

Włókna o strukturze krystalicznej stanowią nową klasę światłowodów charakteryzującą się niezwykle atrakcyjnymi własnościami:

- możliwość wpływania na parametry transmisyjne poprzez parametry strukturalne (odległość między otworami, średnice otworów itp.), a nie jedynie parametry materiałowe [1-6, 8-11]
- możliwość wytwarzania włókien zachowujących jednomodowość w szerokim zakresie długości fal (np. 400 ÷ 1550 nm) [1-3, 6, 8]
- możliwość wytwarzania włókien jednomodowych o dużej średnicy rdzenia (ponad 20 μm) [4, 6, 8-9] – wykorzystanie źródeł światła o większych mocach
- zmniejszenie strat światłowodów na zgięciach [2-3, 5, 8]
- możliwość wytwarzania światłowodów dwójłomnych, zachowujących polaryzację, wielordzeniowych i ich zastosowanie w dziedzinie czujników [8, 11].

Struktury fotoniczne znajdują się w centrum zainteresowania światowej optoelektroniki z uwagi na możliwość wpływania na ich własności i propagację w nich światła przez zmianę struktury przestrzennej. Pozwala to na wytwarzanie elementów optycznych o nowych, nieosiągalnych dotychczas własnościach. Najistotniejsze, dostrzegane obecnie, obszary ich zastosowań to: światłowody nowej generacji (np. zachowujące jednomodowość niezależnie od długości fali) [1-4, 8], wnęki rezonansowe i sprzęgacze o bardzo wąskim paśmie, źródła (lasery, diody) o zwiększonej szybkości emisji spontanicznej (nawet o 2 rzędy) i wyższym współczynniku wzmocnienia [7-8, 10], uzyskanie wyższych sprawności w procesach nieliniowych (np. generacja drugiej harmonicznej) [3, 6, 8].

2. PROPAGACJA ŚWIATŁA WE WŁÓKNIE PCF

Różnice w propagacji światła przez światłowód PCF i zwykłe włókno optyczne o skokowym profilu współczynnika załamania zaprezentowano na przykładzie zjawiska zachowania jednomodowości w całym zakresie transmisji spektralnej materiału [2-3].

W klasycznych włóknach optycznych liczba modów prowadzonych jest zależna od częstotliwości względnej światłowodu (V) określonej wzorem:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

gdzie: a - promień rdzenia światłowodu; λ - długość fali; n_1, n_2 - współczynnik załamania światła rdzenia i kory odpowiednio.

Światłowód jest jednomodowy gdy spełniony jest warunek:

$$V < V_c = 2,405 \quad (2)$$

Wynika stąd, że przy $\lambda \rightarrow 0$ występuje zawsze długość fali λ_c , dla której $V=V_c$. Wtedy dla fal krótszych od λ_c światłowód przestaje być jednomodowy.

W przypadku włókien fotonicznych (PCF - Rys.1) określa się efektywną częstotliwość względną:

$$V_{ef} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_{ef}^2} \quad (3)$$

gdzie: Λ - odległość między otworami równa promieniowi rdzenia; n_{ef} - efektywny współczynnik załamania dla obszaru periodycznego.

Dla krótszych fal $\lambda \rightarrow 0$ zmiany w rozkładzie pola elektromagnetycznego (większe skoncentrowanie w obszarze centralnym) skutkują zmianą n_{ef} , która skutecznie przeciwdziała wzrostowi V_{ef} . Efektywny współczynnik załamania silnie zależy od długości fali λ .

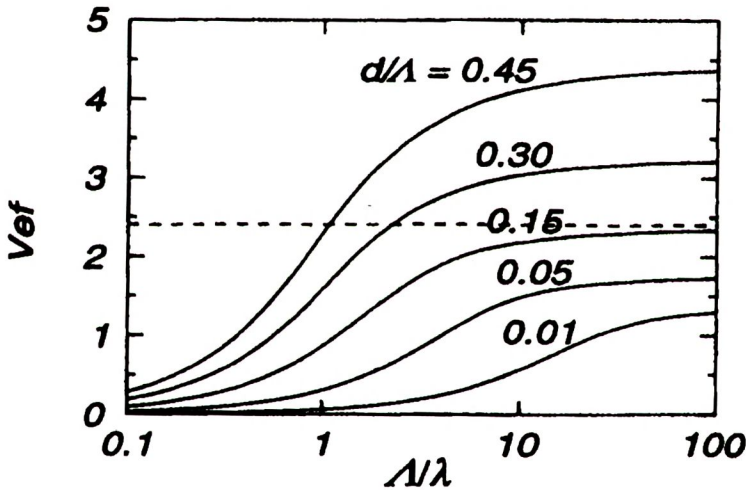
Równocześnie V_{ef} zależna jest od parametrów (D i Λ). Przy odpowiednim współczynniku wypełnienia ($d/\Lambda < 0,15$) możliwe jest spełnienie warunku $V_{ef} < 2,405$ dla wszystkich wartości λ .

Wielkość V_{ef} można określić przybliżonym wzorem:

$$V_{ef} = k\Lambda\sqrt{F}\sqrt{n_1^2 - n_a^2} \quad (4)$$

gdzie: $k = 2\pi/\lambda$; n_a – współczynnik załamania ośrodka wypełniającego otwory; F – współczynnik wypełnienia obszaru periodycznego.

Na Rys.2 przedstawione są wyliczone komputerowo [2] wg wzoru (4) krzywe V_{ef} w zależności od proporcji Λ/λ dla włókien wykonanych ze szkła krzemionkowego $n_1 = 1.45$, gdzie $n_a = 1$ (współczynnik załamania powietrza) i posiadających różne wartości średnicy względnej otworów d/Λ (wpływającej na współczynnik wypełnienia F).



Rys.2. Zmiany V_{ef} w zależności od proporcji Λ/λ dla różnych proporcji d/Λ (współczynnik wypełnienia). Linia przerywana odpowiada wartości $V_{ef} = 2,405$, poniżej której włókna są jednomodowe [2].

Na Rys.2 wyraźnie widoczny jest zakres jednomodowości ($V_{ef} < 2,405$) dla włókien PCF. Dla $d/\Lambda < 0,15$ jednomodowość zachowana jest dla wszystkich wartości λ .

Doniesienia literaturowe [1-3] mówią o praktycznym wykonaniu włókien PCF zachowujących jednomodowość w zakresie $337 \div 1550$ nm, czyli w całym zakresie użytecznym dla telekomunikacji ($800 \div 1600$ nm) i obszarze światła widzialnego. Równocześnie możliwe jest uzyskanie włókien jednomodowych o daleko większej średnicy rdzenia (ponad $20 \mu\text{m}$) [4] niż w przypadku włókien klasycznych (poniżej $10 \mu\text{m}$). Pozwala to na stosowanie źródeł światła o większej mocy i łatwiejsze wprowadzanie światła do światłowodu.

3. PRACE DOŚWIADCZALNE

W związku z nowymi i bardzo interesującymi perspektywami zastosowań włókien i struktur fonicznych w optoelektronice i biorąc pod uwagę posiadane możliwości technologiczne, w roku 2000 rozpoczęto w ITME prace badawczo-technologiczne w tej dziedzinie. Celem pierwszego etapu badań było opracowanie metody wytwarzania włókien PCF ze szkielek krzemianowych i jej weryfikacja poprzez wytworzenie włókna i pomiary jego własności.

3.1. Metoda wytwarzania

Do prób wytwarzania włókien PCF zaproponowano metodę kolejnych pocienień znaną z prac nad światłowodowymi strukturami obrazowodowymi. Wprowadzono modyfikacje związane z przygotowaniem preform wyjściowych w postaci grubościennych rur szklanych, wyciąganiem kapilar zamiast pręcików światłowodowych, przygotowaniem preform multikapilarowych (dwuwymiarowa sieć krystaliczna) i ich pocienianiem. W trakcie prac projektowych i technologicznych korzystano z wyników badań nad strukturami multikapilarowymi prowadzonych w latach poprzednich [12].

3.2. Projekt włókna

Biorąc pod uwagę dane literaturowe [1-4, 6, 8-9], dostępne materiały i możliwości technologiczne ITME postanowiono wytworzyć włókno PCF o typowej strukturze, posiadające zdolność prowadzenia światła w oparciu o całkowite wewnętrzne odbicie od strefy multikapilarowej (niższy efektywny współczynnik załamania) otaczającej rdzeń.

Zaprojektowano włókno o następujących parametrach:

- struktura o symetrii sześciokątnej składająca się z 216 otworów,
- centralnie umieszczony rdzeń wykonany z tego samego szkła o średnicy równej odległości między otworami (Λ),
- średnica względna otworów (d/Λ) $< 0,6$,
- średnica zewnętrzna włókna przed pokryciem $< 150 \mu\text{m}$,
- średnice otworów $< 6 \mu\text{m}$, odległości między otworami $< 10 \mu\text{m}$.

Jako materiał zastosowano wieloskładnikowe szkło krzemianowe o współczynniku załamania światła $n_D = 1,487$ wytopione w ITME.

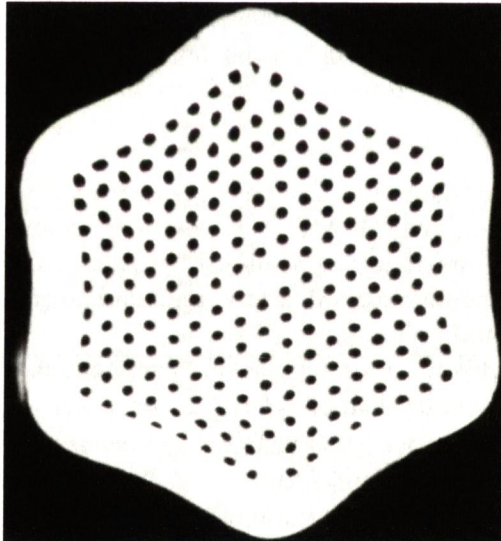
3.3. Wytworzenie włókna PCF

Z wytopionego szkła odlano, a następnie wykonano metodą obróbki szlifiersko-polerskiej rury szklanej o średnicy wewnętrznej (d) 20 mm i zewnętrznej (D) 34 mm co daje proporcję $d/D = 0,59$. W celu uzyskania dobrej jakości włókna, rury wymagały polerownia zarówno powierzchni zewnętrznej jak i wewnętrznej.

Rury były pocieniane na kapilary o średnicy zewnętrznej 1,7 mm. Wytworzono także pręty o tej samej średnicy, które miały stanowić rdzeń światłowodu. Preforma multikapilarowa układana była ręcznie w rurze, z tego samego szkła, o przekroju sześciokątnym. Przygotowanie preformy odbywało się w warunkach podwyższonej czystości.

Przygotowana preforma multikapilarowa została pocieniona na wieży do wyciągania prętów światłowodowych do postaci zintegrowanego pręta o strukturze odpowiadającej projektowi włókna PCF. Średnica zewnętrzna wynosiła $8 \div 10$ mm. Uzyskano poprawną integrację pocienianej wiązki multikapilarowej. Wystąpiły jedynie niewielkie deformacje na obrzeżach struktury.

Strukturę wytworzonej preformy pośredniej przedstawiono na Rys.3, a parametry w Tab.1.



Rys.3. Struktura preformy pośredniej.

Tabela.1. Parametry preformy pośredniej.

Średnica zewnętrzna (odl. między bokami) [mm]	8
Średnica otworów (d) [mm]	0,25
Odległość między otworami (Λ) [mm]	0,43
Średnica względna d/Λ	0,58

Preformy pośrednie posłużyły do wyciągania docelowych włókien PCF. Procesy technologiczne prowadzono na wieży do wyciągania światłowodów elastycznych umożliwiającą nakładanie zewnętrznych pokryć polimerowych. W trakcie prób technologicznych dobierano następujące parametry: temperatura pocieniania, prędkość podawania i wyciągania, naprężenie włókna, grubość nakładanego pokrycia. Włókna były pokrywane jedną warstwą lakieru akrylowego utwardzanego promieniowaniem UV.

Wytworzono włókna o parametrach podanych w Tab.2.

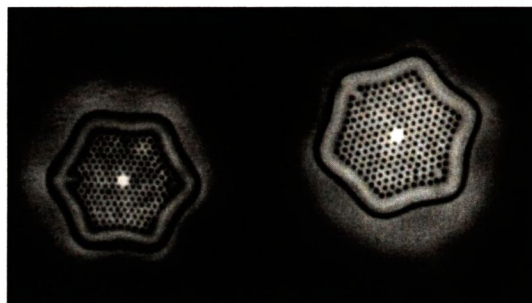
Tabela.2. Parametry geometryczne wytworzonych włókien PCF.

PARAMETR	WARTOŚĆ
Średnica zewnętrzna [μm]	200+230
Średnica przed pokryciem (ϕ)* [μm]	95+130
Średnica otworów (d) [μm]	2,4+3,2
Odległość między otworami (Λ) [μm]	4,7+6,4
d/Λ	0,5 \pm 0,02
Średnica rdzenia (ϕ_r) [μm]	7+10

* włókno o przekroju sześciokątnym, ϕ - odległość bok-bok

Charakteryzowały się one dobrym, bez dodatkowych deformacji, odtworzeniem struktury preformy pośredniej. Wytworzona została poprawna, zgodna z projektem, struktura foniczna, zarówno pod względem zachowania periodyczności i założonej symetrii jak i rozmiarów otworów i odległości między nimi. Zaobserwowano zależność średnicy otworów od temperatury pocieniania,

co stwarza możliwość wpływania na parametry światłowodu w trakcie procesu wyciągania. Podwyższanie temperatury skutkuje zmniejszaniem otworów aż do całkowitego ich zaniku (przy spadku lepkości szkła napięcie powierzchniowe dąży do zamknięcia otworów). W wytworzonych światłowodach uzyskano wartość $d/\Lambda = 0,5$. Parametr ten uległ zmniejszeniu w stosunku do preformy pośredniej (0,58). Proporcja ta wykazywała dobrą ($\pm 0,02$) stabilność w trakcie procesu pocieniania, niezależnie od średnicy wyciąganego światłowodu (w warunkach stałej temperatury). Wytworzenie światłowodu o ściśle określonych parametrach (d , Λ , d/Λ) wymaga bardzo precyzyjnego dobrania i stabilizacji temperatury pocieniania. Na Rys.4 przedstawiono przekrój wytworzonych włókien PCF.

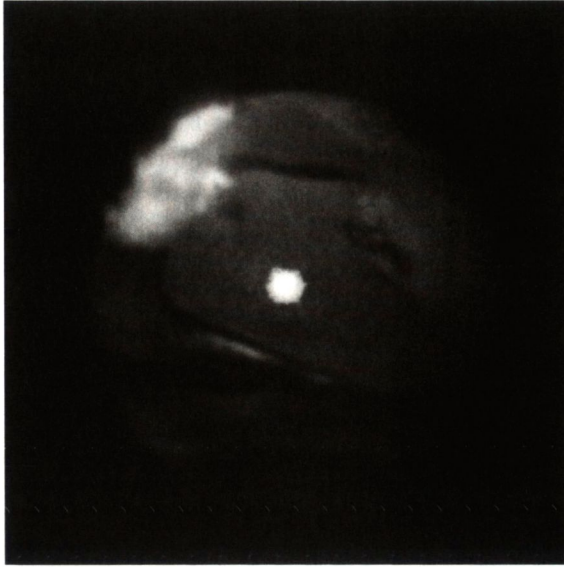


Rys.4. Przekrój wytworzonych włókien PCF (średnice 95 i 120 μm , $d/\Lambda = 0,5$).

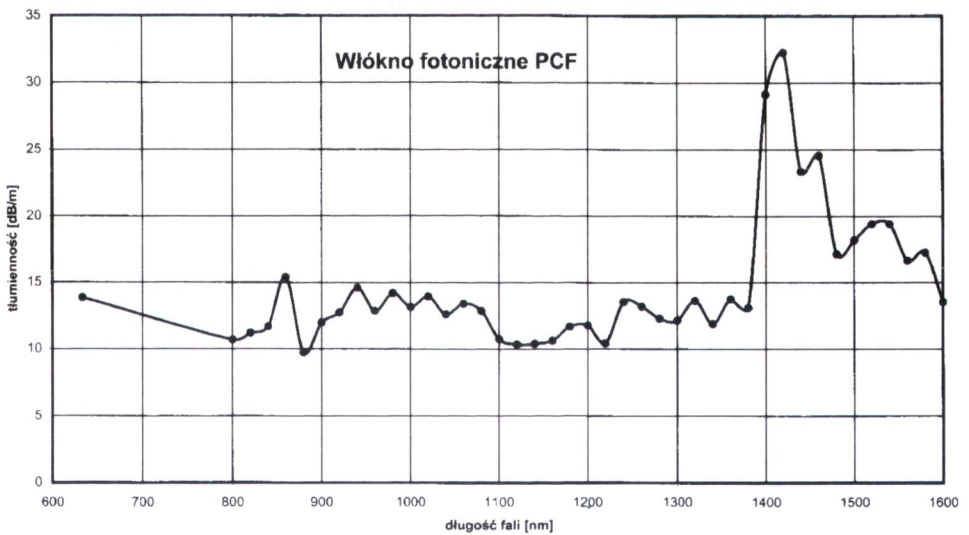
3.4. Własności transmisyjne włókien PCF

Wytworzone włókna wykazują cechy światłowodowe. Światło propaguje się w obszarze rdzenia (defekt struktury periodycznej – brak otworu) zgodnie z założeniami teoretycznymi. Jest to widoczne na Rys.4-5. Wykres tłumienności włókien PCF dla promieniowania z zakresu 600 - 1600 nm przedstawiono na Rys.6. Włókno posiadało stosunkowo wysoką tłumienność ($\sim 10 \pm 15$ dB/m) z uwagi na rodzaj zastosowanego szkła (szkło krzemianowe) i jego jakość (niejednorodności). Duże wahania tłumienności w zakresie 800 \pm 900 nm spowodowane są pracą na granicy czułości fotodetektora InGaAs i związaną z tym małą dokładnością pomiaru. Widoczny wzrost tłumienności (powyżej 30 dB/m) w pobliżu $\lambda = 1400$ nm związany jest z obecnością jonów OH⁻ w szkłe.

Apertura numeryczna włókna o średnicy 120 μm , $\Lambda = 6,1$ μm , $d/\Lambda = 0,5$ i $\phi_r = 8,5$ μm dla $\lambda = 632,8$ nm wynosiła 0,04 co odpowiada kątowi akceptacji 2,34°. Określono ją poprzez pomiar średnicy wiązki światła wychodzącego z włókna i odległości od końca włókna.

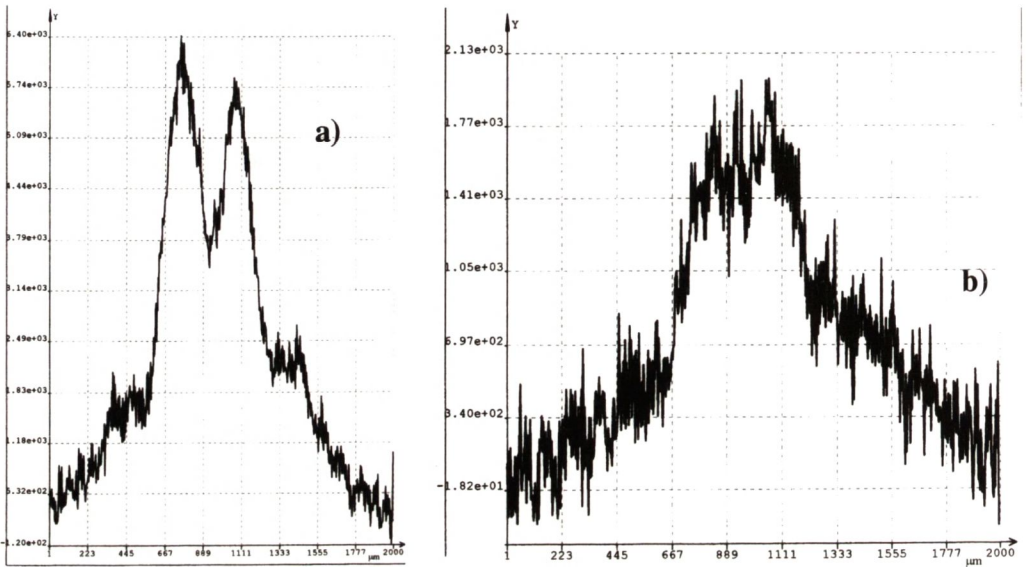


Rys.5. Transmisja promieniowania lasera He-Ne przez wytworzone włókno PCF ($\phi = 120 \mu\text{m}$, $\phi_r = 8,5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6,1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0,5$).



Rys.6. Wykres tłumienności w zależności od długości fali dla wytworzonego włókna PCF ($\phi = 120 \mu\text{m}$, $\phi_r = 8,5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6,1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0,5$).

Dla tego włókna wartość częstotliwości względnej dla $\lambda = 632,8$ nm wynosi $2,421 > 2,405$, co wskazuje na możliwość propagacji dwóch modów. Potwierdziły to przeprowadzone próby pomiaru rozkładu natężenia światła we wiązce wychodzącej z włókna (Rys.7). Ulegał on zmianom przy zmianie kąta zgięcia włókna i sposobie wprowadzania światła. Zarejestrowano rozkład wskazujący na obecność modu drugiego rzędu (Rys.7a). Uzyskanie włókna jednomodowego wymaga zmniejszenia proporcji d/L [2-3, 8] (Rys.2), która w wytworzonym włóknie była stosunkowo duża (0,5).



Rys.7. Rozkład natężenia światła ($\lambda = 633$ nm) we wiązce wychodzącej z światłowodu PCF ($\phi = 120 \mu\text{m}$, $\phi_r = 8,5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6,1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0,5$). a) rozkład świadczący o obecności modu drugiego rzędu, b) rozkład po zmniejszeniu promienia zgięcia światłowodu.

4. PODSUMOWANIE

Wytworzono ze szkła krzemianowego włókno foniczne typu PCF o symetrii sześciokątnej wykazujące zdolność transmisji światła w obszarze rdzenia. Włókno charakteryzuje się tłumiennością na poziomie 13,8 dB/m i aperturą numeryczną $NA = 0,04$ (dla $\lambda = 632,8$ nm). Uzyskano parametry geometryczne ($\phi = 120 \mu\text{m}$, $\phi_r = 8,8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6,1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0,5$) zgodne z wstępnym projektem, co świadczy o poprawności zastosowanej metody technologicznej. Opanowanie metody wytwarzania włókien fonicznych typu PCF z wieloskładnikowych szkieł krzemianowych i zdobyte doświadczenie technologiczne

pozwalają na wytwarzanie złożonych struktur o parametrach modyfikowalnych w bardzo szerokim zakresie.

Badania nad włóknami fonicznymi prowadzono w ramach prac statutowych ITME. Praca została zaprezentowana na Konferencji „Światłowodowy i ich Zastosowania”, Białowieża 2002.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M.: *All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding*. Opt. Lett., 21, 19, (1996), 1547-1549
- [2] Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J.: *Endlessly single-mode photonic crystal fiber*. Opt. Lett., 22, 13, (1997), 961-963
- [3] Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., de Sandro J.P.: *Properties of photonic crystal fiber and the effective index model*. J.Opt.Soc.Am., 15, 3, (1998) 748-752
- [4] Knight J.C., Birks T.A., Cregan R.F., Russell P.St.J., de Sandro J.P.: *Large mode area photonic crystal fibre*; Electron.Lett., 34, 13, (1998), 1347-1348
- [5] Monro T.M., Richardson D.J., Broderick N.G.R., Bennett P.J.: *Holey optical fibers: An efficient modal model*. J.Lightwave Technol., 17, 6, (1999), 1093-1102
- [6] Bennett P.J., Monro T.M., Richardson D.J.: *Toward practical holey fiber technology: fabrication, splicing, modeling, characterization*. Opt.Lett., 24, 17, (1999), 1203-1205
- [7] Sřndergaard T.: *Photonic crystal distributed feedback fiber lasers with bragg gratings*. J.Lightwave Technol., 18, (2000), 589-597
- [8] Broeng J., Barkou S.E., Bjarklev A., Sřndergaard T., Knudsen E.: *Review paper: Crystal fibre technology*. DOPS-NYT 2, (2000), 22-28
- [9] Baggett J.C., Monro T.M., Furusawa K., Richardson D.J.: *Comparative study of large-mode holey and conventional fibers*. Opt.Lett., 26, 14, (2001), 1045-1047
- [10] Sharping J.E., Fiorentino M., Coker A., Kumar P., Windeler R.S.: *Four-wave mixing in microstructure fiber*. Opt.Lett., 26, 14, (2001), 1048-1050
- [11] Ferrando A., Miret J.J.: *Single-polarization single-mode intraband guidance in supersquare photonic crystals fibers*. Appl.Phys.Lett., 78, 21, (2001), 3184-3186
- [12] Pysz D., Michalska I., Kujawa I., Sobkowicz Wł., Haraśny K.: *Opracowanie sposobu wytwarzania szklanych struktur multikapilarowych o wysokiej skali integracji*. Sprawozdanie z pracy statutowej, ITME, 2000

SILICATE GLASS PHOTONIC FIBERS

Summary

Structures with periodic modulation of refractive index, of the order of the optical wavelength, (e.g. regularly arranged air holes) allow to manufacture a new generation of optical fibers – photonic crystal fibers (PCF). It is possible to change their transmission properties not only by material parameters but also by modification of their structure. This brings an opportunity to manufacture optical fibers with unusual properties, different from conventional fibers (e.g. monomode in the whole transmission range and large scale core – above 20 μm). Research works on photonic crystal fibers are carried out in ITME. The method of their manufacturing from silicate glass has been developed. It allows to obtain optical fibers with different crystal structure (triangular, square lattice) and modification of their parameters in a very wide range. In this method PCF fiber with hexagonal symmetry, diameter 120 μm and core 8.5 μm has been manufactured. The possibility of light transmission (in range 400 – 1600 nm) has been verified.