

WYTWORZENIE I CHARAKTERYZACJA CAŁOSZKLANEGO WŁÓKNA Z PRZERWĄ FOTONICZNĄ

Ireneusz Kujawa¹, Dariusz Pysz¹, Adam Filipkowski², Jędrzej Nowosielski²,
Ryszard Buczyński², Ryszard Stepień¹

Całoszklane włókna fotoniczne (*all-solid* PCF) są rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do powietrzno-szklanych światłowodów PCF, umożliwiającym ograniczenie zaburzeń geometrii płaszcza fotonicznego i wszelkich innych deformacji pojawiających się na granicy szkło-powietrze, jako że w tym wypadku granica ta nie istnieje. Głównym celem przeprowadzonych prac było zdobycie większego doświadczenia w wytwarzaniu całoszklanych światłowodów mikrostrukturalnych posiadających użyteczne pasma fotoniczne. W ich rezultacie wytworzono serię światłowodów posiadających dwie przerwy fotoniczne – pierwszą o szerokości 9 nm o centralnej długości 610 nm i drugą o szerokości 80 nm o centralnej długości 840 nm. Zmierzona tłumienność światłowodu w zakresie drugiej przerwy dla $\lambda = 835,2$ nm była równa 13,3 dB/m. Ponadto otrzymano stabilność geometrii mikrostruktury wzdłuż wytworzonego 100 m odcinka światłowodu.

1. WSTĘP

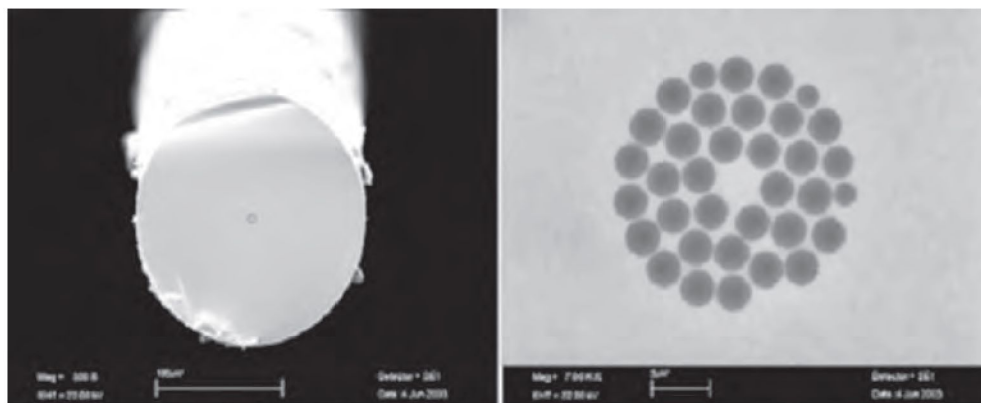
Technologia wytwarzania całoszklanych światłowodów fotonicznych (*all-solid* PCF) w Polsce jest rozwijana równolegle obok technologii pozwalającej uzyskiwać struktury powietrzno-szklane. W obu wypadkach możliwe jest uzyskiwanie propagacji światła w oparciu o pojawiające się pasma fotoniczne (*photonic bandgap*) oraz zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia (*total internal reflection*) [1].

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

² Zakład Optyki Informacyjnej, Wydz. Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul Pasteura 7,
02-093 Warszawa, e-mail: rbuczyns@igf.fuw.edu.pl

Użycie dwóch szkieł do konstrukcji struktury periodycznej jest atrakcyjne z uwagi na możliwość ograniczenia fluktuacji geometrii kryształu fonicznego 2D wzdłuż włókna. Pozwala także na eliminację zaburzeń geometrycznych występujących na granicy szkło powietrze ze względu na brak występowania w tym wypadku tej granicy. Użycie dwóch dielektryków umożliwia także łatwiejsze sterowanie dyspersją chromatyczną włókna [2-3]. Gotowe włókna są bardziej odporne na korozję w porównaniu ze światłowodami powietrzno-szklanymi, a struktura płaszcza fonicznego uniemożliwia wnikanie kurzu, wilgoci i innych czynników w głąb [4]. Łatwiejsze jest też polerowanie czół takich włókien w porównaniu z włóknami powietrzno-szklanymi. Łączenie ze sobą szkieł wymaga precyzyjnego dobrania ich własności fizykochemicznych, optycznych i użytkowych [4-12] oraz sporego doświadczenia w przetwarzaniu półfabrykatów w gotowe włókno foniczne.

Pierwsze doniesienie literaturowe dotyczące wytworzenia dwuszklanego światłowodu pracującego na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia pochodzi z roku 2003 [4]. W pracach tych wytworzono strukturę typu TIR ze szkieł ciężkich o różnicy współczynników załamania światła wynoszącej $\Delta n = 0,23$, przy czym rdzeń wykonano ze szkła o wyższym współczynniku (Rys.1).

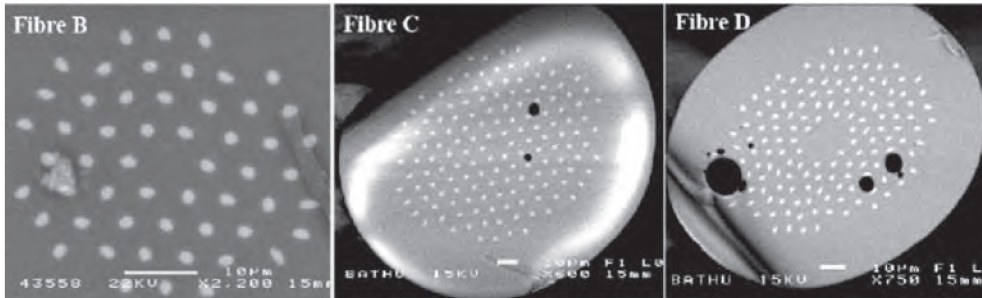


Rys. 1. Pierwszy światłowod całoszkłany SOHO [4].

Fig. 1 First all-glass photonic crystal fiber named SOHO (all-Solid Holey Fiber) [4].

Struktura ta posiadała nieliniowość na poziomie $230\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ dla długości $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, natomiast tłumienność światłowodu dla $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ wynosiła 5 dB/m. Rok później ukazała się publikacja dot. uzyskania pierwszego dwuszklanego włókna, w którym zaobserwowano pojawianie się fonicznej struktury pasmowej [5]. Włókno wykonano ze szkieł wieloskładnikowych firmy SHOTT o $\Delta n = 0,25$. Zmierzona najmniejsza tłumienność dla kilkunastocentymetrowego odcinka włókna wyniosła 18 dB/m dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. W następnych latach sukcesywnie pojawiały się publikacje dot. dalszego rozwoju tego typu włókien [6-12]. Przykład problemów

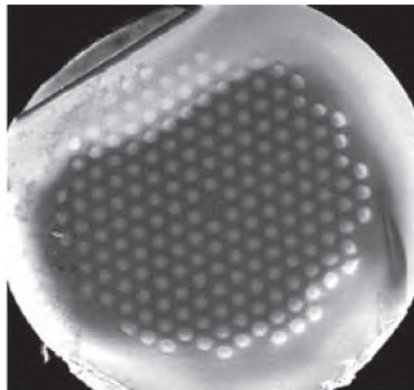
technologicznych związanych z wytwarzaniem tego rodzaju włókien przedstawiono w artykule ukazującym rodzinę włókien całoszklanych o zdeformowanej strukturze płaszczka fotonicznego wykonanych przez zespół z Wielkiej Brytanii (Rys.2) [7].



Rys. 2. Zdjęcia z mikroskopu elektronowego próbek całoszklanych włókien fotonicznych z widocznymi deformacjami struktury [7].

Fig. 2. Scanning electron micrographs of samples of all-glass photonic fibers with random deformations of photonic cladding [7].

Spośród wymienionych prac na uwagę zasługuje szczególnie uzyskane przez zespół francuski włókno ze szkła krzemionkowego o elementach sieci płaszczka fotonicznego wykonanych z domieszkowanego germanem kwarcu o współczynniku załamania $3 \cdot 10^{-2}$ wyższym niż rdzeń [8]. Włókno o liniowym współczynniku wypełnienia $d/\Lambda = 0,683$ posiadało pięć przerw fotonicznych oraz ultraniską tłumienność $18,7 \text{ dB/km}$ w zakresie trzeciej przerwy w okolicach $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

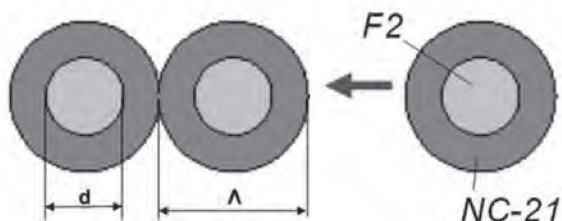


Rys. 3. Zdjęcie SEM światłowodu SC-PBG (Solid Core – PBG) o średnicy całkowitej $300 \mu\text{m}$ i rdzeniu $20 \mu\text{m}$ oraz stałej sieci $\Lambda = 15,2 \mu\text{m}$ – obszary jasne reprezentują domieszkowane germanem elementy sieci o wyższym współczynniku załamania światła [8].

Fig. 3. Scanning electron micrograph of the SC-PBG fiber - the bright cylinders correspond to germanium-doped regions; the fiber diameter is $300 \mu\text{m}$ for a core diameter of $20 \mu\text{m}$ and a pitch $\Lambda = 15.2 \mu\text{m}$ [8].

2. METODYKA WYTWORZENIA CAŁOSZKLANEGO WŁÓKNA FOTONICZNEGO

Większość światłowodów fonicznych jest wytwarzana metodą wielokrotnych pocieniań z zestawianej ręcznie preformy szklanej. Preforma składa się z odpowiednio rozmieszczonych prętów i kapilar szklanych tworzących określoną makrostrukturę. W ramach prowadzonych prac wykorzystano metodę mozaikową stosując pręty dwuszklane [13-14]. Ideę metody przedstawiono na Rys.4.



Rys. 4. Metoda układania makrostruktury dla sieci kryształy fonicznego o parametrach d i d/Λ na przykładzie dwuszkłanych prętów wykonanych ze szkła F2 i NC-21.

Fig. 4. Idea of the mosaic method in case several rods made with F2 and NC-21 glass – two-glass rods create a photonic lattice of crystal with parameters d and d/Λ .

Metoda polega na tym, że stopniowo układa się makrostrukturalną preformę o określonych cechach geometrycznych, z której w procesie pocieniania w urządzeniu zwanym wieżą otrzymuje się preformy przejściowe oraz włókna o określonych parametrach płaszcza fonicznego, zależnych od parametrów procesowych.

3. MATERIAŁY WYJŚCIOWE

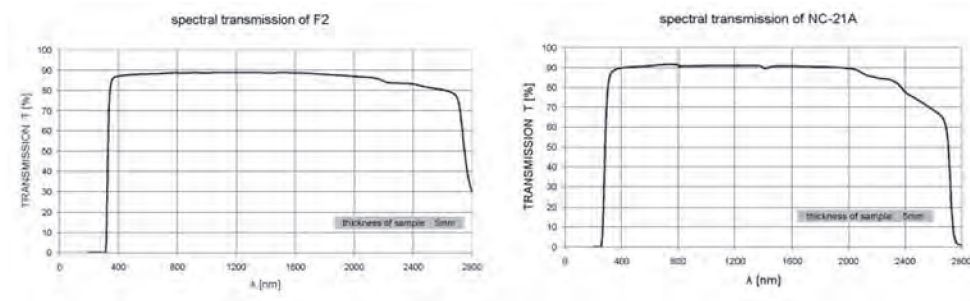
Do tworzenia struktury kryształu fonicznego we włóknach użyto pręcików wykonanych z kompatybilnych termicznie i lepkościowo szkła: F2 o $n_D = 1,619$ oraz NC-21 o $n_D = 1,533$, o składach przedstawionych w Tab. 1.

Tabela 1. Skład tlenkowy szkła F2 i NC-21.

Table.1. Oxide composition of matched glasses (F2 and NC-21).

Symbol szkła	Skład tlenkowy [% _{mas.}]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	PbO	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	As ₂ O ₃
F2	45,7	-	-	45,5	-	3,5	5,0	0,8
NC-21	55,0	1,0	26,0	-	3,0	9,5	5,5	0,8

Płaszcz prętów stanowiło szkło NC-21, rdzeń wykonano ze szkła F2 (Rys.4). Zaletą szkieł jest dobre dopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej (F2 - $\alpha_{20-300} = 94 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; NC-21 - $\alpha_{20-300} = 82 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) oraz duża transmisja spektralna (Rys. 5). Szkła użyte do tworzenia struktury fotonicznej tego typu muszą być właściwie dopasowane, pod względem własności fizycznych, chemicznych i optycznych, o czym wspomniano w wielu pracach [4-7, 10-12].



Rys. 5. Transmisja spektralna szkieł F2 i NC-21.

Fig. 5. Spectral transmission of F2 and NC-21.

Podstawowe własności użytych szkieł przedstawiono w Tab.2.

Tabela 2. Własności szkieł F2 i NC-21.

Table 2. Properties of glasses (F2 and NC-21).

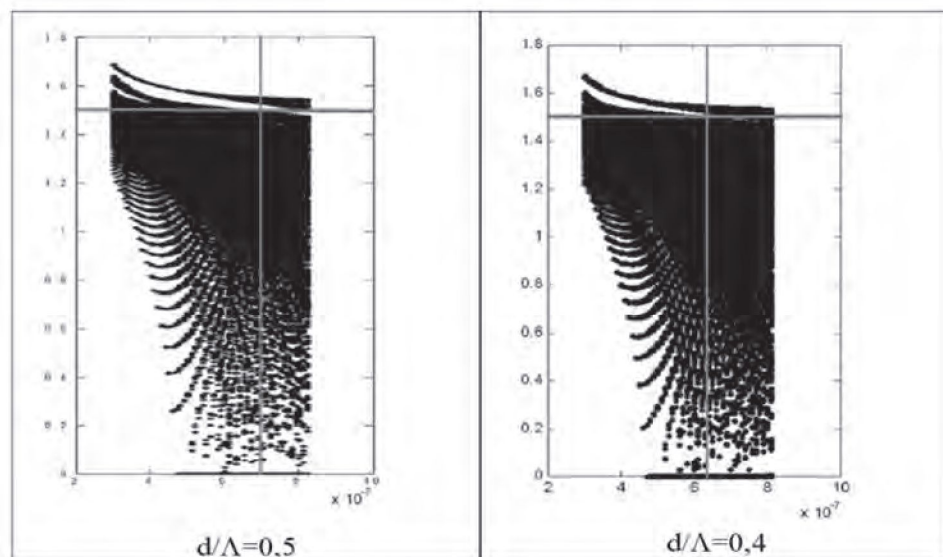
WŁASNOŚCI	SZKŁO	
	F2	NC-21A
Współczynnik załamania światła n_D	1.619	1.533
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej α dla zakresu : 20÷300°C [10^{-7} K^{-1}]	94,0	82,0
Temperatura transformacji T_g [°C]	430	500
Dylatometryczna temperatura mięknięcia DTM [°C]	500	530
Temperatury charakterystyczne w mikroskopie grzewczym Leitz'a. Temperatura [°C] :		
- zaoblenia się próbki	520	590
- przybrania kształtu kuli	690	690
- przybrania kształtu półkuli	1130	900

Wykorzystane szkła jak do tej pory najlepiej sprawdziły się spośród testowanych przez autorów par szkieł pod względem doboru własności transmisyjnych, lepko-

ściowych i temperaturowych (T_g , DTM, α_{20-300}). Posiadają one też Δn pozwalające otrzymywać strukturę pasmową we włóknach strukturalnych [15-16].

3. OSZACOWANIE PARAMETRÓW STRUKTURY

W rdzeniu światłowodu fonicznego o niskim współczynniku załamania światło może się propagować pod warunkiem, że istnieje przerwa foniczna dla płaszcza okalającego rdzeń. Wielkość przerwy fonicznej zależy od różnicy współczynników załamania materiałów tworzących kryształ (Δn), oraz od rodzaju symetrii (m) i współczynnika wypełnienia struktury (d/Λ) [1]. W przypadku niskich kontrastów, czyli w przypadku takim, jaki ma miejsce w całoszklanych strukturach istnieje tylko częściowa przerwa foniczna. Oznacza to, że przerwa istnieje tylko dla wybranego zestawu wektorów falowych propagującego się światła [15]. Na podstawie symulacji stwierdzono, iż pasma wzbronione dla wybranej pary szkieł o $\Delta n \approx 0,09$ w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni $\lambda = 630 \text{ nm} \div 830 \text{ nm}$ pojawiają się dla d/Λ od 0,4 do 0,8 [16]. Przykłady policzonych pasm metodą BBM - baz biortonormalnych [17] dla $d/\Lambda = 0,4$ i $d/\Lambda = 0,5$ przedstawiono na Rys. 6. Przerwa przerwa na poziomie szkła rdzeniowego NC-21 rozpoczyna się dla $d/\Lambda = 0,4$ od 630 nm; dla $d/\Lambda = 0,5$ od 700 nm.



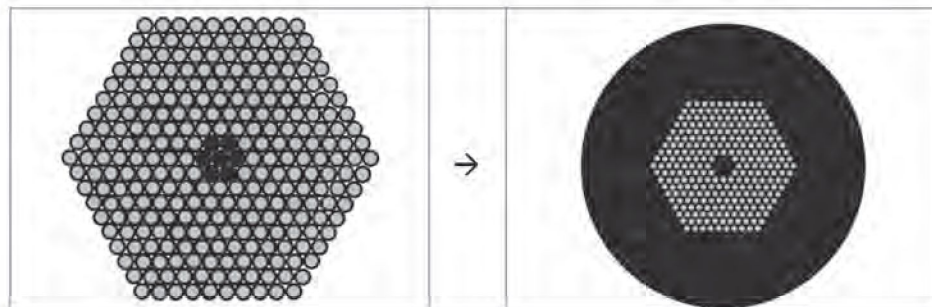
Rys. 6. Diagramy foniczne dla struktury heksagonalnej F2/NC-21.

Fig. 6. Photonic bandgap diagrams of hexagonal lattice F2/NC-21.

Z zaprezentowanych diagramów fotonicznych (Rys. 6) widać jak wraz ze wzrostem współczynnika liniowego wypełnienia struktury d/Λ następuje zwiększanie się szerokości przerwy fotonicznej oraz pojawianie się pasm dodatkowych. Jest to tendencja korzystna zwłaszcza dla struktur o małym Δn - ułatwia, bowiem prowadzenie światła w obszarze złamania symetrii kryształu. Z tego też powodu w pracach technologicznych zdecydowano się dążyć do uzyskania struktury o $d/\Lambda < 0,6$. Główne pasmo wzbronione dla $d/\Lambda = 0,6$ zaczyna się na poziomie szkła NC-21 od $\lambda = 790 \text{ nm}$ [16].

4. PRACE TECHNOLOGICZNE

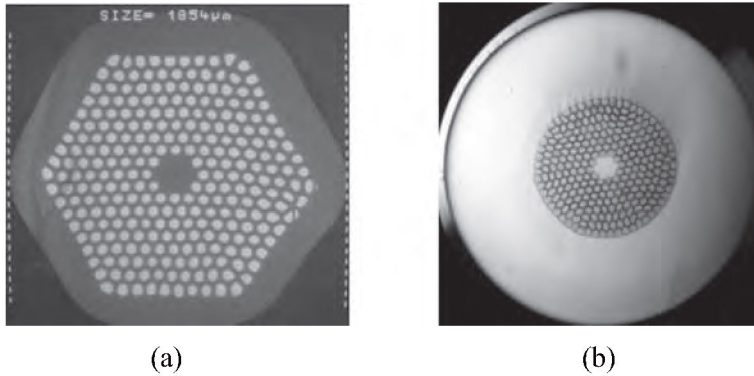
Prace technologiczne rozpoczęto od wykonania preformy o rozległej strukturze płaszcza składającej się z 264 elementów (o średnicy 1,3 mm i $d/\Lambda \approx 0,65$) ułożonych w symetrii heksagonalnej tworzących 8 pierścieni wokół rdzenia. Rdzeń uzyskano przez zastąpienie 7 centralnych prętów dwuszlanych prętami ze szkła matrycy NC-21 (Rys. 7).



Rys.7. Projekt preformy i struktury włókna.

Fig.7. The project of preform bundle and schema of fiber structure.

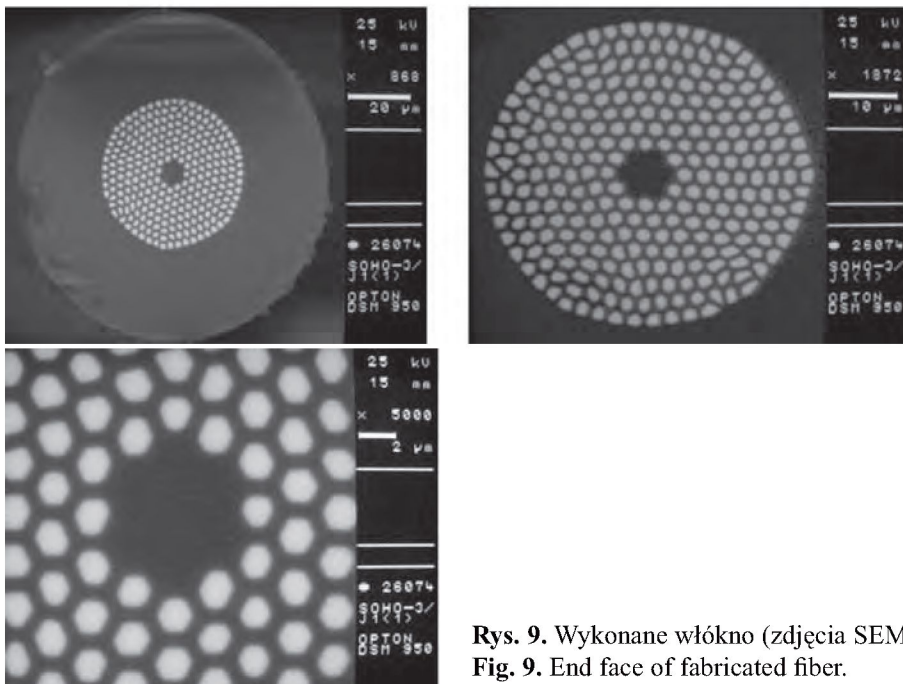
Z preformy wykonano rodzinę subpreform. Zmieniając poziom próżni można reorganizować parametry geometryczne uzyskiwanych subpreform (Rys. 8).



Rys. 8. Przykładowe subpreformy uzyskane w procesie przetwórczym preformy o 271 elementach: a) przy niskiej próżni; b) przy wysokiej próżni.

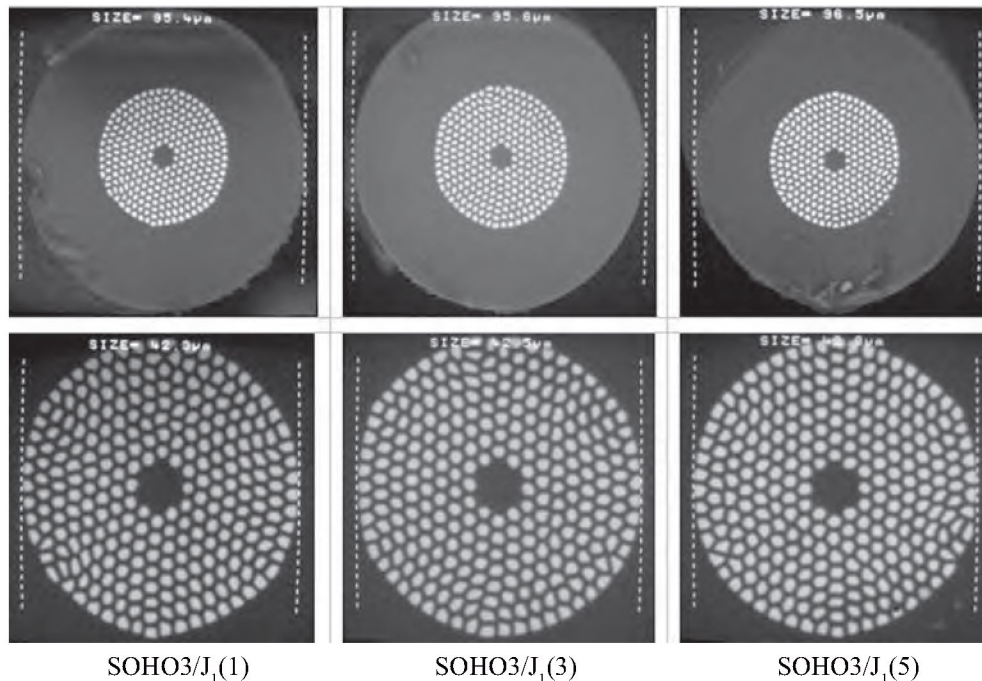
Fig. 8. Example of subpreforms obtained by processing of preform created with 271 elements bundle: a) in low vacuum regime; b) in high vacuum regime.

Do wykonania włókna docelowego serii J_1 wybrano subpreformę (Rys. 8b), preforma (Rys. 8a) została wykorzystana do wytworzenia włókna krystalicznego o strukturze w pełni heksagonalnej [16]. Wyciągnięto z niej światłowody o średnicy zewnętrznej między 140, a 80 μm . Uzyskana struktura pod względem geometrycznym jest identyczna ze strukturą subpreformy (Rys. 9).



Rys. 9. Wykonane włókno (zdjęcia SEM).
Fig. 9. End face of fabricated fiber.

Uzyskano dość równomierny i symetryczny rozkład płaszcza fotonicznego oraz w przybliżeniu sześciokątny kształt węzłów sieci kryształu, co miało również miejsce w subpreformie. Sama struktura jest lekko zaokrąglona – ostatnie trzy pierścienie utraciły symetrię sześciokątną i uporządkowały się w symetrii kołowej. Stwierdzono także brak znacznych, przypadkowych deformacji wzdłuż wyciągniętego ~ 100 m odcinka (Rys. 10).



Rys. 10. Włókno dwuszkłane SOHO3/J₁ - ilustracja stabilności parametrów struktury - zdjęcia SEM z różnych fragmentów włókna na odcinku o długości 100 m.

Fig. 10. End faces of several samples of fabricated all-solid fiber (SOHO3/J₁) - visible geometrical stability of microstructure along the fiber on length 100 m.

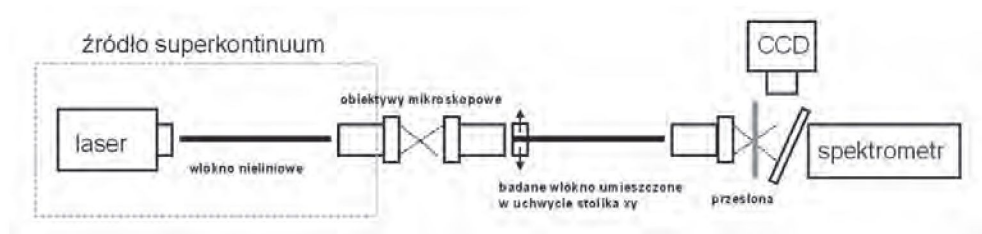
Charakterystykę struktury uzyskanego włókna zaprezentowano w Tab. 3.

Tabela 3. Parametry geometryczne wykonanego włókna dwuszklanego SOHO3/J₁.
Table 3. Geometrical parameters of manufactured all-solid fiber (SOHO3/J₁).

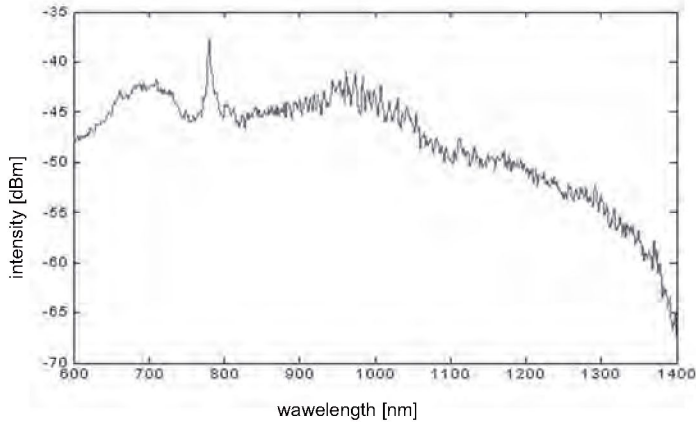
PARAMETR SIECI	WŁÓKNO	
	SOHO3/J ₁ (1)	SOHO3/J ₁ (5)
Średnica zewnętrzna [μm]	95,4	96,5
Średnica struktury [μm]	42x45	43x46
Średnica rdzenia [μm]	6,8x8,6	7,2x8,2
Średnica węzłów sieci (d) [μm]	1,5-1,7	1,6-1,8
Stała sieci (A) [μm]	2,4-2,6	2,5-2,8
Wypełnienie (d/A - średnio)	0,65	0,64

5. CHARAKTERYZACJA WŁÓKNA

Do charakteryzacji wykonanego włókna SOHO3/J₁ wykorzystano układ pomiarowy zaprezentowany na Rys. 11. W eksperymencie użyto źródła superkontinuum składające się z nieliniowego włókna fonicznego o długości 40 cm pompowanego dostrajającym Ti:Szafirowym oscylatorem Tsunami Millennium Pro 10 wyprodukowanym przez firmę Spectra Physics. Wytwarza on impulsy o stałej długości 100 fs ze średnią wyjściową mocą optyczną wynoszącą do 1,13 W. Biorąc pod uwagę, że powtarzalność impulsów wynosi 80 MHz maksymalna moc odpowiada 125 kW, a maksymalna energia impulsu osiąga 12,5 nJ. Spektralny zakres pracy użytego źródła superkontinuum mieści się między 470 nm a 1370 nm, natomiast jego moc optyczna wynosiła 427 mW. Charakterystyka niniejszego źródła została zaprezentowana na Rys. 12.



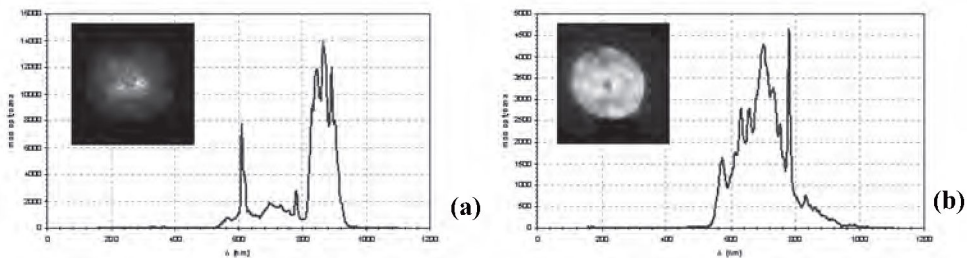
Rys. 11. Użyte stanowisko pomiarowe.
Fig. 11. Used measuring set.



Rys. 12. Spektralny zakres pracy źródła superkontinuum użytego w eksperymencie.

Fig. 12. Spectrum of nonlinear PCF based supercontinuum light source used in the experiment.

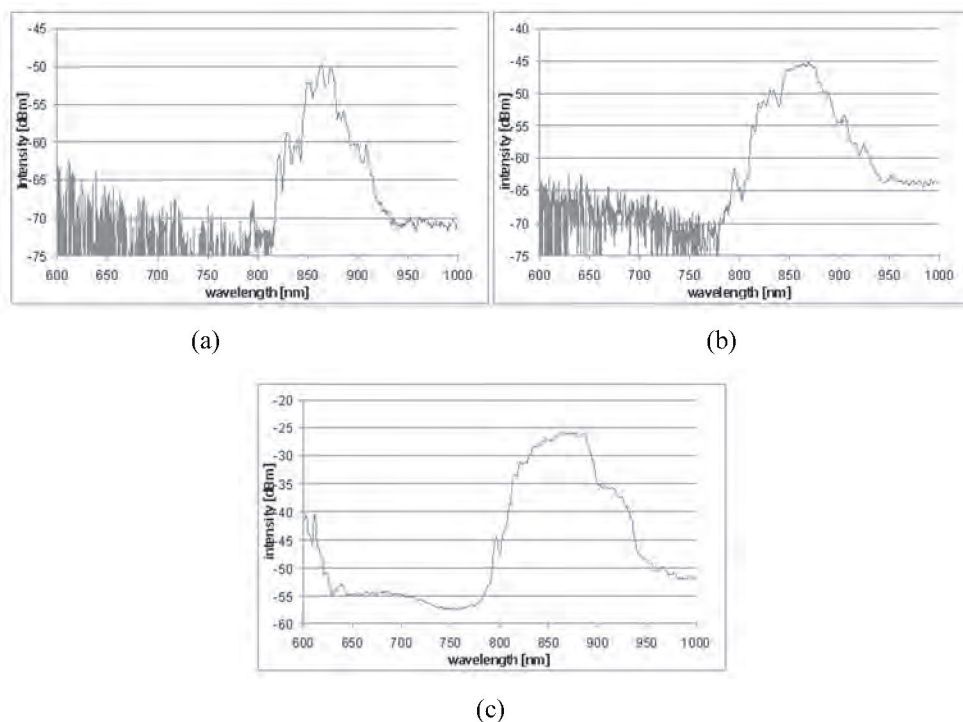
Światło ze źródła wprowadzano do badanego światłowodu systemem dwóch obiektywów mikroskopowych 40x. Na wejściu badanego włókna znajdował się również dzielnik wiązki (nieuwzględniony na Rys. 11), który umożliwiał obserwację czoła światłowodu. Wyjściowy koniec włókna obrazowano za pomocą obiektywu mikroskopowego, przesłony o modyfikowalnej aperturze oraz dodatkowej soczewki o ogniskowej 5 cm. Dzięki temu układowi optycznemu możliwa była obserwacja płaszczyzny wyjściowej badanego włókna, co pozwalało kontrolować prawidłowość justowania układu. Było to szczególnie istotne, gdy pobudzano selektywnie albo obszar rdzenia albo płaszcz badanego włókna (Rys. 13). Stanowisko wyposażone było także w kamerę CCD umożliwiającą rejestrację obrazu.



Rys. 13. Widok czoła światłowodu pobudzanego światłem ze źródła superkontinuum oraz zarejestrowana charakterystyka widmowa: a) w przypadku pobudzenia rdzenia, b) w przypadku pobudzenia płaszcza fotonicznego.

Fig. 13. End face of the fiber illuminated with supercontinuum light source jointly with measured spectral characteristic when: a) light is coupled into a core, b) light is coupled into photonic cladding.

Promieniowanie wychodzące z badanych próbek światłowodu wprowadzono do spektrometru pracującego w zakresie 600÷1700 nm, co pozwalało na obserwację widma wyjściowego. Pomiar prowadzono pobudzając rdzeń włókna każdorazowo rejestrując widmo. Uzyskane rezultaty prowadzenia światła w rdzeniu w oparciu o mechanizm PBG dla próbek światłowodu o długości 80,6 cm, 55,8 cm i 24,1 cm zaprezentowano na Rys. 14.



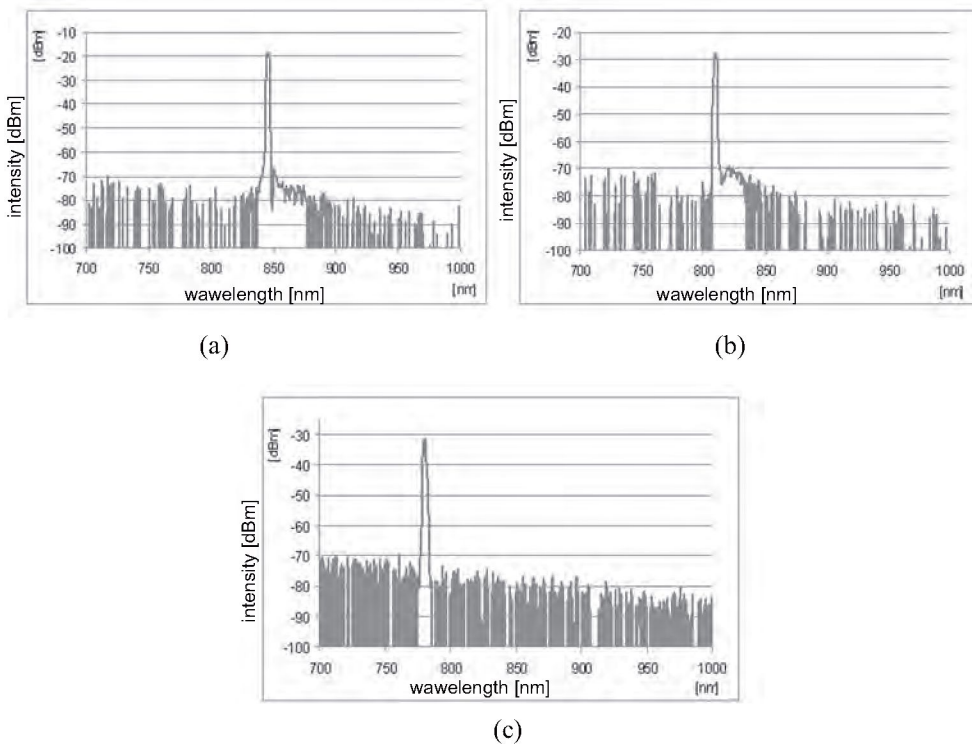
Rys. 14. Zarejestrowany zakres spektralny transmisji dla dwuszkłanego włókna pobudzanego białym światłem pochodzącym ze źródła superkontinuum dla próbek o długości: a) 80,6 cm; b) 55,8 cm; c) 24,1 cm.

Fig. 14. Transmission spectrum for all-solid photonic band gap fiber illuminated with supercontinuum source for different lengths of the fiber: a) 80.6 cm; b) 55.8 cm; c) 24.1 cm.

Widoczne są tu dwie przerwy foniczne umożliwiające propagację światła w rdzeniu włókna. Pierwsza przerwa znajduje się w obszarze światła widzialnego w okolicach 600÷620 nm o centralnej długości fali 610 nm. Niestety ze względu na zakres pracy analizatora wyniki w tym obszarze są niepełne. Druga przerwa o znacznej szerokości znajduje się w obszarze bliskiej podczerwieni między 820 nm a 920 nm, to jest w obszarze, w którym spodziewano się uzyskać prowadzenie

w przerwie wzbronionej (dla $d/\Lambda = 0,6$ pasmo zaczyna się na poziomie szkła NC-21 od $\lambda = 790$ nm).

Weryfikacji położenia drugiej przerwy fotonicznej we włóknach ze szklanym rdzeniem dokonano metodą polegającą na pobudzeniu światłowodu laserem generującym krótkie impulsy o długości fali z zakresu przerwy wzbronionej. Do pomiarów użyto tego samego lasera, co we wcześniejszych pomiarach, ale z pominięciem włókna nieliniowego. W jego miejsce umieszczano włókno badane. Zachodziło wówczas generowanie superkontinuum o szerokości równej wielkości przerwy (Rys. 15a) i b)). Dla impulsu o długości fali będącej poza przerwą przez rdzeń przechodzi tylko słumiony impuls (Rys. 15c)).



Rys. 15. Widmo transmisyjne badanego włókna pobudzone impulsem: a) o mocy 427 mW i długości fali 850 nm - generuje się superkontinuum (pompa w PBG); b) o mocy 427 mW i długości fali 810 nm - generuje się superkontinuum (pompa na brzegu PBG); c) o mocy 427 mW i długości fali 780 nm - przechodzi tylko słumiony impuls (pompa poza PBG).

Fig. 15. Transmission spectrum for all-solid photonic band gap fiber illuminated with laser pulses with power: a) 427 mW and $\lambda = 850$ nm - supercontinuum is present (pump light in photonic bandgap); b) 427 mW and $\lambda = 810$ nm - supercontinuum is present (pump light in edge of photonic bandgap); c) 427 mW and $\lambda = 780$ nm - supercontinuum is absent (pump light out of photonic bandgap).

W wyniku czego oszacowano użyteczną szerokość drugiej przerwy fonicznej na 80 nm ze środkową długością fali wynoszącą 840 nm.

W zakresie drugiej przerwy fonicznej zmierzono tłumienność włókna metodą odcięcia. Uzyskano tłumienność rzędu 13,3 dB/m dla $\lambda = 835,2$ nm. Biorąc pod uwagę tłumienność szkła NC-21 (8,2 dB/m), z którego wykonano rdzeń włókna tłumienność struktury oszacowano na 5,1 dB/m.

6. PODSUMOWANIE

W ramach prac wytworzono metodą mozaikową włókno całoszklane ze szkieł wieloskładnikowych F2 i NC-21. Wykorzystano do tego celu precyzyjne dwuszkłane o $d/\Lambda \approx 0,65$, z których ułożono preformę w symetrii heksagonalnej. Z wyselekcjonowanej subpreformy uzyskano rodzinę włókien o symbolu SOHO3/J₁ o nieznacznych wadach strukturalnych. Przeprowadzone pomiary otrzymanego światłowodu pozwoliły stwierdzić istnienie dwóch przerw fonicznych - jednej w zakresie widzialnym (~ 610 nm) i drugiej w zakresie bliskiej podczerwieni (~ 840 nm). Pomiary przeprowadzone na próbce o średnicy struktury 42,6 μm ($d/\Lambda \approx 0,65$) pozwoliły określić tłumienność włókna na 13,3 dB/m dla $\lambda = 835,2$ nm. Uzyskana tłumienność wynika głównie z przyczyn materiałowych. Tłumienność struktury fonicznej oszacowano na 5,1 dB/m.

Przedstawione prace stanowią dalszą bazę do rozwoju technologii włókien strukturalnych.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować pracownikom Laboratorium Optycznego Wydziału Nauk Stosowanych na Wolnym Uniwersytecie w Brukseli za udostępnienie urządzeń pomiarowych w ramach Sieci Europejskiej COST MP0702.

Pracę wykonano w ramach realizacji grantu 3 T11B 072 30 finansowanego przez MNiSW oraz współpracy w ramach COSTU MP0702 i sieci doskonałości NEMO w 6 Ramowym Programie UE.

LITERATURA

- [1] Sakoda K.: *Optical Properties of Photonic Crystals*, Springer, NY, 2004
- [2] Kujawa I., Pysz D., Stępień R., Michalska I.: Dwuszkłany światłowód foniczny o własnościach dyspersyjnych, Mater. konfer. OPTOELEKTRONIKA 2006, Poznań, 19-20 czerwca 2006, 9-11

I. Kujawa, D. Pysz, A. Filipkowski, ...

- [3] Reeves W.H., Knight J.C., Russell P.St.J., Roberts P.J.: Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers, *Opt. Express*, 10, 14, (2002), 609-613
- [4] Feng X., Monro T.M., Petropoulos P., Finazzi V., Hewak D.: Solid microstructured optical fiber, *Opt. Express*, 11, 18, (2003), 2225-2230
- [5] Luan F., George A.K., Hendley T.D., Pearce G.J., Bird D.M., Knight J.C., Russell P.St. J.: All-solid photonic band gap fiber, *Opt. Lett.*, 29, (2004), 2369-2371
- [6] Argyros A., Birks T. A., Leon-Saval S. G., Cordeiro C. M. B., Luan F., Russell P. St.J., Photonic bandgap with an index step of one percent, *Opt. Express*, 13, 1, (2005), 309-314
- [7] Argyros A., Birks T. A., Leon-Saval S. G., Cordeiro C. M. B., Russell P. St. J.: Guidance properties of lowcontrast photonic bandgap fibers, *Opt. Express*, 13, 7, (2005), 2503-2511
- [8] Bouwmans G., Bigot L., Quiquempois Y., Lopez F., Provino L., Douay M.: Fabrication and characterization of an all-solid 2D photonic bandgap fiber with a low-loss region (< 20dB/km) around 1550 nm, *Opt. Express*, 13, 21, (2005), 8452-8459
- [9] Birks T. A., Luan F., Pearce G. J., Wang A., Knight J. C., Bird D. M.: Bend loss in all-solid bandgap fibres, *Opt. Express*, 14, 12, (2006), 5688-5698
- [10] Kujawa I., Szarniak P., Buczyński R., Pysz D., Stepień R.: Development of all-solid photonic crystal fibers, SPIE International Congress: Photonics Europe 2006, Strasbourg 2006, *Proc. SPIE*, 6182, 61822Q, (2006)
- [11] Kujawa I., Lusawa M., Pysz D., Buczynski R., Stepień R.: Światłowody fotoniczne z płaszczem dwuszklanym i szklano-powietrznym, Proc. of X Scientific Conf. Optical Fibers and Their Applications TAL 2006, Krasnobród, Polska, 171-176
- [12] Buczyński R., Pysz D., Kujawa I., Fita P., Pawłowska M., Nowosielski J., Radzewicz C., Stepień R.: Silicate all-solid photonic crystal fibers with a glass high index contrast, SPIE International Conferences: Optics and Optoelectronics Prague 2007, *Proc. SPIE*, 6588, 6588E
- [13] Bjarklev A., Broeng J., Bjarklev A. S.: Photonic Crystal Fibres, Kluwer Academic, 2003
- [14] Pysz D., Kujawa I., Szarniak P., Franczyk M., Stepień R.: Multicomponent glass fiber optic integrated structures, Photonic Crystals and Fibers: SPIE International Congress on Optics and Optoelectronics Warsaw 2005, paper 5951-02
- [15] Kujawa I., Filipkowski A., Pysz D., Nowosielski J., Stepień R.: Objętościowy rozległy dwuwymiarowy kryształ fotoniczny, *Mat. Elektroniczne*, 36, 1, (2008), 49-69
- [16] Buczyński R., Pysz D., Kujawa I., Fita P., Pawłowska M., Nowosielski J., Radzewicz Cz., Stepień R.: Silicate all-solid photonic crystal fibers with a glass high index contrast, *Proc. SPIE*, 6588, 658802, (2007)
- [17] Silvestre E., Andres M. V., Andres P.: Biorthonormal-basis method for the vector description of optical fiber modes, *J. Lightwave Technol.*, 16, (1998), 923-928

SUMMARY

IMPLEMENTATION AND CHARACTERIZATION OF ALL-GLASS PHOTONIC BAND GAP FIBER

All-glass photonic crystal fiber is an alternative fabrication approach to most popular air-glass PCF facilitating limitation disturb of photonic structure of fiber cladding and deformation of glass-air boundary because in this case it is absent. A goal of this work was to achieve more competence in design and development of such microstructured fibers with photonic band gaps. In result the series of fibers with two band gaps, first 9 nm wide at 610 nm central wavelength and second 80 nm wide at 840 nm central wavelength were developed and characterized. Attenuation of measured fiber was equal 13,3 dB/m for $\lambda = 835.2$ nm. Moreover we obtained quite good stability of geometrical parameters of photonic cladding along 100 m for manufactured *all-solid* fiber.