

DWUSZKLANE WŁÓKNA MIKROSTRUKTURALNE

Ireneusz Kujawa¹⁾, Ryszard Stępień¹⁾, Dariusz Pysz¹⁾, Przemysław Szarniak¹⁾,
Andrzej Lechna¹⁾, Janusz Duszkiewicz¹⁾, Krzysztof Haraśny¹⁾, Irena Michalska¹⁾

Periodyczny rozkład współczynnika załamania światła we włóknie fotonicznym PCF (*Photonic Crystal Fiber*) uzyskuje się przez odpowiednie rozmieszczenie przestrzenne obszarów z przynajmniej dwóch dielektryków – zwykle szkła i powietrza. Dwuszkłane włókna mikrostrukturalne są całkowicie szklanymi włóknami fotonicznymi, w przypadku których rolę węzłów sieci dwuwymiarowego kryształu fotonicznego pełnią inkluzje ze szkła o innym współczynniku załamania niż matryca włókna. Dzięki użyciu dwóch szkieł do utworzenia struktury periodycznej możliwa jest na etapie wytwarzania ścisła kontrola geometrii mikrostruktury kryształu. Umożliwia to uzyskanie światłowodu fotonicznego o zamierzonych własnościach optycznych. W artykule zaprezentowano wykonane w wyniku prac dwuszkłane włókna fotoniczne oraz przedyskutowano ich potencjalne zastosowania.

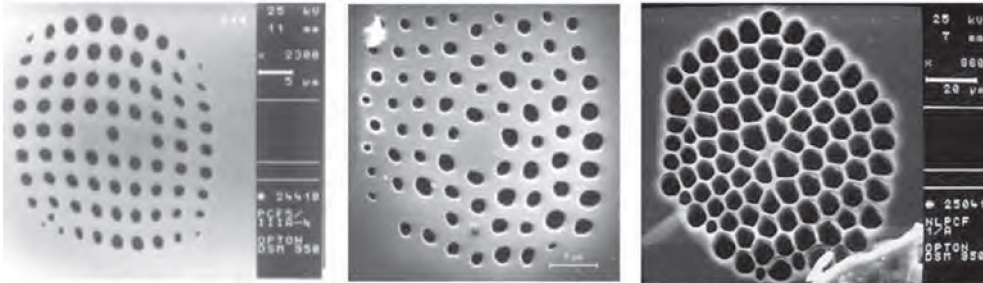
1. WSTĘP

Utrzymanie cech strukturalnych na całej długości światłowodu fotonicznego (PCF) jest niezbędne do zachowania planowanych własności optycznych [1-2]. Jednakże we włóknach szklano-powietrznych HF-PCF/HC-PCF (*Holey Fiber PCF* lub *Holey Clad PCF*) uzyskanie intencjonalnego współczynnika wypełnienia jest trudne technologicznie. Podczas procesu wytwarzania dochodzi do zmiany ciśnienia w kanalikach tworzących płaszcz fotoniczny, fluktuacji napięcia powierzchniowego szkła i tworzenia się niekorzystnego profilu gradientu temperatury w preformie ze względu na liczne granice szkło-powietrze. W krytycznych przypadkach pojawiają się znaczne deformacje (Rys. 1).

Większość przyczyn niejednorodności włókien można ostatecznie wyeliminować modyfikując i dopracowując proces technologiczny. Nie da się jednak wyeliminować powstawania niejednorodności wewnątrz kapilar spowodowanych istnieniem fali powierzchniowej [3]. W konsekwencji dochodzi do wzrostu tłumienności gotowych włókien ze względu na niejednorodności wewnętrznej powierzchni kapilar

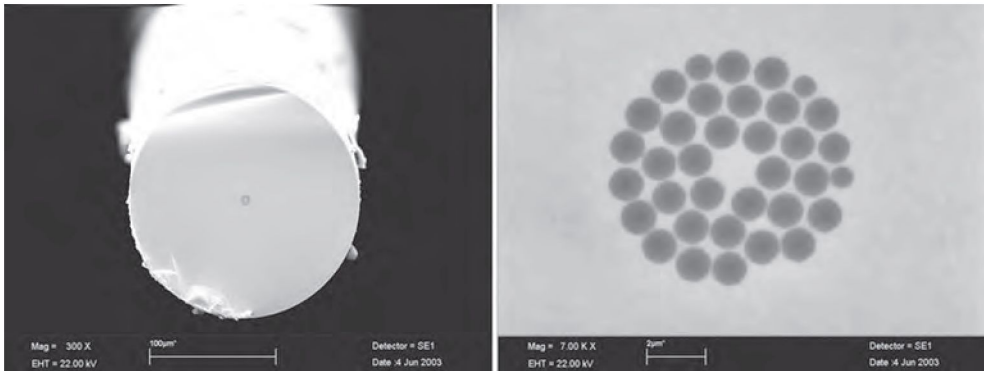
¹⁾ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa,
e-mail: Ryszard.Stepien@itme.edu.pl

tworzących płaszcz foniczny. Aby ominąć omawiany problem można wykorzystać alternatywne podejście, zastępując mikrootwórki mikroprętami, w wyniku czego uzyskuje się światłowód mozaikowy o dwuszkłanej mikrostrukturze fonicznej (Rys. 2) [4-5].



Rys. 1. Przykłady zdeformowanych struktur krystalicznych 2-D włókien szklano-powietrznych HF-PCF

Fig. 1. Examples of disturbed 2-D air-glass structures of HF-PCF's.



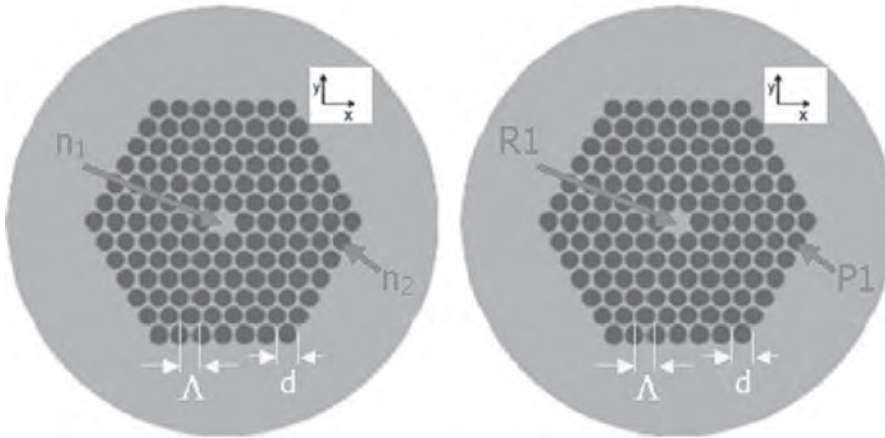
Rys. 2. Pierwszy światłowód SOHO (Southampton 2003) [4].

Fig. 2. First all-solid photonic crystal fiber made of two glasses named SOHO (Southampton 2003)[4].

2. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA DWUSZKLANEGO WŁÓKNA OPTYCZNEGO

Włókna optyczne dwuszkłane zwane też SOHO (*all-Solid Holey Fiber*) [4] są całkowicie szklanymi światłowodami fonicznymi. O tym jak będzie propagowane światło w takim włóknie decyduje, podobnie jak w światłowodach HF-PCF, wielkość i rodzaj symetrii układu periodycznego kryształu fonicznego, który stanowi

plaszcz włókna. Istotna jest również różnica między wartościami współczynników załamania matrycy (tj. materiału rdzeniowego) R1 i płaszczu P1 oraz kształt i średnica d pojedynczego elementu sieci, a także stała sieci Λ (Rys. 3).



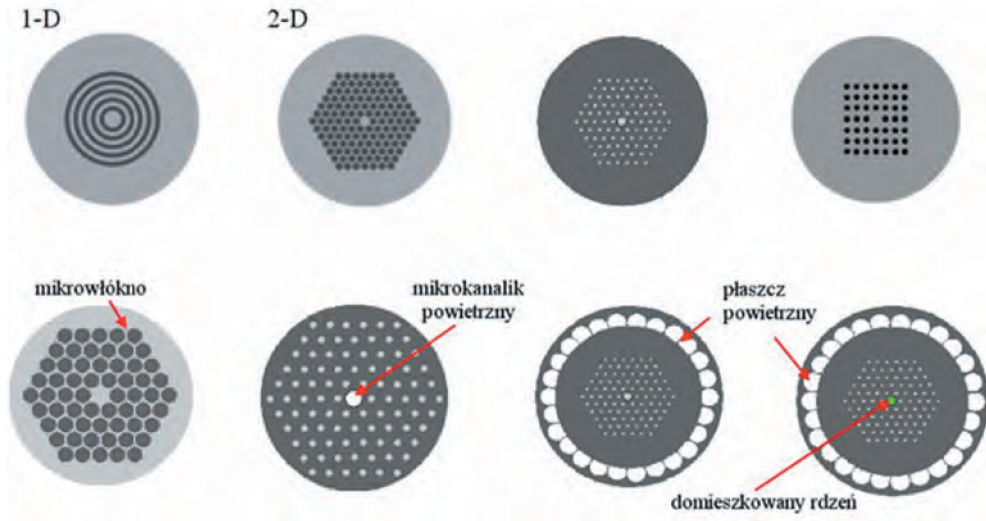
Rys. 3. Mikrostruktura o symetrii $m = 6$ – obszary jaśniejsze reprezentują szkło rdzeniowe R1 o współczynniku załamania n_1 , obszary ciemniejsze reprezentują szkło płaszczowe P1 o współczynniku załamania n_2 .

Fig. 3. Twoglass hexagonal microstructure - brighter areas represent the core glass R1, darker areas represent the clad glass P1 with refractive index n_2 .

Zaletą mikrostrukturalnych włókien dwuszkłanych jest wyeliminowanie obszarów powietrznych, w wyniku czego łatwiej jest kontrolować geometryczne parametry płaszczu na całej długości światłowodu w czasie jego wytwarzania [4-9]. Nieobecność mikrokanalików w prezentowanych włóknach ułatwia polerowanie ich czół oraz chroni je przed wpływem czynników zewnętrznych.

Włókna złożone z kilku lub więcej rodzajów szkła mogą posiadać szereg konfiguracji mikrostruktury fotonicznej (Rys. 4) [4-14].

Dopuszczalna jest również konfiguracja kilkurdzeniowa [15-16]. O ile brak jest przeszkód technologicznych, w każdym z przypadków można dowolnie kształtować wielkość d/Λ oraz średnicę rdzenia $D_{R'}$, jak i ilość warstw struktury periodycznej płaszczu fotonicznego.



Rys. 4. Możliwe konfiguracje strukturalne fonicznych włókien dwu- lub więcej szklanych.

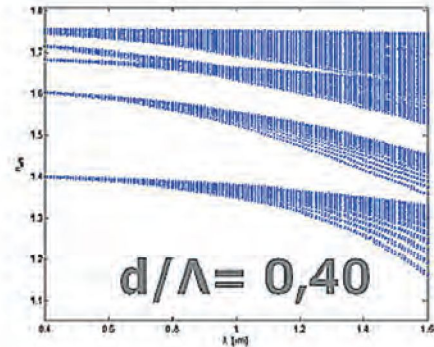
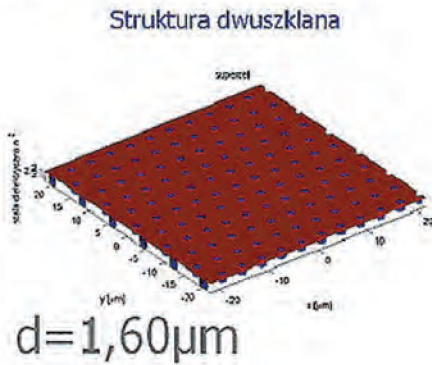
Fig. 4. The possible structural configurations of twoglass or several glasses photonic crystal fibers.

3. WŁASNOŚCI WŁÓKIEN DWUSZKLANYCH

Propagacja światła w defekcie w oparciu o całkowite wewnętrzne odbicie TIR (*Total Internal Reflection*) w dwuszkłanych światłowodach fonicznych wynika z różnicy między wartością współczynnika załamania defektu (rdzenia), a mniejszą od niego wartością efektywnego współczynnika załamania płaszcza fonicznego. Wysokie mody wyciekają przez płaszcz foniczny, w rdzeniu prowadzone są za to mody o najmniejszej średnicy [11-13].

Efekt pojawiania się fonicznych pasm wzbronionych PBG (*Photonic Band-gap*) w strukturach dwuszkłanych pokazano na Rys. 5. Zjawisko to jest efektem będącym optycznym odpowiednikiem pasm wzbronionych w półprzewodnikach. Pasma wzbronione we włóknach fonicznych są następstwem występowania dyfrakcji Bragga na periodycznej strukturze płaszcza fonicznego. Przerwa foniczna określa zakres długości fali, dla których światło nie może się propagować, dzięki czemu światło z tego zakresu jest odbijane od struktury. Zaburzenie periodyczności struktury przez wprowadzenie defektu, prowadzi do lokalizacji w jego obszarze światła odbitego [5-9, 11-13].

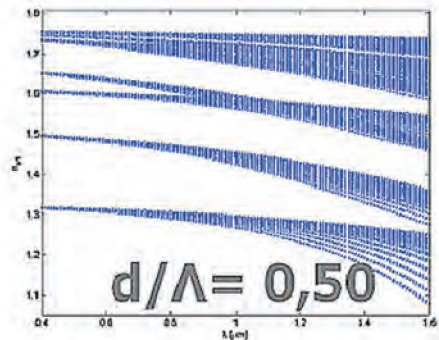
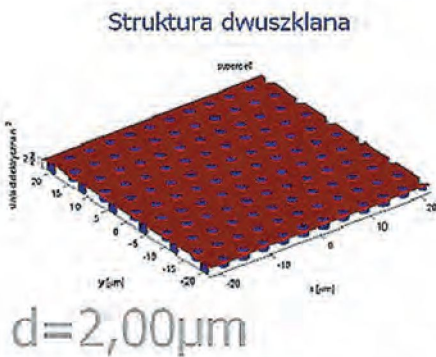
(a)



Struktura heksagonalna z siatką (rozmiar 11X11) o parametrach:

- stała sieci $\Lambda = 4 \mu\text{m}$
- stosunek $d/\Lambda = 0,40$
- współczynnik załamania prętów $n_a = 1,53$
- współczynnik załamania matrycy $n_b = 1,76$

(b)



Struktura heksagonalna z siatką (rozmiar 11X11) o parametrach:

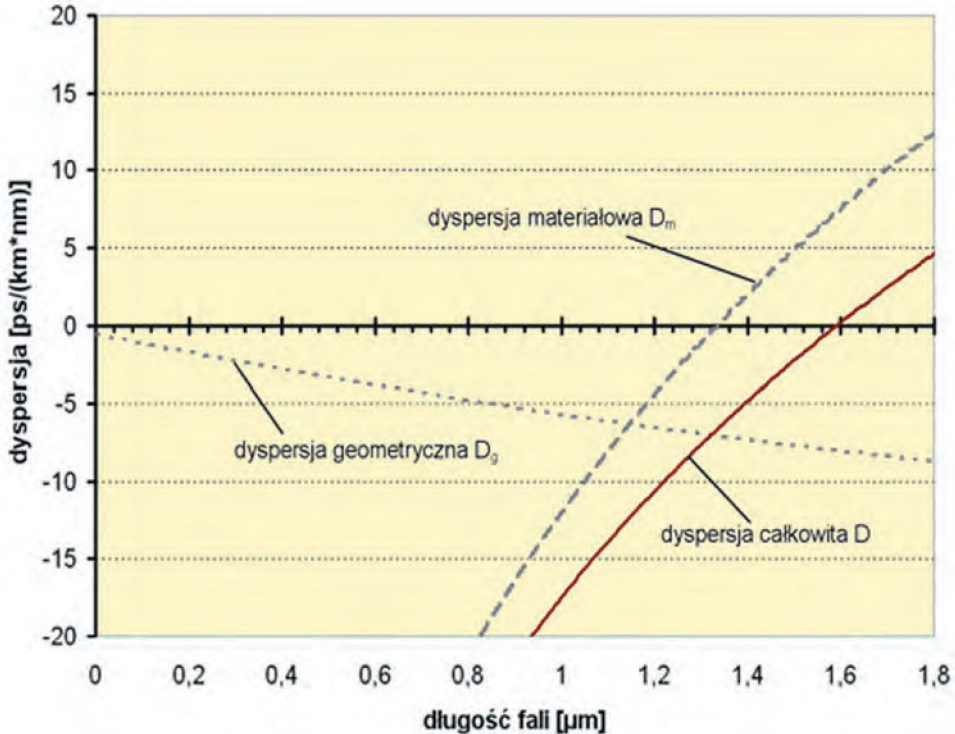
- stała sieci $\Lambda = 4 \mu\text{m}$
- stosunek $d/\Lambda = 0,50$
- współczynnik załamania prętów $n_a = 1,53$
- współczynnik załamania matrycy $n_b = 1,76$

Rys. 5. Pasma wzbronione dla dwuszkłanych struktur PBG: (a) $d/\Lambda = 0,4$; (b) $d/\Lambda = 0,5$.

Fig. 5. Photonic bandgap diagrams of two-glass photonic crystals: (a) $d/\Lambda = 0,4$; (b) $d/\Lambda = 0,5$.

Wykorzystanie do budowy płaszczu fotonicznego szklanych mikroprętów zamiast mikrootworów ma istotny wpływ na wielkość kontrastu między płaszczem a rdzeniem. Wartość częstości własnej V_{eff} struktur dwuszkłanych jest niższa niż V_{eff} struktur szklano-powietrznych [4-6, 8]. Wielkość kontrastu nie tylko zależy od

współczynnika wypełnienia, ale też od współczynników załamania światła szkieł P1 i R1. Wielkość V_{eff} wpływa na własności modowe gotowego włókna.



Rys. 6. Wpływ dyspersji materiałowej i geometrycznej na całkowitą dyspersję światłowodu jednodomowego.

Fig. 6. The influence of material and geometrical dispersion on total dispersion of single mode photonic fiber.

Zastąpienie mikrokanalików mikroprętami ułatwia proces technologiczny. Wytwarzane struktury są powtarzalne – bez znaczących wad stochastycznych [4-9]. Ma to szczególne znaczenie np. dla światłowodów o planowanej charakterystyce dyspersyjnej [6, 17-18].

Dyspersja całkowita D włókna jest czuła na przypadkowe deformacje płaszcza fotonicznego (tzn. zmiany wartości dyspersji geometrycznej D_g), które w tym przypadku są w dużym stopniu eliminowane. Ułatwia to uzyskanie założonej dyspersji całkowitej światłowodu (Rys. 6), która jest zdefiniowana jako suma dyspersji mody D_{mod} , geometrycznej D_g i materiałowej D_m , a co za tym idzie można kształtować dyspersję prędkości grupowej GVD gotowego włókna:

$$D(\lambda) = D_{\text{mod}}(\lambda) + D_g(\lambda) + D_m(\lambda) \equiv -\frac{2\pi}{c} GVD \quad (1)$$

$D_{\text{mod}} = 0$, gdy struktura jest jednodomowa

Jeśli dobierze się w sposób optymalny współczynniki załamania szkieł R1 i P1 i otrzyma przez dobór d i d/Λ niską wartość V_{eff} , to uzyska się włókno jednodomowe w nieskończenie szerokim zakresie widmowym (*Endlessly Single Mode PCF*) [19]. Dla takiego włókna wartość dyspersji modowej wynosi zero. Wówczas na całkowitą dyspersję włókna wpływać będzie jedynie dyspersja materiałowa użytych szkieł oraz dyspersja geometryczna D_g struktury periodycznej kryształu. Zgodność wykonanych struktur z projektem (tj. nieznaczne tylko odstępstwa wielkości d i d/Λ od założonych) gwarantuje uzyskanie planowanej dyspersji całkowitej włókna, czyli położenie punktu $D(\lambda) = 0$ i nachylenie krzywej dyspersji $B_d = dD/d\lambda$.

Zastosowanie w takim włóknie ciężkich szkieł o znacznych współczynnikach nieliniowości dodatkowo umożliwia wytwarzanie włókien wysoce nieliniowych [4, 20-22].

Podobieństwa i różnice między fonicznymi włóknami dwuszklanymi i szklano-powietrznymi zestawiono w Tab. 1.

Tabela 1. Podobieństwa i różnice między włóknami dwuszklanymi i szklano-powietrznymi.

Table 1. Similarities and differences between two glass and air-glass photonic fibers.

| PODOBIENSTWA | RÓŻNICE |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ◇ Kształtowanie własności propagacyjnych przez dobór symetrii m, średnicy elementu sieci d oraz stałej sieci Λ płaszcza fonicznego. ◇ Uzyskiwanie: <ul style="list-style-type: none"> - jednodomowości, - dużego pola modowego, - dwójłomności, - efektów nieliniowych, - zjawiska PBG. | <p>W przypadku struktur dwuszklanych:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◇ Łatwiejsza kontrola geometrii płaszcza fonicznego – ograniczenie przypadkowych deformacji ◇ Zgodność wykonanych struktur z projektem ◇ Szersza możliwość kształtowania własności dyspersyjnych i nieliniowych |

4. DOBÓR SZKIEŁ

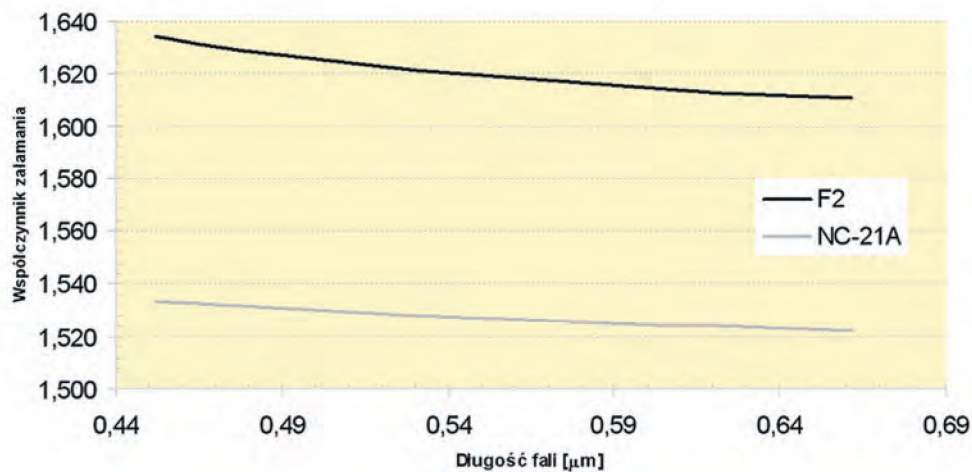
Przy opracowywaniu sposobu wytwarzania optycznych włókien SOHO brano pod uwagę szereg szkieł wieloskładnikowych. Po przeanalizowaniu składu chemicznego oraz wielkości współczynników rozszerzalności termicznej do przeprowadzenia prób

technologicznych wytypowano dwa szkła: komercyjne szkło ołowiowe F2 ($\rho = 3,61\text{g/cm}^3$) firmy SHOTT o wysokiej transmisji oraz topione w Pracowni Szkła ITME szkło krzemianowe NC-21A ($\rho = 2,50\text{g/cm}^3$). Skład szkieł przedstawiono w Tab. 2. Różnica współczynników załamania światła w zakresie spektralnym 450÷670 nm tych szkieł wynosi $\sim \Delta n = 0,086$ (Rys. 7).

Tabela 2. Skład tlenkowy szkieł wytypowanych do wytworzenia dwuszkłanej struktury fotonicznej.

Table 2. Oxide composition of selected to producing the two-glasses photonic structure.

| 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-21A | 55,0 | 1,0 | 26,0 | - | 3,0 | 9,5 | 5,5 | 0,8 |



Rys. 7. Współczynnik załamania szkieł F2 i NC-21A w funkcji długości fali.

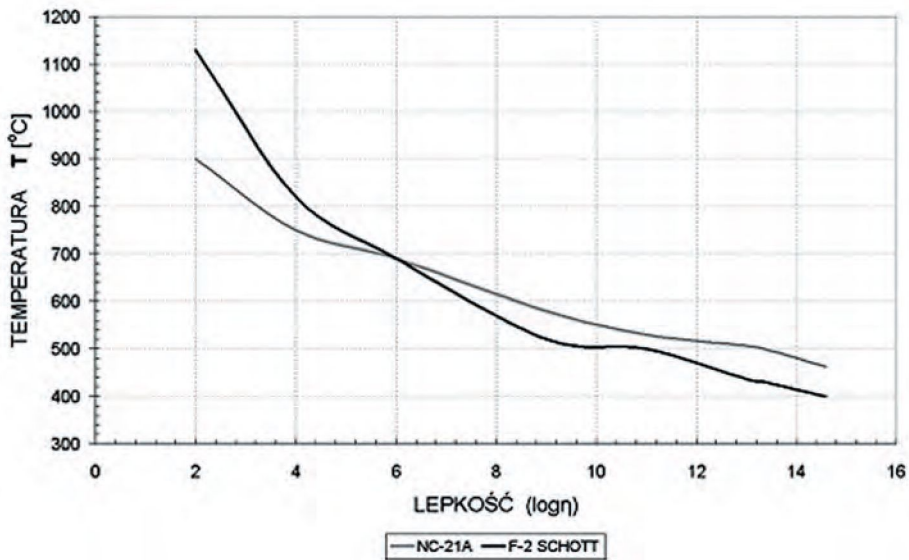
Fig. 7. Refractive index of F2 and NC-21A glasses as a function of wavelength.

Dane uzyskane z mikroskopu grzewczego i dylatometru potwierdziły dobre dopasowanie wzajemne współczynników rozszerzalności termicznej i lepkości obu szkieł (Tab. 3).

Tabela 3. Dane z mikroskopu grzewczego i dylatometru wytypowanych szkieł.
Table 3. The data from Leitz's microscope and the dilatometer for selected glasses.

| L.p. | Parametr | Nazwa szkła | |
|------|---|-------------|-------------------------|
| | | F2 | NC-21A |
| 1. | n_d | 1,619 | 1,533 |
| 2. | $\alpha_{20}^{300} \cdot 10^{-7K^{-1}}$ | 94 | 82 |
| 3. | Tg [°C] | 430 | 500 |
| 4. | DTM [°C] | 500 | 530 |
| 5. | mikroskop grzewczy: | | |
| | - temp. zaoblenia, | 520 | α_{20}^{300} 590 |
| | - temp. kuli, | 690 | 690 |
| | - temp. półkuli, | 820 | 750 |
| | - temp. rozplięcia. | 1130 | 900 |

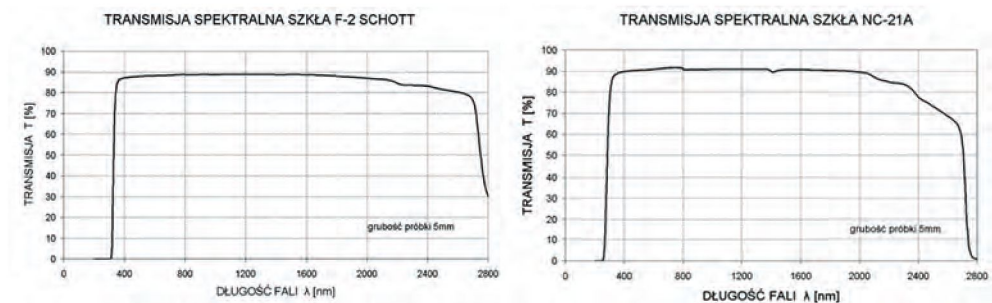
gdzie: n_d – współczynnik załamania światła; α_{20}^{300} - współczynnik rozszerzalności termicznej w zakresie 20°C-300°C; Tg – temperatura transformacji; DTM – dylatometryczna temperatura mięknięcia.



Rys. 8. Krzywe lepkości szkieł F2 i NC-21A.
Fig. 8. The curves of viscosity of glasses: F2 and NC-21A.

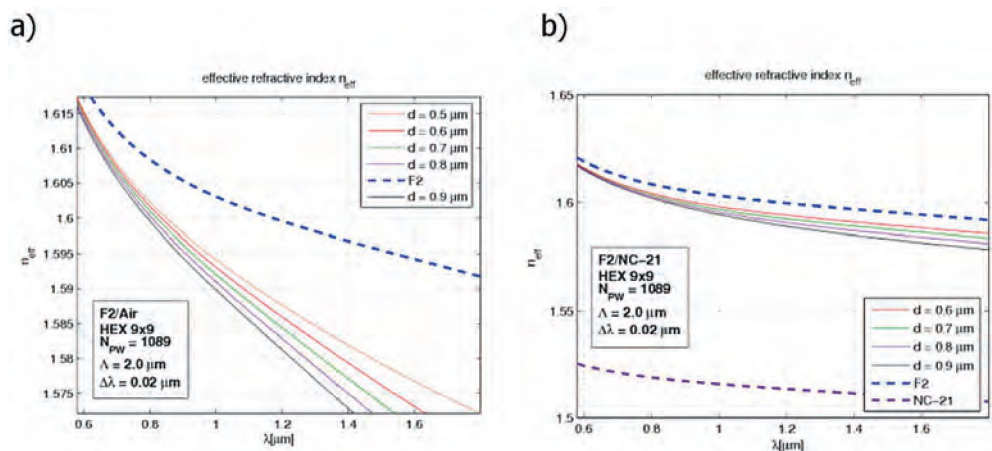
Na Rys. 8 przedstawiono krzywe lepkości szkieł wytypowanych do realizacji opisywanego włókna. Jak widać w temperaturze $\sim 700^{\circ}\text{C}$, szkła mogą być wspólnie przetwarzane ze względów lepkościowych.

Transmisja spektralna szkła F2 i NC-21A została zaprezentowana na Rys. 9.



Rys. 9. Transmisja spektralna wytypowanych szkieł.
Fig. 9. Spectral transmission of selected glasses.

Dla wybranej pary szkieł (P1 = NC-21A, R1 = F2) przeprowadzono obliczenia własności modowych struktur dwuszklanych dla różnych współczynników wypełnienia oraz stałych sieci d : 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 i $\Lambda = 2,0\mu\text{m}$ i porównano je dla analogicznych struktur szklano-powietrznych (Rys. 10).



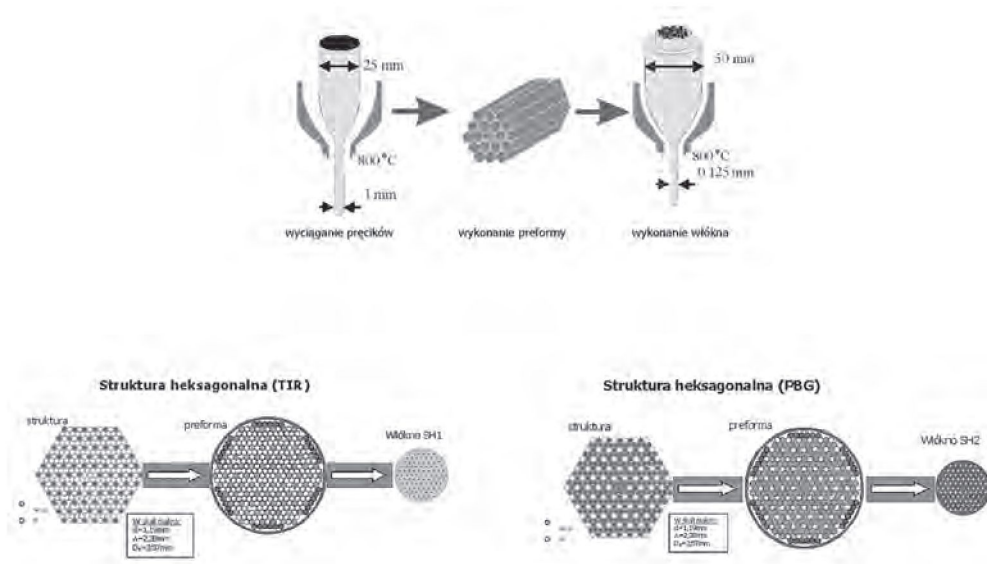
Rys. 10. Porównanie efektywnych współczynników załamania dla najwyższego modu płaszczowego struktur: a) szklano-powietrznych (F2/powietrze), b) dwuszklanych (F2/NC-21A) o różnych współczynnikach wypełnienia.

Fig. 10. The comparison of effective refractive indexes for the highest cladding mode: a) for F2/air structure, b) for F2/NC -21A twoglass structure – for several filling factors.

Zastosowanie szkieł F2 i NC-21A ułatwia uzyskanie jednorodności w szerokim zakresie widmowym i zwiększa tolerancję procesu technologicznego ze względu na niejednorodność rozmiarów mikroprętów oraz odstępstwa od zaprojektowanego współczynnika wypełnienia.

5. TECHNOLOGIA WŁÓKIEN DWUSZKLANYCH

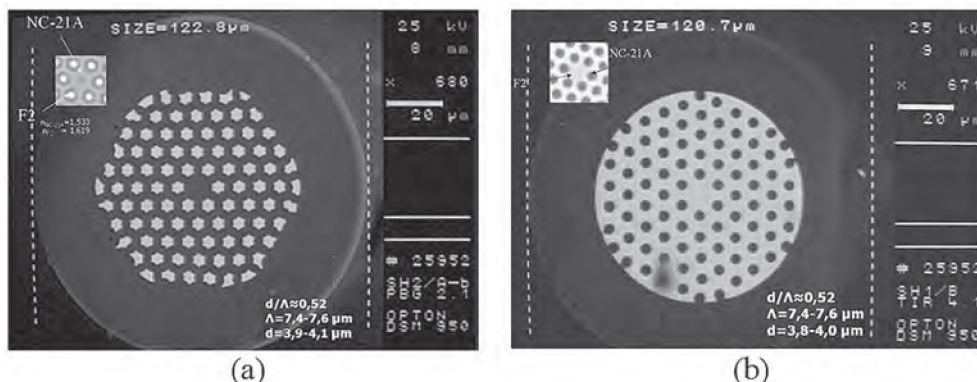
Mozaikę dwuszkłąną można uzyskać we włóknie światłowodowym przez proces przeskalowywania makrostruktury do mikrostruktury (Rys. 11). Wszystkie etapy procesu technologicznego wymagają podwyższonych standardów czystości.



Rys. 11. Sposób wykonania włókien dwuszkłanych SOHO [23].

Fig. 11. The procedure of manufacturing of two-glass fibers type SOHO [23].

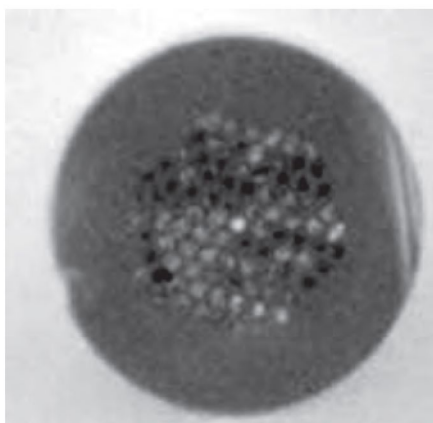
W obu przypadkach, to jest dla struktury PBG o $n_1 < n_2$ i TIR o $n_1 > n_2$, po dobraniu parametrów procesu wyciągania uzyskano struktury poprawne (Rys. 12) [5-6, 18, 23], potwierdzając w ten sposób prawidłowość doboru szkieł. Struktura z Rys. 12(a) składa się z matrycy wykonanej ze szkła NC-21A o niższym współczynniku (n_1) w stosunku do szkła płaszczowego F2 o wyższym współczynniku (n_2), co eliminuje możliwość wystąpienia całkowitego wewnętrznego odbicia, które występuje, gdy jako matrycy użyje się szkło F2, a inkluzje wykonana ze szkła NC-21A (Rys. 12(b)).



Rys. 12. Uzyskane fotoniczne światłowody dwuszkłane: (a) PBG, (b) TIR.
Fig. 12. Manufactured twoglass photonic fibers: (a) PBG, (b) TIR.

Jak widać z zaprezentowanych zdjęć (Rys. 12), liniowy współczynnik wypełnienia $d/\Lambda \approx 0,5$. Świadczy to o dobrej skalowalności struktury, gdyż z takiego d/Λ startowano. Znaczniejsze deformacje dotyczą ostatniego rzędu płaszczu fotonicznego co jest związane z pojawianiem się sił deformujących w trakcie integracji w wyniku działania próżni.

Jak widać z Rys. 12(a) podczas procesu wyciągania włókna PBG pręciki ze szkła F2 utworzyły obszary gwiazdkowe. W temperaturze wyciągania zastosowane tu szkło płaszczowe F2 posiada mniejszą lepkość niż NC-21, które w tym włóknie pełni rolę matrycy o niższym współczynniku załamania. Jednakże taka zmiana geometrii elementu sieci we włóknach PBG wprowadza relatywnie niewielkie zmiany, jeśli chodzi o umiejscowienie i kształt przerw fotonicznych [7, 8]. Dla przedstawionego na Rys. 13 światłowodu o średnicy $D_{fiber} = 122,8 \mu\text{m}$ i długości $L_{fiber} = 30 \text{ cm}$ zaobserwowano prowadzenie światła w przerwie w zakresie światła widzialnego w obszarze światła pomarańczowego $\lambda \approx 590 \div 625 \text{ nm}$ (Rys. 13).



Rys. 13. Prowadzenie światła w przerwie fotonicznej w zakresie światła widzialnego ($\lambda \approx 590 \div 625 \text{ nm}$).

Fig. 13. Photonic bandgap guiding of visible light ($\lambda \approx 590 \div 625 \text{ nm}$).

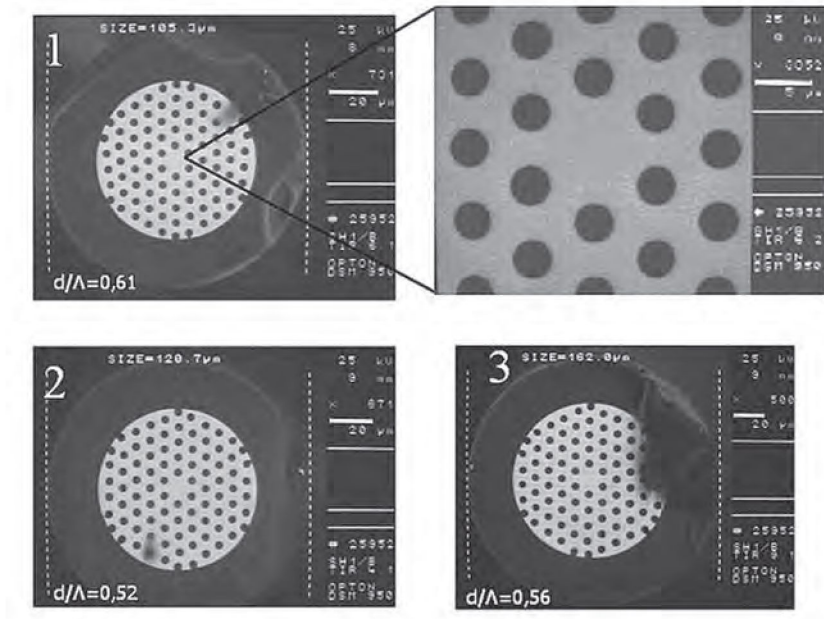
Tłumienność wykonanych światłowodów TIR (Rys. 12(b)) zaprezentowano w Tab. 4.

Tabela 4. Tłumienność światłowodów dwuszkłanych typu TIR ($\lambda = 632,8 \mu\text{m}$) [6].

Table 4. The attenuation of two glass photonic fibers type TIR for $\lambda = 632,8 \mu\text{m}$ [6].

| Średnica światłowodu [μm] | d [μm] | Λ [μm] | Liniowy współczynnik wypełnienia d/Λ | Tłumienność światłowodu A [dB/m] |
|--|-----------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| 90 | 3,18 | 5,0 | 0,636 | 1,9 |
| 100 | 3,21 | 5,6 | 0,573 | 8,7 |
| 110 | 3,60 | 6,1 | 0,590 | 5,4 |
| 125 | 3,92 | 7,6 | 0,516 | 1,8 |

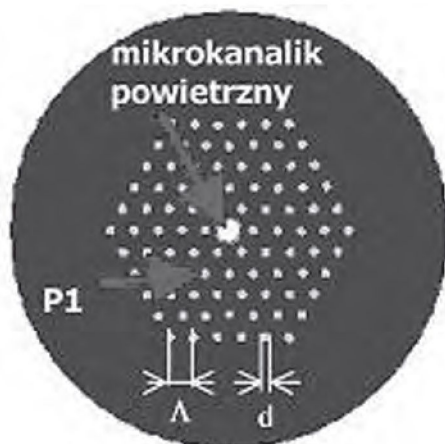
W trakcie prac technologicznych uzyskano dobrą skalowalność geometryczną płaszczka fotonicznego (Rys. 14).



Rys. 14. Przykładowe światłowody SOHO TIR: 1- włókno o średnicy 105 μm , 2 - włókno o średnicy 120 μm , 3 - włókno o średnicy 160 μm .

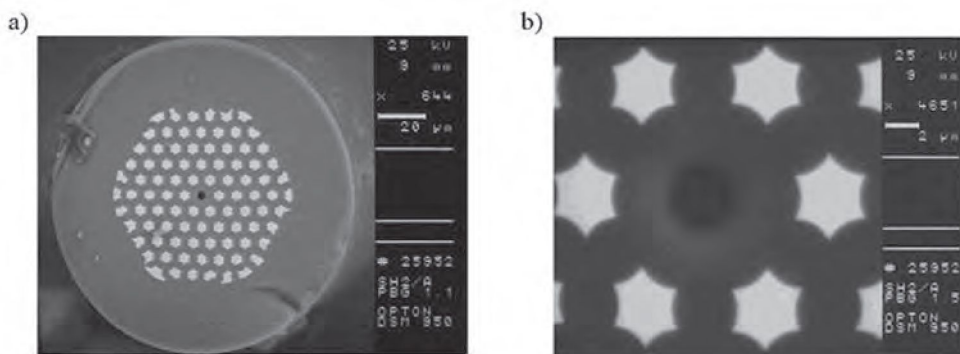
Fig. 14. Samples of optical fibres type SOHO TIR: 1- diameter of fiber 105 μm , 2 - diameter of fiber 120 μm , 3 - diameter of fiber 160 μm .

W ramach prac przeprowadzonych w roku 2005 uzyskano również strukturę typu ACSC (*Air Core - Solid Clad*), czyli powietrzny rdzeń-płaszcz szklany (Rys. 15).



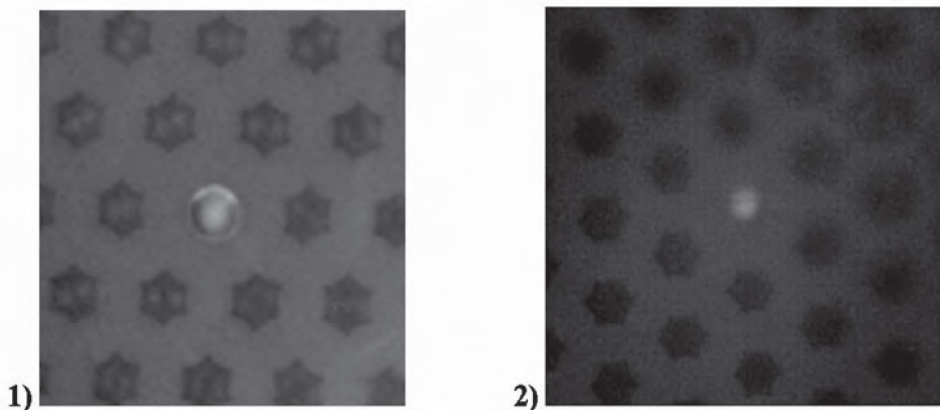
Rys. 15. Struktura włókna typu ACSC.
Fig. 15. The hexagonal structure of SCSC..

Początkowe wymiary preformy były identyczne jak w poprzednich procesach. Dla tej konfiguracji uzyskano poprawną strukturę fotoniczną (Rys. 16).



Rys.16. Struktura włókna ACSC $D_{fiber} = 123,80 \mu\text{m}$; $d \approx 3,90 \mu\text{m}$; $\Lambda \approx 7,49 \mu\text{m}$; $D_R = 3,67 \mu\text{m}$:
a) widok ogólny; b) zbliżenie obszaru rdzenia powietrznego.
Fig.16. The hexagonal structure of ACSC fiber ($D_{fiber} = 123,80 \mu\text{m}$; $d \approx 3,90 \mu\text{m}$; $\Lambda \approx 7,49 \mu\text{m}$; $D_R = 3,67 \mu\text{m}$): a) general view; b) air core region.

Dla dwóch próbek włókna zaobserwowano prowadzenie światła w zakresie widzialnym: 1) w zakresie światła czerwonego $\lambda \approx 625\text{--}740 \text{ nm}$ i 2) w zakresie światła zielonego $\lambda \approx 520\text{--}565 \text{ nm}$ (Rys. 17).



Rys. 17. Propagacja światła z zakresu widzialnego we włóknie o dwuszkłanym płaszczu fonicznym i powietrznym rdzeniu o różnych wymiarach otworu: 1) 4 μm , 2) 2 μm .

Fig.17. Guiding visible light in air core: 1) diameter of air core 4 μm – red light, 2) diameter of air core 2 μm – green light.

Kontrola wielkości otworu centralnego pełniącego rolę rdzenia jest krytyczna. Niestety zaobserwowano dużą niestabilność wielkości średnicy powietrznego rdzenia wzdłuż włókna. Dlatego też trudno uzyskać stałość warunków propagacji na długim odcinku światłowodu.

6. PODSUMOWANIE

W dotychczasowych pracach uzyskano światłowody SOHO TIR o tłumienności poniżej 2,0 dB/m dla $\lambda = 632,8$ nm. Uzyskano również światłowody SOHO PBG ze szklanym i powietrznym rdzeniem, w którym zaobserwowano prowadzenie światła w zakresie widzialnym.

7. PERSPEKTYWY ROZWOJU

W trakcie realizacji tematu statutowego pt.: „Opracowanie sposobu wytwarzania włókien typu SOHO (all-Solid Holey Fiber)”:

- dobrano kompatybilną parę szkieł, która umożliwiła wykonanie dwuszkłanych mikrostrukturalnych włókien fonicznych SOHO,
- opracowano technologię i wykonano prototypowe włókna SOHO,
- uzyskano dobre odwzorowanie implementowanych struktur oraz ich skalowalność (Rys. 12, 14),

- wykonano także nadprogramowo włókno o roboczej nazwie ACSC (Rys. 16).

W oparciu o te doświadczenia w ramach aktualnie realizowanego grantu: „*Projektowanie i wytwarzanie światłowodów mikrostrukturalnych z przerwą foniczną ze szkieł wieloskładnikowych*” przewiduje się wykonanie serii włókien ze strukturą dwuszkłaną umożliwiającą propagację światła w oparciu o zjawisko PBG dla celów czujnikowych. Ponadto dalszym planowanym na 2007 rok etapem prac nad dwuszkłanymi strukturami fonicznymi będzie próba wykonania materiału makroskopowego o własnościach kryształu fonicznego. Jak już wspomniano, struktura posiadająca pasmo wzbronione odbija światło o długości z obszaru przerwy. Taki makroskopowy obszar (np. 1 mm x 1 mm) z zaimplementowanym dwuwymiarowym pełnym kryształem fonicznym o określonej przerwie wzbronionej może stanowić nowy materiał foniczny stosowany jako filtr optyczny odbijający fale o zaplanowanych długościach. Wytworzenie docelowo płytek lub/i soczewek z takiego materiału może umożliwić wykonanie nowej klasy optycznych filtrów i elementów optyki objętościowej.

Koncepcja dwuszkłanych światłowodów fonicznych może przynieść korzyści tam, gdzie wymagany jest odpowiedni kształt charakterystyki dyspersyjnej. Ewentualność kontrolowanego wypłaszczenia dyspersji całkowitej światłowodu i przesuwania punktu $D(\lambda) = 0$ i nachylenia $B_d = dD/d\lambda$ w okolicach tego punktu stwarza szereg możliwości. Takie profilowanie własności dyspersyjnych jest istotne nie tylko przy jej kompensacji, ale również w światłowodach nieliniowych, które mogą być stosowane do generacji koherentnego światła białego [6, 21, 24-25] w spektroskopii, interferometrii, czy koherentnej tomografii optycznej. Do uzyskania *supercontinuum* wymagany jest mały rdzeń oraz płaska dyspersja anormalna (dodatnia) – włókna dwuszkłane ze szkieł wieloskładnikowych pozwalają stosunkowo łatwo spełnić oba warunki [18].

Przedstawione prace wykonano w ramach realizacji tematu statutowego ITME pt.: „Opracowanie sposobu wytwarzania włókien typu SOHO (all-Solid Holey Fiber)” (2005 r).

LITERATURA

- [1] Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A.: Reduced microdeformation attenuation in large-mode area potonic optical fibers for visible applications, *Opt. Lett.* 28, (2003) 1645-1647
- [2] Steel M., White T., de Sterke C.M., McPhedran R., Botton L.: Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers, *Opt. Lett.* 26 (2001) 488-490
- [3] Birks T.A., Roberts P.J., Couny F., Sabert H., Mangan B.J., Williams D.P, Farr L., Mason M.W., Tomilinson A., Knight J.C., Russell P.St. J.: The fundamental limits

- to the attenuation of hollow-core photonics crystal fibers, *Proc. of ICTON* (2005) 1, 107-110
- [4] Feng X., Monro T.M., Petropoulos P., Finazzi V., Hewak D.: Solid microstructured optical fiber, *Opt. Express*, 11, 18 (2003) 2225-2230
- [5] Kujawa I., Lusawa M., Pysz D., Buczyński R., Stępień R.: Światłowody fotoniczne z płaszczem dwuszklanym i szklano-powietrznym, X Konf. Światłowody i ich zastosowania, Krasnobród 2006, Mat. Konf., 171-176
- [6] Kujawa I., Szarniak P., Buczyński R., Pysz D., Stępień R.: Development of all-solid photonic crystal fibers, *Proc. SPIE* 6182 (2006) 2Q1-2Q8
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Cryan C., Tatah K., Strack R.: Multi-component all glass photonic bandgap fiber, US Patent No. US 6598428B1 Jul. 29, 2003
- [11] Knight J.C.: Photonic crystal fibres, *Nature*, 424 (2003) 847-851
- [12] Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russel P.S.: Photonic band gap guidance in optical fibers, *Science*, 282 (1998) 1476-1478
- [13] Pysz D., Stępień R., Jędrzejewski K., Kujawa I.: Włókna fotoniczne ze szkieł wieloskładnikowych, *Materiały Elektroniczne*, 30, 3 (2002) 39-50
- [14] Yi N., Lei Z., Shu J., Jiangde P.: Dispersion of square solid-core photonic bandgap fibers, *Opt. Express*, 12, 13 (2004) 2825-2830
- [15] Pysz D., Kujawa I., Szarniak P., Franczyk M., Stępień R.: Multicomponent glass fiber optic integrated structures, Photonic Crystals and Fibers: SPIE International Congress on Optics and Optoelectronics, Warsaw 2005, paper 5951-02
- [16] Buczyński R., Szarniak P., Pysz D., Kujawa I., Stępień R., Szoplík T.: Properties of a double-core photonic crystal fibre with a square lattice, *Proc. SPIE*, 5576 (2004) 85-91
- [17] Łucki M. Boháč L.: Flexible control of dispersion in Index Guiding Photonic Crystal Fibers governed by geometrical parameters, *Proc. SPIE*, 6182, (2006) 2F1-2F9
- [18] Kujawa I., Pysz D., Stępień R., Michalska I.: Dwuszkłany światłowód fotoniczny o własnościach dyspersyjnych, *Optoelektronika*, 2006 – Poznań, Mat. Konf. 9-11
- [19] Birks T.A., Knight J.C., Russell P. St. J.: Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt. Lett.*, 22, (1997) 961-963
- [20] Szarniak P., Foroni M., Buczyński R., Pysz D., Wasylczyk P., Gaboardi P., Poli F., Cucinotta A., Selleri S., Stępień R.: Nonlinear photonic crystal fiber with high birefringence made of silicate glass, *Proc. SPIE*, 6182 (2006) 6182, 201-208

- [21] Buczyński R., Lorenc D., Bugar I., Korzeniowski J., Pysz D., Kujawa I., Uherek F., Stępień R.: Nonlinear microstructured fibers for supercontinuum generation, X Konf. Światłowody i ich Zastosowania, Krasnoblód 2006, Mat. Konf. 81-86
- [22] Petropoulos P., Monro T. M., Ebendorff-Heidepriem H., Frampton K., Moore R. C., Rutt H.N., Richardson D.J.: Soliton-self-frequency-shift effects and pulse compression in an anomalously dispersive highnonlinearity lead silicate holey fiber, OFC 2003, *OSA Proceeding Series* (Optical Society of America, Washington, D. C.), 2003, PD3
- [23] Kujawa I., Stępień R., Pysz D., Szarniak P., Haraśny K., Michalska I.: Technologia włókien mikrostrukturalnych typu all-Solid Holey Fiber (SOHO), *Ceramika, Polish Ceramic Bulletin*, 912 (2005), 775-782
- [24] Yamamoto T., Kubota H., Kawanishi S., Tanaka M., Yamaguchi S.: Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber, *Opt. Express*, 11, 13 (2003) 1537-1540
- [25] Mitrofanov A.V., Linik Y.M., Buczynski R., Pysz D., Lorenc D., Bugar I., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Fedotov A.B., Zheltikov A.M.: Highly birefringent silicate glass photonic-crystal fiber with polarization-controlled frequencyshifted output: A promising fiber light source for nonlinear Raman microspectroscopy, *Opt. Express*, 14, 22, 30 (2006) 10645-10651

Summary

MICROSTRUCTURAL TWO-GLASSES OPTICAL FIBERS

In the case of photonic crystal fibers using two or more multicomponent glasses in the photonic structure allows to manipulate refractive index contrast which is not possible in holey fibers. The all-solid holey fibers (SOHO) offer additional degree of freedom to the designer for determination of dispersion than in case of air-holes PCFs. Moreover a fabrication of all-solid PCFs allows for a better control of geometry and uniformity of the cladding structure design. We report on fabrication of such fibers made of multicomponent glasses. In the paper we also discuss possible future modifications of the structures and their potential applications.