

OBJĘTOŚCIOWY, ROZLEGŁY, DWUWYMIAROWY KRYSTAŁ FOTONICZNY

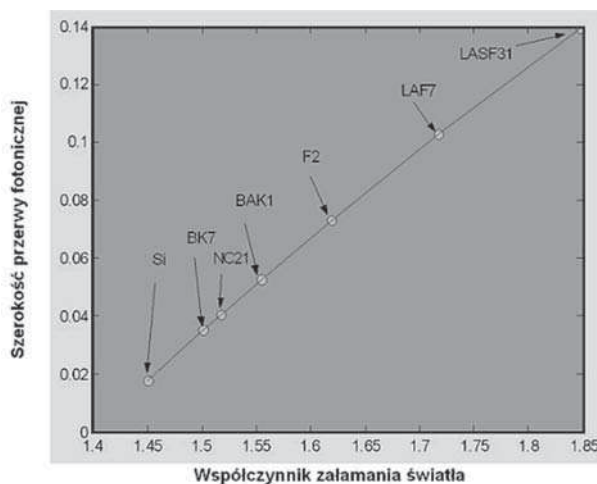
Ireneusz Kujawa¹, Adam Filipkowski², Dariusz Pysz¹, Jędrzej Nowosielski²,
Ryszard Stępień¹

1. WSTĘP

Przerwa fotoniczna (*Photonic Bandgap*) jest optycznym odpowiednikiem występujących w półprzewodnikach pasm wzbronionych [1-4]. Pojawianie się pasm spowodowane jest występowaniem dyfrakcji Bragga fali świetlnej na periodycznej strukturze dielektrycznej jedno- dwu- lub trójwymiarowego kryształu fotonicznego. Przerwa fotoniczna określa zakres długości fali, wektorów falowych i modów, dla których światło nie może się rozchodzić – dla tego zakresu struktura o określonych parametrach dielektrycznych i geometrycznych jest idealnym zwierciadłem. Efekt ten wykorzystuje się w optycznych światłowodach fotonicznych PCF (*Photonic Crystal Fiber*) [5–8] do propagacji światła. Istnienie fotonicznych stanów wzbronionych jest uwarunkowane kontrastem współczynników załamania światła i stosunkiem ilościowym dielektryków wykorzystanych do budowy struktury oraz sposobem ich wzajemnego rozmieszczenia [1–11]. Ilustracją wpływu Δn na szerokość przerwy fotonicznej jest Rys. 1 przedstawiający wyniki przeprowadzonych dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ symulacji powietrzno-szklanego sześciokątnego kryształu 2-D (przy $d/\Lambda = \text{const}$) dla szkła kwarcowego i kilku wieloskładnikowych szkieł, zależnie od ich współczynnika załamania.

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-684 Warszawa, ul. Wólczyńska 133, e-mail: Ireneusz.Kujawa@itme.edu.pl

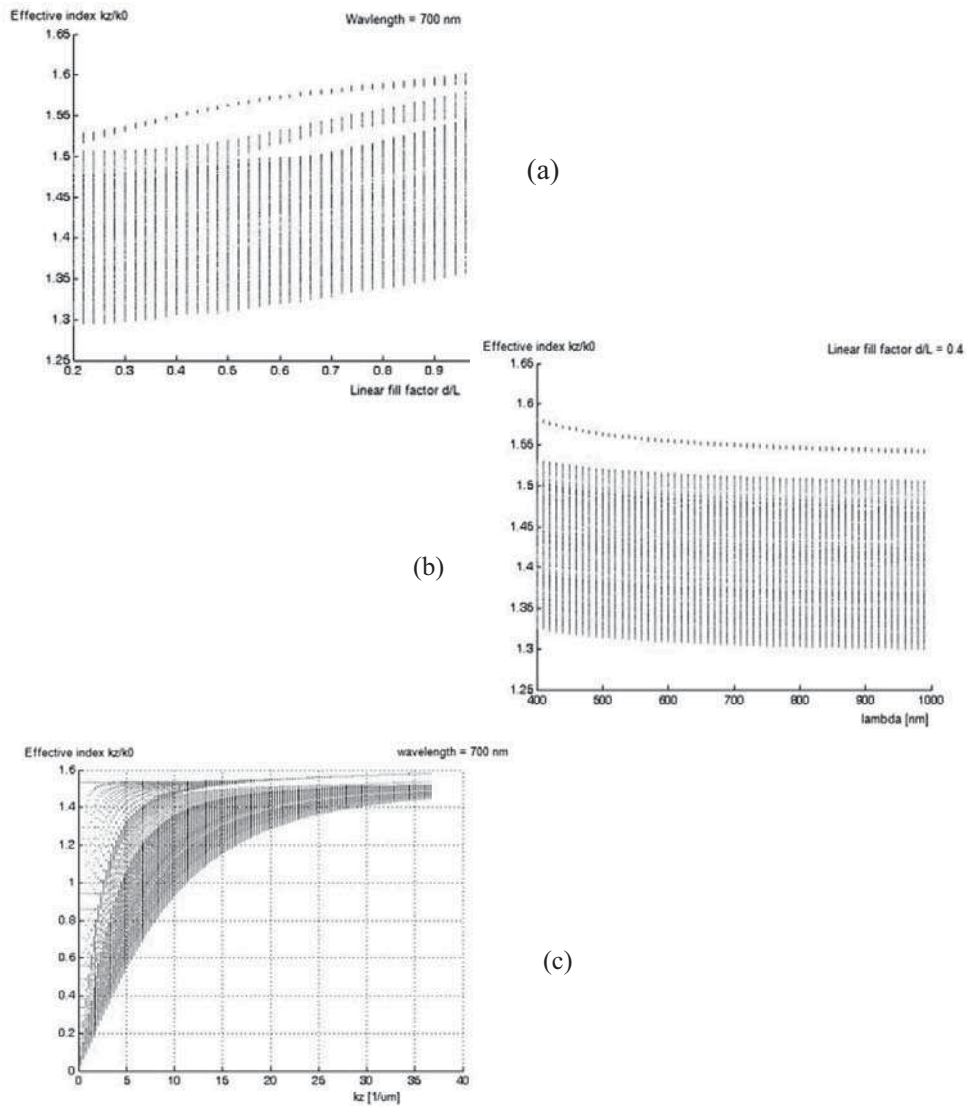
² Zakład Optyki Informacyjnej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa, Polska, tel. (0-22) 55-46-857, rbuczyns@igf.fuw.edu.pl



Rys. 1. Szerokość przerwy fotonicznej powietrzno-szklanego kryształu 2-D o heksagonalnej siatce dla kilku wieloskładnikowych szkieł w funkcji wielkości współczynnika załamania światła ($d/\lambda = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$).

Fig. 1. Size of the bandgap for several multicomponent glasses in function of refractive indexes (simulations are made for 2-D hexagonal air-glass photonic crystal structures and $d/\lambda = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$).

W przypadku struktur dwuszkłanych różnica współczynników załamania Δn jest zwykle dużo niższa niż w kryształach szklano-powietrznych i zwykle nie przekracza 0,1. Wielkość kontrastu Δn jest ograniczona ze względów materiałowych i wynika z konieczności doboru chemicznego, temperaturowego i lepkościowego pary szkieł niezbędnej do wytworzenia struktury dwuszkłanej. Przeprowadzone wstępne symulacje wykazały, że dla dwuszkłanych kryształów ze względu na wielkość Δn , jest możliwe uzyskanie tylko częściowej przerwy fotonicznej (Rys. 2).



Rys.2. Efektywny współczynnik załamania struktury periodycznej o kontraście współczynników załamania $\Delta n \approx 0,086$ w funkcji: (a) liniowego współczynnika wypełnienia d/Λ , symulacja dla $\lambda = 700$ nm; (b) długości fali λ dla wybranego liniowego współczynnika wypełnienia $d/\Lambda = 0,4$ ($k_z = \text{const}$); (c) wektora falowego k_z , dla wybranego liniowego współczynnika wypełnienia $d/\Lambda = 0,4$ i długości fali 700 nm.

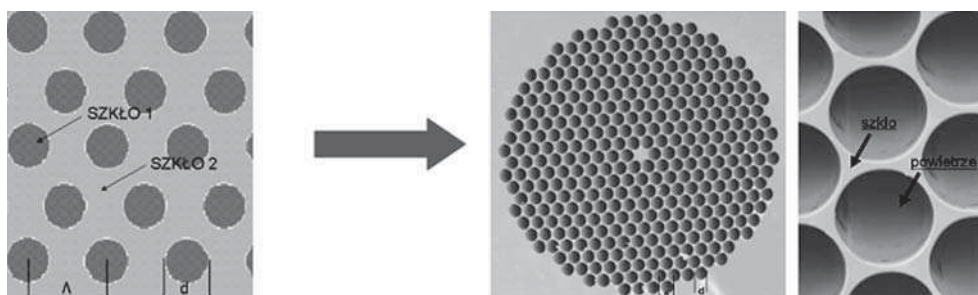
Fig. 2. Photonic bandgap diagrams for periodic structures with contrast $\Delta n \approx 0,086$: (a) effective index in function of inclusion diameter (simulations are made for wavelength $\lambda = 700$ nm); (b) effective index in function of wavelength (simulations are made for fill factor $d/\Lambda = 0,4$ and $k_z = 20,9436$ 1/um); (c) effective index with increase of k_z component of the wave vector (simulations are made for fill factor $d/\Lambda = 0,4$ and wavelength 700 nm).

Z zaprezentowanych symulacji wyraźnie widać, że dla rozpatrywanego kryształu dwuszklanego o małym kontraście Δn przerwa fotoniczna jest ściśle powiązana z parametrami sieci d/λ (Rys. 2a). Ponadto przerwa istnieje dla określonych wartości wektora falowego (Rys. 2c).

Ze względu na charakter zjawiska materiał z całkowitą foniczną przerwą wzbronioną (przerwa istnieje dla określonego zakresu spektralnego dla dowolnego wektora falowego) lub częściową foniczną przerwą wzbronioną (przerwa istnieje dla określonego zakresu spektralnego dla określonych wektorów falowych) może pracować jako filtr lub zwierciadło dla zakresu promieniowania określonego rodzajem, położeniem i szerokością przerwy.

2. DWUSZKLANE STRUKTURY Z PRZERWĄ FOTONICZNĄ

Dwuwymiarowe kryształy foniczne wykonuje się w postaci niezbyt rozległych cienkich warstw tworzonych metodami litograficznymi i w formie różnorodnych światłowodów fonicznych. Uzyskiwane poprzeczne rozmiary są przyczyną ograniczeń w ich stosowaniu. Korzystając ze zmodyfikowanej metody mozaikowej z zastosowaniem pary kompatybilnych szkieł opracowano sposób zwiększania powierzchni tworzonej struktury periodycznej. Dzięki temu powstała koncepcja dwuszklanego materiału mikrostrukturalnego (Rys. 3), któremu proponuje się nadanie nazwy szkła fonicznego (*Photonic Glass*), z uwagi na to, iż można poddawać go obróbce szlifiersko-polerskiej jak jednorodne szkło przy jednoczesnym zachowaniu cech kryształu fonicznego wzdłuż jego osi symetrii.



Rys. 3. Periodyczna struktura dwuszkłana jako analogia struktury powietrzno-szklanej włókna PCF (na zdjęciu po prawej światłowod foniczny wykonany przez US Naval Research Laboratory z zaznaczonymi obszarami szklanymi i powietrznymi).

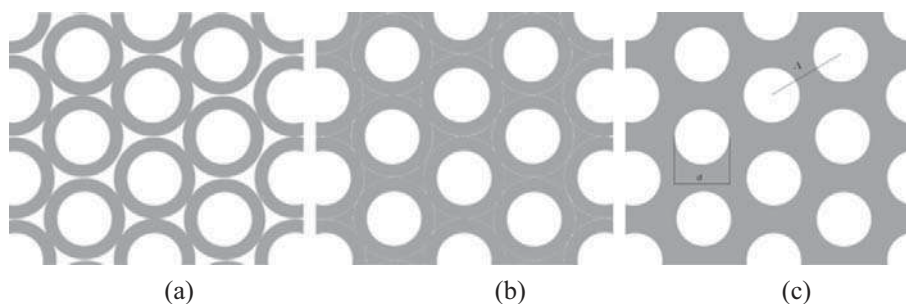
Fig. 3. Two-glass periodic structure - analogy of air-glass PCF; (on right was presented the micrographs of a photonic crystal fiber produced at US Naval Research Laboratory).

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można spodziewać się, że ten nowy materiał optyczny będzie posiadał własności m.in. takie jak przerwa wzbroniona oraz szczególne własności dyspersyjne w obszarach widma zbliżonych do przerwy wzbronionej pozwalające na uzyskanie efektu superpryzmatu [12-15]. Dzięki swym własnościom będzie można stosować go jako wysoce selektywne filtry optyczne oraz elementy multiplekserów dla zmiennej długości fali.

3. METODY OTRZYMYWANIA STRUKTUR DWUSZKLANYCH

Aby wykonać strukturę dwuszkłąną należy sporządzić makrostrukturalną preformę o proporcjach pozwalających uzyskać docelowe parametry mikrostruktury fotonicznej, tj. stałą sieci Λ określającą odległość między elementami sieci, średnicę elementu sieci d oraz rodzaj symetrii m [6-7, 11, 16-20]. Tworząc odpowiednią konfigurację można uzyskiwać określone własności propagacyjne takie jak: ograniczenie tłumienności, modowość, strukturę pasmową, dyspersję, dwójłomność itp. Projektowanie własności optycznych odbywa się na drodze modelowania numerycznego [21-23]. Wynikiem modelowania jest uzyskanie diagramów fotonicznej struktury pasmowej oraz ewentualnie obraz propagowanych modów. Obliczenia pozwalają ustalić, dla jakich parametrów geometrycznych struktury, przy określonej przenikalności elektrycznej ($\epsilon_r = n^2$) elementu sieci i matrycy, możliwe jest uzyskanie poszukiwanych własności optycznych.

Stosowana technologia umożliwia otrzymywanie szeregu struktur złożonych z kilku materiałów, w tym dwuszkłąnych i szklano metalowych [8, 10, 16-20, 24]. Polega ona na wytworzeniu odpowiednich półfabrykatów szklanych i układaniu

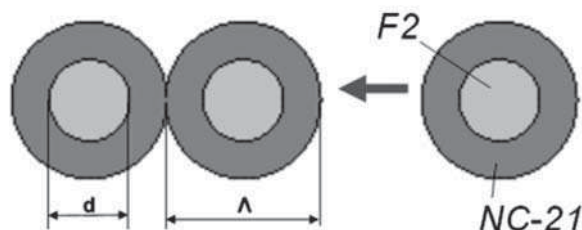


Rys. 4. Schemat przebiegu procesu wytwarzania struktury dwuszkłanej: (a) preforma zbudowana z dwuszkłanych prętów ułożonych w strukturę sześciokątną, (b) tworzenie się struktury pośredniej w czasie wstępnego przetwarzania, (c) ostateczna struktura fotoniczna o określonym liniowym współczynniku wypełnienia d/Λ i symetrii $m = 3$.

Fig. 4. Stages of photonic crystal structures fabrication: (a) several glass rods in hexagonal structure create macroscopic preform, (b) intermediate structure after first process, (c) final photonic structure with symmetry $m = 3$, and defined fill factor.

ich w mozaikę, którą następnie przeciąga się przez piec urządzenia zwanego wieżą. Sposób układania i przetwarzania takiej mozaiki przedstawiono na Rys. 4.

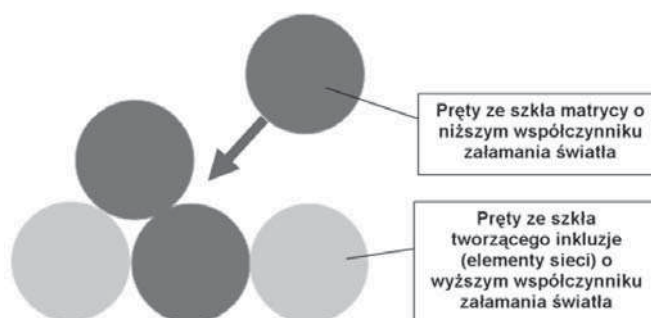
Dobierając proporcje między rdzeniem a płaszczem pojedynczych prętów można uzyskiwać żądane parametry struktury (Rys. 5).



Rys. 5. Zasada doboru proporcji pręta: wielkość d odpowiada średnicy inkluzji, wielkość Λ – wielkości stałej sieci.

Fig. 5. Size d answers diameter of inclusions, and size Λ equals pitch of lattice.

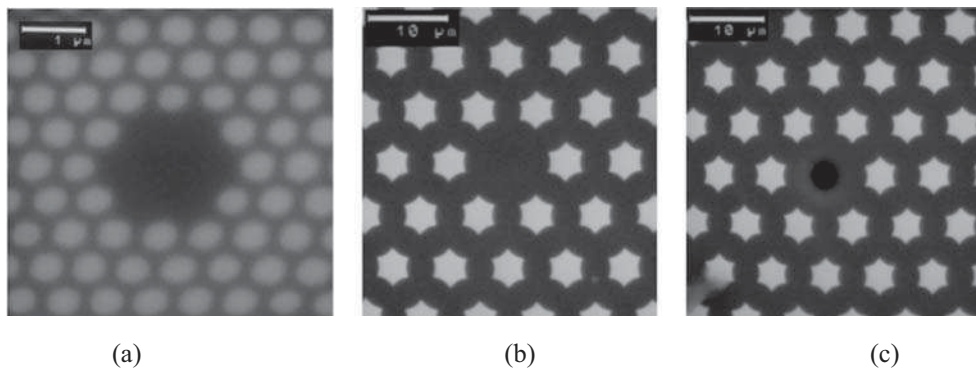
Zmiana grubości warstwy szkła zewnętrznego np. NC-21 wpływa na współczynnik wypełnienia d/Λ preformy, z której jest wykonywana struktura. Dzięki temu możliwe jest płynne manipulowanie parametrami geometrycznymi. Dodatkowo można stosować metodę polegającą na naprzemiennym układaniu dwóch (lub więcej) rodzajów szklanych prętów. Stała sieci Λ zależy w tym przypadku od średnicy prętów ze szkła wybranego na matrycę struktury (Rys. 6).



Rys. 6. Układanie struktury metodą naprzemienną.

Fig. 6. Idea of mosaic method – preparing structure by stacking glass rods.

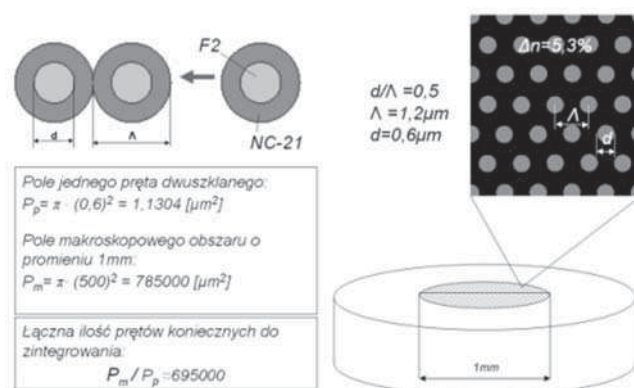
Do tak wykonywanych preform można także wprowadzać kapilary, które po procesie przetwórczym utworzą mikrootwory. Na Rys. 7 przedstawiono trzy przykładowe struktury włókien PCF wykonane w Pracowni Szkieł ITME dwoma omówionymi powyżej sposobami, o matrycy ze szkła NC-21 i elementach sieci ze szkła F2.



Rys. 7. Periodyczne struktury dwuszkłane uzyskanych w ITME włókien PCF-PBG: (a) struktura uzyskana metodą układania pręcików dwuszkłanych; (b) struktura uzyskana metodą układania naprzemiennego dwóch rodzajów pręcików szklanych; (c) struktura powstała z preformy wykonanej z pręcików ułożonych naprzemiennie, z kapilarą w części centralnej [17-20].

Fig. 7. Three examples of all-solid PCF structures: (a) photonic band gap fiber made by arranging of two-glass rods; (b) another structure made by arranging two types of rods; (c) photonic band gap fiber with a solid cladding and hollow core made by arranging two types of rods and microcapillary in central region [17-20].

Przeciętnie średnice implementowanych w światłowodach struktur periodycznych wahają się między kilkunastoma a kilkudziesięcioma mikrometrami. W ramach prac zdecydowano się wykonać strukturę o średnicy $\sim 1000 \mu\text{m}$. Uzyskanie kryształu fotonicznego o powierzchni bliskiej 1 mm^2 wymaga integracji $\sim 7 \cdot 10^5$ elementów dwuszkłanych tworzących inkluzje (Rys. 8), co zasadniczo komplikuje przedstawione powyżej koncepcje.



Rys. 8. Oszacowanie ilości niezbędnych do integracji prętów dwuszkłanych dla struktury F2/NC-21 o określonych parametrach $d = 0,6 \mu\text{m}$ i $d/\Lambda = 0,5$.

Fig. 8. Number of rods indispensable to creation of F2/NC-21 structure with parameters: $d = 0,6 \mu\text{m}$ and $d/\Lambda = 0,5$.

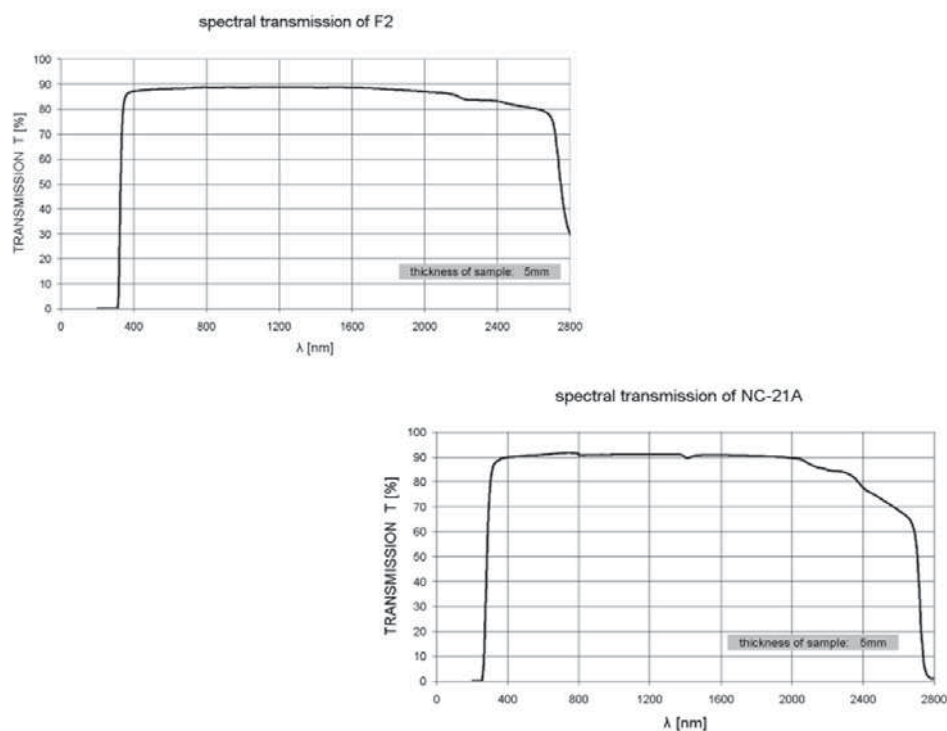
4. STOSOWANE SZKŁA

Istotną przeszkodą w swobodnym kształtowaniu Δn jest dobór kompatybilnej pary szkła optycznych. Ograniczenie wynika z konieczności ich wzajemnego dobrania lepkościowego i temperaturowego. Pokazane na Rys. 7 struktury PCF wykonano ze szkła ołowiowego F2 ($n_D = 1,619$) wytwarzanego przez firmy Schott i Corning oraz boro-krzemianowego szkła topionego w Pracowni Szkła ITME o symbolu NC-21 ($n_D = 1,533$). Transmisję spektralną szkła dla próbek o grubości 5 mm zaprezentowano na Rys. 9; skład tlenkowy dla tej pary przedstawiono w Tab. 1.

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

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

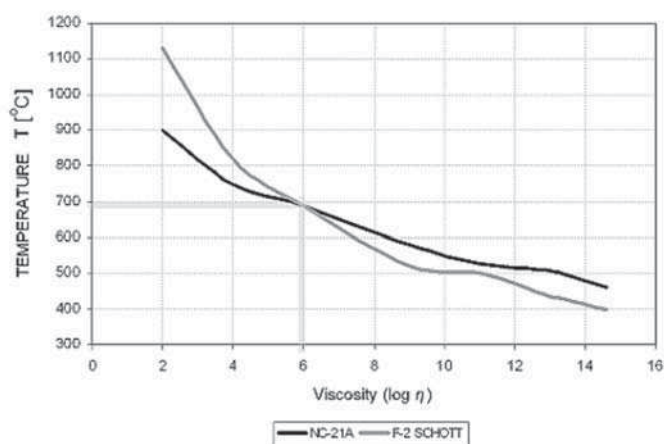
Symbol szkła	Skład tlenkowy [% _{mas.}]							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	PbO	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	As ₂ O ₃
F2	45,7	-	-	45,5	-	3,5	5,0	0,8
NC-21	55,0	1,0	26,0	-	3,0	9,5	5,5	0,8



Rys. 9. Widma transmitancji dla szkła F2 i NC-21

Fig. 9. Transmittance spectra for F2 and NC-21 glasses.

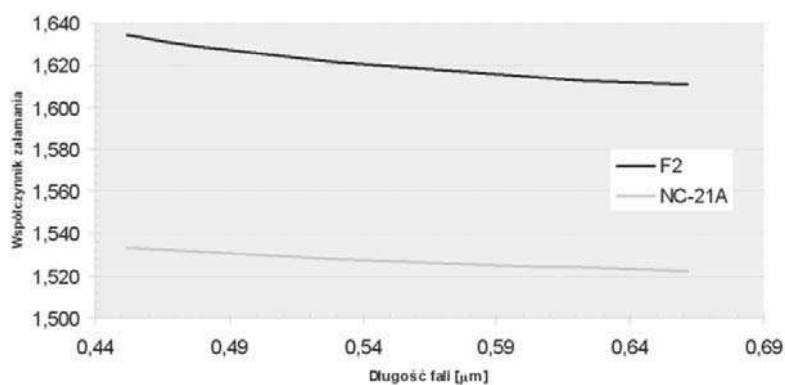
Zaletą tej pary jest dobre dopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej ($F2 - \alpha_{20-300} = 94 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; $NC-21 - \alpha_{20-300} = 82 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), co gwarantuje wytrzymałość mechaniczną struktury. Szkła można wspólnie przetwarzać w temperaturze 700°C (Rys. 10). Jednakże szkła te różnią się między sobą o 70°C temperaturami tworzenia się półkuli w mikroskopie grzewczym Leitz'a. Ze względu na ilość niezbędnych procesów przetwórczych dla struktur o dużych powierzchniach i o elementach nie większych niż $1 \mu\text{m}$ pojawiają się deformacje (zmiana kształtu elementów sieci, zmiana wielkości λ) oraz dyfuzja na granicy matryca i element płaszcz (Rys. 7a).



Rys. 10. Zależność lepkości szkieł F2 i NC-21 od temperatury procesu.

Fig. 10. Viscosity change for F2 and NC-21 glasses in function of process temperature.

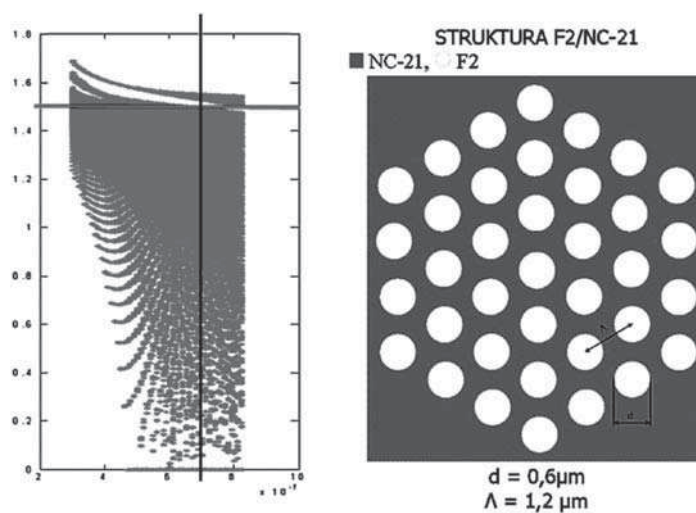
Para wymienionych szkieł posiada stosunkowo dużą różnicę wartości współczynnika załamania światła w zakresie światła widzialnego (Rys. 11).



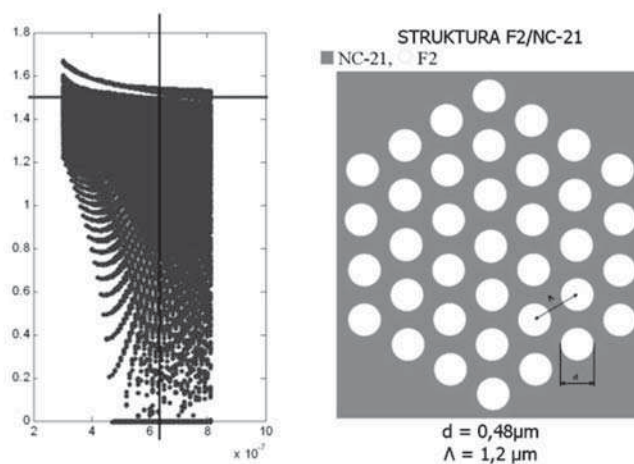
Rys. 11. Zależność współczynnika załamania światła n od długości światła λ dla szkieł F2 i NC-21

Fig. 11. Refractive index of F2 and NC-21A in function of λ .

Odpowiedni kontrast Δn między szklami jest niezbędny do uzyskania dyfrakcji braggowskiej przy rozsądnych pod względem technologicznym wartościach d/Λ . Dla zaprezentowanej pary szkieł wyliczono istnienie przerwy fotonicznej metodą baz biortonormalnych (BBM). Poniżej przedstawiono diagramy stanów fotonicznych dla $d/\Lambda = 0,5$ i $0,4$ (Rys. 12-13).



Rys. 12. Pasma wzbronione dla struktury F2/NC-21 o $d/\Lambda = 0,5$.
Fig. 12. Photonic bandgap diagram for two-glass structure with $d/\Lambda = 0,5$.



Rys. 13. Pasma wzbronione dla struktury F2/NC-21 o $d/\Lambda = 0,4$.
Fig. 13. Photonic bandgap diagram for two-glass structure with $d/\Lambda = 0,4$.

Jak widać z diagramów, dla struktur o $\Delta n = 0,086$ wykonanych ze szkła NC-21 – stanowiącego matrycę i F2 stanowiącego elementy sieci, dla wymienionych liniowych współczynników wypełnienia obserwowana jest przerwa fotoniczna. Istnieje ona dla światła o długości powyżej 700nm dla struktury o liniowym współczynniku wypełnienia $d/\Lambda = 0,5$ ($d = 600$ nm) i od ~ 630 nm dla $d/\Lambda = 0,4$ ($d = 480$ nm) – pozioma czerwona linia określa linię $n_D = 1,533$ odpowiadającą współczynnikowi załamania światła matrycy.

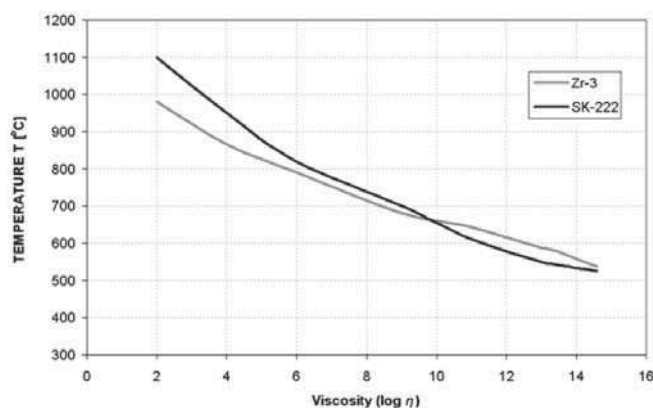
Do prac wytypowano również parę szkieł topionych w ITME o symbolach: Zr-3 i SK222 stosowaną głównie do wytwarzania obrazowodów prętowych i światłowodowych aplikatorów stomatologicznych. Są to szkła o własnościach zaprezentowanych w Tab. 2. Posiadają one większy kontrast współczynnika załamania światła niż poprzednia para ($\Delta n = 0,089$). Wspólne przetwarzanie ze względów lepkościowych jest możliwe od temperatury $\sim 660^\circ\text{C}$ (Rys. 14). Szkła te nie nadają się do wytwarzania długich światłowodów, gdyż w odróżnieniu od poprzedniej pary posiadają znacznie gorsze własności transmisyjne. Dla objętościowych kryształów fotonicznych nie jest to krytyczne ze względu na nieznaczne planowane długości (np. 10 mm).

Tabela 2. Podstawowe własności szkieł Zr-3 i SK222.

Table 2. The data from refractometer, dilatometer and Leitz's microscope for Zr-3. and SK222.

WŁASNOŚCI	SZKŁO	
	Zr-3/XV	SK222
Współczynnik załamania światła n_D	1.609	1.520
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej α dla zakresu :		
20÷300°C [10^{-7}K^{-1}]	89.7	84.0
20÷450°C [10^{-7}K^{-1}]	94.5	89.0
Temperatura transformacji T_g [°C]	581	542
Dylatometryczna temperatura mięknięcia DTM [°C]	644	610
Temperatury charakterystyczne w mikroskopie grzewczym Leitz'a. Temperatura [°C] :		
- zaoblenia się próbki	680	700
- przybrania kształtu kuli	790	820
- przybrania kształtu półkuli	865	950

Objętościowy rozległy dwuwymiarowy kryształ fotoniczny



Rys. 14. Zależność lepkości szkieł F2 i NC-21 od temperatury procesu.

Fig. 14. Viscosity change for F2 and NC-21 glasses in function of process temperature.

Biorąc pod uwagę wady pierwszej i drugiej pary wymienionych szkieł, jako trzecią alternatywną wytypowano parę F2 i K-209. Szkło K-209 wymagało modyfikacji pozwalających na wspólne przetwarzanie z F2. Właściwości szkła K-209 (po modyfikacji) w porównaniu z F2 zaprezentowano w Tab. 3.

Tabela 3. Podstawowe własności szkieł K-209 i F2.

Tabela 3. Basic properties of matched glasses: K-209 and F2.

Własności	Szkło	
	K-209/V	F2
Współczynnik załamania światła n_D	1.508	1.619
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej α dla zakresu :		
20÷300°C [$10^{-7}K^{-1}$]	90.0	94.0
20÷450°C [$10^{-7}K^{-1}$]	93.3	-
Temperatura transformacji T_g [°C]	482	430
Dylatometryczna temperatura mięknięcia DTM [°C]	530	500
Temperatury charakterystyczne w mikroskopie grzewczym Leitz'a. Temperatura [°C] :		
- zaoblenia się próbki	585	520
- przybrania kształtu kuli	690	690
- przybrania kształtu półkuli	770	820

I. Kujawa, A. Filipowski, D. Pysz, ...

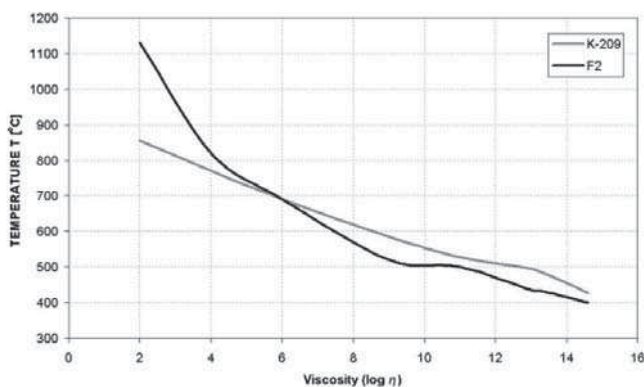
Skład tlenkowy obu szkieł zaprezentowano w Tab. 4.

Tabela 4. Skład tlenkowy szkieł F2 i K-209.

Table 4. Oxide composition of glasses F2 and K-209.

Symbol szkła	Skład tlenkowy [% _{mas.}]						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	PbO	Na ₂ O	K ₂ O	As ₂ O ₃
F2	45,7	–	–	45,5	3,5	5,0	0,8
K-209/V	45,0	3,0	33,0	–	9,0	10,0	–

Wspólne przetwarzanie tych szkieł ze względów lepkościowych jest możliwe między 720°C, a 680°C (Rys. 15).



Rys. 15. Zależność lepkości szkieł F2 i NC-21 od temperatury procesu.

Fig. 15. Viscosity change for F2 and NC-21 glasses in function of process temperature.

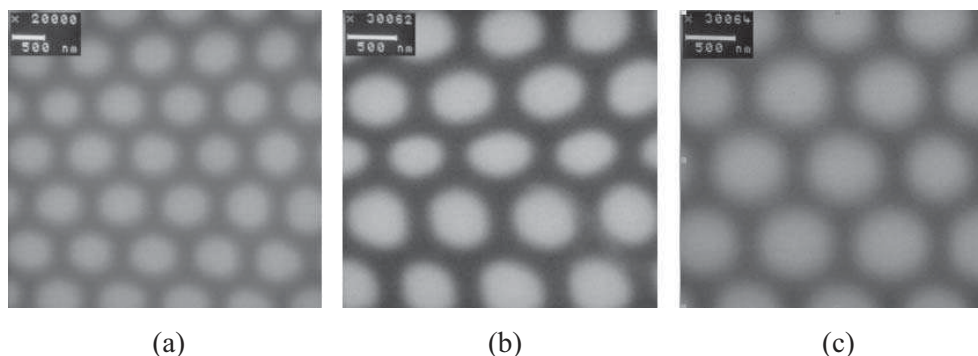
5. PRÓBY TECHNOLOGICZNE

W ramach prób technologicznych wytworzono struktury dwuszkłane ze szkieł wymienionych w poprzednim podrozdziale. Efekty przeprowadzonych prac zebrano w Tabeli 5.

Tabela 5. Wykonane dwuszklane periodyczne struktury.**Tab.5.** List of manufactured two-glass large area volume periodic structures.

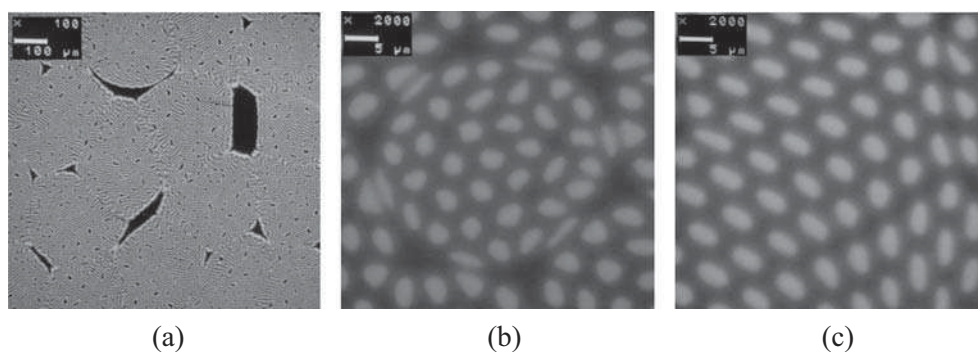
Symbol	Struktura				
	Przybliżona ilość inkluzji	Średnica obszaru struktury	Para szkieleł	Liczba etapów integracji	Uwagi
PG-0	$0,3 \cdot 10^3$	17,4 μm	F2 - inkluzje NC21 - matryca	3	Dyfuzja i deformacje inkluzji (spłaszczenie), brak poważnych deformacji. Uzyskane parametry sieci: $d \approx 0,6 \mu\text{m}$, $\Lambda \approx 0,9 \mu\text{m}$
PG-1	$0,5 \cdot 10^4$	2870 μm	F2 - inkluzje NC-21 - matryca	4	Awaria – struktura nieprzeskalowana z licznymi poważnymi deformacjami i otworami (nawet powyżej 400 μm średnicy). Uzyskane parametry sieci: $d \approx 5,3 \mu\text{m}$, $\Lambda \approx 8,0 \mu\text{m}$.
PG-2	$1,7 \cdot 10^5$	478 μm	Zr-3 - inkluzje SK222 - matryca	4	Ograniczona dyfuzja, okrągłe inkluzje, nieliczne poważne deformacje (~15% powierzchni całkowitej), kilka mikrootworków o średnicy $0,2 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Uzyskane parametry sieci: $d \approx 0,7 \mu\text{m}$, $\Lambda \approx 1,1 \mu\text{m}$.
PG-3A	$6,3 \cdot 10^5$	655 μm	F2 - inkluzje K-209 - matryca	4	Dyfuzja, spłaszczenie inkluzji, nie liczne poważne deformacje (~16% powierzchni całkowitej), kilka nanootworków. Uzyskane parametry sieci: $d \approx 0,4 \mu\text{m}$, $\Lambda \approx 0,8 \mu\text{m}$.
PG-3B	$6,3 \cdot 10^5$	2114 μm	F2 - inkluzje K-209 - matryca	4	Ograniczona dyfuzja, inkluzje sześciokątne lekko spłaszczone, nieliczne poważne deformacje (~16% powierzchni całkowitej), jeden duży otwór o średnicy $\sim 5 \mu\text{m}$ i kilka mniejszych. Uzyskane parametry sieci: $d \approx 1,8 \mu\text{m}$, $\Lambda \approx 2,7 \mu\text{m}$

Widok uzyskanych struktur zaprezentowano na Rys.16–20.



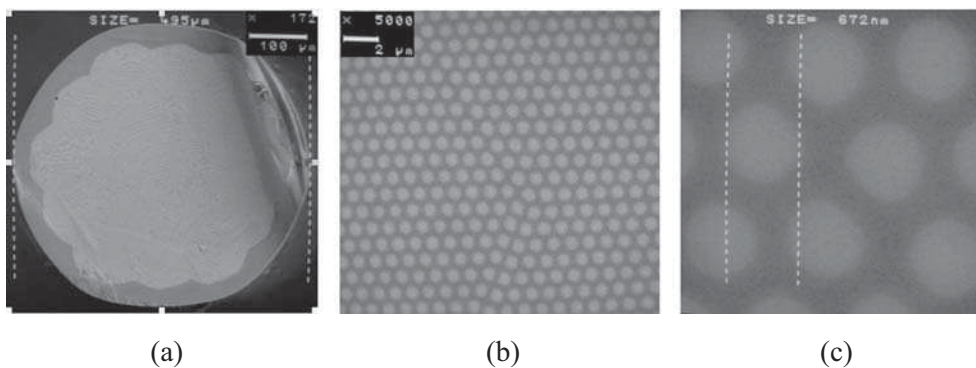
Rys. 16. Zdjęcia SEM struktury PG-0 ($D \approx 17,4 \mu\text{m}$, $P_{\text{calc}} \approx 2,3 \cdot 10^{-4} \text{mm}^2$): (a) powiększenie 20000x, (b) powiększenie ponad 30000x – widoczne spłaszczenie inkluzji, (c) powiększenie ponad 30000x – obszar niezdefektowany z widoczną dyfuzją (nieostre granice między inkluzjami a matrycą).

Fig. 16. SEM micrographs of PG-0 (basic parameters: $D \approx 17,4 \mu\text{m}$, $P_{\text{total}} \approx 2,3 \cdot 10^{-4} \text{mm}^2$): (a) magnification 20000x, (b) magnification over 30000x – visible deformation of inclusions, (c) magnification over 30000x – non-deformed area, visible diffusion between inclusions glass and matrix glass ions.



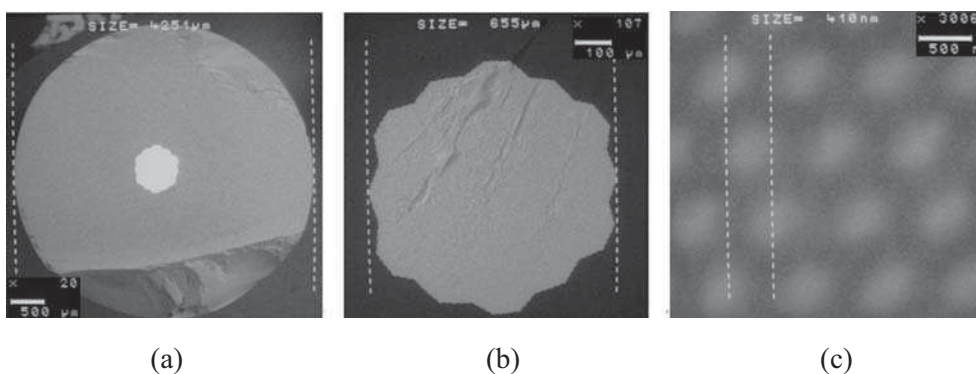
Rys. 17. Zdjęcia SEM struktury PG-1 (struktura nieudana): (a) powiększenie 100x – widoczne liczne wady i otwory o średnicach nawet powyżej 400 μm, (b) powiększenie 2000x – widoczne niedopasowanie elementów pośrednich – błąd integracji, (c) powiększenie 2000x – obszar, gdzie inkluzje uległy spłaszczeniu.

Fig. 17. SEM micrographs of failed structure PG-1: (a) magnification 100x - large number of deformation and holes is observed, (b) magnification 2000x - ions diffusion between inclusions glass and matrix glass, and incorrect fitting between elements, (c) magnification 2000x - area where inclusions of structure was flattened.



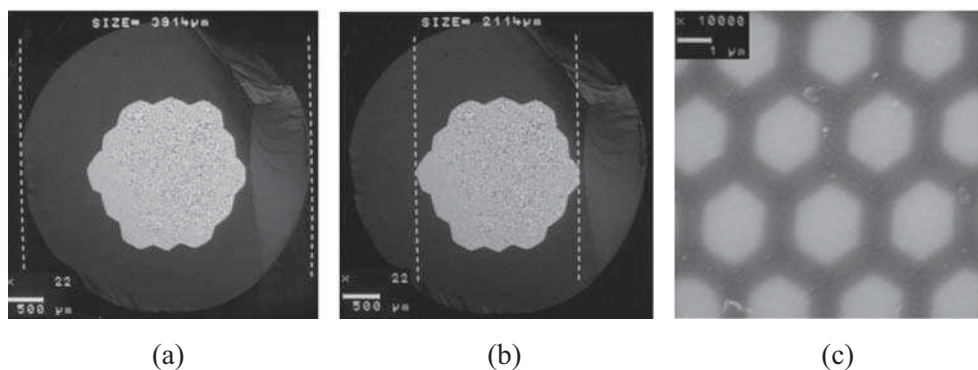
Rys. 18. Zdjęcia SEM struktury PG-2 ($D \approx 478 \mu\text{m}$, $P_{\text{calc.}} \approx 0,178 \text{ mm}^2$): (a) powiększenie 172x – widok na strukturę, (b) powiększenie 5000x, (c) powiększenie ponad 30000x.

Fig. 18. SEM micrographs of PG-2 (basic parameters: $D \approx 478 \mu\text{m}$, $P_{\text{total}} \approx 0,178 \text{ mm}^2$): (a) magnification 172x - general view, (b) magnification 5000x, (c) magnification over 30000x - diffusion is absent.



Rys. 19. Zdjęcia SEM struktury PG-3A ($D \approx 655 \mu\text{m}$, $P_{\text{calc.}} \approx 0,338 \text{ mm}^2$) umieszczonej w matrycy szklanej o średnicy 4,25 mm: (a) powiększenie 20x – widok na strukturę, (b) powiększenie 107x, (c) powiększenie ponad 30000x – rozmycie inkluzji świadczy o dyfuzji

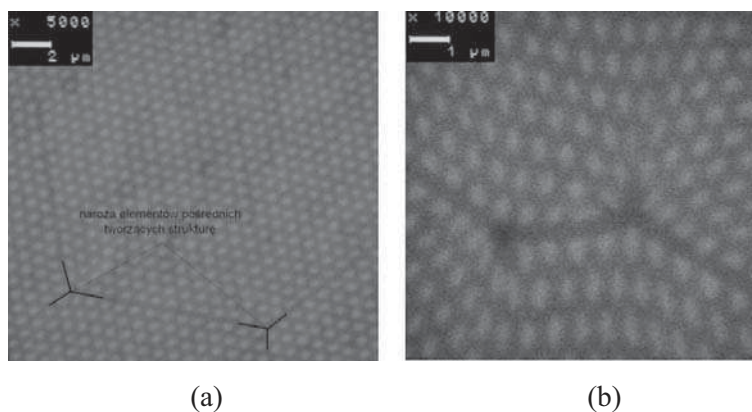
Fig. 19. SEM micrographs of PG-3A (basic parameters: $D \approx 655 \mu\text{m}$, $P_{\text{total}} \approx 0,338 \text{ mm}^2$): (a) magnification 20x - general view, (b) magnification 107x, (c) magnification over 30000x - diffusion



Rys. 20. Zdjęcia SEM struktury PG-3B ($D \approx 2114 \mu\text{m}$, $P_{\text{calc.}} \approx 3,5 \text{ mm}^2$) umieszczonej w matrycy szklanej o średnicy $\sim 4,0 \text{ mm}$: (a) powiększenie 22x – widok na strukturę, (b) średnica zaimplementowanej rozległej struktury periodycznej, (c) powiększenie 10000x – inkluzje przyjęły kształt rozciągniętych sześciokątów.

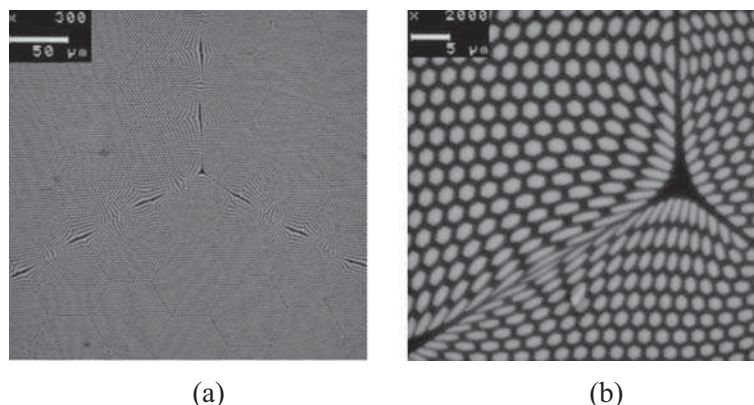
Fig. 20. SEM micrographs of PG-3B (basic parameters: $D \approx 2114 \mu\text{m}$, $P_{\text{total}} \approx 3,5 \text{ mm}^2$): (a) magnification 22x - general view, (b) diameter of large area photonic crystal structure, (c) magnification 10000x.

Typowe jest pojawianie się trzech typów zaburzeń strukturalnych, tj. pochodzących z pierwszego etapu integracji (mało istotne) – zwykle dotyczą niejednorodnego kształtu inkluzji np. Rys. 18c, z drugiego etapu (zauważalne) – Rys. 21a oraz z trzeciego etapu integracji (poważne) – Rys. 21b i 22.



Rys. 21. Deformacje struktury PG-3A o $P_{\text{calc.}} \approx 0,338 \text{ mm}^2$: (a) widoczne łączenia na elementach pośrednich; (b) poważne defekty powstałe w ostatnim procesie integracji.

Rys. 21. Deformation of photonic glass structure PG-3A: (a) defects on the borders between intermediate multirods elements; (b) significant final process deformations.



Rys. 22. Deformacje struktury PG-3B o $P_{\text{całk.}} \approx 3,5 \text{ mm}^2$: (a) poważne defekty powstałe w ostatnim procesie integracji oraz granice elementów pośrednich; (b) zbliżenie 2000x poważnego defektu zaprezentowanego na zdjęciu obok.

Rys. 22. Deformation of photonic glass structure PG-3B: (a) defected structure – view on the board of significant final process deformations; (b) significant final process deformations - magnification 2000x.

Wyniki prac wskazują, że przedstawiona technologia po jej dalszej optymalizacji, pozwoli na wytworzenie rozległych struktur dwuszlanych o zminimalizowanej ilości przypadkowych zaburzeń geometrycznych. Stworzono warunki do wykonania bardziej zaawansowanych struktur składających się z $\sim 7 \cdot 10^5$ i więcej pojedynczych elementów struktury o znacznych wysokościach przekraczających 10mm.

6. PODSUMOWANIE

Celem zaprezentowanej pracy było przetestowanie nowej, nie stosowanej dotąd nigdzie metody wytwarzania objętościowych (nieplanarnych) rozległych dwuwymiarowych kryształów fonicznych. Przy realizacji niniejszego materiału istnieje zagrożenie pojawiania się niebezpiecznych procesów dyfuzji jonów i krystalizacji szkła przy wielokrotnych procesach integracji i przeskalowań. Ilość i wielkość elementów sieci wpływa na liczbę koniecznych procesów przetwórczych. Parametry struktury d i d/λ również mogą ulegać poważnym przypadkowym zaburzeniom w trakcie tych procesów. Kolejne prace oraz zdobyte już doświadczenie ułatwią rozwijanie tej technologii, a w dalszej perspektywie wytworzenie nowego typu strukturalnego materiału optycznego, tzw. szkła fonicznego (*Photonic Glass*). Materiał ten, mimo posiadania przez niego wewnętrznej nanostruktury będzie można poddawać klasycznej obróbce szlifiersko-polerskiej jak jednorodne szkło. Pozwoli to na wykonywanie elementów optyki objętościowej z wbudowanym filtrem, odpornych na

I. Kujawa, A. Filipowski, D. Pysz, ...

wysokie temperatury i pozwalających na transfer wysokich energii. Dla niektórych przedziałów długości padającego światła materiał ten może odbijać światło o danej polaryzacji i kącie padania – ma to miejsce przy niepełnej przerwie wzbronionej. Pełną przerwę uzyskuje się przez takie dobranie parametrów struktury kryształu, aby częstotliwości wzbronione dla padającej fali były niezależne od kierunku wektora falowego (kąta padania). Na położenie przerwy fotonicznej mają wpływ nie tylko współczynniki załamania, ale również stosunek ilościowy materiałów, z których składa się kryształ oraz rodzaj symetrii sieci. Ścisłe wykonanie zaprojektowanej struktury wymaga pełnego zoptymalizowania procesu wytwórczego.

W ramach przeprowadzonych prac osiągnięto postęp w dziedzinie wytwarzania struktur dwuszlanych o określonych parametrach geometrycznych, a także opracowano koncepcję rozwoju podobnych materiałów stosowanych jako filtry i zwierciadła.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować zespołowi ZOI (UW), w osobach: dr. R. Buczyńskiego i dr. R. Kasztelanica za pomoc i owocną współpracę w zakresie modelowania numerycznego periodycznych struktur dwuszlanych.

Pracę wykonano w ramach realizacji tematu statutowego ITME (2007) we współpracy z Wydz. Fizyki (Zakład Optyki Informacyjnej) Uniwersytetu Warszawskiego. Wyniki symulacji uzyskano przy wykorzystaniu zasobów komputerowych Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego.

LITERATURA

- [1] Yablonovich E.: Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.*, 58, (1987), 2059-2062
- [2] Yablonovich E.: Photonic band structures, *J. Mod. Opt.*, 41, (1994), 171-404
- [3] L'opez C.: Three-dimensional photonic bandgap materials: semiconductors for light, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 8, (2006), R1–R14
- [4] Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russel P.S.: Photonic band gap guidance in optical fibers, *Science*, 282, (1998), 1476-1478
- [5] Knight J.C.: Photonic crystal fibres, *Nature*, 424, (2003), 847-851
- [6] Cryan C., Tatak K., Strack R.: Multi-component all glass photonic bandgap fiber, US Patent No. US 6598428B1 Jul. 29, (2003)
- [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] Pysz D., Stępień R., Jędrzejewski K., Kujawa I.: Włókna fotoniczne ze szkieł wieloskładnikowych, *Materiały Elektroniczne*, 30, 3, (2002), 39-50
- [9] Yi N., Lei Z., Shu J., Jiangde P.: Dispersion of square solid-core photonic bandgap fibers, *Opt. Express*, 12, 13, Jun. 28, (2004), 2825-2830
- [10] Buczyński R., Szarniak P., Pysz D., Kujawa I., Stępień R., Szoplik T.: Properties of a double-core photonic crystal fibre with a square lattice, *Proc. SPIE*, 5576, (2004), 85-91
- [11] Feng X., Monro T.M., Petropoulos P., Finazzi V., Hewak D.: Solid microstructured optical fiber, *Opt. Express*, 11, 18, 8, (2003), 2225-2230
- [12] Matsumoto T., Fujita S., Baba T.: Wavelength demultiplexer consisting of photonic crystal superprism and superlens, *Opt. Express*, 13, 26, 12, (2005), 10768-10776
- [13] Momeni B., Huang J., Soltani M., Askari M., Mohammadi S., Rakhshandehroo M., Adibi A.: Compact wavelength demultiplexing using focusing negative index photonic crystal superprisms, *Opt. Express*, 14, 6, 3, (2006), 2413-2422
- [14] Steel M. J., Zoli R., Grillet C., McPhedran R. C., de Sterke C. M., Norton A., Bassi P., Eggleton B. J.: Analytic properties of photonic crystal superprism parameters, *Phys. Rev. E* 71, (2005), 056608-1÷056608-9
- [15] Tandon S.N., Soljacic M., Petrich G. S., Joannopoulos J. D., Kołodziejcki L. A.: The superprism effect using large area 2D-periodic photonic crystal slabs, *Elsevier, Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 3, (2005), 10–18
- [16] 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), 5951-02
- [17] Kujawa I., Stępień R., Pysz D., Szarniak P., Haraśny K., Michalska I.: Technology of microstructural all-solid holey fibers, *Ceramic, Polish Ceramic Bulletin*, 912, (2005), 775-782
- [18] Kujawa I., Szarniak P., Buczyński R., Pysz D. & Stępień R.: Development of all-solid photonic crystal fibers, SPIE International Congress: Photonics Europe 2006, Strasbourg 2006, *Proc. SPIE* 6182, (2006), 61822Q
- [19] Kujawa I., Lusawa M., Pysz D., Buczyński R., Stępień 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
- [20] Buczyński R., Pysz D., Kujawa I., Fita P., Pawłowska M., Nowosielski J., Radzewicz C., Stępień R.: Silicate all-solid photonic crystal fibers with a glass high index contrast, SPIE International Conferences: Optics and Optoelectronics PRAGUE (2007), *Proc. SPIE* vol. 6588, 6588E,(inv. paper)
- [21] Azizur Rahman B. M. A., Saiful Kabir A. K. M., Rajarajan M., Kenneth Grattan T. V., Finite element modal solutions of planar photonic crystal fibers with rectangular air-holes, *Optical and Quantum Electronics*, 37, 1-3 , (2005), 171-183
- [22] 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

I. Kujawa, A. Filipowski, D. Pysz, ...

[23] Issa N., Poladian L., Vector wave expansion method for leaky modes of microstructured fibers, *J. Lightwave Technol.*, 21, (2003), 1005-1012

[24] Pysz D., Kujawa I., Stępień R., Dominiak R., Pniewski J., Szoplik T.: Dwuwymiarowy szklano-metalowy kryształ fotoniczny, Proc. of X Scientific Conf. Optical Fibers and Their Applications TAL, Krasnobród, Polska (2006), 208-215

SUMMARY

BULK, LARGE AREA, TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

Existence and size of photonic bandgap depends on the contrast of refractive indices of glasses used in manufacturing of the photonic crystal. For this structure contrast about 0.1 is possible to obtain. In such structures partial photonic bandgap exist, which means that photonic bandgap exists only for selected wave vectors. It can be used to shape and steer electromagnetic waves in function of wavelength change. Such commercial materials could *find applications as beam* splitters and couplers, wave filters, demultiplexers, low loss waveguides, and highly selective mirrors.

A possibility of fabrication double glass photonic crystals is determined by a choice of pair of glasses with similar viscosity, melting temperature, thermal coefficients, and small diffusion (close to zero). Moreover glass has to be dedicated to multiple thermo-mechanical process without crystallization effects. Only glass that fulfils conditions mentioned above can be considered for such fabrications using a mosaic drawing method.

In this article we described our works in manufacturing of large area (diameter in the order of 1mm) and large height photonic crystal structures – a novel material for optic applications.