Dwuszklane nanostruktury periodyczne z przerwą wzbronioną

IRENEUSZ KUJAWA, DARIUSZ PYSZ, RYSZARD STĘPIEŃ, ANDRZEJ LECHNA, JANUSZ DUSZKIEWICZ, IRENA MICHALSKA

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
itme@sp.itme.edu.pl

Wstęp

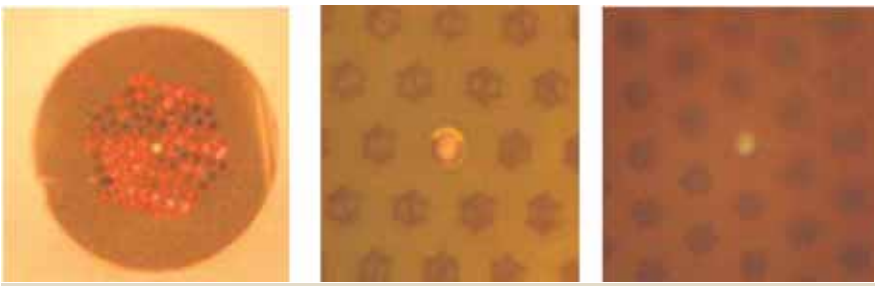
Przerwa fotoniczna PBG (*ang. Photonic Bandgap*) jest optycznym odpowiednikiem występujących w półprzewodnikach pasm wzbronionych[1÷3]. Pojawianie się pasm spowodowane jest występowaniem dyfrakcji Bragga na periodycznej strukturze dielektrycznej o stałej sieci zbliżonej do długości światła. Przerwa fotoniczna określa zakres długości fali, dla których światło nie może się rozchodzić – dla tego zakresu struktura jest idealnym zwierciadłem [1÷7]. Efekt ten wykorzystuje się w światłowodach fotonicznych poprzez wykonywanie struktur zarówno szklano-powietrznych jak i dwuszklanych z centrycznym obszarem zaburzającym periodyczność sieci. Zabieg ten prowadzi do lokalizacji światła odbitego od periodycznej struktury w defekcie – co pokazano na trzech przykładach struktur włókien PCF (*ang. Photonic Crystal Fibers*)[4,5] wykonanych w ITME (Rys. 1).

Rozchodzenie się światła w dielektrycznych strukturach periodycznych zależne jest od ich geometrii. Dzięki elastyczności w projektowaniu takiej struktury (różna średnica elementów sieci i rodzaj ich rozmieszczenia: 1D, 2D, 3D, wielkość współczynnika wypełnienia) można uzyskać kontrolę nad jej właściwościami transmisyjnymi [6÷11]. Otrzymujemy w ten sposób cały wachlarz potencjalnych możliwości projektowania i zastosowania kryształów fotonicznych. W związku z postępem technologicznym jaki się dokonał, podjęto próby wytworzenia rozległych struktur z przerwą fotoniczną z myślą o ich zastosowaniach jako filtry optyczne. Stosowane obecnie filtry interferencyjne (tj. odbiciowe) pracują w wąskich przedziałach długości fal, podczas gdy materiał zachowujący cechy kryształu fotonicznego z przerwą wzbronioną może teoretycznie pracować dla zdecydowanie szerszego zakresu promieniowania zależnie od szerokości przerwy fotonicznej. Dlatego też materiał o rozległej (tj. rzędu kilku mm^2) strukturze dwuszklanej o określonym kontraście współczynników załamania światła i o dobranej średnicy elementu sieci d i stałej sieci Λ może stanowić znakomity filtr odbiciowy w technikach laserowych i diagnostyce biomedycznej.

W artykule prezentujemy osiągnięty w ciągu ostatnich dwóch lat postęp w dziedzinie wytwarzania struktur dwuszklanych z przerwą wzbronioną, a także koncepcję rozwoju podobnych materiałów stosowanych jako filtry i zwierciadła.

Wytwarzanie struktur dwuszklanych

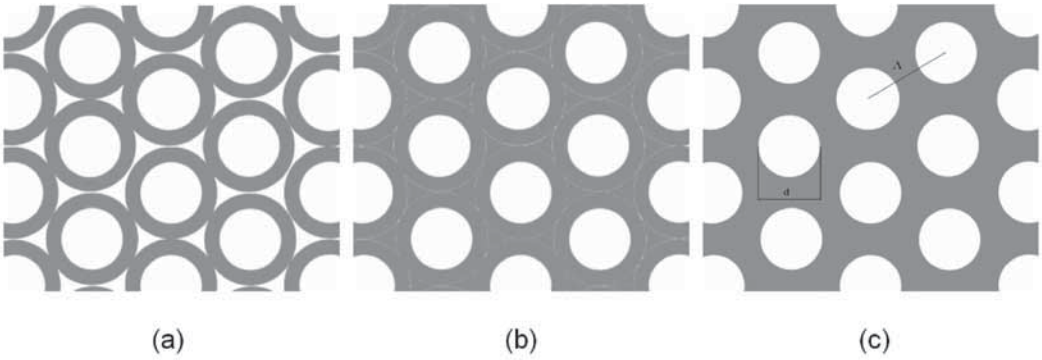
Aby wykonać strukturę dwuszklaną należy sporządzić preformę o makrostrukturze w proporcjach pozwalających uzyskać docelowe parametry mikrostruktury fotonicznej tj. stałą sieci Λ określającą odległość między elementami sieci, średnicę elementu sieci d oraz rodzaj symetrii kryształu m [6, 7, 11÷16]. Tworząc odpowiednią konfigurację uzyskuje się określone własności propagacyjne takie jak: ograniczenie tłumienności, modowość, strukturę pasmową, dyspersję i dwójłomność itp. Projektowanie własności optycznych odbywa się na drodze modelowania FDTD (*ang. Finite Difference Time Domain*) [17] i baz biortonormalnych BBM (*ang. Biortonormal Basis Method*) [18] oraz innych metod wektorowych [19]. Wynikiem modelowania jest uzyskanie diagramów fotonicznej struktury pasmowej oraz wygląd propagowanych modów. Obliczenia pozwalają ustalić, dla jakich parametrów geometrycznych struktury przy określonej przenikalności dielektrycznej elementu sieci i matrycy możliwe jest uzyskanie poszukiwanych własności optycznych. Z punktu widzenia technologii wytwarzania konieczne jest zatem kształtowanie liniowego współczynnika wypełnienia d/Λ w szerokim zakresie oraz możliwość



a) b) c)

Rys. 1. Uwięzienie odbitego światła w rdzeniu: a) w strukturze SOHO $d \approx 3{,}9$ μm, $\Lambda \approx 6{,}4$ μm – światło pomarańczowe; b) w strukturze ACSC, $d \approx 3{,}9$ μm, $\Lambda \approx 7{,}5$ μm, $D_R \approx 4{,}0$ μm – światło czerwone; c) w strukturze ACSC, $d \approx 4{,}1$ μm, $\Lambda \approx 8{,}0$ μm, $D_R \approx 2{,}0$ μm – światło zielone

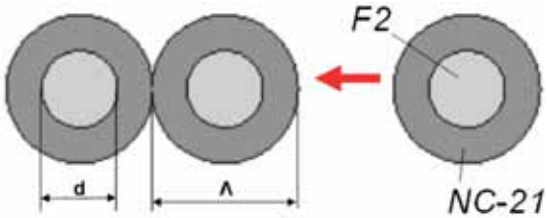
doboru szkieł zależnie od wymaganego kontrastu współczynnika załamania światła między elementem sieci a matrycą. Niekiedy we włóknie fotonicznym konieczne jest dodanie kolejnych warstw struktury periodycznej wokół rdzenia oraz dobór rozmiaru średnicy rdzenia D_R.



Rys. 2. Schemat procesu wytwarzania struktury dwuszklanej: (a) preforma zbudowana z dwuszklanych pręcików ułożonych w strukturę heksagonalną, (b) tworzenie się struktury pośredniej w czasie wstępnego przetwarzania, (c) ostateczna struktura fotoniczna o określonym liniowym współczynniku wypełnienia d/Λ i symetrii m = 3

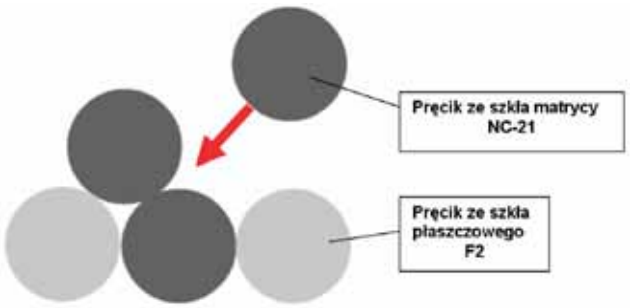
Technologia stosowana w naszej pracowni umożliwia wytwarzanie szeregu struktur, w tym dwuszklanych [8,10,12÷16]. Polega ona na wytworzeniu odpowiednich pręcików szklanych i układaniu ich w mozaikę, którą następnie przeciąga się przez piec wieży do wykonywania światłowodów i kompozytów szklanych. Sposób układania i przetwarzania takiej mozaiki przedstawiono na Rys. 2.

Dobierając proporcje między rdzeniem a płaszczem pojedynczych pręcików, można uzyskiwać żądane parametry struktury (Rys. 3).



Rys. 3. Zasada doboru proporcji pręcika

Zmiana grubości warstwy szkła zewnętrznego np. NC-21 wpływa na współczynnik wypełnienia d/Λ makrostruktury preformy, z której jest wykonywane włókno. Dzięki temu możliwe jest płynne manipulowanie parametrami geometrycznymi tworzonej struktury. Dodatkowo można stosować metodę polegającą na układaniu naprzemiennym dwóch (lub więcej) rodzajów szklanych pręcików. Stała sieci Λ zależy w tym

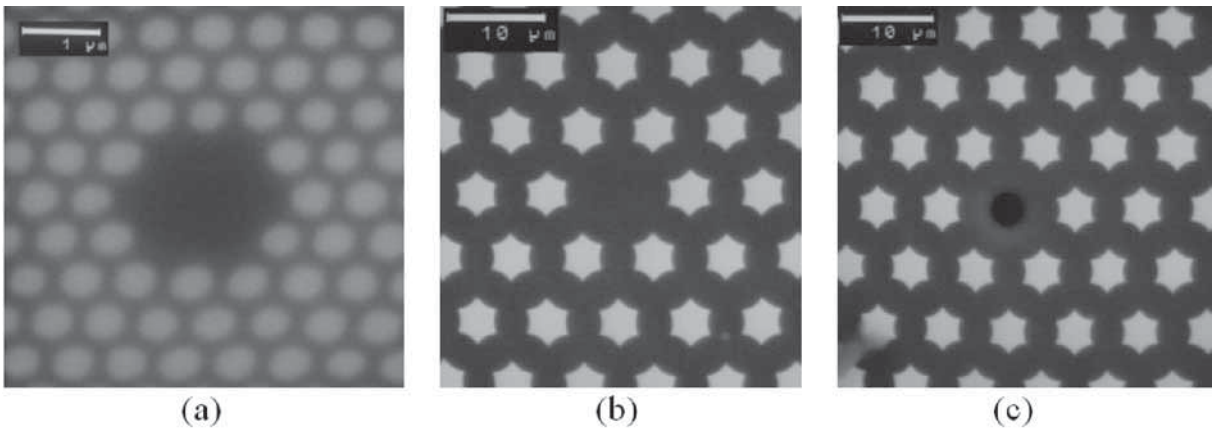


Rys. 4. Układanie struktury metodą naprzemienną

przypadku od średnicy pręcika ze szkła wybranego na matrycę włókna (Rys. 4).

Do tak wykonywanych preform można także wprowadzać kapilary, które po procesie przetwarzania utworzą powietrzne mikrokanaliki. Na Rys.5 przedstawiono trzy przykładowe struktury włókien PCF wykonane dwoma omówionymi powyżej sposobami o matrycy ze szkła NC-21 i elementach sieci ze szkła F2.

Na Rys. 5a widać nieznaczną deformację płaszcza fotonicznego oraz brak ostrych granic między ośrodkiem, z którego wykonano elementy sieci a matrycą (szkłem rdzeniowym). Zaszła tu dyfuzja. Pozostałe, około 3,8x większe od pierwszej struktury Rys. 5b i c mają elementy sieci zbliżone kształtem do gwiazdek. Jest to wynik oddziaływania twardszego w czasie przetwarzania szkła matrycy, ze szkłem



Rys. 5. Periodyczne struktury dwuszklane uzyskanych w ITME włókien PCF-PBG: (a) struktura uzyskana metodą zaprezentowaną na Rys.2 i 3; (b) struktura uzyskana metodą układania naprzemiennego dwóch rodzajów pręcików szklanych; (c) struktura powstała z preformy wykonanej z pręcików ułożonych naprzemiennie, z kapilarą w części centrycznej [13÷16]

elementów płaszcza fotonicznego. Nie jest tu widoczne rozmycie na granicy szkieł.

Szkło fotoniczne – nowy materiał o strukturze periodycznej

Jak dotąd kryształy fotoniczne dwuwymiarowe wykonuje się jedynie w postaci niezbyt rozległych cienkich warstw tworzonych metodami litograficznymi i w formie różnorodnych światłowodów fotonicznych wykonywanych metodami podobnymi do opisanych wcześniej. Wieloletnie doświadczenia w dziedzinie wytwarzania światłowodów konwencjonalnych oraz PCF i elementów optyki włóknistej spowodowały podjęcie przez nasz zespół prac nad wykonaniem nowego materiału objętościowego o strukturze periodycznej (Rys. 6). Metoda, jaką opracowano i postanowiono przetestować, została oceniona jako potencjalnie użyteczna do wytwarzania dwuwymiarowych objętościowych kryształów fotonicznych o rozmiarach poprzecznych rzędu 1x1 mm i długości powyżej 0,5 mm.

Według wiedzy autorów dotychczas nie wykonywano na świecie objętościowych kryształów fotonicznych o porównywalnych rozmiarach.

Spodziewamy się, że 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 [20÷23]. Dzięki tym własnościom materiał ten może znaleźć zastosowanie jako filtry optyczne oraz elementy multiplekserów dla zmiennej długości fali.

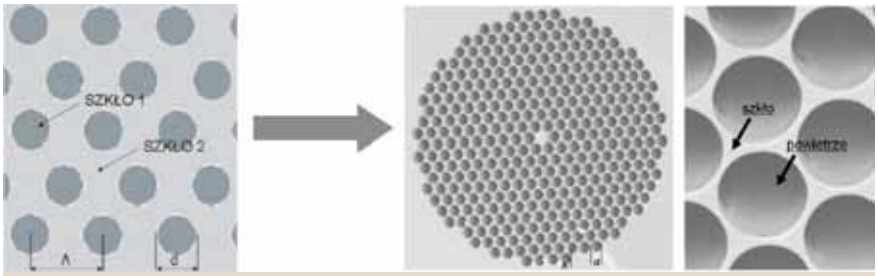
Symulacje

W celu analizy możliwych do otrzymania pasm wzbronionych w dwuszklanych strukturach o różnych parametrach materiałowych i geometrycznych, przeprowadzono modelowanie struktur ze szczególnym uwzględnieniem struktur o niewielkim w porównaniu do układu szkło-powietrze kontraście. W tym celu użyto własne programy oparte na następujących metodach obliczeniowych:

– oprogramowanie Zakładu Optyki Informacyjnej Wydziału Fizyki UW oparte na metodzie fal płaskich PWM (*ang. Plane Wave Expansion Method*)
– EMMOS oprogramowanie Zakładu Optyki Informacyjnej Wydziału Fizyki UW oparte na metodzie baz biortonormalnych (*ang. Biortonormal Basis Method*)
– EMFIDES oprogramowanie Optyki Informacyjnej Wydziału Fizyki UW oparte na metodzie przyrostów skończonych w dziedzinie czasu FDTD (*ang. Finite Difference Time Domain Method*)

Wyniki tych obliczeń zaprezentowano na Rys. 7 i 8.

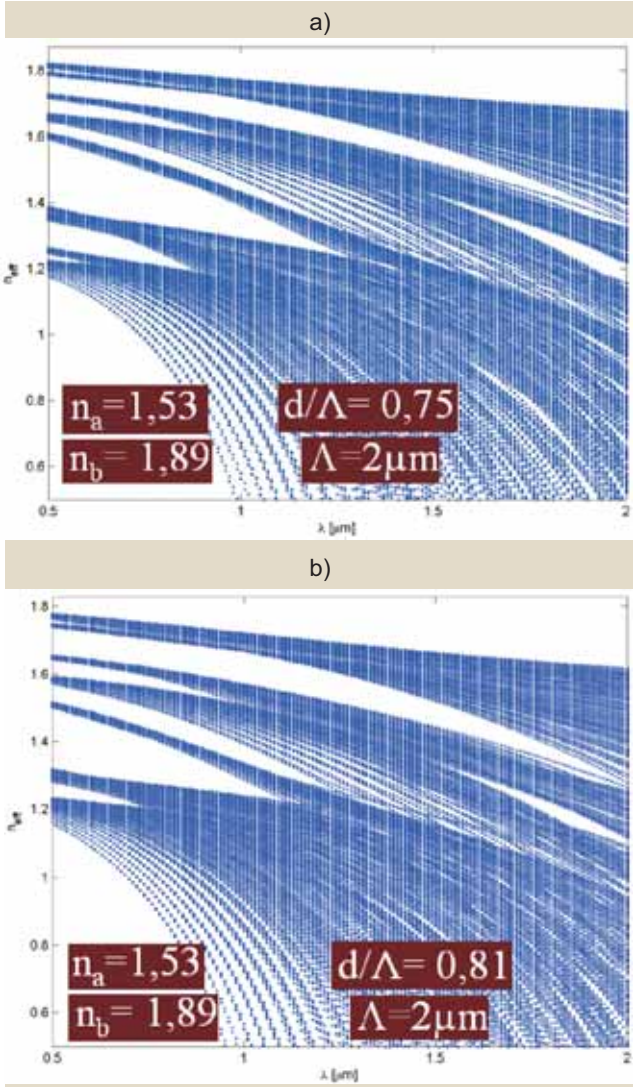
Obecnie, ze względów technologicznych możliwe jest uzyskanie znacznie niższych Δn. Przeprowadzone obliczenia wskazują jak bardzo cechy materiałowe i geometryczne wpływają na pojawianie się pasm wzbronionych.



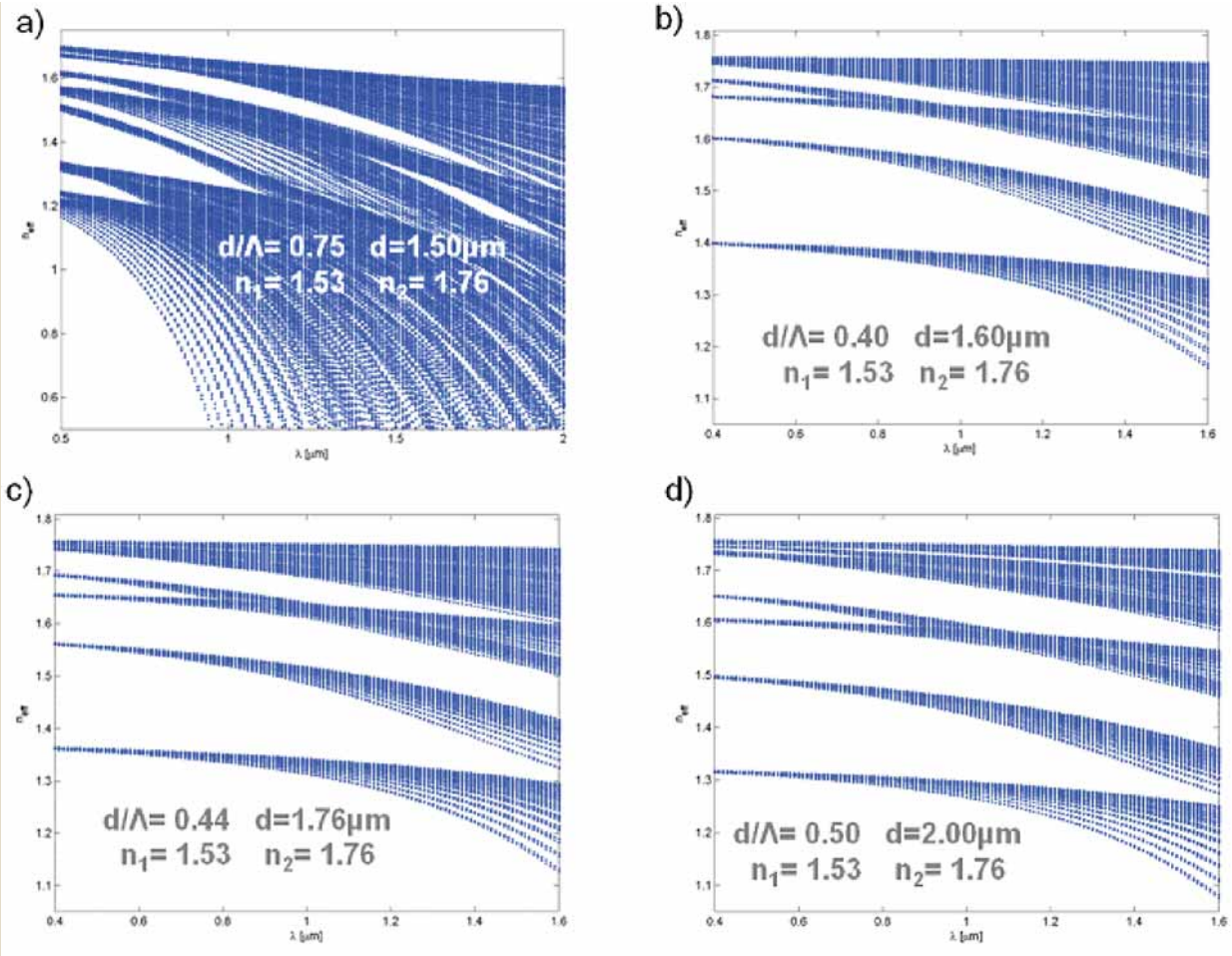
Rys. 6. Periodyczna struktura dwuszklana jako analogia struktury powietrzno-szklanej włókna PCF (na zdjęciu po prawej światłowód fotoniczny wykonany przez US Naval Research Laboratory z zaznaczonymi obszarami szklanymi i powietrznymi)

Stosowane szkła

Przeprowadzone symulacje wskazują na istotną rolę doboru właściwej pary szkieł optycznych przy tworzeniu tego typu struktur. Głównym ograniczeniem jest dobranie ze względu na własności lepkościowe i temperaturowe. Ukazane na Rys. 5 struktury PCF wykonano ze szkła ołowiowego F2 (n_D = 1,619) wytwarzanego przez firmy SCHOTT i CORNING oraz boro-krzemianowego szkła wytopionego



Rys. 7. Diagramy pasm fotonicznych dla struktur dwuszklanych o Δn = 0,36 o symetrii heksagonalnej (m = 3) o stałej sieci Λ = 2 μm i liniowych współczynnikach wypełnienia: a) d/Λ = 0,75, b) d/Λ = 0,81



Rys. 8. Diagramy pasm fotonicznych dla struktur dwuszklanych o Δn = 0,23, symetrii heksagonalnej (m = 3) i liniowych współczynnikach wypełnienia: a) d/Λ = 0,75, b) d/Λ = 0,40, c) d/Λ = 0,44 oraz d) d/Λ = 0,50

w pracowni szkieł ITME o symbolu NC-21 (n_D = 1,533). Transmisję spektralną szkieł zaprezentowano dla próbek o grubości 5 mm na Rys. 9; skład tlenkowy tych szkieł przedstawiono w Tabeli 1.

Symbol szkła	Skład tlenkowy [$\%_{mas.}$]							
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	PbO	Li_2O	Na_2O	K_2O	As_2O_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

Tabela 1. Skład tlenkowy szkieł na struktury fotoniczne

Zaletą tej pary szkieł jest dobre dopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej (F2 - $\alpha_{20\text{-}300} = 94\cdot10^{-7}$ K^{-1}; NC-21 - $\alpha_{20\text{-}300} = 82\cdot10^{-7}$ K^{-1}), co gwarantuje trwałość struktury w czasie. Szkła można wspólnie przetwarzać w temperaturze około 700°C ze względów lepkościowych (Rys. 10). Jednakże szkła te różnią się między sobą o 70°C temperaturami „zaoblenia i półkuli" oraz o 230°C temperaturą „rozpłynięcia". Dla struktur o elementach nie większych niż 1 μm zaczyna mieć to znaczenie. Pojawiają się deformacje (zmiana kształtu elementów sieci, zmiana wielkości Λ oraz dyfuzja na granicy matryca i element płaszcza (Rys. 5a).

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

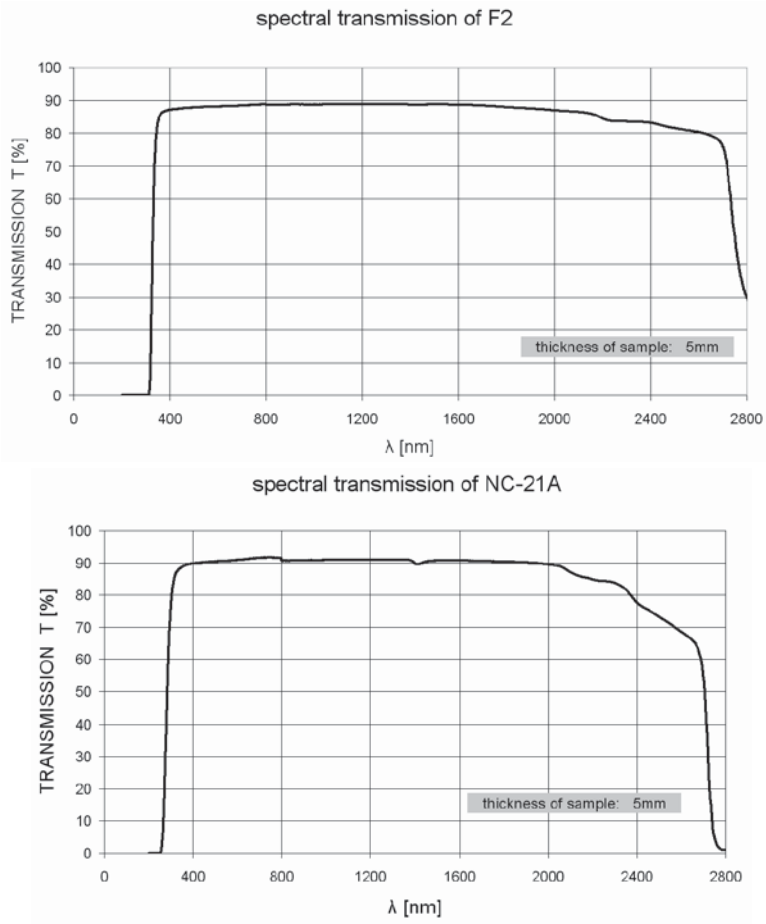
Odpowiedni kontrast między szkłami jest niezbędny do uzyskania dyfrakcji bragowskiej przy rozsądnych pod względem technologicznym wartościach d/Λ. W ramach prowadzonych prac przetestowano istnienie pasm wzbronionych dla wybranej pary szkieł. Na Rys.12 i 13 przedstawiono wyliczone metodą baz biortonormalnych diagramy stanów fotonicznych struktur dla dwóch różnych liniowych współczynników wypełnienia d/Λ: 0,5 i 0,4.

Jak widać dla struktur o Δn = 0,086 dla wymienionych liniowych współczynników wypełnienia częściowa przerwa fotoniczna istnieje.

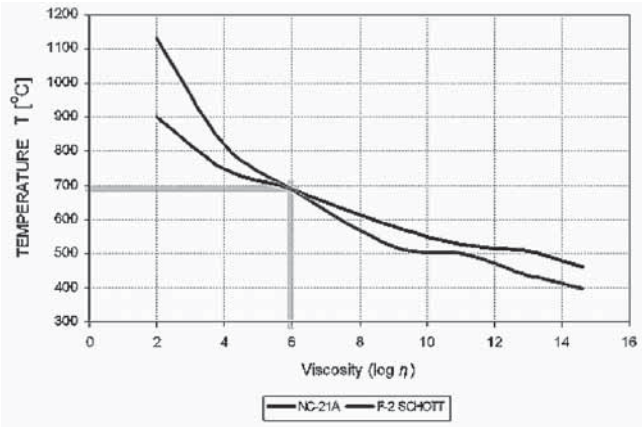
Do dalszych badań wytypowano również drugą parę szkieł wytopionych w ITME o symbolach: Zr-3 i SK222. Są to szkła o własnościach zaprezentowanych w Tabeli 2. Posiadają one większy kontrast współczynnika załamania światła niż poprzednia para szkieł (Δn = 0,089). Wspólne przetwarzanie ze względów lepkościowych jest możliwe od temperatury około 660°C (Rys. 14). Szkła te nie nadają się do wytwarzania światłowodów, gdyż posiadają znacznie gorsze własności transmisyjne niż poprzednia para. Dla objętościowych kryształów fotonicznych nie jest to krytyczne ze względu na ich Z-owe wymiary docelowe.

Próby technologiczne wykonania rozległych dwuszklanych struktur periodycznych

Przetestowane numerycznie struktury F2/NC-21 (Rys. 12 i 13) odbijają na poziomie szkła matrycy NC-21 (n_D = 1,533)



Rys. 9. Transmisja spektralna szkieł F2 i NC-21



Rys. 10. Krzywe lepkościowe szkieł F2 i NC-21

światło o długości powyżej 630 nm i mogą stanowić potencjalnie filtr odbiciowy od tej długości. Niestety, testy technologiczne pokazały, iż wykonanie rozległych struktury o zbliżonych parametrach geometrycznych ze szkieł F2 i NC-21 jest trudne ze względu na zachodzącą w trakcie procesów przetwórczych dyfuzję (Rys. 15). Jak widać na zdjęciu SEM elementy sieci uległy lekkiemu „spłaszczeniu".

W ramach badań podjęto też próby wytworzenia struktury dwuszklanej ze szkieł nieco lepiej dobranych pod względem dyfuzyjnym: Zr-3 i SK222. Stosując tę samą technologię wykonano z nich kryształ o 166421 elementach sieci o średnicy całkowitej 478 μm – co odpowiada powierzchni ~0,178 mm^2. Parametry uzyskanego kryształu Zr-3/SK222: stała sieci $\Lambda \approx 1110$ nm, $d \approx 749$ nm (Rys. 16).

Wykonana struktura posiadała deformacje, które stanowiły szacunkowo 20% powierzchni całkowitej. Głównie były to uskoki, zaburzenia stałej sieci Λ, nieliczne mikrootworki oraz spłaszczenia elementów sieci (Rys. 17). Poważne wady stanowiły 15% powierzchni całkowitej struktury na Rys. 18.

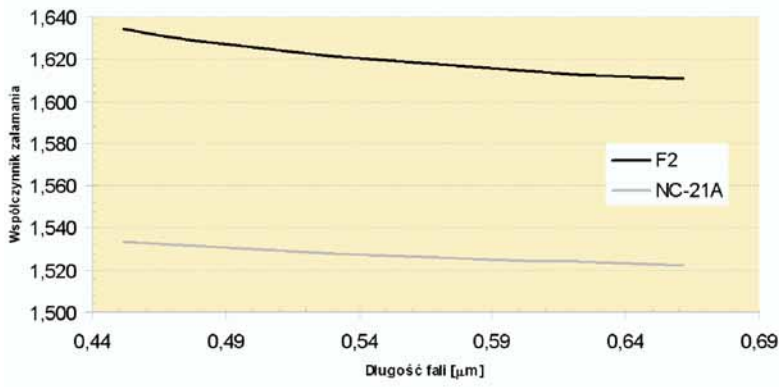
Opracowana technologia z dużym prawdopodobieństwem umożliwi po jej dalszym rozwinięciu wykonanie dwuszklanych rozległych struktur o ograniczonych przypadkowych zaburzeniach geometrycznych i stwarza szansę na tworzenie bardziej zaawansowanych struktur.

Podsumowanie

Rozwój technologii pozwala na wytwarzanie nowych materiałów o własnościach niespotykanych w przyrodzie lub naśladujących przyrodę. Poznanie zjawisk występujących w strukturach periodycznych przyczyniło się do wytworzenia kryształów fotonicznych o interesujących własnościach modyfikujących fale elektromagnetyczne i metamateriałów o ujemnym współczynniku załamania światła. Przetestowano nową metodę wytwarzania rozległych dwuwymiarowych kryształów fotoniczych, na które jest zapotrzebowanie[23]. Przy wytwarzaniu tych materiałów istnieje zagrożenie pojawiania się niebezpiecznych procesów dyfuzji jonów i krystalizacji szkła przy wielokrotnych procesach integracji i przeskalowywań. Ilość i wielkość elementów sieci wpływa na ilość koniecznych procesów przetwórczych. Parametry struktury d i d/Λ również mogą ulegać poważnym przypadkowym zaburzeniom w trakcie tych procesów. Dlatego w dalszej perspektywie przewidujemy doskonalenie tej metody.

Inne nie fotoniczne materiały o dużym stopniu integracji wykonane pokrewną metodą przedstawiono na Rys.19.

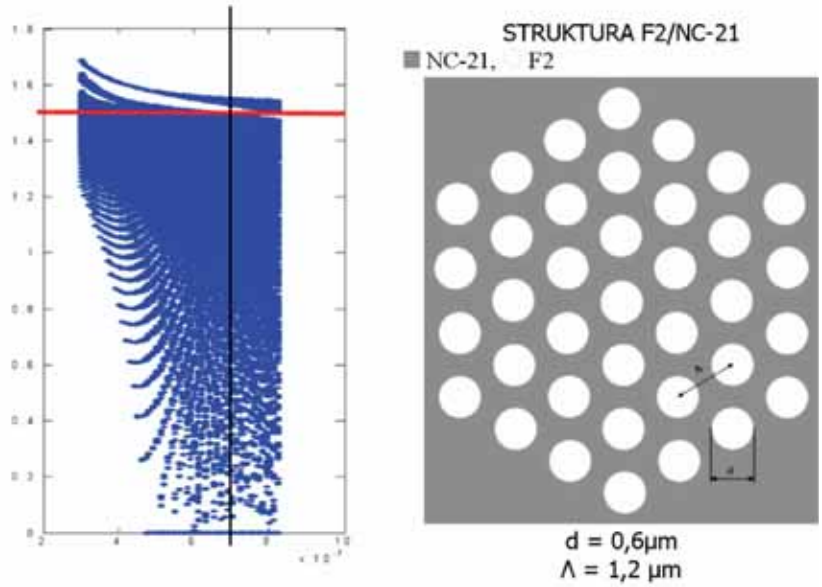
Zespół nasz ma również osiągnięcia w dziedzinie wytwarzania metamateriałów – periodycznych struktur szklano-metalowych (Rys. 20).



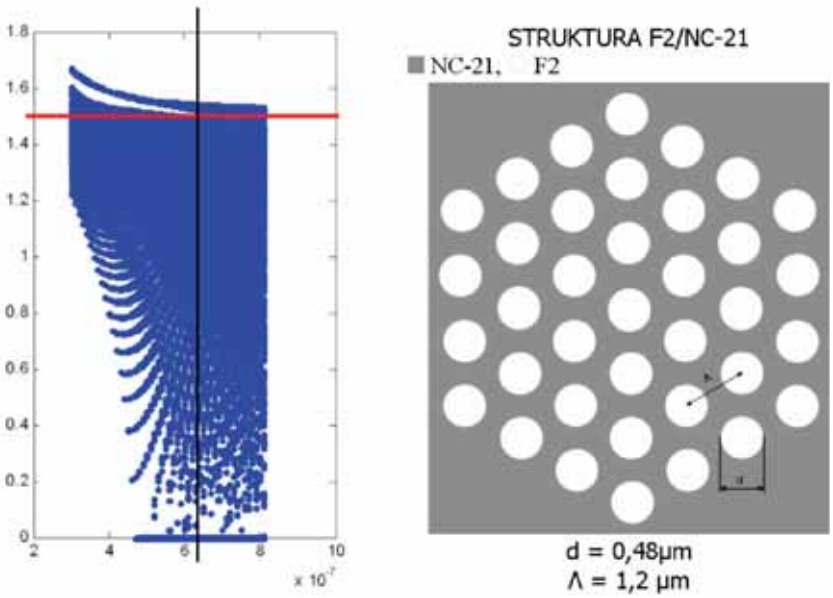
Rys. 11. Zależność współczynnika załamania światła n od długości światła λ dla szkieł F2 i NC-21

WŁASNOŚCI	SZKŁO	
	Zr3/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 Tg [°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

Tabela 2. Podstawowe własności szkieł Zr-3 i SK222



Rys. 12. Pasma wzbronione dla struktury F2/NC-21o d/Λ = 0,5



Rys. 13. Pasma wzbronione dla struktury F2/NC-21 o d/Λ = 0,4

Kolejne prace oraz zdobyte już doświadczenie pozwolą na rozwijanie tej technologii, a w dalszej perspektywie wytworzenie nowego typu mikrostrukturalnego materiału optycznego, tzw. szkła fotonicznego (*ang. Photonic Glass*). Materiał ten mimo posiadania wewnętrznej nanostruktury, będzie można poddawać klasycznej obróbce szlifiersko-polerskiej, jak jednorodne szkło. Pozwoli to na wykonywanie elementów optyki objętościowej z wbudowanym filtrem, odpornych na wysokie temperatury i pozwalających na transfer wysokich energii. Dla niektórych przedziałów długości padającego światła materiał ten będzie odbijać światło o dowolnej polaryzacji i padające z dowolnego kąta. Ponieważ propagacja obydwu modów TE i TM jest w krysztale niezależna, pełną przerwę uzyskuje się tak dobierając parametry struktury kryształu, aby częstości wzbronione obu modów nałożyły się na siebie. Wpływ na położenie przerwy fotonicznej mają nie tylko współczynniki załamania materiałów, z których składa się kryształ, ale również rodzaj symetrii sieci oraz stosunek ilościowy materiałów tworzących sieć. Wykonanie zaprojektowanej struktury takiego materiału wymaga pełnego zoptymalizowania procesu wytwórczego.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować zespołowi ZOI (UW), a zwłaszcza dr R. Buczyńskiemu i dr R. Kasztelanicowi, za pomoc i owocną współpracę w zakresie modelowania numerycznego periodycznych struktur dwuszklanych.

Pracę wykonano w ramach realizacji tematu statutowego ITME na rok 2007 we współpracy z Uniwersytetem Warszawskim Wydz. Fizyki (Zakład Optyki Informacyjnej). Niektóre prezentowane wyniki osiągnięto realizując grant MNII 3 T11B 072 30, COST 299 oraz w ramach Sieci Doskonałości NEMO i METAMORPHOSE w 6 PR UE, a także grantu KBN Nr 3T08A08127 i prac statutowych ITME na rok 2005. Wyniki symulacji uzyskano przy wykorzystaniu zasobów komputerowych Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego.

Literatura

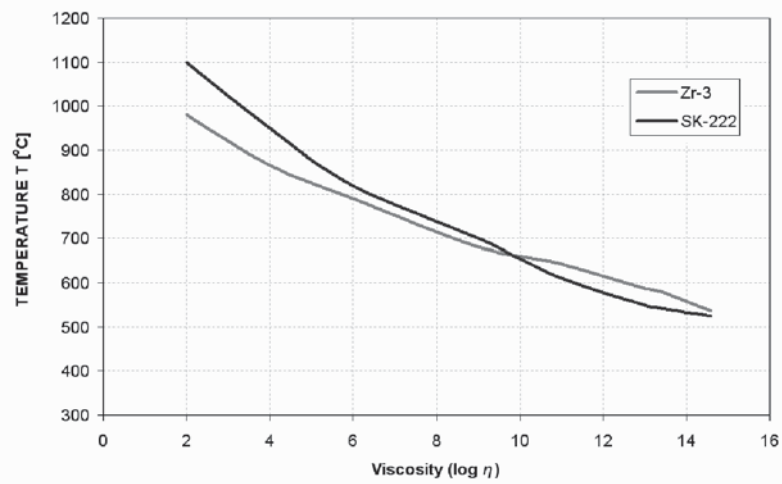
[1] Yablonovich E., *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*, Phys. Rev. Lett., Vol. 58, 1987, 2059-2062.

[2] Yablonovich E., Photonic band structures, J. Mod. Opt., Vol. 41, 1994, 171-404.

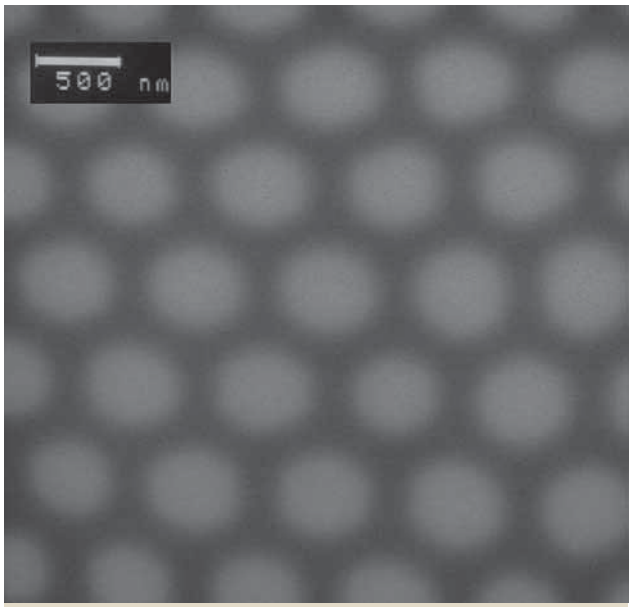
[3] Lopez C., *Three-dimensional photonic band-gap materials: semiconductors for light*, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 8, 2006, R1–R14.

[4] Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russel P.S., *Photonic band gap guidance in optical fibers,* Science Vol. 282, 1998, 1476-1478.

[5] Knight J.C., *Photonic crystal fibres,* Nature 424, 2003, 847-851.



Rys. 14. Krzywe lepkościowe szkieł F2 i NC-21



Rys. 15. Struktura periodyczna F2/NC-21 o średnicy 17,4 μm (~0,00023 mm²) o 271 elementach sieci o d ≈ 0,6 μm i stałej sieci Λ ≈ 0,9 μm, brak ostrych granic między matrycą a elementami sieci wynika z dyfuzji między szkłami

[6] Cryan C., Tatah 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.

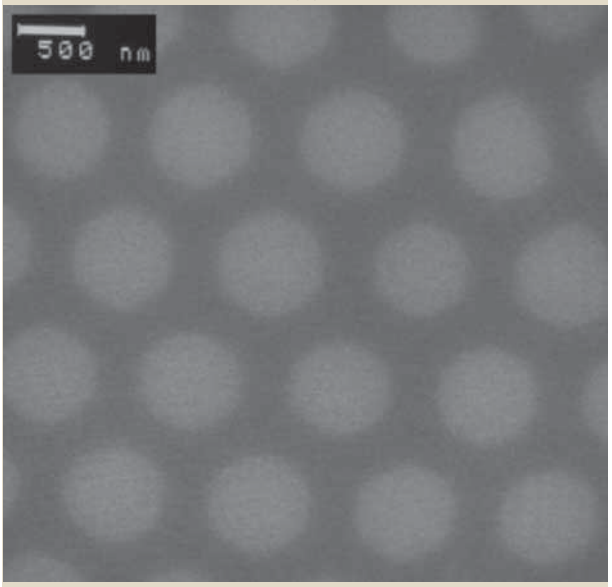
[8] Pysz D., Stępień R., Jędrzejewski K., Kujawa I., *Włókna fotoniczne ze szkieł wieloskładnikowych,* Materiały Elektroniczne T.30, Nr 3, 2002, 39-50.

[9] Yi N., Lei Z., Shu J., Jiangde P., *Dispersion of square solid-core photonic bandgap fibers,* Opt. Express Vol. 12, No. 13, Jun. 28, 2004, 2825-2830.

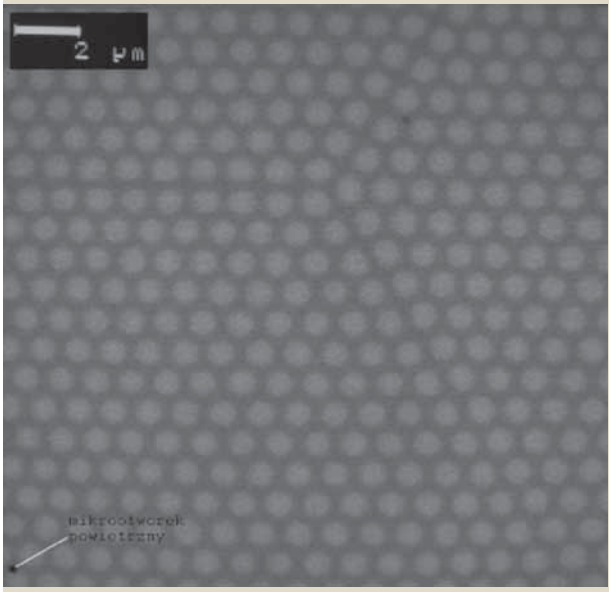
[10] Buczyński R., Szarniak P., Pysz D., Kujawa I., Stępień R., Szoplik T., *Properties of a double-core photonic crystal fibre with a square lattice,* Proc. SPIE Vol. 5576, 2004, 85-91.

[11] Feng X., Monro T.M., Petropoulos P., Finazzi V., Hewak D., *Solid microstructured optical fiber*, Opt. Express Vol. 11, No. 18, Sep. 2003, 2225-2230.

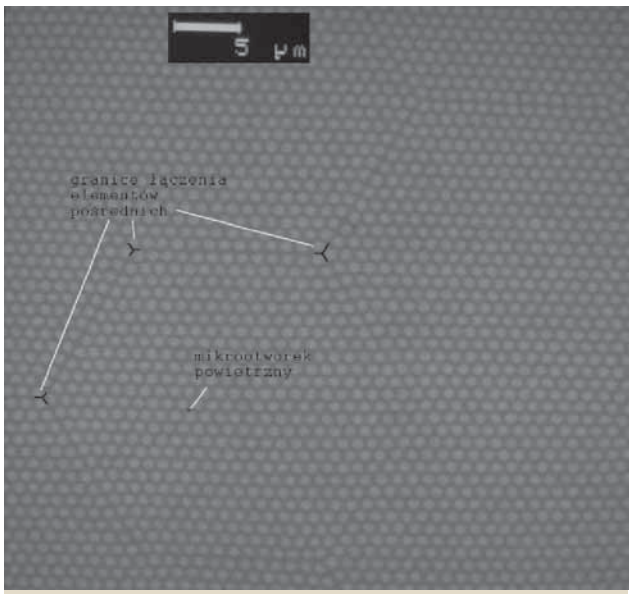
(a)



(b)



Rys. 16. Struktura dwuszklana Zr-3/SK222 o 166421 elementach sieci: (a) powiększenie 20000x, (b) powiększenie tego samego obszaru 5000x (widoczne: mikrootworek powietrzny oraz uskoki na łączeniu elementów pośrednich)



Rys. 17. Zbliżenie 2000x obszaru z Rys. 16 - z zaznaczonym mikrootworkiem i krawędziami elementów pośrednich, wzdłuż których widoczne są uskoki sieci kryształu fotonicznego

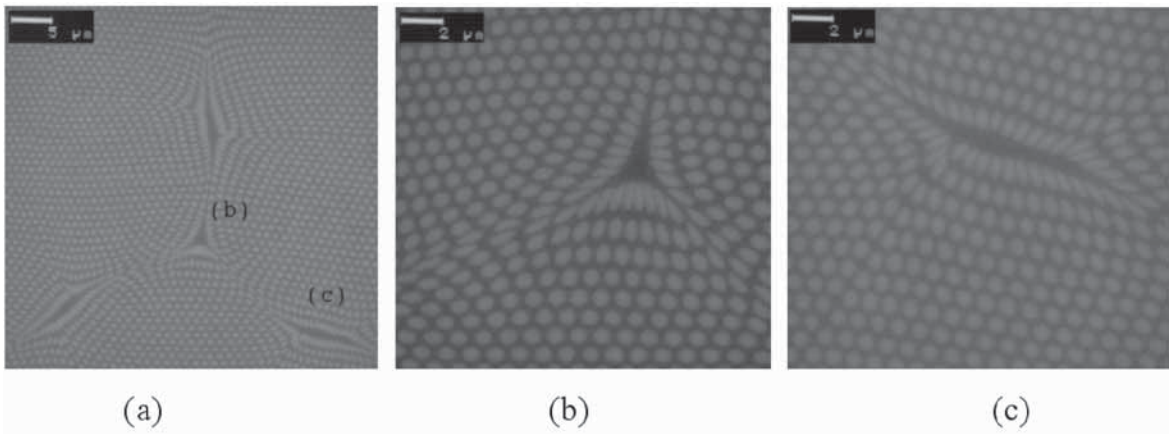
[12] Pysz D., Kujawa I., Szarniak P., Franczyk M., Stepień R., *Multicomponent glass fiber optic integrated structures,* Photonic Crystals and Fibers: SPIE International Congress on Optics and Optoelectronics Warsaw 2005, paper 5951-02.

[13] Kujawa I., Stępień R., Pysz D., Szarniak P., Haraśny K. & Michalska I., *Technology of microstructural all-solid holey fibers*, Ceramic, Polish Ceramic Bulletin Vol. 912, 2005, 775-782.

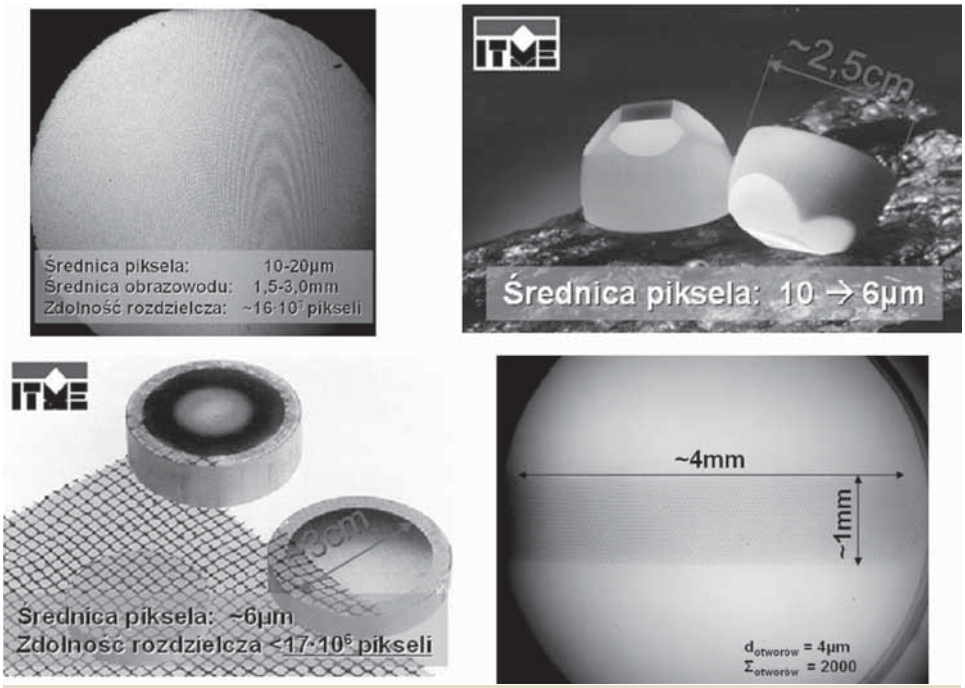
[14] Kujawa I., Szarniak P., Buczyński R., Pysz D., Stępień R., *Development of all-solid photonic crystal fibers*, SPIE International Congress: Photonics Europe 2006, Strasbourg 2006, Proc. SPIE vol.6182, 61822Q, 2006.

[15] 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.

[16] 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 vol. 6588, 6588E, (inv. paper).

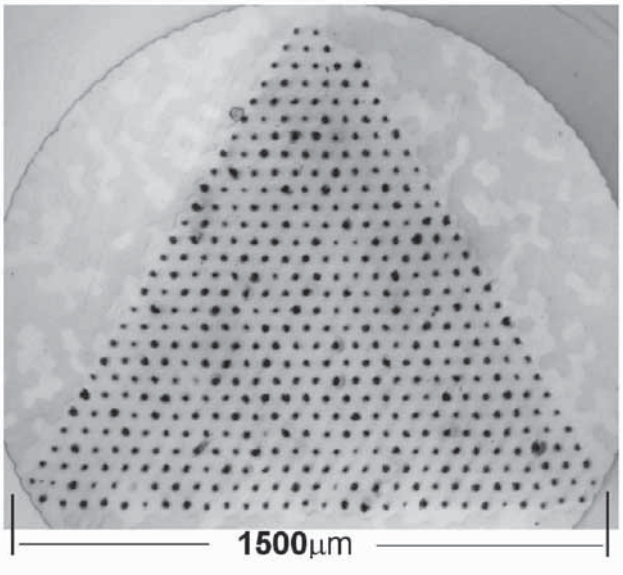


Rys. 18. Poważne deformacje struktury rozległego kryształu fotonicznego Zr-3/SK222: (a) widok ogólny, (b) zbliżenie defektu centralnego, (c) zbliżenie defektu widocznego na zdjęciu ogólnym w prawym dolnym rogu

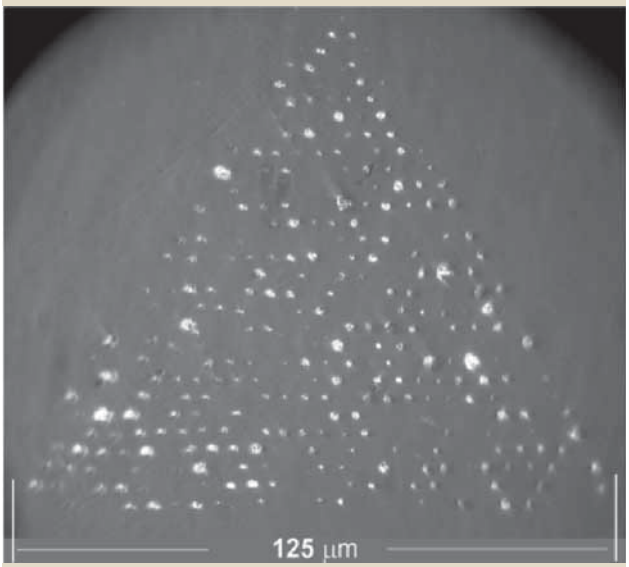


Rys. 19. Struktury dwuszklane i szklano-powietrzne o dużej skali integracji wykonane w ITME

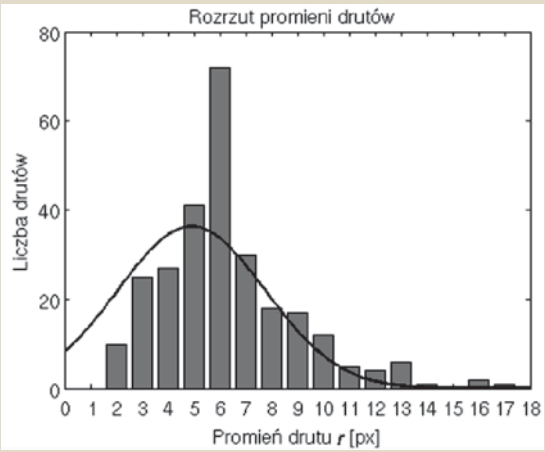
a)



b)



c)



Rys .20. Struktura preformy pośredniej szklano-metalowego kryształu fotonicznego: d = 8÷18 μm, Λ = 49÷53 μm (a); przeskalowana 12x struktura o boku 125 μm o parametrach: d = 0,8÷2,0 μm, Λ ≈ 5,1 μm (b); rozkład promieni drutów w krysztale o boku 125 μm z dopasowaną krzywą Gaussa (c) [24]

[17] 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 Volume 37, Numbers 1-3, Jan 2005, 171-183.

[18] 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.

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

[20] Matsumoto T., Fujita S. & Baba T., *Wavelength demultiplexer consisting of photonic crystal superprism and superlens,* Opt. Express Vol. 13, No. 26, Dec 2005, 10768-10776.

[21] 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 Vol. 14, No. 6, March 2006, 2413-2422.

[22] 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.

[23] Tandon S.N., Soljacic M., Petrich G.S., Joannopoulos J.D., Kołodziejski L. A., *The superprism effect using large area 2D-periodic photonic crystal slabs,* Elsevier, Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications 3, 2005, 10–18.

[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 2006, Krasnobród, Polska 2006, 208-215.