

PRÓBY WYTWARZANIA SOCZEWEK FRESNELA METODĄ WYTŁACZANIA NA GORĄCO W SZKŁACH TLENKOWYCH DEDYKOWANYCH NA ZAKRES OD 400 DO 8000 nm

Ireneusz Kujawa¹, Rafał Kasztelaniec², Piotr Waluk³, Ryszard Stępień¹, Krzysztof Haraśny¹, Dariusz Pysz¹, Ryszard Buczyński^{1,2}

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

² Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa

³ Kolegium Międzywydziałowych Interdyscyplinarnych Studiów Matematyczno - Przyrodniczych, Uniwersytet Warszawski, ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa

Streszczenie: Głównym celem pracy było zbadanie możliwości wykonywania szklanych, niedrogich w produkcji elementów mikrooptycznych do pracy w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Masowa produkcja takich elementów odbywa się przy wykorzystaniu metody wytłaczania na gorąco (*hot embossing*) dotyczy jednak głównie elementów polimerowych. Te z kolei jako materiały organiczne nie mogą być wykorzystywane we wszystkich zastosowaniach. W artykule przedstawiono wyniki prac zrealizowanych dla szeregu szkieł tlenkowych charakteryzujących się wysoką transmitancją w zakresie od światła widzialnego do średniej podczerwieni. Jako stempla użyto płytkę ze szkła kwarcowego o reliefie wykonanym standardowymi metodami trawienia jonowego. Do odwzorowywania zastosowano statyczny proces wytłaczania z zastosowaniem niewielkich sił nacisku. Jakość uzyskanych elementów zbadano przy pomocy interferometru światła białego oraz pomiarów ogniskowania.

Słowa kluczowe: mikropowielanie, wytłaczanie na gorąco, soczewka Fresnela, mikrooptyka, średnia podczerwień

TRIAL PROCESSES OF FRESNEL LENSES MOULDING IN OXIDE GLASSES INTENDED FOR VIS AND MIDIR REGIONS USING THE HOT EMBOSsing TECHNIQUE

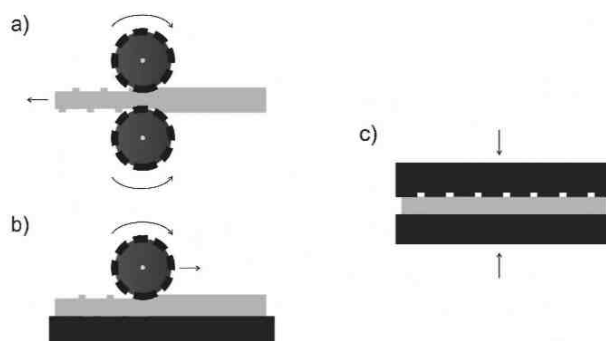
Abstract: The aim of this work was to examine the possibility of manufacturing low-cost glass diffractive optical elements that work in near and mid-infrared. The paper focuses on the results of the fabrication of Fresnel lenses from multi-component glasses in a hot embossing process. In the experiment lead-bismuth-gallium oxide and tellurite glasses characterized by high transmittance in the range of visible light spectrum to mid-infrared were applied. A fused silica element obtained by standard ion etching was used as the mold. The presented elements were fabricated in a static process with the use of low pressure. The quality of the outcome elements was examined employing white light interferometry as well as performing focusing measurements.

Keywords: microreplication, hot embossing, Fresnel lense, microoptics, MidIR

1. WSTĘP

Elementy optyczne DOE (*diffractive optical element*) wykonane z najrozmaitszych materiałów stanowią zainteresowanie nowoczesnej optyki, fizyki i inżynierii. Do celów wytwarzania mikrostruktur optycznych stosowane są różne techniki, w tym procesy litograficzne, epitaksja, techniki jonowe, obróbka mikromechaniczna oraz wiele innych. Jedną z najtańszych i najlepiej dostosowanych zarówno do mało- jak i wielkoseryjnej produkcji jest wyciskanie na gorąco (*hot embossing*). Technika ta posiada trzy podstawowe odmiany polegające na [1 - 4]:

- odwzorowywaniu wzoru za pomocą walcowania substratu przez dwa wzorniki (Rys. 1a);
- walcowaniu substratu przez wzornik na powierzchni dolnego płaskiego stempla (Rys. 1b);
- odciskaniu dwóch płaskich stempli na powierzchni substratu (Rys. 1c).



Rys. 1. Schematy podstawowych odmian procesu wyciskania na gorąco.

Fig. 1. Basic types of hot embossing processes.

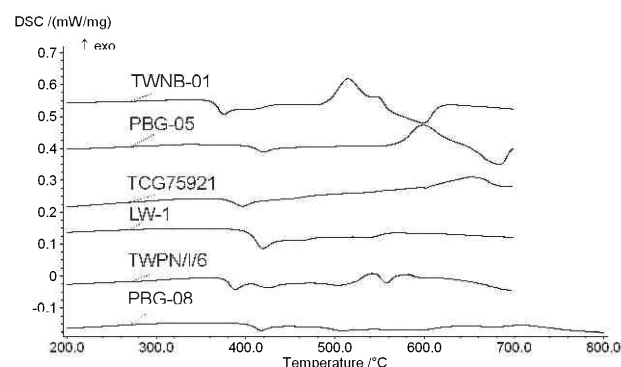
W szczególności zaprezentowane metody stosuje się do wytwarzania polimerowych elementów mikrooptycznych [1 - 4]. W ograniczonym stopniu wytlaczanie na gorąco jest także stosowane do wytwarzania elementów ze szkieł nieorganicznych tlenkowych i beztlenowych [1, 5 - 10]. W tym jednak przypadku pojawiają się dodatkowe problemy technologiczne. W trakcie procesu przetwórczego szkła zwykle konieczne jest zapewnienie relatywnie wysokiej temperatury w porównaniu do temperatury, w jakiej odbywa się proces odciskania polimerów – wyjątek stanowią szkła beztlenowe [1 - 10]. W przypadku formowania polimerów proces zachodzi maksymalnie w temperaturze 200 °C (zwykle ~ 80 °C), natomiast przy przetwarzaniu większości stabilnych wieloskładnikowych szkieł tlenkowych (pracujących w zakresie VIS i MidIR) stosuje się temperatury rzędu 400 ÷ 600 °C lub wyższe. Jest to związane z koniecznością uzyskania przez szkło odpowiedniej lepkości, która w procesie odciskania winna mieścić się między 10^{13} a 10^9 P. W przypadku, gdy lepkość jest mniejsza szkło (niezależnie od przejawianej skłonności do adhezji) zwykle trwale przywiera do stempla niszcząc i korodując jego powierzchnię [1, 5, 8 - 9]. Natomiast przy zbyt dużej lepkości szkło nie jest wystarczająco plastyczne i niedokładnie wypełnia drobne szczegóły wzorca [1, 5 - 10]. Inne ograniczenia wynikają z własności termo-chemicznych [1, 5, 10 - 11], a także mechanicznych (w tym głównie związane są z modułem Younga i kruchym pękaniem szkieł) [1]. W podwyższonej temperaturze zachodzą również spontaniczne procesy korozji wzajemnej na granicy szkło - stempel wpływające na szkło i skracające żywotność formy [1, 5, 8]. Dla szkieł beztlenowych nieodzownym jest zapewnienie ochrony przed agresywnym wpływem tlenu atmosferycznego i wilgoci [5 - 8]. W przypadku szkieł tlenkowych o wysokiej transmitancji w zakresie od widzialnego do średniej podczerwieni szczególną trudność nastręcza natomiast krystalizacja,

którą można ograniczyć, ale tylko kosztem transmisji w MidIR, wzbogacając skład o tlenki szklotwórcze [9 - 11]. Niezależnie od rodzaju szkła istotne jest także właściwe dopasowanie współczynnika rozszerzalności cieplnej do materiału stempla w zakresie temperatury przetwarzania, jak również daleko poniżej temperatury transformacji T_g ($\log \eta = 13,4$) [1].

2. DOBÓR MATERIAŁU

Do testów technologicznych wybrano szkła potencjalnie odpowiednie dla zakresu widzialnego i podczerwieni, o składzie tlenkowym zaprezentowanym w Tab. 1.

Inne własności, a zwłaszcza adhezja do szkła kwarcowego, charakterystyka lepkościowa oraz skłonność do krystalizacji miały rozstrzygnąć o ostatecznym wyborze poszczególnych szkieł. Za wyznacznik odporności na krystalizację szkła przyjęto przebieg krzywych DSC (*differential scanning calorimetry*) [12] – Rys. 2. Pojawianie się na krzywych wyraźnych pików egzotermicznych sugeruje skłonność szkła do dewitryfikacji w określonym zakresie



Rys. 2. Krzywe DSC rozważanych szkieł.

Fig. 2. Curves of differential scanning calorimetry of the investigated glasses.

SYMBOL SZKŁA	Skład tlenkowy w % _{w.obe.}													
	SiO ₂	PbO	Bi ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	CdO	B ₂ O ₃	ZnO	Tl ₂ O	GeO ₂	WO ₃	Na ₂ O	TeO ₂	Nb ₂ O ₅	
IW-1	5,2	63,7	-	-	-	14,6	16,5	-	-	-	-	-	-	
PRG05	-	40,6	42,4	17,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TCG75921	-	28,6	31,3	12,6	4,9	-	-	13,4	9,2	-	-	-	-	
PRG08	14,1	39,2	27,3	14,3	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	
TWNR-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,6	1,8	67,2	2,4	
TWPN//6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,8	1,8	60,3	3,1	

Tab. 1. Zestawienie składów szkieł.

Tab. 1. Oxide composition of the investigated glasses.

temperatury. Z tego względu ustalono, że najlepszą odpornością na odszklenie spośród rozważanych szkieł charakteryzują się szkła: LW-1, PBG08 oraz TCG75921. W ograniczonym zakresie możliwe jest również przetwarzanie pozostałych szkieł, jednak w poszczególnych przypadkach istnieje większe lub

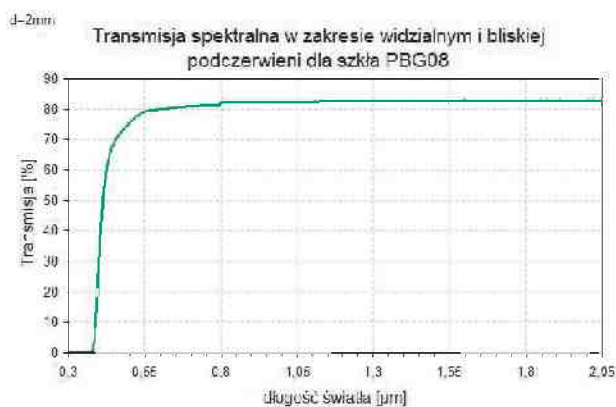
mniejsze ryzyko wystąpienia krystalizacji.

W Tab. 2 zaprezentowano także zestawienie podstawowych własności typowanych szkieł z uwzględnieniem współczynnika załamania n_d , temperatur charakterystycznych, gęstości i transmisji spektralnej.

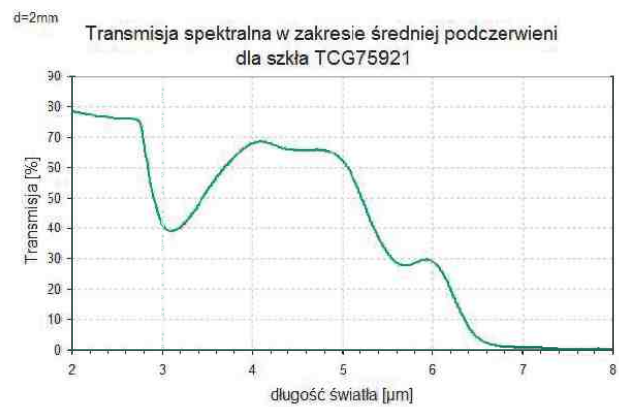
PARAMETR	SYMBOL SZKŁA					
	LW-1	PBG08	PBG05	TWNB-1	TWPN/1/6	TCG75921
Współczynnik załamania światła n_d	1,846	1,938	2,350	2,155	2,149	2,170
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej α [$10^{-6} K^{-1}$]: - dla zakresu 20 ÷ 300 °C - dla zakresu 20 ÷ 400 °C	8,31 9,58	8,30 8,48	11,05 9,10	15,51 b.d.	14,40 b.d.	10,78 b.d.
Temperatura transformacji: T_g [°C]	400,0	463,2	443,0	355,9	365,0	368,5
Dylatometryczna temperatura mięknięcia: DTM [°C]	420,0	500,0	468,5	368,0	385,0	392,2
Temp. charakterystyczne [°C]: - zaoblenia próbki T_z $\log\eta=9,0$ - utworzenia kuli T_k $\log\eta=6,0$ - utworzenia półkuli T_{pk} $\log\eta=4,0$ - rozplynięcia się próbki T_r $\log\eta=2,0$	421,0 450,0 487,5 645,0	542,0 615,0 690,8 800,5	490,0 540,0 575,0 680,0	370,0 395,0 440,0 510,0	395,0 415,0 460,0 535,5	395,0 445,0 485,0 560,0
Gęstość d [g/cm^3]	5,625	5,798	8,020	5,795	5,881	7,410
Zakres transmisji [nm]: - krawędź dolna (DPA) - krawędź górna (GPA)	380 3700	380 5200	460 8000	425 6700	420 6850	460 7400
Źmurność w zakresie transmisji: A [dB/m]	b.d.	5-2200	b.d.	b.d.	b.d.	16-2100

Tab. 2. Parametry typowanych szkieł.

Tab. 2. Characteristics of the glasses considered for the experiment.



Rys. 3. Transmisja spektralna szkła PBG08 dla próbki o grubości 2 mm w zakresie 300 ÷ 2050 nm oraz 2000 ÷ 6000 nm.
Fig. 3. Spectral transmission of PBG08 glass for a 2 mm sample in 300 ÷ 2050 nm and 2000 ÷ 6000 nm.

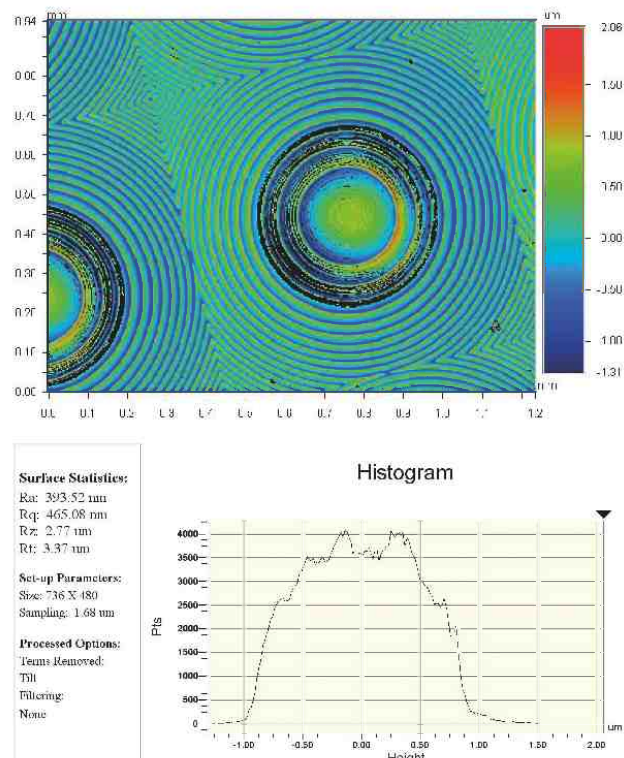


Rys. 4. Transmisja spektralna szkła TCG75921 dla próbki o grubości 2 mm w zakresie $300 \div 2050$ nm oraz $2000 \div 8000$ nm.
Fig. 4. Spectral transmission of TCG75921 glass for a 2 mm sample in $300 \div 2050$ nm and $2000 \div 8000$ nm.

Spośród trzech szkieł o małej skłonności do krystalizacji dwa ostatnie charakteryzują się znaczną transmisją w zakresie widzialnym i podczerwieni – Rys. 3 - 4; (dla szkła LW-1 górna granica transmisji nie przekracza 3700 nm – Tab. 2). Szkła te różnią się jednak adhezją do szkła kwarcowego. Szło PBG08 nie przywiera pod obciążeniem w tak dużym stopniu do szkła kwarcowego jak ma to miejsce w przypadku szkła TCG75921, które natomiast w mniejszym stopniu niż PBG08 przywiera do podłoża metalicznych. Ze względu na dostępny materiał stempli do dalszych prac wytypowano szkło PBG08.

3. STEMLOWANIE

W substratach ze szkła PBG08 wykonano próby odwzorowania soczewek Fresnela używając stempla ze szkła kwarcowego. Układ stemplujący był zgodny z Rys. 1c. Stosowanie krótkiego czasu odciskania wymusza użycie większych sił, zwłaszcza jeśli chcemy uzyskać pełne odwzorowanie profilu, to jednak zwiększa przywieranie szkła i uniemożliwia otrzymanie gotowego wyrobu – przy próbie rozdzielenia substrat i stempla zwykle ulegają uszkodzeniu. Podobny skutek przynosi zwiększenie temperatury – substrat chętniej przywiera i koroduje powierzchnię stempla. Dlatego też do odcisnięcia matrycy soczewek wykorzystano proces statyczny z zastosowaniem długiego czasu odwzorowywania i niewielkiego nacisku w umiarkowanej temperaturze. Takie podejście pozwoliło w pewnym zakresie ograniczyć przywieranie szkła PBG08 do materiału stempla i wydłużyć jego żywotność do 5 cykli. Profil powierzchni użytego stempla zarejestrowany przy wykorzystaniu interferometru światła białego (Veeco Wyko NT2000) przedstawiono na Rys. 5.



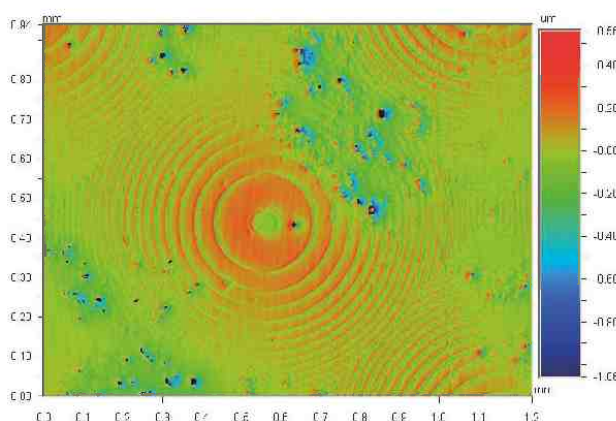
Rys. 5. Profil powierzchni zastosowanego stempla ze szkła kwarcowego wraz z histogramem.

Fig. 5. Scans of the surface of the original stamp in cross-section (fused silica glass mould insert) and the actual histogram.

Poniżej zaprezentowano obrazy odcisniętych replik soczewki na powierzchni substratów ze szkła PBG08 wraz z opisem parametrów procesowych i odpowiednimi histogramami (Rys. 6).

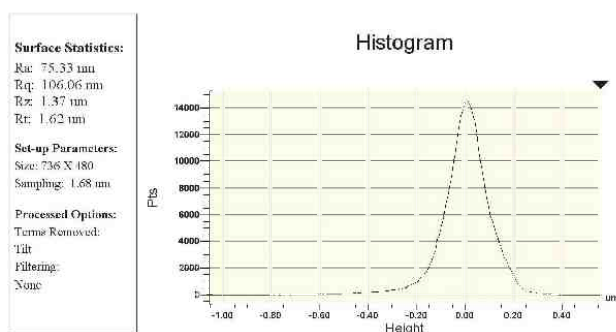
Na jakość odwzorowania kształtu soczewki w prezentowanym przypadku mają wpływ głównie czas oraz w nieco mniejszym stopniu temperatura prowadzenia procesu odwzorowywania (siła nacisku ze względu na małą wartość nie stanowi głównego czynnika). Analizę uzyskanych głębokości odwzoro-

(a) replika

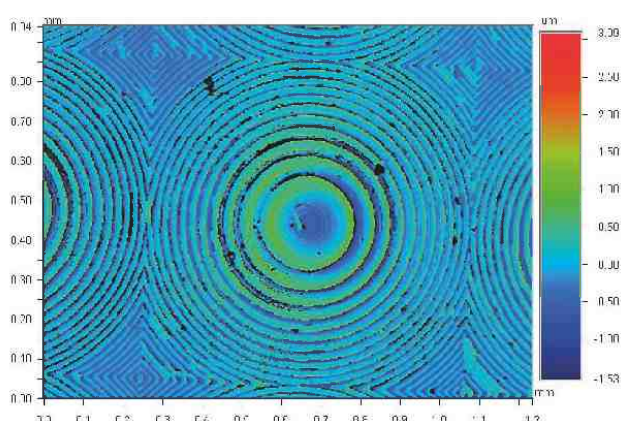


powierzchnia substratu PBG08

Temp.: 518 °C
 SIŁA NACISKU: ~ 1,02N
 CZAS STEMPLOWANIA: 40'

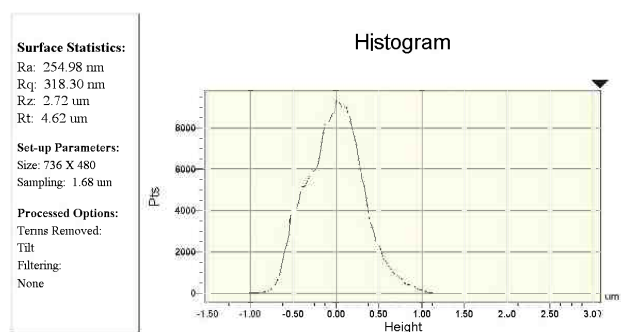


(b) replika



powierzchnia substratu PBG08

Temp.: 518 °C
 SIŁA NACISKU: ~ 1,02N
 CZAS STEMPLOWANIA: 120'



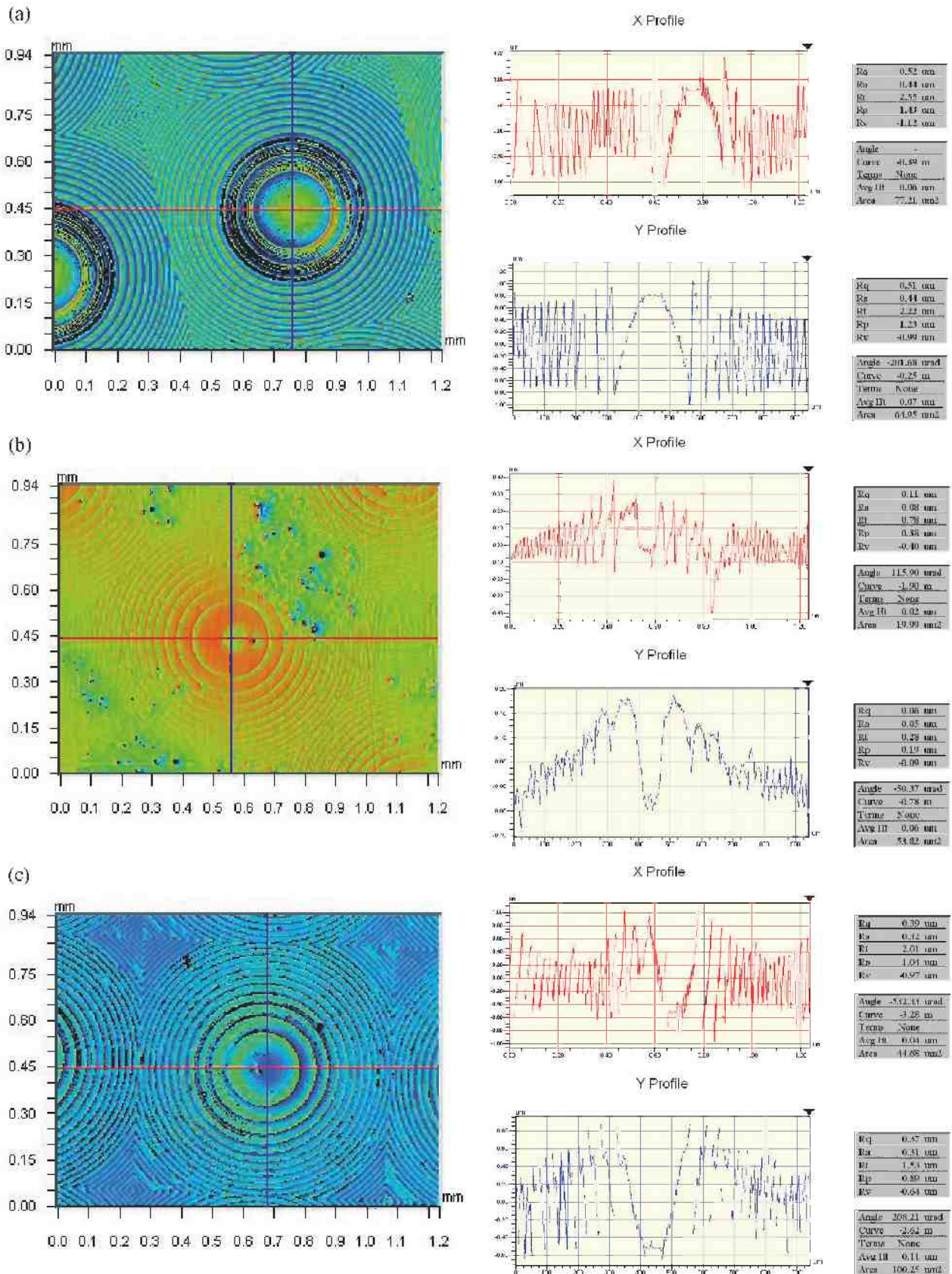
Rys. 6. Profile powierzchni wykonanych soczewek w szkle PBG08 wraz z ich histogramami dla czasu stemplowania (a) 40 minut i (b) 120 minut w temperaturze $T_s = 518$ °C i przy zastosowaniu siły stemplowania $F_s = 1,02$ N.

Fig. 6. Scans of the samples fabricated in PBG08 at the temperature of: 518 °C and force of: 1.02 N for different process times: 40 min (a), and 120 min (b).

wania w substracie ze szkła PBG08 w porównaniu do stempla wykonanego metodami trawienia jonowego w szkle kwarcowym zaprezentowano na Rys. 7.

Przedstawione przekroje świadczą o wyraźnym wpływie czasu stemplowania na głębokość odwzorowania. Dobranie optymalnych warunków pozwala uzyskać kopię zbliżoną do wzorca (z błędem odwzorowania kształtu ~ 10%). W prezentowanym przypadku były to: siła nacisku $F_s = 1,02$ N, temperatura prowadzenia procesu stemplowania $T_s = 518$ °C

i czas stemplowania $\tau_s = 120$ min. Warto przy tym pamiętać, że wielkość T_s nie jest tożsama z osiąganą w trakcie procesu temperaturą substratu ze szkła PBG08. Poziom temperatury T_s uwarunkowany jest rozwiązaniami konstrukcyjnymi, które uzależniają miejsce umieszczenia termopary względem substratu. Temperaturę T_s , jak i pozostałe parametry procesu stemplowania określa się doświadczalnie dla danego szkła. Dążono do tego by poziom temperatury procesu był maksymalnie bliski DTM ($\log \eta = 11$).



Rys. 7. Obrazy przekrojów x - y: (a) wzorca – stempla ze szkła kwarcowego oraz wykonanych soczewek w szkłe PBG08 w procesie w $T = 518\text{ }^{\circ}\text{C}$ w czasie: (b) 40 min stemplowania oraz (c) 120 min.

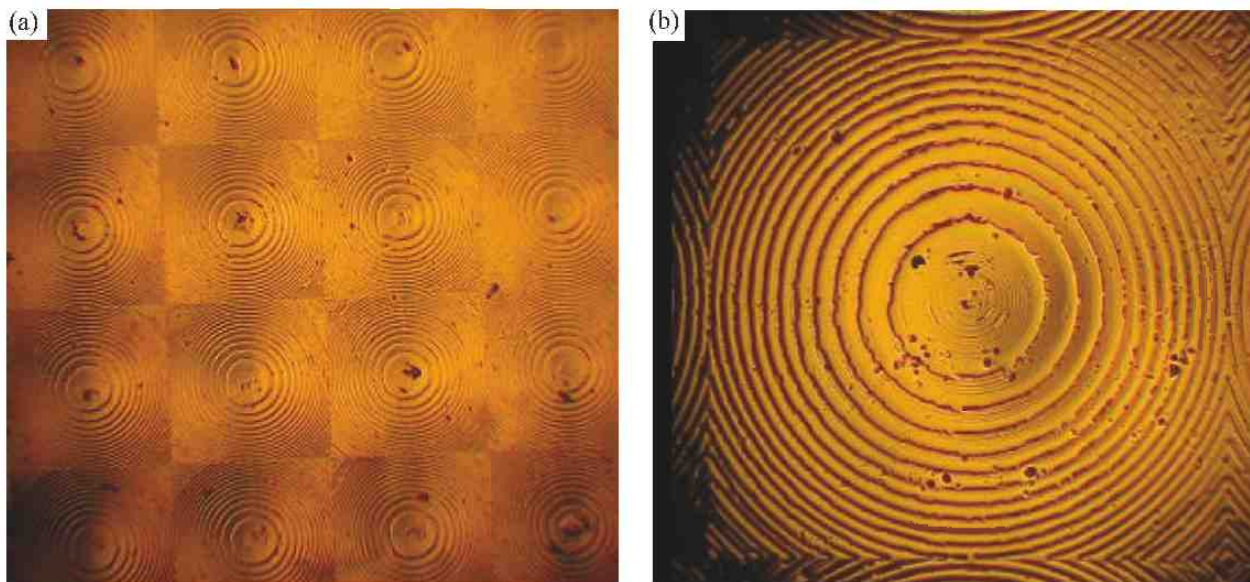
Fig. 7. Scans of the surface of the original stamp in cross-section (fused silica glass mould insert) (a), and the samples fabricated in PBG08 glass at the temperature of: $518\text{ }^{\circ}\text{C}$ and force of 1.02 N for different process times: 40 min (b), and 120 min (c).

4. POMIARY OPTYCZNE

Dla wykonanych soczewek na powierzchni szkła PBG08 przeprowadzono pomiary optyczne. Prezentowane wyniki dotyczą substratu przetworzonego

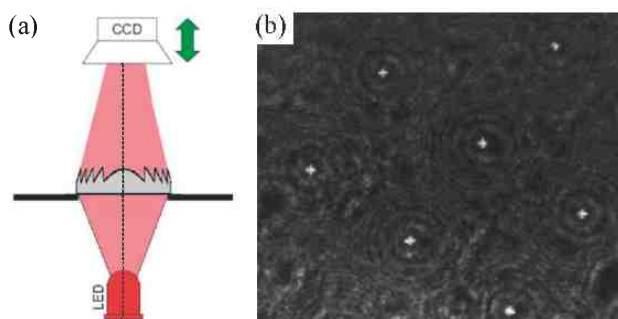
w warunkach uznanych za optymalne. W pierwszej kolejności przeprowadzono inspekcję powierzchni przy pomocy mikroskopu optycznego (Mikroskop stereoskopowy TPL SCIENCE ETD-101) (Rys. 8).

Po oczyszczeniu powierzchni z ewentualnych



Rys. 8. Uzyskane w mikroskopie optycznym zdjęcie powierzchni substratu ze szkła PBG08 z macierzą soczewek Fresnela - a) oraz wygląd pojedynczej soczewki - b).

Fig. 8. Image of the array of the Fresnel lenses obtained using an optical microscope. Magnification 3.2x - a) and 10x - b).

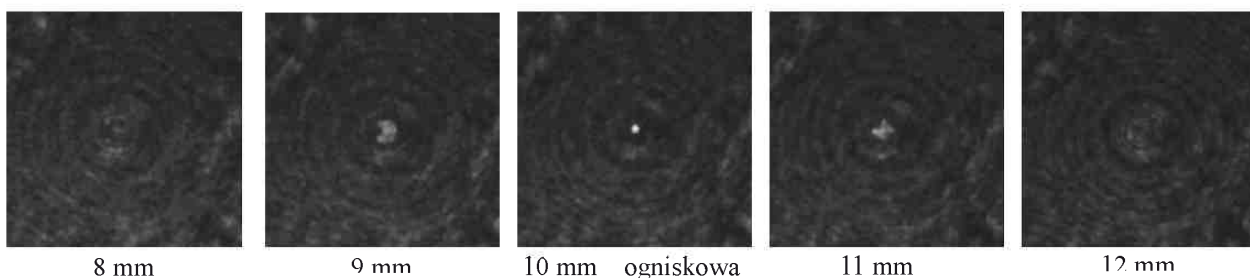


Rys. 9. Schemat pomiaru – (a) oraz rejestrowany obraz przez kamerę CCD (uzyskane natężenie światła blisko ogniska) – (b).

Fig. 9. Scheme of the measurement setup – (a) and light intensity near the focal plane for the array of lenses recorded by a CCD camera – (b).

zanieczyszczeń strumieniem sprężonego powietrza przeprowadzono testy ogniskowania soczewek stosując światło o długości fali $\lambda = 1300 \text{ nm}$ – schemat stanowiska przedstawiono na Rys. 9. Dla poszczególnych soczewek uzyskano dużą jednorodność natężenia światła niezależnie od ich położenia – Rys. 9(b). Widok ogniskowania pokazano na Rys. 10. Kolejne obrazy pokazują natężenie fali świetlnej w różnych płaszczyznach w okolicy płaszczyzny ogniskowej prezentowanej soczewki Fresnela. Ogniskową w tym przypadku określono na 10 mm.

W trakcie pomiarów, dzięki analizie obrazów leżących w kilku płaszczyznach w okolicy odległości ogniskowej określono parametr M^2 (*M square*) dla



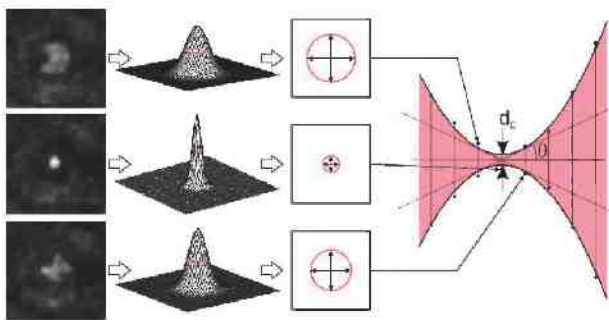
Rys. 10. Ogniskowanie światła przez jedną z soczewek Fresnela. Natężenie światła w kolejnych płaszczyznach.

Fig. 10. Light focusing through the Fresnel lens array. Light intensity in several planes for one of the Fresnel lenses.

losowo wybranych 30 soczewek. Niniejszy parametr zdefiniowany jest dla danej długości fali λ jako [13]:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 \theta}{4\lambda}$$

Pomiar wartości d_0 oraz θ oznaczających odpowiednio średnicę przewężenia wiązki oraz jej rozbieżność dokonano na podstawie dopasowania do plamki ogniskowej w kilku płaszczyznach wokół płaszczyzny ogniskowej krzywej Gaussa, odczytaniu z jej kształtu szerokości połówkowej, a następnie dopasowania do niej paraboli. Schemat postępowania przedstawiony został na Rys. 11. Średnia wartość M^2 wyniosła 11,97. Wykonane na tej podstawie soczewki oceniono jako słabej jakości. Jak można dostrzec na Rys. 8 na powierzchni soczewek pojawiają się różnego rodzaju wady, głównie powstałe w wyniku kłopotów z kompatybilnością szkła i materiału stempla. Poważnym utrudnieniem w uzyskaniu wysokiej jakości soczewek jest adhezja szkła PBG08 do powierzchni szkła kwarcowego, której wynikiem są różnego rodzaju artefakty na powierzchni soczewek (Rys. 8b).



Rys. 11. Schemat pomiaru parametru M^2 (M square) z oznaczeniem średnicy przewężenia d_0 oraz kątem rozbieżności wiązki θ .

Fig. 11. Scheme of the measurement of the M square parameter (d_0 - beam waist, θ - beam divergence).

Dla wykonanych soczewek sprawdzono również możliwość wprowadzenia światła w zakresie bliskiej podczerwieni do światłowodu wielomodowego o średnicy rdzenia $D_r = 10 \mu\text{m}$. Mimo niezbyt dobrej jakości soczewek pozytywne wyniki uzyskane zostały dla fal o długości od $1,3 \mu\text{m}$ do $4,8 \mu\text{m}$ gdzie wprowadzono ponad 75% światła.

5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki doświadczeń związanych z próbą wytwarzania, przy wykorzystaniu względnie mało kosztownej metody *hot embossingu*, dyfrakcyjnych elementów szklanych działających w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Jak stwierdzono istotnym ograniczeniem stosowania szkieł posiadających transmitancję w zakresie widzialnym i podczerwieni jest ich reologia i skłonność do krystalizacji, którą można ograniczyć poprzez poszerzenie składu o GeO_2 , SiO_2 , Tl_2O , CdO , Nb_2O_5 itp., ale kosztem pogorszenia transmisji spektralnej w obszarze podczerwieni (Tab. 2). Dodatkowym poważnym problemem jest skłonność do przywierania szkieł do powierzchni wzornika w czasie stemplowania. Spośród sześciu szkieł branych pod uwagę wytypowano pięcioskładnikowe ołowiowo - bizmutowo - galowe szkło o symbolu PBG08 posiadające odporność na odszkleńnię i w ograniczonym zakresie wykazujące adhezję do szkła kwarcowego, z którego wykonano stempel. W temperaturze roboczej $T_s = 518 \text{ }^\circ\text{C}$ przy zastosowaniu niewielkiego nacisku $F_s = 1,02 \text{ N}$ i długiego czasu stemplowania $\tau_s = 120 \text{ min}$ uzyskano dość dobre odwzorowanie wzorca (t.j. z błędem odwzorowania kształtu $\sim 10\%$ - Rys. 5 - 6).

Pomiary optyczne wykonanych soczewek pozwoliły określić zakres ich ogniskowania dla światła $\lambda = 1300 \text{ nm}$ oraz możliwość wprowadzenia światła w zakresie $1300 \div 4800 \text{ nm}$ do światłowodu wielomodowego. W wyniku tego można stwierdzić, że technika stemplowania na gorąco nadaje się do produkcji szklanych elementów dyfrakcyjnych na potrzeby optyki w zakresie podczerwieni i jest perspektywiczną metodą pozwalającą dokonać pewnego postępu w dziedzinie wykonywania niewielkich elementów optycznych ze szkieł tlenkowych. Ze względu na poziom uzyskanego parametru M^2 zastosowana metoda wymaga jednak dalszej optymalizacji.

Praca finansowana ze środków MNiSW w ramach grantu N.N507 431339, pt.: „Opracowanie metody wytwarzania szklanych elementów mikrooptycznych i dyfrakcyjnych dla średniej podczerwieni ze szkieł nieorganicznych”.

LITERATURA

- [1] Worgull M.: Hot embossing: theory and technology of microreplication (Micro and nano technologies, William Andrew, 2009)

- [2] Hecke M., Schomburg W. K.: Review on micro molding of thermoplastic polymers, *J. of Micromech. Microeng.*, 2004, 14, R1 - R14
- [3] Becker H., Heim U.: Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures, *ELSEVIER - Sensors and Actuators*, 2000, 83, 130-135
- [4] Velten T., Schuck H., Haberer, Bauerfeld W. F.: Investigations on reel-to-reel hot embossing, *Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, 2010, 47, 1-4, 73 - 80
- [5] Pan C. T., Wu T. T., Chen M. F., Chang Y. C., Lee C. J., Huang J. C.: Hot embossing of micro-lens array on bulk metallic glass, *Sensors and Actuators A*, 2008, 141, 422 - 431
- [6] Zhang X. H., Guimond Y., Bellec Y.: Production of complex chalcogenide glass optics by molding for thermal imaging, *J. of Non-Crystalline Solids*, 2003, 326 - 327, 519 - 523
- [7] Edelmann J., Worsch Ch., Schubert A., Rüssel Ch.: Micro structuring of inorganic glass by hot embossing of coated glass wafers, *Journal Microsystem Technologies*, 2010, 16(4), 553 - 560
- [8] Chua J. P., Wijaya H., Wu C. W., Tsai T. R., Wei C. S., Nieh T. G., Wadsworth J.: Nanoimprint of gratings on a bulk metallic glass, *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90, 034101
- [9] Kujawa I., Buczyński R., Duszkiewicz J., Lechna A., Pysz D., Stępień R.: Stemplowanie szkieł – tania metoda formowania struktur optycznych, *Materiały Ceramiczne/Ceramic Materials*, 2012, 64, 2, 181-187
- [10] Kujawa I., Stępień R., Waddie A. J., Skrabalak G., Taghizadeh M. R., Buczyński R.: Development of glass microoptics for MidIR with hot embossing technology, *Proc. of SPIE*, 2012, 8428, 84281P-84281P-7
- [11] Stępień R., Buczyński R., Pysz D., Kujawa I.: Szklą ołowiowo - bizmutowe na włókna mikrostrukturalne i elementy mikrooptyczne dla średniej podczerwieni, *Materiały Ceramiczne/Ceramic Materials*, 2012, 64, 2, 219-224
- [12] Höhne G., Hemminger W. F., Flammersheim H.-J.: Differential scanning calorimetry, Springer, 2003
- [13] ISO Standard 11146, Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios, 2005