

Wpływ zmian profilu apodyzacyjnego siatki Bragga na jej charakterystyki spektralne.

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwość kształtowania widma światłowodowej siatki Bragga poprzez zmianę jej profilu apodyzacyjnego. Analizie numerycznej zostały poddane siatki Bragga jednorodny oraz chirpowe z różną wartością składowej stałej współczynnika załamania światła. W artykule przedstawiony został wpływ składowej stałej współczynnika załamania światła na charakterystyki widmowe struktur. Porównano parametr FWHM (ang.: full width at half maximum) dla siatek jednorodnych i chirpowych o funkcjach apodyzacyjnych różniących się procentową wartością składowej stałej w zakresie od 0% do 100%.

Abstract. The article presents the possibility of shaping the spectrum of a fiber Bragg grating by changing its apodization profile. Uniform and chirp Bragg gratings with different values of the constant component of the refractive index were subjected to numerical analysis. The article presents the influence of the constant component of the refractive index on the spectral characteristics of the structures. The FWHM (full width at half maximum) parameter was compared for uniform and chirp gratings with apodization functions differing in the percentage value of the constant component in the range from 0% to 100%. (**The impact of changes in the apodization profile of the Bragg grating on its spectral characteristics**)

Słowa kluczowe: światłowodowe siatki Bragga, apodyzacja, FBG

Keywords: fiber Bragg gratings, apodization, FBG

Wstęp

Światłowodowe siatki Bragga są ważnymi elementami w technice światłowodowej, są wykorzystywane jako elementy torów światłowodowych [1], elementy do budowy laserów światłowodowych oraz jako czujniki wielkości fizycznych i chemicznych wykorzystywanych w przemyśle i medycynie [2][3][4][5]. Niewątpliwymi zaletami struktur Bragga są małe wymiary, waga oraz niewrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne, co pozwala na to iż światłowodowa siatka Bragga może stać się konkurencyjnym elementem w stosunku do wielu zastosowań wykorzystujących elementy elektroniczne [6][7].

Najczęściej wykorzystywaną metodą wytwarzania struktur Bragga na włóknach światłowodowych jest metoda zapisu za pomocą maski fazowej [8][9][10]. Jest to dobrze znana metoda, której zaletą jest mała ilość elementów niezbędnych do wytworzenia siatki oraz niska wrażliwość na wibracje. Wadą natomiast jest koszt masek fazowych oraz zapis struktury na konkretną długość fali. Dopasowanie odpowiedniej siatki do zastosowanej aplikacji wymaga precyzyjnej znajomości jej parametrów wyjściowych. Każdorazowe wytwarzanie światłowodowych struktur periodycznych związane jest z dodatkowymi kosztami, które można zmniejszyć wykorzystując symulacje numeryczne. Dzięki wykorzystaniu metod numerycznych możliwe jest sprawdzenie parametrów siatki na etapie projektowania [11].

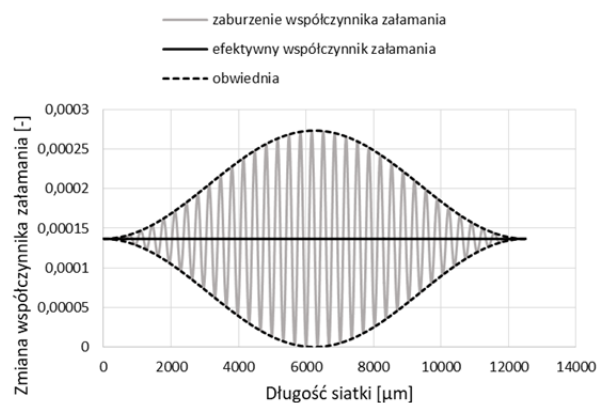
Symulacje numeryczne

Apodyzacja siatki Bragga jest jednym z podstawowych parametrów. Zmiana tego parametru możliwa jest poprzez zmianę rozkładu przestrzennego natężenia promieniowania wiązki lasera, zmianę czasu naświetlania poszczególnych części siatki lub zastosowanie masek fazowych o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej. Zastosowanie tego rodzaju masek fazowych wiąże się z koniecznością określenia parametrów siatki i funkcji apodyzacyjnej już na etapie wytwarzania maski fazowej. Większość siatek Bragga w których zmieniono profil apodyzacyjny wytworzonych jest w wyniku modyfikacji techniki zapisu [12].

Wykorzystując metodę symulacji numerycznych możliwe jest zaprojektowanie określonej siatki Bragga bez konieczności wytwarzania takiej struktury. Przed wytworzeniem konkretnej struktury możliwe jest jej

zamodelowanie i określenie jaki kształt będą miały jej charakterystyki spektralne dla konkretnych parametrów takich jak długość, amplituda modulacji współczynnika załamania światła czy apodyzacja. Najczęściej spotykaną funkcją apodyzacyjną, dla której wytwarzane są siatki Bragga jest apodyzacja o rozkładzie Gaussa, ponieważ jest ona narzucana poprzez źródło światła wykorzystywane do wytwarzania takiej struktury.

Apodyzacja, która jest jednym z podstawowych parametrów siatek Bragga wynika z wielkości zmian współczynnika załamania światła na długości całej struktury, oraz obwiedni zmian amplitudy współczynnika załamania światła. Te dwie wartości razem wpływają na efektywny współczynnik załamania światła. Występują dwa przypadki apodyzacji opisane w pracy [13], bez stałej wartości współczynnika załamania w obszarze siatki (tzw. non-true apodization) oraz ze stałym efektywnym współczynnikiem załamania w obszarze siatki (tzw. true apodization). Przypadki te przedstawiono na rysunku 1 i rysunku 2.

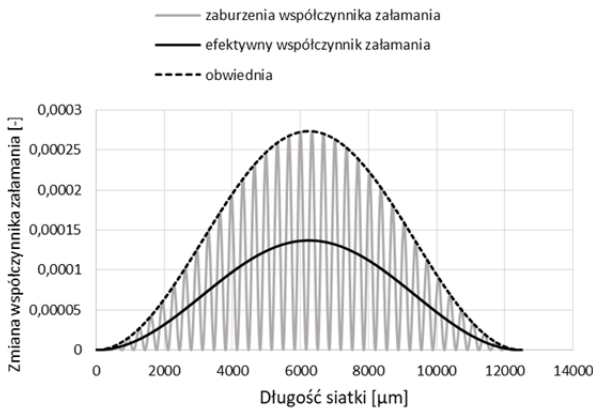


Rys.1. Apodyzacja ze składową stałą współczynnika załamania światła w obszarze siatki (true apodization)

W celu wykonania analizy wpływu zmiany parametrów fizycznych siatki na jej charakterystyki spektralne, wykonano obliczenia numeryczne w środowisku OptiGrating Optiwave Systems Inc. Przeprowadzone badania dotyczyły parametrów takich jak, chirp oraz

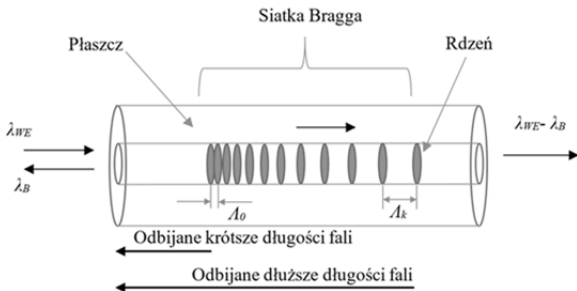
apodyzacja siatki. Chirp siatki Bragga jest to zmiana długości okresu struktury Bragga na jej długości, co ukazuje poniższa zależność:

$$(1) \quad chirp = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} \left[\frac{nm}{cm} \right].$$



Rys.2. Apodyzacja bez składowej stałej współczynnika załamania światła w obszarze siatki (non-true apodization)

Na rysunku 3 przedstawiona została zasada działania siatki Bragga o zmiennym okresie struktury.

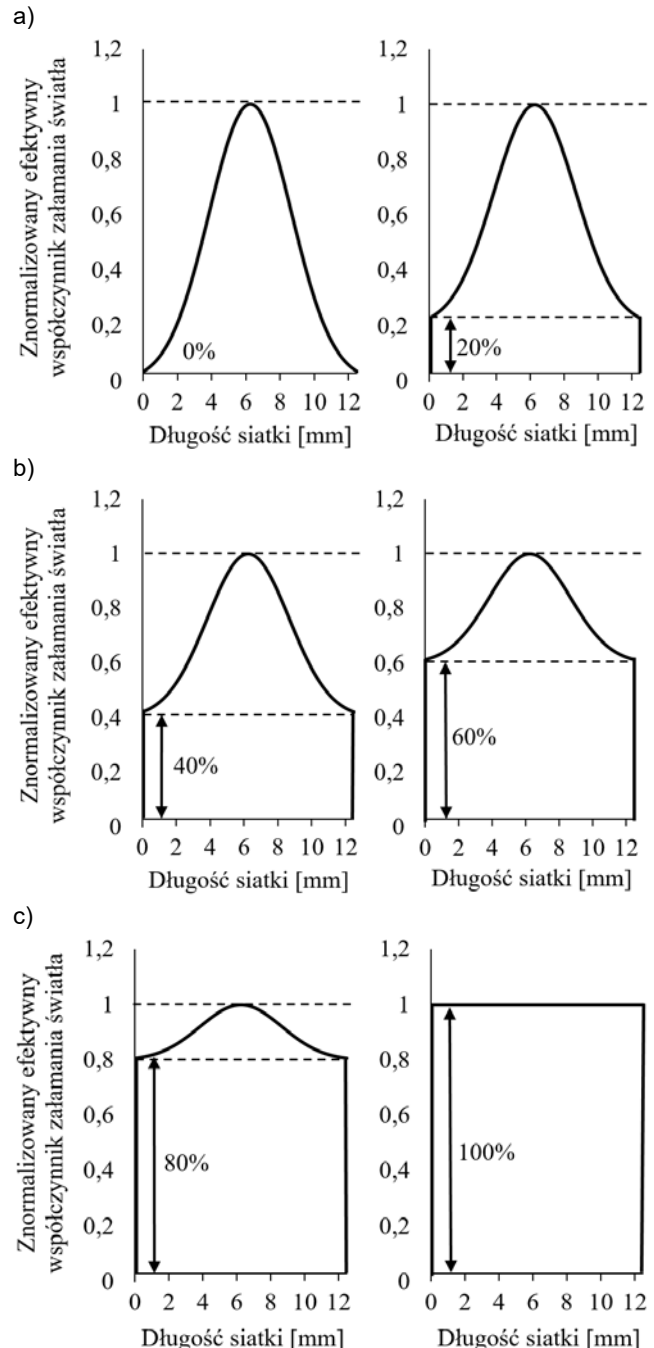


Rys.3. Schemat i zasada działania siatki chirpowej

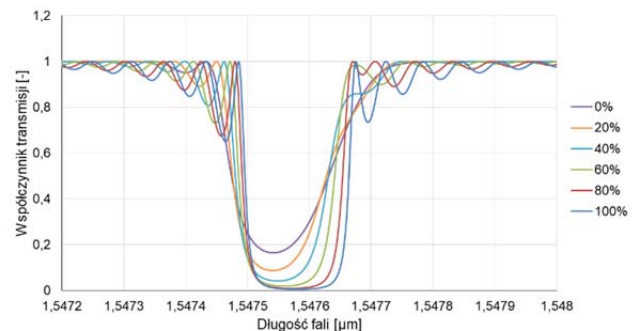
Dla siatki chirpowej krótsze długości fali odbijane są przez część początkową siatki w której występuje mniejszy okres zmian współczynnika załamania światła (A_0), dłuższe długości fali odbijane są w części końcowej siatki gdzie okres zmian współczynnika załamania światła jest większy (A_k).

Do obliczeń przyjęto średnicę rdzenia równą 9 μm , średnicę płaszczka 125 μm , współczynnik załamania rdzenia 1,4672, współczynnik załamania płaszczka 1,444 długość siatki 12,5 mm oraz amplitudę modulacji współczynnika załamania równą 0,000137. Obliczenia numeryczne zostały wykonane z wykorzystaniem oprogramowania OptiGrating. Jest to środowisko umożliwiające projektowanie oraz analizę czujników opartych na światłowodowych siatkach Bragga. Wykorzystuje teorię modów sprzężonych CMT (ang.: *coupled mode theory*) [14][15]. Program zawiera w sobie moduły równań modów sprzężonych CME (ang.: *coupled mode equations*). Następnie metodą macierzy przejścia TMM (ang.: *transfer matrix method*) [16] rozwiązywane są równania modów sprzężonych. Metoda TMM wykorzystywana jest w optyce jak również w akustyce do analizowania fal elektromagnetycznych i akustycznych przechodzących przez wielowarstwowe struktury zwane również strukturami periodycznymi.

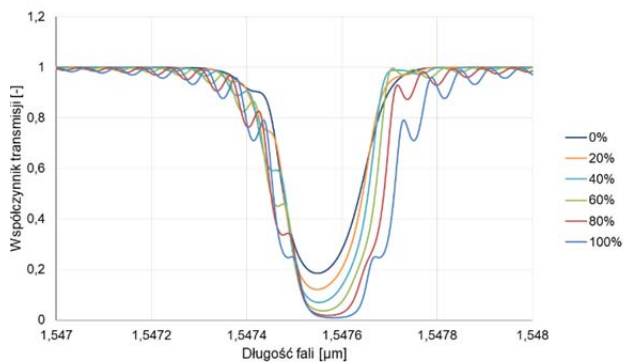
Symulacje zostały przeprowadzone dla sześciu funkcji apodyzacyjnych różniących się procentową zawartością składowej stałej współczynnika załamania światła 0%, 20%, 40%, 60%, 80% oraz 100%. Sposób wyznaczania wartości składowej stałej przedstawia rysunek 4 [17].



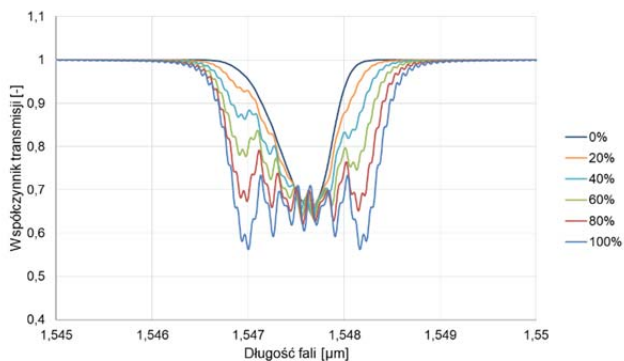
Rys.4. Procentowa wartości składowej stałej współczynnika załamania światła a) składowa stała równa 0%, i 20%, b) składowa stała równa 40% i 60%, c) składowa stała równa 80% i 100%



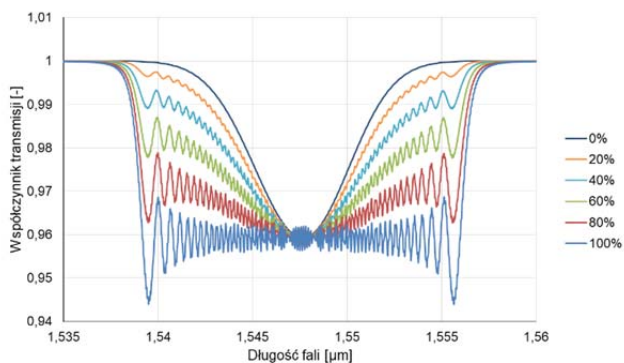
Rys.5. Widma transmisyjne siatki bez chirpu dla różnych procentowych zawartości składowej stałej współczynnika załamania światła



Rys.6. Widma transmisyjne siatki z chirpem 0,05 nm/cm dla różnych procentowych zawartości składowej stałej współczynnika załamania



Rys.7. Widma transmisyjne siatki z chirpem 0,5 nm/cm dla różnych procentowych zawartości składowej stałej współczynnika załamania



Rys.8. Widma transmisyjne siatki z chirpem 5 nm/cm dla różnych procentowych zawartości składowej stałej współczynnika załamania

Tabela 1. Wartości parametru *FWHM* dla różnych procentowych zawartości składowej stałej współczynnika załamania siatek bez chirpu z chirpem 0,05 nm/cm, 0,5 nm/cm i 5 nm/cm

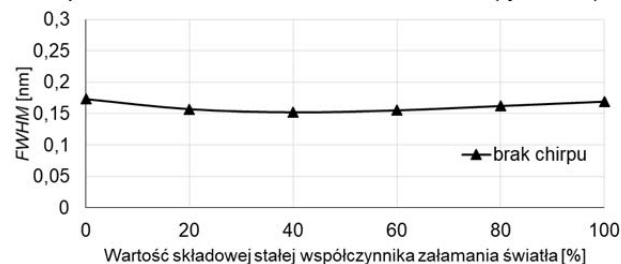
	brak chirpu	0,05 nm/cm	0,5 nm/cm	5 nm/cm
	<i>FWHM</i>			
[%]	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
0	0,173	0,178	0,605	5,775
20	0,157	0,173	0,655	6,65
40	0,152	0,18	0,91	8
60	0,155	0,221	1,345	16,3
80	0,162	0,237	1,495	17,025
95	0,168	0,25	1,595	17,15
100	0,169	0,253	1,605	17,15

Dla zdefiniowanych funkcji apodyzacyjnych uwzględniających wartość składowej stałej współczynnika załamania światła zostały uzyskane widma transmisyjne

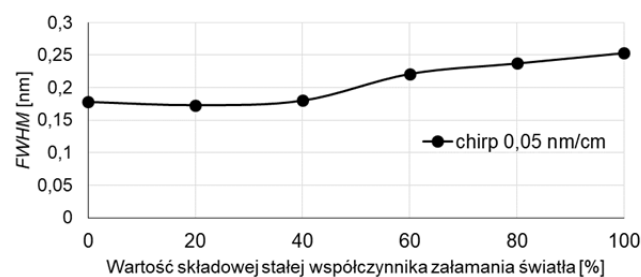
siatek bez chirpu oraz z chirpem: 0,05 nm/cm, 0,5 nm/cm, 5 nm/cm, co zostało przedstawione na rysunkach 5-8.

Na podstawie uzyskanych widm struktur Bragga dla każdej charakterystyki spektralnej wyznaczony został parametr *FWHM*. Wyniki zostały zamieszczone w tabeli 1

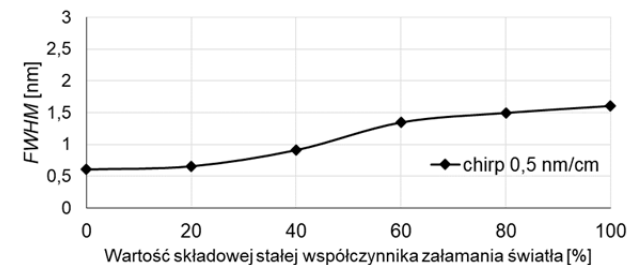
W celu łatwiejszego zobrazowania wyniki charakterystyk zależności parametru *FWHM* od procentowej zawartości współczynnika załamania światła dla siatki bez chirpu oraz z chirpem 0,05 nm/cm, 0,5 nm/cm i 5 nm/cm (rys. 9-12).



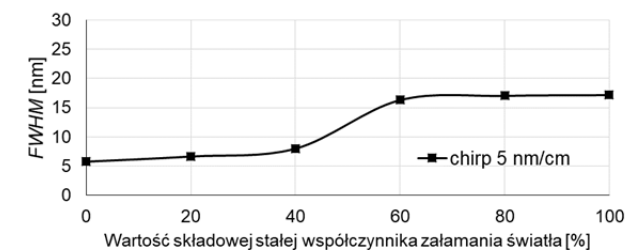
Rys.9. Zależność wartości parametru *FWHM* od wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki bez chirpu



Rys.10. Zależność wartości parametru *FWHM* od wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki z chirpem 0,05 nm/cm



Rys.11. Zależność wartości parametru *FWHM* od wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki z chirpem 0,5 nm/cm



Rys.12. Zależność wartości parametru *FWHM* od wartości składowej stałej efektywnego współczynnika załamania światła dla siatki z chirpem 5 nm/cm

Wnioski

Na podstawie uzyskanych widm można zauważyć, iż apodyzacja minimalizuje wstęgi boczne dla siatek bez chirpu jak również dla siatek z chirpem. Przy małych zawartościach składowej stałej współczynnika załamania

światła zawierającej się w przedziale 0 do 20% udział wstęg bocznych dla siatki jednorodnej wynosi do 10%. Przy wartościach składowej stałej na poziomie 100% udział wstęg bocznych jest na poziomie 35%.

Apodyzacja skraca efektywną długość siatki i wpływa na zmianę wartości parametru *FWHM*. Najmniejszą wrażliwość parametru *FWHM* na zmianę wartości składowej stałej współczynnika załamania światła wykazuje siatka jednorodna, parametr ten zmienia się w zakresie od 0,152 nm do 0,173 nm czyli o 21 pm. Dla siatki z chirpem 0,05 nm/cm różnica ta wynosi 80 pm. Największe różnice wartości parametru *FWHM* występują dla siatki o chirpie 0,5 nm/cm oraz 5 nm/cm i wynoszą one odpowiednio 1 nm oraz 11,375 nm. Przeprowadzona analiza numeryczna potwierdziła możliwość kształtowania widm optycznych siatek Bragga i zmianę ich parametru *FWHM* poprzez zmianę udziału procentowej wartości składowej stałej współczynnika załamania światła. Zmiana funkcji apodyzacyjnej w rzeczywistym układzie do wytwarzania struktur Bragga związana jest z modyfikacją tego układu lub zakupem odpowiedniej maski fazowej o zmiennej wydajności dyfrakcyjnej.

Autorzy: dr inż. Jacek Klimek, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroniki i Techniki Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: j.klimek@pollub.pl;

LITERATURA

- [1] Ghosh Ch., Priye V., Dispersion compensation in a 24×20 Gbps DWDM system by cascaded chirped FBGs. *Optik* (2018) 164, 335–344
- [2] Lo Presti D., Massaroni C., Sofia C., Leitão J., De Fátima Domingues M., Sypabekova M., Barrera D., Floris I., Massari L., Oddo C., M., Sales S., Iordachita I., I., Tosi D., Schena E., Fiber Bragg Gratings for Medical Applications and Future Challenges: A Review, *IEEE Access*, 8 (2020), 156863 - 156888
- [3] P. Arasu, A. S. M. Noor, A. A. Shabaneh, S. H. Girei, M. A. Mahdi, H. N. Lim, H. A. Abdul Rashid, M. H. Yaacob, Absorbance properties of gold coated fiber Bragg grating sensor for aqueous ethanol, *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, (2014) Vol 9
- [4] Teixeira A.L.J.; Lima M.J.N.; Frazao O.; Ferreira da Rocha J.R. Fiber Bragg gratings for telecommunications, *IEEE*, (2001)
- [5] Othonos A. and Kalli K., Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, (1999).
- [6] Kisała, P., Metrological conditions of strain measurement optoelectronic method by the use of fibre Bragg gratings. *Metrology and Measurement Systems*, (2012) 19(3), 471–480
- [7] Kisała P., Cieszczyk S., Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head. *Applied Optics*, (2015) 54(10)
- [8] Anderson D. Z., Mizrahi V., Erdogan T., and White A. E., Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element. *Electron. Lett.*, (1993) 29(6)
- [9] Ascorbe J., Corres J. M., Villar I. and Matias I. R., Fabrication of Long Period Gratings by Periodically Removing the Coating of Cladding-Etched Single Mode Optical Fiber Towards Optical Fiber Sensor Development, *Sensors* (2018) (Basel) 18(6)
- [10] Othonos A. and Lee X., Novel and improved methods of writing Bragg gratings with phase masks. *IEEE Photonics Technology Letters* 7(10), (1995), 1183 – 1185
- [11] Dziubiński G., Kisała P., Analiza charakteru zmian parametrów apodyzowanych siatek Bragga spowodowanych zmiennym rozkładem wiązki laserowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 10, 214-217
- [12] Zychowicz Ł., Kisała P., Klimek J., Methods of producing apodized fiber bragg gratings and examples of their applications, *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, (2018) 1, 60-63
- [13] H. Singh, M. Zippin, Apodized fiber Bragg gratings for DWDM applications using uniform phase mask, *IEEE*, (1998)
- [14] T. Erdogan, Fiber Grating Spectra, *J. Lightwave Technol.*, vol.15, No.8, (1997), 1277-1294.
- [15] Hwang G.-S., Huang D.-W., Ma Ch.-Ch., Numerical Study on Reflection Spectra of an Apodized Fiber Bragg Grating Subjected to Strain Gradients. *Procedia Engineering*, (2014) 79, 631–639
- [16] Kashyap R., Fiber Bragg gratings, Optics And Photonics. *Academic Press*, (1999)
- [17] Klimek J., Badanie wpływu parametrów procesu wytwarzania periodycznych struktur światłowodowych na ich charakterystyki widmowe. Rozprawa doktorska, promotor dr hab. inż. Piotr Kisała, prof. Politechniki Lubelskiej, promotor pomocniczy dr hab. inż. Sławomir Cieszczyk Politechnika Lubelska (2021)