

Analiza charakteru zmian parametrów apodyzowanych siatek Bragga spowodowanych zmiennym rozkładem wiązki laserowej

Streszczenie. Artykuł dotyczy analizy możliwości wpływania na kluczowe parametry siatek Bragga jeszcze na etapie ich projektowania przed procesem zapisu. Zaproponowano i zdefiniowano parametry siatek, które są kluczowe przy ich wykorzystaniu w układach czujnikowych oraz systemach telekomunikacyjnych. W artykule zaprezentowano sposób modelowania siatek Bragga metodą macierzy przejścia (ang. Transfer Matrix Method). Przedstawiono funkcje apodyzacyjne, które mogą zostać opcjonalnie zastosowane podczas zapisu siatki. Zbadane zostały one pod kątem ich wpływu na charakterystyki widmowe, a także podstawowe parametry modelowanej siatki.

Abstract. This article concerns the analysis of Bragg grating key parameters and their influence on final gratings spectral characteristic. It proposed and defined the gratings parameters that are critical to their use in sensor systems and telecommunication systems. This article presents a simulation of fiber Bragg gratings using transfer matrix method. Apodization profiles have been discussed according to their function parameter. Different fiber gratings lengths were analyzed according to their reflection and transmission spectra. **The analysis of Bragg grating key parameters and their influence on final gratings spectral characteristic**

Słowa kluczowe: światłowodowe siatki Bragga, metoda macierzy przejścia, równania modów sprzężonych, apodyzowane siatki Bragga
Keywords: fiber Bragg grating, coupled mode theory, transfer matrix method, apodized fiber Bragg grating, wavelength division multiplexing.

Wstęp

Przez ostatnie lata obserwujemy znaczący rozwój w zakresie sieci telekomunikacyjnej. To zainteresowanie wymusza jeszcze szerszą i dokładniejszą analizę podzespołów optycznych, a także możliwości ich zastosowania. Na uwagę z całą pewnością zasługują światłowodowe siatki Bragga. Dają one ogromne możliwości dzięki temu, że posiadają zdolność odbijania światła o określonej długości fali przy jednoczesnym przepuszczaniu prawie bezstratnie pozostałego spektrum [1]. Wielkość tych strat może zostać wyznaczona np. poprzez poziom tzw. wstęg bocznych widma spektralnego, czy szerokość połówkową. Zarówno liczba jak i wielkość wstęg może zostać zniwelowana poprzez właściwe zastosowanie różnych funkcji apodyzacyjnych [2].

Problematyka apodyzacji siatek Bragga poruszana jest w wielu artykułach [3]. W tym jednak skoncentrowano się na takich charakterystycznych parametrach siatek, które są szczególnie przydatne przy zastosowaniu ich w telekomunikacji i w systemach pomiarowych

Dobór odpowiedniej siatki wymaga ścisłej znajomości jej parametrów wyjściowych. Każdorazowe wytwarzanie takich elementów optycznych jest dość kosztowne. Poprzez zastosowanie teorii modów sprzężonych i metody macierzy przejść możliwe jest oszacowanie działania siatki Bragga wytworzonej według zadanych parametrów jeszcze na etapie jej projektowania [4-6].

Modelowanie siatek Bragga zapisanych apodyzowaną wiązką laserową

Metoda TMM (ang. Transfer Matrix Method) pozwala wyznaczyć charakterystykę spektralną elementów optycznych w oparciu o teorię modów sprzężonych oraz macierzowy opis fali elektromagnetycznej, która przechodzi poprzez kolejne periody światłowodu [1].



Rys. 1. Wizualizacja siatki Bragga z wykorzystaniem macierzy przejścia

W rozwiązaniu tym należy przyjąć, że cała długość siatki L , zostaje podzielona na ściśle określoną liczbę sekcji N (rys. 1), tak aby każda w ten sposób utworzona sekcja o długości $\Delta z = L / N$ mogła być traktowana jako jednorodna [7]. Macierz przejścia opisująca i -tą sekcję zdefiniowana będzie poprzez:

$$(1) \quad T_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \Delta z) - \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sin(\gamma \Delta z) & \cosh(\gamma \Delta z) - \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) \end{bmatrix}$$

Dla powyższej definicji przyjmuje się ponadto, że κ jest składową zmienną współczynnika sprzężenia dla kontrastu współczynnika załamania $v = 1$, analizowanej długości fali λ i przyjętej funkcji apodyzacyjnej $g(z)$:

$$(2) \quad \kappa = \frac{\Pi}{\lambda} \cdot v \cdot \bar{\delta}_{eff}(z)$$

$$(3) \quad \bar{\delta}_{eff}(z) = \bar{\delta}_{eff} \cdot g(z)$$

Całkowity współczynnik sprzężenia określony jest poprzez wartość $\hat{\sigma}$, dla której λ_B jest długością fali Bragga, natomiast n_{eff} jest efektywnym współczynnikiem załamania światła.

Wartość $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ w przypadku siatki jednorodnej można przyjąć jako 0.

$$(4) \quad \hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$$

$$(5) \quad \delta = 2\Pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$$

$$(6) \quad \sigma = \frac{2\kappa}{v}$$

Parametr γ dla macierzy przejścia wyznacza się następująco:

$$(7) \quad \gamma = \sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2}$$

Charakterystyka całej siatki może zostać opisana poprzez:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N T_i \cdot \begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} R_N \\ S_N \end{bmatrix}$$

$$(9) \quad T = [T_N] \cdot [T_{N-1}] \cdots [T_3] \cdot [T_2] \cdot [T_1]$$

Na podstawie wartości parametrów macierzy **T** możemy wyznaczyć charakterystykę fali odbitej (10) oraz transmitowanej (11) – przyjmuje się wtedy, że element T_{ij} wskazuje na wartość dla elementu pod i -tą kolumną oraz j -tym wierszem całkowitej macierzy przejścia.

$$(10) \quad R = \frac{T_{21}}{T_{11}}$$

$$(11) \quad S = \frac{1}{T_{11}}$$

Podczas symulacji siatek Bragga na wartość składowej zmiennej współczynnika sprzężenia κ wpływ ma dobór funkcji obwiedni współczynnika załamania światła (2). Na potrzeby niniejszego artykułu skorzystano z następujących funkcji apodyzacyjnych:

1. Funkcja jednorodna (brak apodyzacji)

$$(12) \quad g(z) = 1$$

2. Funkcja tangens hiperboliczny

$$(13) \quad g(z) = \tanh\left(\frac{\alpha z}{L}\right) \cdot \tanh\left[\alpha \cdot \left(1 - \frac{\alpha z}{L}\right)\right] + 1 - \tanh^2\left(\frac{\alpha}{L}\right)$$

3. Funkcja Gaussa

$$(14) \quad g(z) = \exp\left\{-4 \cdot \log(2) \cdot \left[\frac{z - \frac{L}{2}}{\alpha L}\right]^2\right\}$$

Badanie wpływu apodyzacji siatek na ich charakterystyki widmowe

Modelowanie siatek za pomocą metody macierzy przejść pozwala na uzyskanie charakterystyk odbiciowych światłowodowych siatek Bragga [8]. Zgodnie ze wzorem (2) przy numerycznej symulacji uwzględnić można nie tylko podstawowe parametry siatki, ale również różne funkcje obwiedni współczynnika załamania światła. Właściwy dobór funkcji apodyzacyjnej pozwala zoptymalizować charakterystykę siatki pod względem jej docelowego zastosowania np. jako filtr optyczny [7] co jest szczególnie istotne w systemach telekomunikacyjnych np. w multiplexerach optycznych. W związku z tym, w niniejszym artykule przy ocenie skuteczności działania apodyzacji wybrano takie kryteria i parametry jak pochylenie zbocza, wagę piku głównego światła odbitego, wytlumienie wstęg bocznych.

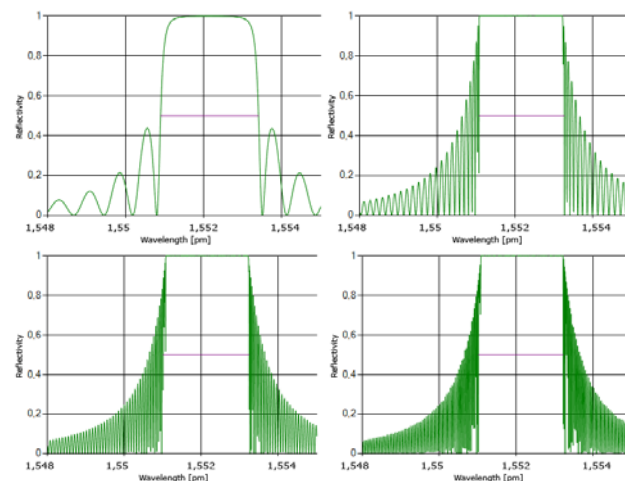
Do przeprowadzonych symulacji przyjęto ściśle określone wartości parametrów – zgodnie z tabelą 1. Wielkości przyjęte w tabeli odpowiadają wartościom parametrów siatek stosowanych w istniejących układach pomiarowych.

Badania numeryczne wykonywane dla zmieniających się wartości długości siatki (rys. 2) pozwalają zaobserwować wpływ tego parametru na docelową wizualizację charakterystyki spektralnej.

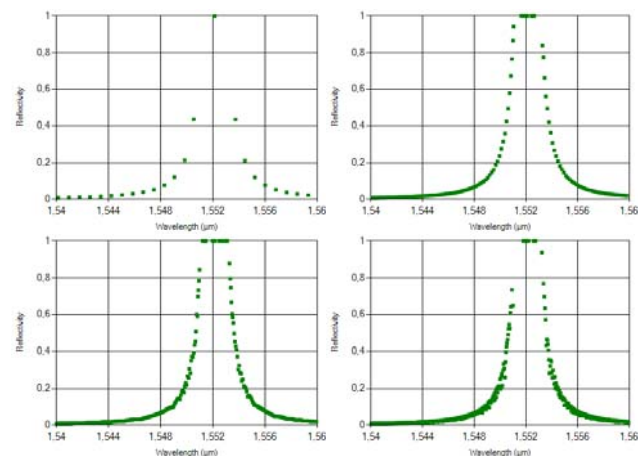
Zwiększenie długości siatki powoduje zwiększenie liczby wstęg bocznych - dla przyjętego przedziału długości fali (1540 – 1560 nm) ich liczba wynosi 23, 131, 255, 356 dla długości odpowiednio 1 mm, 5 mm, 10 mm oraz 15 mm.

Tabela 1. Wielkości charakterystyczne parametrów siatek

Parametr	Symbol	Wartość
Długość	L	1 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm
Efektywny współczynnik załamania	n_{eff}	1,447
Długość fali Bragg'a	λ_B	1550 nm
Visibility	V	1
Zmiana współczynnika załamania	δ_n	0,001; 0,002; 0,003



Rys. 2. Wykres światła odbitego dla różnych długości fali przy zmieniającej się długości siatki $L = 1$ mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm



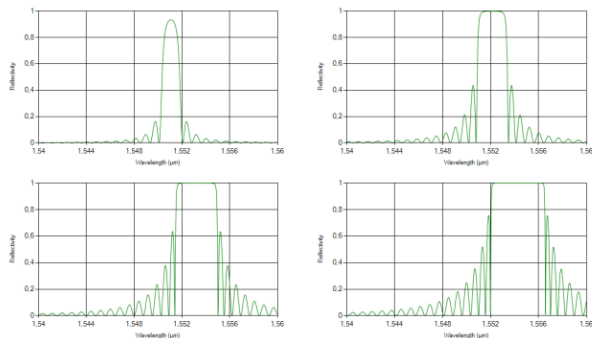
Rys. 3. Wykres rozkładu wartości maksymalnych (maksimów lokalnych) światła odbitego dla różnych długości fali przy zmieniającej się długości siatki $L = 1$ mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm

Przy zmieniającej się długości siatki zauważyć można profil wygięcia wstęgi głównej. Przy długości 1 mm wyraźnie widać gładkie zaokrąglenie obrzeży przy osiągnięciu wartości maksymalnej. Nie widać tego zjawiska przy większych długościach siatki.

Dla każdej z przyjętych długości zaobserwować można, że wizualizacja kolejnych lokalnych maksimów dla poszczególnych długości fal stanowi element tego samego wykresu. Zostało to przedstawione na rysunku 3.

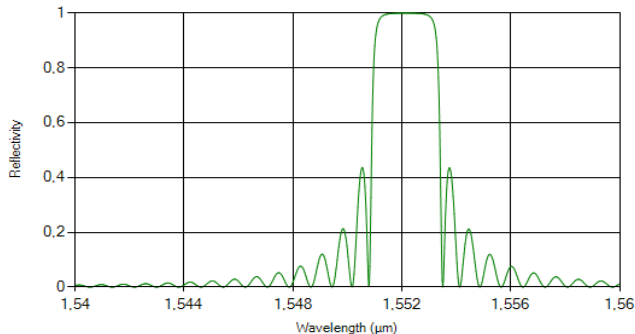
Podczas analizy numerycznej metodą macierzy przejścia ważną rolę odgrywa zmiana współczynnika

załamania (3), który przyjmuje wielkości rzędu 0,0001 dla siatek słabych oraz 0,003 dla siatek mocnych [9] (rys. 4). Przy zwiększającej się wartości współczynnika zaobserwować można zwiększenie się szerokości półwłokowej, zmianę poziomu wstęg bocznych, a także wysokość pików głównego.

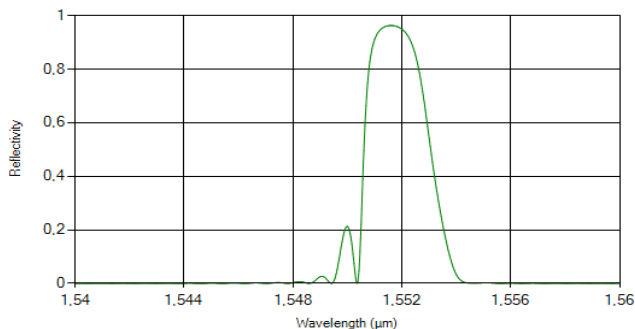


Rys. 4. Wykres światła odbitego dla różnych wartości współczynnika załamania światła $\bar{\delta}_{eff} = 1 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$ ($L = 1 \text{ mm}$)

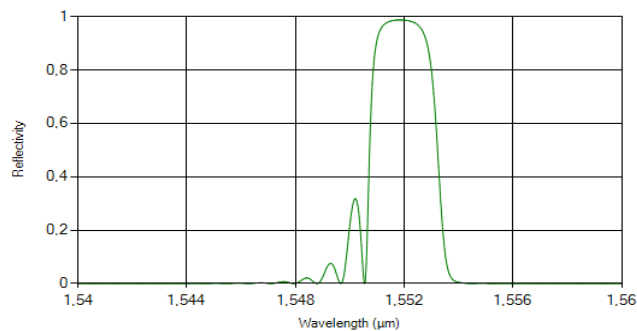
Zastosowanie funkcji apodyzowanych, pozwala na uzyskanie charakterystyk, których tzw. wstęgi boczne [10] są znacząco zniwelowane. Dobór funkcji jak i ich parametrów jest kluczowy pod względem optymalizacyjnym i pozwala uzyskać lepsze parametry siatki. Na potrzeby tego artykułu skoncentrowano się na funkcji jednorodnej (12) oraz dwóch funkcjach apodyzacyjnych (f. Gaussa (14) oraz tangens hiperboliczny (13)) mając przy tym na uwadze zmieniające się wartości współczynnika α_1 oraz α_2 . Światło odbite, które zostało przeprowadzone przez nieapodyzowaną siatkę charakteryzuje się dużą liczbą wstęg bocznych (rys. 5). Na rysunkach przedstawiono wykres światła odbitego dla funkcji Gaussa dla parametru $\alpha_1 = 0,6$ (rys. 6) oraz funkcję tangens hiperboliczny dla parametru $\alpha_2 = 4$ (rys. 7).



Rys. 5. Wykres światła odbitego $L = 1 \text{ mm}$ przy braku apodyzacji



Rys. 6. Wykres światła odbitego $L = 1 \text{ mm}$ przy apodyzacji funkcją Gaussa



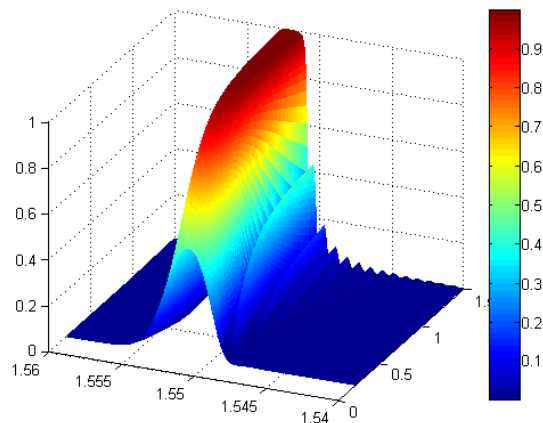
Rys. 7. Wykres światła odbitego $L = 1 \text{ mm}$ przy apodyzacji funkcją Tangens Hiperboliczny

Podczas doboru funkcji apodyzacyjnej należy skoncentrować się również na jej parametrach. Ich wybór może nieść za sobą kluczowe zmiany w charakterystyce odbiciowej.

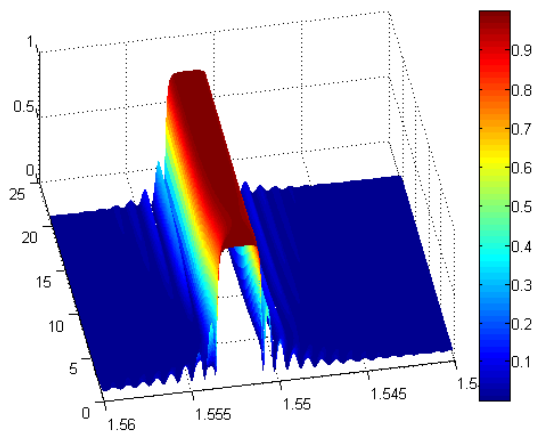
Symulacja metodą macierzy przejść pozwoliła na wizualizację światła odbitego w zależności od doboru wartości parametru α_1 dla funkcji Gaussa (rys. 8). Z poniższego wynika, że ustawienie parametru $\alpha_1 > 1$ nie niesie za sobą dużej zmiany w kontekście zarówno piku głównego jak i samych wstęg bocznych. Wartość $\alpha_1 = 0,3$ to punkt w którym wstęgi boczne praktycznie zanikają (ich poziom znajduje się poniżej 5%) co jest jednak kosztem znaczącego obniżenia piku głównego do poziomu 45%.

W przypadku funkcji tangens hiperboliczny (rys. 9) dla symulacji wartość parametru α_2 nie wpływa w znaczący sposób na wysokość piku głównego – utrzymuje się on bowiem na całym przedziale analizowanych zmian na stałym poziomie powyżej 98%. Z punktu widzenia lewych wstęg bocznych najkorzystniejszym jest ustawienie parametru $\alpha_1 < 10$ (w przypadku większej wartości znacząco różnie ich poziom – niemal do sytuacji w której nie zastosowano żadnej funkcji apodyzacyjnej).

Przedstawione charakterystyki widmowe siatek Bragga pozwalają na poglądową ocenę skuteczności zadanej funkcji apodyzacyjnej. Do prawidłowego zaobserwowania zależności wynikających z konfiguracji parametrów apodyzacyjnych należy również mieć na uwadze szerszą grupę wyjściowych parametrów siatek, np. szerokość półwłokową czy wartość wytłumienia wstęg bocznych. To od nich zależy jak bardzo efektywna będzie dana apodyzacja i czy docelowa siatka znajdzie swoje zastosowanie w rzeczywistości.



Rys. 8. Wykres światła odbitego dla zmieniającej się wartości współczynnika $\alpha_1 = 0,2 - 1,5$ dla funkcji Gauss'a



Rys. 9. Wykres światła odbitego dla zmieniającej się wartości współczynnika $\alpha_2 = 1 - 21$ dla funkcji Tangens Hiperboliczny

Wnioski

Wykorzystana metoda macierzy przejścia pozwala na budowę modelu siatki i pozwala na analizę właściwości siatek Bragga zarówno pod kątem charakterystyki spektralnej jak i poszczególnych parametrów siatki. Przyjęte funkcje apodyzacyjne mają wpływ na charakterystykę światła odbitego, co przedstawione zostało na odpowiednich wykresach. Poprzez zastosowanie symulacji metodą TMM już na wczesnym etapie możliwa jest ocena użyteczności siatki do konkretnych jej zastosowań.

Nie należy jednoznacznie wskazywać, która z funkcji apodyzacyjnej i z jakimi parametrami jest najlepsza. Przy doborze parametru apodyzacji należy skoncentrować się nad docelowym zastosowaniem siatki. Skuteczność zadanej funkcji czy parametru w wartości FWHM nie przekłada się jednoznacznie na liczbę czy poziom wstęg bocznych. Z tego powodu podczas doboru funkcji apodyzacyjnej należy uwzględnić wszystkie niezbędne kryteria – nawet te, które nie zostały poruszone w niniejszym artykule, a mogą być bardziej istotne z punktu praktycznego wykorzystania siatki.

Parametry funkcji apodyzacyjnych tangens hiperboliczny oraz Gauss dla pewnych wartości parametru α_1 , α_2 zachowują charakterystykę bardzo zbliżoną do siatki nieapodyzowanej co wnioskować można z ich wykresu funkcji.

Dalsze badania z powodzeniem rozszerzyć można o inne funkcje apodyzacyjne. Skoncentrować się przy tym można na konkretnych wartościach parametrów takich jak szerokość połówkowa czy poziom wstęg bocznych.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Dziubiński, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: dziubinski.grzegorz@pollub.edu.pl;
dr hab. inż. Piotr Kisała, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: p.kisala@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Khalid K. S., Zafrullah M., Bilal S. M., Mirza M. A., Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor, *Journal of Optical Technology*, 79 (2012), nr 10, 667-673
- [2] Abdullina S. R., Vlasov A. A., Suppression of side lobes in the fiber Bragg grating reflection spectrum, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 50 (2014), nr 1, 75-86
- [3] Wójcik W., Kisała P., The method for the recovery of the apodization function of the fiber Bragg gratings on the basis of its spectra, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 10, 127-130
- [4] Kisała P., Metrological conditions of strain measurement optoelectronic method by the use of fibre Bragg gratings, *Metrology and Measurement Systems*, 19 (2012), nr 3, 471-480
- [5] Wójcik W., Kisała P., Modelowanie struktur światłowodowych siatek Bragga wykorzystywanych w układach czujnikowych, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 53 (2007), nr 11, 10-14
- [6] Kisała P., Ciężczyk S., Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head, *Applied Optics*, 54 (2015), nr 10, 2677-2687
- [7] Eldada L., Yin S., Poga C., Glass C., Blomquist R., Norwood R. A., Integrated multichannel OADM's using polymer bragg grating MZI's, *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (1998), nr 10, 1416-1418
- [8] Kisała P., Generation of a zone chirp in uniform Bragg grating as a way of obtaining double functionality of a sensor, *Metrology and Measurement Systems*, 19 (2012), nr 4, 727-738
- [9] Udoh S., Njuguma J., Prabhu R., Modelling and Simulation of Fiber Bragg Grating Characterization for Oil and Gas Sensing Applications, *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 15 (2014), nr 5, 213-218
- [10] Ugale S., Mishra V., Fiber Bragg Grating Modeling, Characterization and Optimization with different index profiles, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (2010), nr 9, 4464-4468