

**Zdzisław KACZMAREK, Małgorzata DETKA**  
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

## Wpływ gradientu odkształcenia światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie na jej charakterystyki spektralne

Prof. dr hab. inż. Zdzisław KACZMAREK

Jest kierownikiem Katedry Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Jego tematyka naukowo-badawcza obejmuje sensorykę elektroniczną i światłowodową, wybrane zagadnienia miernictwa dynamicznego i odtwarzanie sygnałów pomiarowych. Opublikował z tego zakresu ponad 100 artykułów i referatów naukowych.



e-mail: z.kaczmarek@tu.kielce.pl

Dr inż. Małgorzata DETKA

Jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki specjalności Informatyka Politechniki Świętokrzyskiej. Stopień doktora na tym samym wydziale uzyskała w 2006 r. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych PŚk w Kielcach. Jej zainteresowania naukowe obejmują pomiary z użyciem światłowodowych czujników pomiarowych a zwłaszcza metody odtwarzania sygnałów. Jest autorem kilku artykułów o wymienionej tematyce.



e-mail: m.detka@tu.kielce.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i symulacji wpływu gradientu odkształcenia siatki Bragga o stałym okresie na jej charakterystyki widmowe: pasmo 3 decybelowe i współczynnik odbicia mocy. Zakres zmian gradientu odkształcenia wynosił od 0 do  $\pm 27 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Wyniki pomiarów wskazują na liniową zależność pasma 3 dB siatki od stałego gradientu odkształcenia oraz brak jego wpływu na współczynnik odbicia mocy siatki w badanym zakresie jego zmian. Wyniki tych badań mogą być przydatne przy konstrukcji czujników wielkości mechanicznych z siatkami Bragga, w których elementem sprężystym jest belka zginana oraz w pomiarach odkształceń.

**Słowa kluczowe:** siatka Bragga, gradient odkształcenia, parametry widma mocy.

### Influence of the strain gradient of a uniform fiber grating on its spectral characteristics

#### Abstract

Experimental and simulation results of the influence of the strain gradient of a uniform fiber Bragg grating on its spectral characteristics, the 3-dB bandwidth and reflectivity, are presented in the paper. For experiments a 10 mm long grating embedded in a bended cantilever (Fig. 1) was used. The strain and the strain gradient of the cantilever were caused by a concentrated force acting on the cantilever free end. A change of the kind of strain (stretching or compression) and the strain gradient sign was achieved by reversing the cantilever in the holder. The range of the strain gradient equals  $0 \pm 27 \mu\text{e}/\text{mm}$ . The measurements were taken in a setup shown in Fig. 2. Using the transfer matrix method derived from the coupled mode theory, the changes of the grating reflected spectrum caused by the strain and the strain gradient in it were simulated [5]. The obtained results of measurements and simulations show that increase in the strain gradient causes increase in the 3-dB bandwidth of the grating reflected beam both for a positive and negative strain gradient (Figs. 3-5). The dependence of the 3-dB bandwidth on the strain gradient is linear and symmetric with respect to the y-axis. The measurement results confirm this feature in the range  $\pm 8,5 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Outside this range, increase in the 3-dB bandwidth for a negative strain gradient is smaller than for a positive one. For the investigated range of the grating strain gradient, its influence on the grating reflectivity was not observed (Fig. 6). This last feature is important in detection of the grating signals by means of optical wavelength discriminators.

**Keywords:** fiber Bragg grating, strain gradient, power spectrum parameters.

## 1. Wprowadzenie

Światłowodowe siatki Bragga w miernictwie wielkości nieelektrycznych są wykorzystywane jako przetworniki pomiarowe odkształcenia, temperatury i ciśnienia [1]. Wielkości te oddziałując na stałą siatkę i jej efektywny współczynnik załamania zmieniają centralną długość fali wiązki światła odbijanej przez siatkę.

Jeżeli rozkład wielkości przetwarzanej przez siatkę jest równomierny wzdłuż jej długości, to zależność centralnej długości siatki w funkcji wielkości przetwarzanej jest liniowa w szerokim zakresie zmian wielkości przetwarzanej, a kształt widma wiązki odbitej przez siatkę nie ulega zmianie. Celem uzyskania takiego zachowania się siatek wykorzystywanych w czujnikach wielkości fizycznych należy wybrać taką konstrukcję przetwornika mechanicznego i sposób instalowania na nim siatek, aby uzyskać równomierny stan odkształcenia przy przetwarzaniu wielkości mierzonej. Przykładem takich przetworników mogą być podłużne elementy sprężyste czujników sił i ciśnień, o prostym rodzaju deformacji wywołanych wymuszeniem, na powierzchni których w odpowiedniej odległości od punktu przyłożenia wymuszenia, uzyskuje się równomierny stan odkształceń.

Detekcję sygnałów wyjściowych siatek w takich przypadkach realizuje się poprawnie wykorzystując znane ogólnie układy optycznych detektorów długości fali [1].

Jeżeli rozkład wielkości przetwarzanej przez siatkę jest nierównomierny wzdłuż jej długości, to zależność centralnej długości siatki w funkcji wielkości przetwarzanej może wykazywać nieliniowość, a kształt widma wiązki odbitej ulega zmianie. Zachodzi to w przypadku pomiarów odkształceń zmiennych w czasie oraz nierównomiernych odkształceń statycznych (z gradientem odkształcenia). Detekcja sygnałów wyjściowych siatek Bragga w tych zastosowaniach stwarza określone trudności, szczególnie przy zastosowaniu prostych i tanich optycznych dyskryminatorów długości fali [1].

Badania wpływu nierównomiernego odkształcenia siatek Bragga na jej charakterystyki spektralne prowadziło wielu autorów, głównie pod kątem tego wpływu na dokładność pomiaru odkształceń i możliwości pomiaru nierównomierności odkształceń siatkami Bragga [2-4].

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wpływu gradientu odkształcenia w siatce Bragga o stałym okresie na jej charakterystyki wyjściowe i konsekwencji tego wpływu na detekcję sygnału wyjściowego siatki. Badania wykonano dla małego zakresu zmian gradientu odkształcenia, który występuje w elementach sprężystych czujników wielkości mechanicznych. Siatkę naklejono na prostokątną, płaską belkę jednostronnie zamocowaną, poddawaną zginaniu siłą skupioną na wolnym końcu. Ustalenia wynikające z uzyskanych wyników mogą być pomocne w konstrukcji czujników światłowodowych, w których wykorzystuje się element sprężysty w postaci belki zginanej.

## 2. Stanowisko pomiarowe i wyniki pomiarów

Jeżeli siatka Bragga o stałym okresie podlega równomiernemu odkształceniu i takim zmianom temperatury, to zmiany długości fali Bragga jej wiązki odbitej można zapisać w postaci zależności:

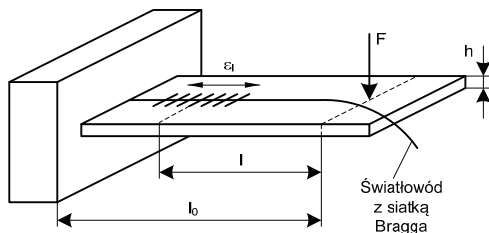
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T], \quad (1)$$

gdzie  $\varepsilon$  jest odkształceniem względnym,  $\alpha_A$  jest współczynnikiem rozszerzalności temperaturowej światłowodu,  $\alpha_n$  jest współczynnikiem temperaturowo-optycznym,  $p_e$  jest współczynnikiem odkształceniowo-optycznym, którego wartość dla szkła kwarcowego domieszkowanego germanem wynosi  $p_e \approx 0,22$  [5].

Dla ustalonej temperatury  $\Delta T = 0$ , zmiana długości centralnej siatki wynosi:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - p_e)\varepsilon], \quad (2)$$

Mierząc przesunięcie fali Bragga można wyznaczyć wywołujące je odkształcenie. Jeżeli siatka jest odkształcana nierównomiernie a zatem na jej długości występuje gradient odkształcenia, widmo jej wiązki odbitej ulega zmianie i zależność (2) może nie być ściśle obowiązująca. Dla zbadania wpływu gradientu odkształcenia na charakterystyki wyjściowe równomiernej siatki Bragga wykorzystano prostokątną płaską belkę, wykonaną z włókna szklanego, jednostronnie zamocowaną, poddawaną zginaniu siłą skupioną na wolnym końcu. Podczas zginania belki powstają w niej odkształcenia o stałym gradientie odkształcenia, którego wartość zmienia się wraz ze strzałką ugięcia belki. Siatkę przyklejono wzdłuż osi symetrii jednej z jej płaskich powierzchni belki w odległości 5 mm od krawędzi mocowania belki. Do klejenia siatki użyto dwuskładnikowej żywicy epoksydowej „epidiana 5”. Schemat belki z naklejoną siatką przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Belka zginana, płaska, jednostronnie zamocowana z naklejoną światłowodową siatką Bragga

Fig. 1. Bended cantilever with the embedded fiber Bragg grating

Odkształcenie belki określa znana z mechaniki zależność [6]:

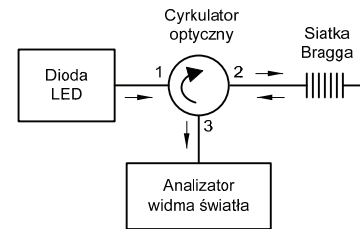
$$\varepsilon_l = \frac{3hl}{2l_0^3} f, \quad (3)$$

gdzie  $f$  jest strzałką ugięcia belki, pozostałe oznaczenia jak na rysunku 1. Gradient odkształcenia siatki przyklejonej do belki wyznaczony na podstawie zależności (3) wynosi:

$$\frac{d\varepsilon_l}{dl} = \frac{3h}{2l_0^3} f, \quad (4)$$

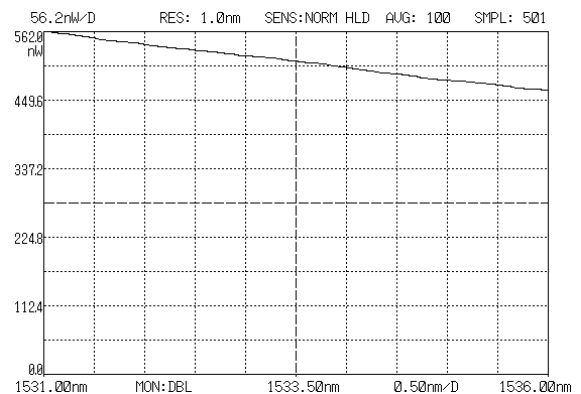
Dla zastosowanej belki o wymiarach  $l_0 = 100$  mm,  $h = 1,4$  mm oraz maksymalnej strzałce ugięcia  $f = 13$  mm uzyskano możliwość zmiany wartości gradientu odkształcenia w przedziale 0-26,8  $\mu\text{e}/\text{mm}$ . Jednocześnie środek siatki ulega odkształceniu w zakresie 0-2,42  $10^{-3}$ . Względna złożona niepewność standardowa zadawania gradientu odkształcenia wynosi 4,1 $\times 10^{-3}$ . Pomiar przeprowadzono w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 2. W układzie tym zastosowano następujące urządzenia: analizator widma światła Ando AQ-6315A o dokładności pomiaru: długości fali  $\pm 0,05$  nm, poziomu mocy  $\pm 0,3$  dB, źródło światła w postaci diody LED o mocy 30  $\mu\text{W}$ , centralnej długości fali 1521,3 nm i 3 dB paśmie 56 nm, trzyportowy cyrkulator optyczny, oraz siatkę Bragga ze stałym okresem, długości  $L = 10$  mm i centralnej długości fali  $\lambda_c = 1535,075$  nm oraz 3-dB paśmie

0,345 nm. Siatkę wytworzono w szklanym światłowodzie jednomodowym Corning SMF28.



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru widma wiązki odbitej przez siatkę  
Fig. 2. Setup for measurement of the grating reflection spectrum

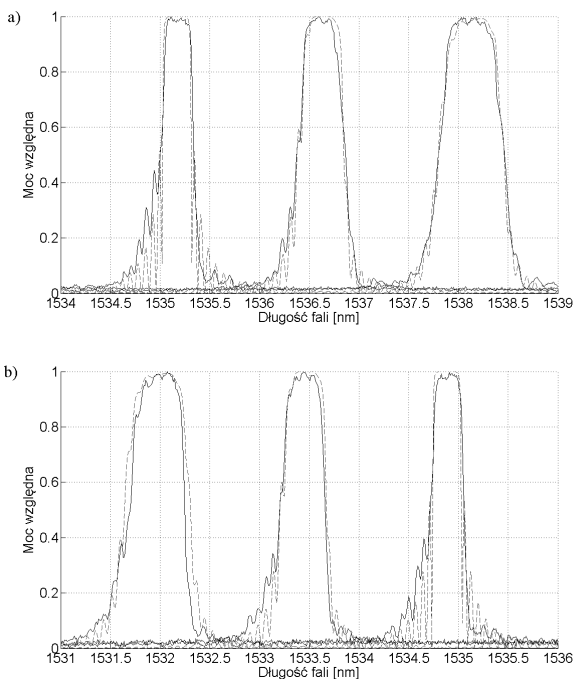
Wyniki badań i symulacji wpływu gradientu odkształcenia na 3 decybelowe pasmo oraz znormalizowany współczynnik odbicia badanej siatki przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 3-6. Ze względu na zmieniające się natężenie oświetlenia siatki podczas jej odkształcania wynikające z charakterystyki spektralnej stosowanej diody LED, przeprowadzono numeryczną korekcję otrzymanych charakterystyk wiązki odbitej siatki. Dokonano tej operacji na podstawie zmierzonej charakterystyki spektralnej diody w przedziale długości fal, w którym zmienia się centralna długość fali siatki pod wpływem odkształcenia. Na rysunku 3 przedstawiono wycinek tej charakterystyki diody wykorzystywanej w korekcji widma wiązki odbitej przez siatkę dla ujemnych wartości gradientu odkształcenia



Rys. 3. Wycinek charakterystyki widmowej diody LED  
Fig. 3. Part of the spectral characteristic of LED

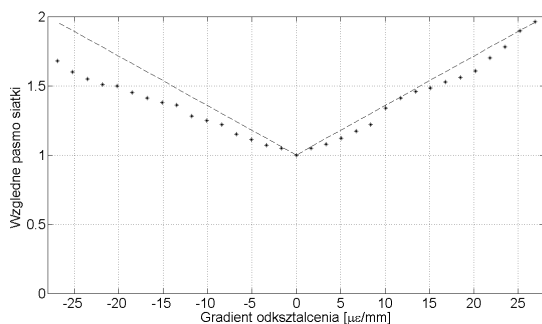
Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono widmo wiązki odbitej siatki dla trzech wartości gradientu odkształcenia: 0, 13,4 i 26,8  $\mu\text{e}/\text{mm}$  dodatniego i ujemnego, uzyskane z pomiarów i w wyniku symulacji. Symulacje widma wiązki odbitej siatki wykonano bazując na metodzie macierzy transferowych stosowanej najczęściej do tego celu ze względu na dobrą zbieżność obliczeń i potwierdzoną zgodność z pomiarami [5]. Na przedstawionych rysunkach widać dobrą zgodność widma symulowanego i zmierzonego. Należy zauważyć, że widmo dla wartości gradientu odkształcenia 13,4 i 26,8  $\mu\text{e}/\text{mm}$  jest poszerzone bez rozdzielania i przesunięte w stosunku do widma siatki nie odkształconej o 1,455 i 2,91 nm odpowiednio, co wynika z wartości odkształcenia środka siatki odpowiadających wartościom powyższych gradientów odkształcenia.

Zmierzoną i obliczoną charakterystykę 3-dB pasma wiązki odbitej przez siatkę w funkcji gradientu odkształcenia pokazuje rysunek 5. Charakterystykę obliczoną wyznaczono przyjmując, że gradient odkształcenia powstały w belce, zmienia siatkę o stałym okresie w siatkę o liniowo zmiennym okresie, wywołując powstanie pasma migotania (ang. the chirped bandwidth) [7]. Wartość tego pasma obliczono dla ustalonych wartości gradientu odkształcenia z zależności (2) uprzednio obliczając dla tych wartości zmianę odkształcenia na długości całej siatki. Wartość pasma migotania sumowano z pasmem siatki nie odkształconej.



Rys. 4. Widmo mocy wiązki odbitej siatki w funkcji długości fali dla różnego gradientu odkształcenia: a) 0, 13,4, 26,8  $\mu\epsilon/\text{mm}$ , b) 0, -13,4 i -26,8  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . Linia ciągła oznacza przebieg zmierzony, linia przerywana oznacza przebieg symulowany

Fig. 4. Reflection spectrum of the grating as a function of wavelength for different strain gradients: a) 0, 13,4, 26,8  $\mu\epsilon/\text{mm}$ , b) 0, -13,4 i -26,8  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . The solid line denotes the measured function, the dashed line denotes the simulated function



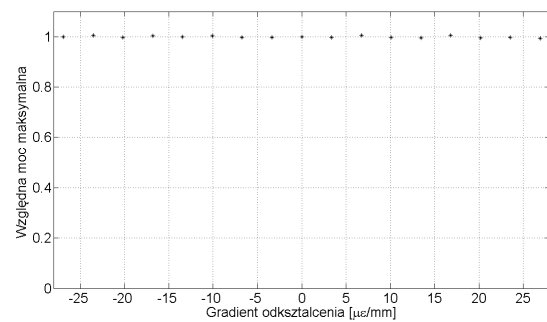
Rys. 5. Względne 3-dB pasmo wiązki odbitej siatki w funkcji gradientu odkształcenia

Fig.5. Relative 3-dB bandwidth of the grating as a function of the strain gradient

Z przeprowadzonych pomiarów i obliczeń zobrazowanych na rysunku 5 wynika, że wzrost gradientu odkształcenia wywołuje liniowe zwiększenie 3-dB pasma wiązki odbitej przez siatkę, zarówno dla gradientu odkształcenia dodatniego jak i ujemnego.

Obliczenia wskazują, że zależność 3-dB pasma siatki w funkcji gradientu odkształcenia ma charakter liniowy a przebieg tej zależności jest symetryczny względem osi rzędnych. Wyniki pomiarów potwierdzają tą ostatnią właściwość w zakresie  $\pm 8,5 \mu\epsilon/\text{mm}$ . Przy większych wartościach gradientu odkształcenia wzrost szerokości pasma dla ujemnego gradientu jest mniejszy niż dla odpowiadających wartości dodatniego gradientu. Dla wartości końcowych badanego zakresu gradientu odkształcenia  $\pm 27 \mu\epsilon/\text{mm}$  zwiększenie 3-dB pasma dla ujemnego gradientu odkształcenia wynosi 68%, podczas gdy dla jego dodatniej wartości wynosi 96%.

Przyczyn tego efektu może być kilka. Najbardziej prawdopodobną jest niedoskonałość właściwości elastycznych żywicy epoksydowej, użytej do klejenia siatki.



Rys. 6. Względna moc maksymalna wiązki odbitej siatki w funkcji gradientu odkształcenia

Fig. 6. Relative peak power of the grating reflected beam as a function of the strain gradient

Pomiary względnej mocy maksymalnej wiązki odbitej przez siatkę w funkcji gradientu odkształcenia w zakresie zmian  $0 \pm 27 \mu\epsilon/\text{mm}$ , zobrazowane na rysunku 6 wskazują, że moc wiązki odbitej a zatem i współczynnik odbicia nie zależy od gradientu odkształcenia w badanym zakresie.

### 3. Wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów i symulacji wynika, że gradient odkształcenia powoduje proporcjonalne zwiększenie 3-dB pasma wiązki odbitej siatki równomiernej, zarówno dla gradientu odkształcenia dodatniego jak i ujemnego, w badanym zakresie zmian gradientu odkształcenia od 0 do  $\pm 27 \mu\epsilon/\text{mm}$ . Z symulacji i obliczeń wynika, że przebieg zależności 3-dB pasmo siatki w funkcji odkształcenia jest symetryczny. Wyniki pomiarów potwierdzają tą właściwość w zakresie  $\pm 8,5 \mu\epsilon/\text{mm}$ . Przy większych wartościach gradientu odkształcenia, wzrost szerokości pasma dla ujemnego gradientu jest mniejszy, niż dla odpowiadających wartości dodatniego gradientu.

Wyniki pomiarów wskazują, że gradient odkształcenia nie ma wpływu na wartość mocy maksymalnej wiązki odbitej przez siatkę, w badanym zakresie jego zmian. Ta ostatnia właściwość jest szczególnie istotna w detekcji sygnałów siatek Bragga przy pomocy optycznych dyskryminatorów długości fali, gdyż stałość amplitudy sygnału optycznego jest warunkiem ich poprawnej detekcji. Jednak wpływ gradientu odkształcenia na pasmo siatki jest czynnikiem utrudniającym korzystanie z optycznych dyskryminatorów długości fali.

### 4. Literatura

- [1] Kaczmarek Z.: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006.
- [2] Torres P., Valente L.: Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating. Optics Communications, 208 (2002) pp. 285-291.
- [3] Peters K. i inni: Embedded optical Fiber Bragg grating sensor in nonuniform strain field; measurements and simulations. Experimental Mechanics, Vol. 41, no. 1, 2001, pp.19-28.
- [4] Dong X., Gaun Bo., Yuan S., Tam H.: Strain gradient chirp of uniform fiber Bragg grating without shift of central Bragg wavelength. Optics Communications, 202, 2002, pp. 91-95.
- [5] Othonos A., Kalli K.: Fiber Bragg Grating Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House, Boston London 1999.
- [6] Timoshenko S.P., Gere J.M.: Mechanics of materials. Von N. Reinhold Company, New York 1972.
- [7] Kashyap R.: Fiber Bragg Grating. Academic Press, San Diego 1999.