

Analiza numeryczna i doświadczalna odpowiedzi światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie na odkształcenie o nieregularnym rozkładzie

Streszczenie. Przedstawiono wyniki analizy numerycznej i doświadczalnej odpowiedzi światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie poddanej nieregularnemu rozkładowi odkształcenia. Wyniki obydwu analiz dobrze korespondują ze sobą i pokazują, że zadawany rozkład odkształcenia siatki wywołuje poszerzenie jej widma odbitego ze znaczną nieregularnością kształtu, zależną od położenia punktu nieregularności odkształcenia i wartości maksymalnej odkształcenia.

Abstract. The paper presents the results of numerical and experimental analysis of the response of an embedded uniform optical fiber Bragg grating to a strain, whose distribution is non-smooth. The results of both analyzes correspond well with each other and indicate that the applied strain distribution of the grating induces a broadening of its reflection spectrum, with considerable irregularity of the spectrum's shape, depending on the position of the point of non-smoothness of the strain distribution and on the strain's maximum value. (*Numerical and experimental analysis of response of uniform optical fiber Bragg grating to a strain with a non-smooth distribution*).

Słowa kluczowe: światłowodowa siatka Bragga, nieregularny rozkład odkształcenia, widmo odbite.

Keywords: optical fiber Bragg grating, non-smooth strain distribution, reflected spectrum.

Wprowadzenie

Światłowodowe czujniki pomiarowe są już okrzepłą gałęzią sensoryki. Jest to wynik ponad trzech dekad ich dynamicznego rozwoju. Niewrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne, możliwość pracy w środowiskach o dużej wilgotności i dużym zagrożeniu wybuchowym czujników światłowodowych sprawia, że wiele zadań pomiarowych realizuje się najlepiej lub jedynie przy ich pomocy. W czujnikach tych jako przetworniki optyczne wykorzystuje się światłowody telekomunikacyjne oraz coraz częściej światłowody kształtowane, w tym fotoniczne [1,3]. Mała wrażliwość temperaturowa światłowodów fotonicznych jest szczególnie istotna w ich stosowaniu do pomiaru innych oprócz temperatury wielkości fizycznych [4-6]. Ważne znaczenie wśród czujników światłowodowych mają czujniki ze światłowodowymi siatkami Bragga. Wynika to głównie z małych wymiarów siatek, co umożliwia prawie punktowe przetwarzanie mesurandu oraz częstotliwościowego sygnału wyjściowego. Światłowodowe siatki Bragga wykorzystywane są w miernictwie jako przetworniki pomiarowe odkształcenia, temperatury i ciśnienia. Jako przetworniki odkształcenia czyli tensometry optyczne są wykorzystywane najczęściej, gdyż umożliwiają budowę czujników szeregu wielkości mechanicznych, które przetwarzają się najpierw w odkształcenie siatek [7-9]. Odkształcenie, temperatura lub ciśnienie działając na siatkę wywołują zmianę centralnej długości fali wiązki światła przez nią odbitej, na skutek zmiany okresu i efektywnego współczynnika załamania światła siatki.

Jeżeli pole wielkości przetwarzanej jest jednorodne wzdłuż długości zainstalowanej w nim siatki, to zależność centralnej długości siatki w funkcji wielkości przetwarzanej jest liniowa w szerokim zakresie jej zmian, a kształt widma wiązki światła odbitej przez siatkę nie ulega zmianie. Czujniki pomiarowe z siatkami Bragga są tak projektowane aby zapewnić jednorodność pola wielkości mierzonej w obszarze zainstalowanej siatki.

W przypadku instalacji siatki Bragga w niejednorodnym polu wielkości mierzonej jej widmo wiązki odbitej i transmisyjnej ulega zmianie w stosunku do siatki w spoczynku. Widmo to jest funkcją rozkładu stałej siatki wzdłuż jej długości, a zatem odwzorowuje w dziedzinie spektralnej pole wielkości mierzonej pod siatką [9]. Ta cecha światłowodowych siatek Bragga, że w swoim widmie

zawierają informacje o rozkładzie przetwarzanego mesurandu jest ich unikalną cechą w odróżnieniu od przetworników pomiarowych, które uśredniają mesurand na swojej bazie pomiarowej (przykładem są tensometry rezystancyjne). Analizę widma siatek Bragga pod wpływem jej odkształceń o gładkich rozkładach różnych rodzajów przedstawiono w pracach [11-14]

W artykule przedstawiono wyniki numerycznej analizy odpowiedzi spektralnej i jej eksperymentalną weryfikację równomiernej światłowodowej siatki Bragga na odkształcenie o nieregularnym rozkładzie, który składa się z części liniowo zmiennej i zerowej.

Analiza numeryczna

Dla przeprowadzenia analizy numerycznej odpowiedzi spektralnej światłowodowej siatki Bragga na nierównomierne jej odkształcenie, aproksymowano rozkład tego odkształcenia funkcją odcinkami stałą, a samą analizę wykonano wykorzystując metodę macierzy przejścia.

Jeżeli przyjąć, że z jest współrzędną wzdłuż osi podłużnej światłowodu to efektywny współczynnik załamania rdzenia siatki można zapisać w postaci funkcji okresowej:

$$(1) \quad n_{eff}(z) = n_o + \delta n_{eff}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \varphi(z)\right)$$

gdzie n_o jest wartością średnią współczynnika załamania δn_{eff} jest amplitudą zmian współczynnika załamania, Λ_0 jest okresem siatki nieobciążonej, a $\varphi(z)$ jest funkcją opisującą zmienność tego okresu. Funkcja $\varphi(z)$ jest związana z działającym wzdłuż osi podłużnej światłowodu odkształceniem $\varepsilon_z(z)$ relacją [14]

$$(2) \quad \varphi(z) = \frac{-2\pi}{\Lambda_0} \frac{(1-p_e)\varepsilon_z(z)}{[1+(1-p_e)\varepsilon_z(z)]} z$$

gdzie p_e jest współczynnikiem elastoptycznym. Funkcja $\varphi(z)$ opisana przez (2) jest równoważna zmianom okresu siatki wywołanym jej odkształceniem danym jako

$$(3) \quad \Lambda(z) = \Lambda_0 [1 + (1-p_e)\varepsilon_z(z)]$$

W metodzie macierzy przejścia siatkę dzieli się na M jednakowych, równomiernych sekcji. Każdą sekcję opisuje się macierzą przejścia 2x2, której elementy są funkcją

długości fali optycznej, długości segmentu, okresu segmentu i fizycznych właściwości siatki. Okres każdego segmentu oblicza się z zależności (3) gdzie $\varepsilon_z(z)$ jest wartością lokalną. Iloczyn macierzy wszystkich sekcji opisuje całą siatkę. Macierz T całej siatki można opisać wyrażeniem

$$(4) \quad T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_M$$

gdzie $T_1, T_2 \dots T_M$ są macierzami równomiernych sekcji 1, 2 ... M siatki. Zależności do obliczenia macierzy równomiernych sekcji podane są w [10].

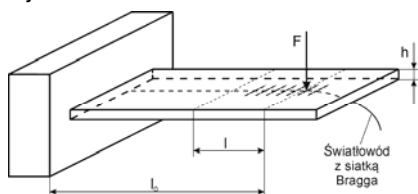
Współczynnik odbicia mocy dla całej siatki ma postać:

$$(5) \quad R = \left| -\frac{t_{21}}{t_{22}} \right|^2$$

Poprawność analizy numerycznej odpowiedzi spektralnej siatki na niejednorodne odkształcenie uzyskuje się przy spełnieniu warunku, że minimalna długość sekcji siatki L_{min} musi być znacznie większa niż okres siatki $L_{min} \gg \Lambda_0$.

Stanowisko pomiarowe

Do wytworzenia nierównomiernego odkształcenia o dającym się policzyć rozkładzie, wykorzystano prostokątną płaską belkę jednostronnie zamocowaną, którą zginano siłą skupioną na wolnym końcu. W czasie zginania belki powstają w niej odkształcenia nierównomierne o stałym gradientie odkształcenia. Wartość maksymalna odkształceń występuje w płaszczyźnie utwierdzenia belki. Siatkę przyklejono wzdłuż podłużnej osi symetrii belki na jej powierzchni przeciwległej na której działa siła gnąca (rys.1). Do klejenia siatki użyto dwuskładnikowej żywicy epoksydowej.



Rys.1. Płaska belka zginana jednostronnie z zainstalowaną światłowodową siatką Bragga

Odkształcenie belki wyznacza się ze znanej z mechaniki zależności

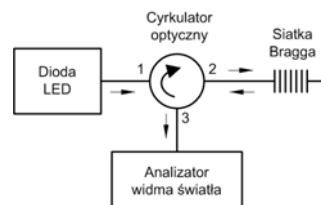
$$(6) \quad \varepsilon_l = \frac{3hl}{2l_0^3} f$$

gdzie f jest strzałką ugięcia belki, pozostałe oznaczenia jak na rysunku 1. Gradient odkształcenia siatki przyklejonej do belki wyznaczony na podstawie zależności (6) wynosi:

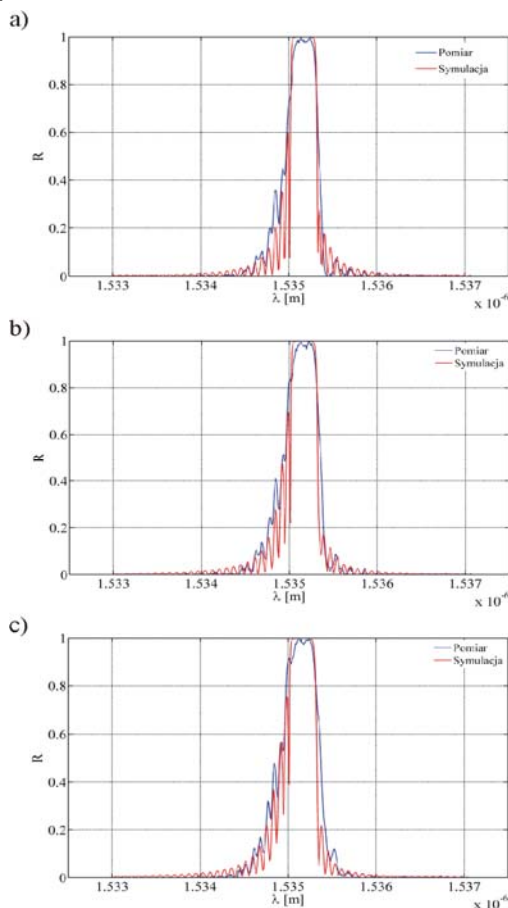
$$(7) \quad \frac{d\varepsilon_l}{dl} = \frac{3h}{2l_0^3} f$$

W badaniach zastosowano belkę z włókna szklanego o grubości $h = 1,4$ mm. Dla uzyskania niegładkiego odkształcenia siatki, siłą gnącą doprowadzono do trzech różnych punktów wzdłuż jej osi, odpowiadającym 0,25, 0,5 oraz 0,75 jej długości. Punktom tym odpowiadały trzy wartości długości l_0 : 58, 60,5, 63 mm.. Uzyskano tym sposobem niegładkie odkształcenie siatki składające się z części liniowo narastającego i części zerowego odkształcenia z wyżej wymienionym podziałem tych części wzdłuż długości siatki. Przy zmianach strzałki ugięcia belki w zakresie $f = 0 - 7,3$ mm uzyskano możliwość zmiany

wartości gradientu odkształcenia belki w przedziale 0-78, 0-69 i 0-61 $\mu\epsilon/\text{mm}$ dla odkształcenia 0,25, 0,5 oraz 0,75 długości siatki odpowiednio. Maksymalne lokalne odkształcenie siatki wynosi $0,46 \times 10^{-3}$. 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 i poziomowi mocy $\pm 0,3$ dB, źródło światła w postaci diody LED o mocy 30 μW , centralnej długości fali 1521,3 nm i 3 dB paśmie 56 nm, trzyportowy cyrkulator optyczny, oraz siatkę Bragga ze stałym okresem o 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

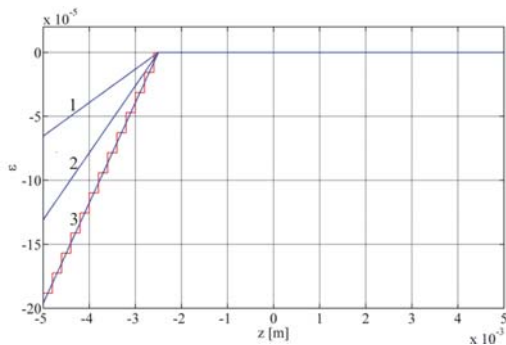


Rys.4. Widma wiązki odbitej siatki Bragga zmierzone i obliczone metodą macierzy przejścia poddanej rozkładowi odkształcenia jak na rysunku 3: a) rozkładowi odkształcenia 1, b) rozkładowi odkształcenia 2, c) rozkładowi odkształcenia 3

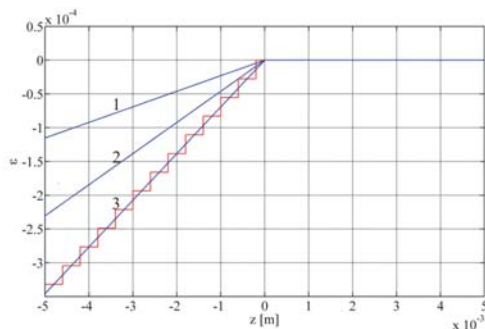
Wyniki analizy numerycznej i pomiarów

Na rysunkach 3, 5 i 7 przedstawiono niegładkie rozkłady odkształcenia, którym poddano badaną siatkę. Linia czerwona na tych rysunkach przedstawiono aproksymacje wybranych liniowo zmiennych części rozkładów, które zostały wykorzystane jako dane wejściowe do analizy numerycznej widma siatki metoda macierzy przejścia.

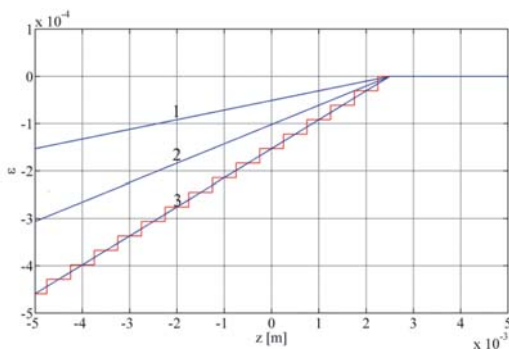
Wyniki analizy numerycznej i pomiarów odpowiedzi spektralnej światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie na zastosowane niegładkie rozkłady odkształcenia przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 4, 6 i 8. Ze względu na zmianę punktu przyłożenia siły gnącej, celem odkształcenia różnych części siatki przy niezmiennym utwierdzeniu belki, gradient odkształcenia uzyskanych rozkładów odkształceń różni się nieznacznie dla tych samych strzałek ugięcia belki, malejąc ze zwiększeniem odkształcanej części siatki. Minimalne i maksymalne wartości gradientu odkształcenia rozkładu odkształcenia wynoszą dla odkształcenia $\frac{1}{4}$ długości siatki 26 i 78 $\mu\text{e}/\text{mm}$, dla $\frac{1}{2}$ długości siatki 23 i 69 $\mu\text{e}/\text{mm}$ oraz dla $\frac{3}{4}$ długości siatki 20 i 61 $\mu\text{e}/\text{mm}$. Natomiast maksymalna wartość odkształcenia w uzyskanych rozkładach odkształceń występuje dla przypadku odkształcenia $\frac{3}{4}$ długości siatki i wynosi 460 μe .



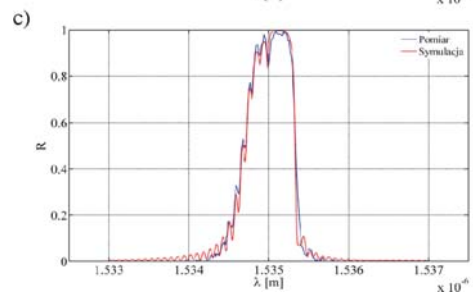
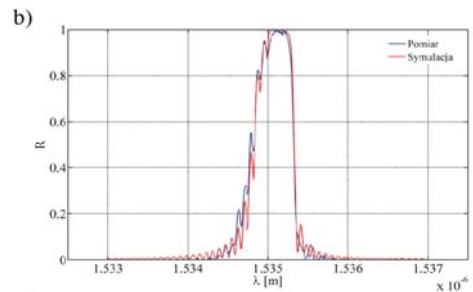
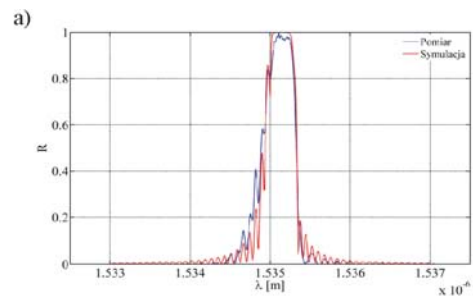
Rys.3. Rozkłady niegładkie odkształcenia z liniowo zmiennymi odkształceniami wzdłuż 0,25 ich długości o wartościach gradientu odkształcenia: 1-26 $\mu\text{e}/\text{mm}$, 2-52 $\mu\text{e}/\text{mm}$, 3-78 $\mu\text{e}/\text{mm}$



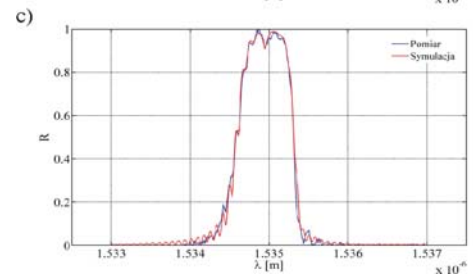
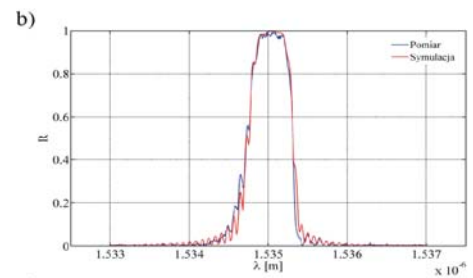
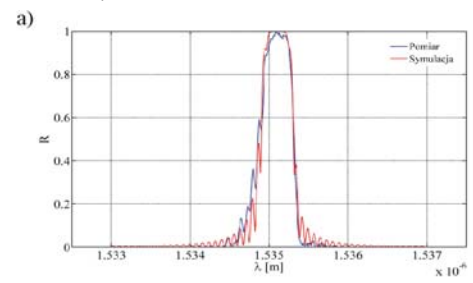
Rys.5. Rozkłady niegładkie odkształcenia z liniowo zmiennymi odkształceniami wzdłuż 0,5 ich długości o wartościach gradientu odkształcenia: 1-23 $\mu\text{e}/\text{mm}$, 2-46 $\mu\text{e}/\text{mm}$, 3-69 $\mu\text{e}/\text{mm}$



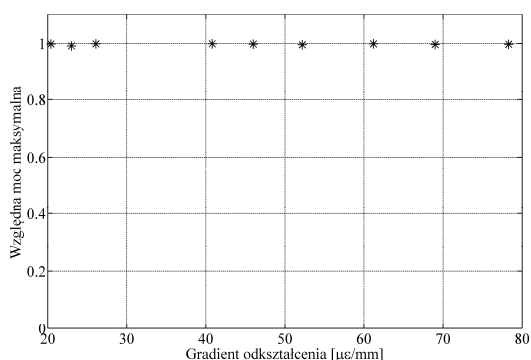
Rys.7. Rozkłady niegładkie odkształcenia z liniowo zmiennymi odkształceniami wzdłuż 0,75 ich długości o wartościach gradientu odkształcenia: 1-20 $\mu\text{e}/\text{mm}$, 2-40 C, 3-61 $\mu\text{e}/\text{mm}$



Rys.6. Widma wiązki odbitej siatki Bragga zmierzone i obliczone metodą macierzy przejścia poddanej rozkładowi odkształcenia jak na rysunku 5: a) rozkładowi odkształcenia 1, b) rozkładowi odkształcenia 2, c) rozkładowi odkształcenia 3



Rys.8. Widma wiązki odbitej siatki Bragga zmierzone i obliczone metodą macierzy przejścia poddanej rozkładowi odkształcenia jak na rysunku 7: a) rozkładowi odkształcenia 1, b) rozkładowi odkształcenia 2, c) rozkładowi odkształcenia 3



Rys.9. Względna moc maksymalna wiązki odbitej przez siatkę w funkcji gradientu odkształcenia

Z przedstawionych na rysunkach wyników pomiarów i wyników analizy numerycznej odpowiedzi spektralnej siatki Bragga o stałym okresie na zastosowane niegładkie jej odkształcenie wynika, że widmo amplitudowe siatki ulega poszerzeniu. Poszerzeniu podlega jedynie ta część widma, która odpowiada części siatki poddanej odkształceniu. Poszerzenie widma jest liniowo zależne od gradientu odkształcenia. Ze względu na fakt, że w wytwarzanym rozkładzie odkształcenia liniowo zmienne odkształcenie ma charakter ściskający poszerzeniu podlega część widma siatki od strony fal krótszych. Niegładkość rozkładu odkształcenia objawia się w widmie w postaci oscylacji na zboczu narastającym poszerzonej części widma. Dla wartości gradientu odkształcenia większych niż $60 \mu\epsilon/\text{mm}$ liniowo zmiennej części rozkładu odkształcenia obserwuje się rozdzielanie się poszerzającej się części widma od części niezmiennej. Na rysunku 9 przedstawiono zależność względnej maksymalnej mocy wiązki odbitej przez siatkę w funkcji gradientu odkształcenia liniowo zmiennej części rozkładu odkształcenia. Zależność ta wskazuje że w badanym zakresie zmian gradientu odkształcenia nie obserwuje się zmian mocy wiązki odbitej przez siatkę.

Wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów i analizy numerycznej odpowiedzi spektralnej siatki Bragga o stałym okresie na zastosowane niegładkie odkształcenie wynika, że gradient odkształcenia nie wpływa na moc maksymalną wiązki odbitej przez siatkę w badanym zakresie jego zmian, natomiast wywołuje poszerzenie części widma amplitudowego siatki odpowiadającej jej odkształcanej części. Na zboczu poszerzonej części widma obserwuje się oscylacje. Poza tym po przekroczeniu pewnej wartości gradientu odkształcenia występuje rozdzielanie części widma odpowiadającej części siatki odkształcanej od części widma odpowiadającej części siatki nieodkształcanej. Wszystkie te szczegóły dotyczące zmiany widma amplitudowego siatki świadczą, że widmo to zawiera informacje zarówno o charakterze jej odkształcenia jak i wartościach tego odkształcenia.

Wyniki pomiarów odpowiedzi spektralnej siatki na zastosowane odkształcenie o niegładkim rozkładzie dobrze korespondują z wynikami analizy numerycznej tych odpowiedzi.

Wyniki przeprowadzonych analiz stanowiąc będą podstawę do realizacji zadań odtwarzania niegładkich rozkładów odkształceń przy pomocy światłowodowych siatek Bragga.

Praca zrealizowana w ramach pracy statutowej „Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach materiałowych. Konstruowanie i badania wybranych typów czujników światłowodowych. Propagacja niepewności w programowo definiowanych systemach pomiarowych – zlecenie nr: 03.0.06.00/2.01.01.01.0002 (MNSP. EKES.14.001)

Autorzy: dr inż. Małgorzata Detka, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Zakład Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: m.detka@tu.kielce.pl; prof. dr hab. inż. Zdzisław Kaczmarek, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Zakład Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: z.kaczmarek@tu.kielce.pl;

LITERATURA

- [1] Karimi M., Fabian M., Jaroszewicz L. R., Schuster K., Mergo P., Sun T., Grattan K. T. V., Lateral force sensing system based on different photonic crystal fibers, *Sensors and Actuators A*, 205 (2014), 86-91
- [2] Romaniuk R., Światłowody nietelekomunikacyjne, w: *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej (5) / Janusz Mroczka (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 978-83-7493-686-6, 2012, 63-207*
- [3] Wójcik W., Romaniuk R., Światłowody i ich zastosowania, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, (2012), nr. 12, 120-126
- [4] Frazao O., Baptista J. M., Santos J. L., Temperature-independent strain sensor based on a HI-Bi photonic crystal fiber loop mirror, *IEEE sensors Journal*, (2007), n.10, 1453-1455
- [5] Kaczmarek C., Właściwości światłowodowego czujnika ciśnienia zbudowanego w układzie interferometru Sagnaca z dwójmownym światłowodem fotonicznym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 4 (2013), nr. 4, 292-294
- [6] Dong X., Tam H. Y., Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer, *Applied Physics Letters*, (2007) n. 90, 151113-1 - 151113-3
- [7] Antunes P., Varum H., Andre P., Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axial insensitivity, *Measurement*, 44 (2011), 55-59
- [8] Kaczmarek C., Światłowodowy czujnik laserowy odkształcenia z siatką Bragga, *Pomiary Automatyka Kontrola*, (2010), nr. 9, 1071-1073
- [9] Zhao Y., Yu C.B., Liao Y.B., Differential FBG sensor for temperature compensated high-pressure (or displacement) measurement, *Opt. Laser Technol.*, 36 (2004), 39-42
- [10] Erdogan T., Fiber grating spectra, *J. Lightwave Technol.*, 15 (1997), n. 8, 1277-1294
- [11] Torres P. Valente L.C.G., Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating, *Optics Communications*, 208 (2002), n 15, 285-291
- [12] Kaczmarek Z., Detka M., Wpływ gradientu odkształcenia światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie na jej charakterystyki spektralne, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56 (2010), nr. 1, 1-3
- [13] Hung.S, LeBlanc M., Ohn M.M. and Measures R.M., Bragg intragrating structural sensing, *Applied Optics*, 34 (1995), n. 22, 5003-5009
- [14] Peters K., Pattis P., Botsis J., Giaccari P, Experimental verification of response of embedded optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain field, *Optics and Lasers Engineering*, 33 (2000), 107-119