

**Cezary KACZMAREK**POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, KATEDRA ELEKTRONIKI,  
ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin**Światłowodowy czujnik laserowy odkształcenia z siatką Bragga**

Dr inż. Cezary KACZMAREK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej na kierunku Elektrotechnika w roku 2001. W 2007 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektronika na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Od lutego 2008 roku pracuje w Katedrze Elektroniki na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Działalność naukowa obejmuje nieliniową propagację impulsów w światłowodach i czujniki światłowodowe.

e-mail: c.kaczmarek@pollub.pl

**Streszczenie**

W światłowodowych czujnikach laserowych z rezonatorem Fabry-Perot (liniową wnęką rezonansową), siatka Bragga przetwarzająca wielkość mierzoną stanowi selektywne, przestrajane zwierciadło tego rezonatora. Drugie zwierciadło rezonatora jest zwykle szerokopasmowe. Praca dotyczy światłowodowego czujnika laserowego odkształcenia z siatką Bragga, w którym jako zwierciadło szerokopasmowe rezonatora zastosowano światłowodowe zwierciadło pętlowe. Ośrodkiem wzmacniającym wnęki rezonatora jest światłowód erbowy, oświetlany wiązką promieniowania półprzewodnikowej diody laserowej o długości fali 980 nm z wykorzystaniem sprzęgacza selektywnego, wrażliwego na długość fali. Demodulację sygnału wyjściowego czujnika przeprowadzono przy pomocy optycznego dyskryminatora długości fali w postaci siatki Bragga o stałym okresie i fotodetektora. Przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych charakterystyk wykonanego czujnika.

**Słowa kluczowe:** Laser światłowodowy, czujnik światłowodowy, światłowodowa siatka Bragga, czujnik odkształcenia.

**Fiber laser strain sensor with a Bragg grating****Abstract**

Fiber optic laser sensors are constructed with Fabry-Perot resonators and ring resonators [1-3]. In the article a fiber optic laser sensor with a linear resonator is introduced, created from a fiber Bragg grating having a constant period, and a wideband mirror in the form of a fiber loop. The scheme of the sensor is shown in Figure 1. As the active medium, a section of a silica fiber doped with Erbium ions was used, pumped by 980 nm radiation using a WDM coupler. The FBG, apart from being the output mirror is also the strain transducer. The spectrum of the laser output beam of the sensor is shown in Figure 2. The determined conversion characteristic of the sensor,  $\lambda = f(\epsilon)$ , is a linear relationship with a slope of  $1,21 \text{ nm} / 10^{-3}$ , which is in agreement with formula (2). The output power of the sensor's laser, above the threshold power, increases linearly with the pump power [3], which is shown in Figure 4. As the optical discriminator of the laser's wavelength, a FBG having a constant period was used, whose reflected beam spectrum is shown in Figure 5. The converting characteristic of the laser sensor together with the wavelength discriminator is shown in Figure 6. The linear converting range of this characteristic is  $\sim 100 \cdot 10^{-6}$ . The introduced laser sensor features a signal to noise ratio greater than 30 dB and a spectral line width of 0,051 nm, while the same parameters for the gratings used, are 20 dB and 0,42 nm, respectively. The converting range of the sensor can be widened by applying a different arrangement of the wavelength detector.

**Keywords:** Fiber laser, optical fiber sensor, fiber Bragg grating, strain sensor.

**1. Wstęp**

Światłowodowe siatki Bragga są wykorzystywane w miernictwie wielkości nieelektrycznych jako przetworniki odkształcenia, temperatury i ciśnienia. Zakres ich zastosowań w tej dziedzinie systematycznie rośnie ze względu na szereg zalet, którymi się charakteryzują. Zalicza się do nich częstotliwościowy sygnał wyjściowy, łatwość instalacji, przetwarzanie zbliżone do punkto-

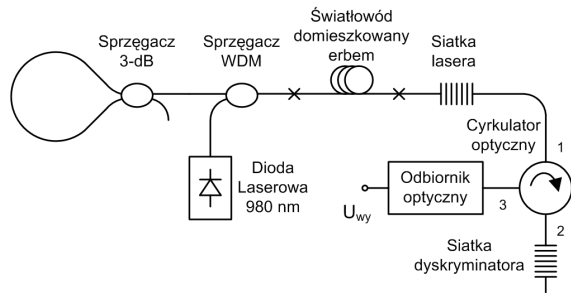
wego, łatwość wykonania na jednym światłowodzie wielu siatek, łatwość tworzenia matryc czujników z siatkami, możliwość zwielokrotniania kanału światłowodowego z czujnikami oraz bardzo dobre właściwości dynamiczne [1].

Czujniki ze światłowodowymi siatkami Bragga dzieli się ogólnie na dwa rodzaje: zwykłe, w których siatka pełni rolę optycznego przetwornika pomiarowego i laserowe, w których siatka (lub siatki) pełnią rolę nie tylko przetwornika optycznego, ale także zwierciadeł wnek rezonansowych lasera. Światłowodowe lasery włóknowe stosowane w czujnikach są budowane z rezonatorami: Fabry-Perota i pierścieniowym. Lasery te konstruuje się jako przestrajane na jednej długości fali lub na wielu długościach fal, w zależności od potrzeb. Jako zwierciadła rezonatorów tych laserów wykorzystuje się światłowodowe siatki Bragga o stałym i zmiennym okresie, pętłe światłowodowe [1-3] oraz zwierciadła nanoszone bezpośrednio na koniec światłowodu [4]. ŚSB o stałym okresie stanowią zwierciadła selektywne rezonatorów, poza tym są przestrajalne, gdyż stanowią optyczny przetwornik pomiarowy. Są one wykorzystywane w rezonatorach laserów czujnikowych jako jedno z jego zwierciadeł [5] lub jako obydwa zwierciadła [6].

Do oświetlania siatek zwykłych czujników stosuje się najczęściej szerokopasmowe źródła światła takie jak: diody elektroluminescencyjne lub światłowodowe źródła wzmacnionej emisji spontanicznej ASE. Pasma tych źródeł muszą pokrywać zakres zmian długości fali siatek wywołanych wielkością mierzoną. Ze względu na wąskie pasmo wiązki odbijanej przez siatkę jej moc stanowi tylko niewielką część mocy źródła. Stosunek sygnału do szumu takich czujników jest mały, co przy dużym poziomie zakłóceń środowiskowych prowadzi do pogorszenia dokładności pomiaru. Czujniki laserowe w porównaniu do zwykłych czujników z siatkami Bragga wykazują znacznie lepszy stosunek sygnału do szumu oraz co najmniej o rząd wielkości węższą linię widmową. Pozwala to uzyskać większą rozdzielczość i większą dokładność pomiaru. Z tych względów światłowodowe czujniki laserowe są szczególnie atrakcyjne do zastosowań w rozległych systemach pomiarowych oraz w środowiskach o dużym poziomie zakłóceń.

**2. Układ i sposób działania laserowego czujnika odkształcenia**

Sposób działania czujnika wynika z jego schematu przedstawionego na rysunku 1. Laser czujnika jest zbudowany z długiego rezonatora Fabry-Perot, zawierającego światłowód aktywny oraz pompy optycznej. Rezonator jest utworzony z dwóch zwierciadeł światłowodowych: pętlowego-szerokopasmowego i wąskopasmowego w postaci równomiernej siatki Bragga. Rolę pompy optycznej pełni półprzewodnikowa dioda laserowa o długości fali 980 nm. Erbowy światłowód aktywny jest pompowany optycznie przy pomocy sprzęgacza selektywnego, wrażliwego na długość fali (WDM). Sygnał wyjściowy lasera, stanowiący część generowanego promieniowania w rezonatorze przepuszczonego przez siatkę jest doprowadzony przy pomocy cyrkulatora optycznego do siatki dyskryminatora długości fali. Część tego sygnału odbita od siatki dyskryminatora jest kierowana do odbiornika optycznego. Demodulację sygnału wyjściowego lasera czujnika przeprowadza się w dwóch etapach: najpierw sygnał optyczny o modulowanej długości fali przetwarza się w sygnał optyczny o modulowanym natężeniu przy pomocy optycznego dyskryminatora długości fali, a następnie sygnał o modulowanym natężeniu poddaje się detekcji natężeniowej w fotodetektorze odbiornika optycznego. Napięciowy sygnał wyjściowy odbiornika odwzorowuje przebieg wielkości mierzonej.



Rys. 1. Schemat światłowodowego czujnika laserowego odkształcenia z siatką Bragga

Fig. 1. Schematic diagram of the fiber laser strain sensor with a Bragg grating

Długość wnęki rezonansowej lasera wynosi 7,4 m a długość zastosowanego światłowodu erbowego wynosi 3 m. Parametry optyczne użytego światłowodu erbowego, dobór jego długości, parametry diody pompującej laser czujnika, sposób stabilizacji jej prądu zasilania i temperatury podano w pracy [7].

Zwierciadło z pętlą włókna światłowodowego wykonano łącząc ze sobą końce ramion wyjściowych jednomodowego sprzęgacza kierunkowego 2x2, o współczynniku sprzężenia  $k = 0,5$  (3 dB), o centralnej długości fali 1550 nm, oraz o paśmie  $\pm 40$  nm. Współczynnik odbicia  $R$  takiego zwierciadła, w przypadku gdy straty włókna i straty sprzężenia są do pominięcia, opisuje wzór [2]

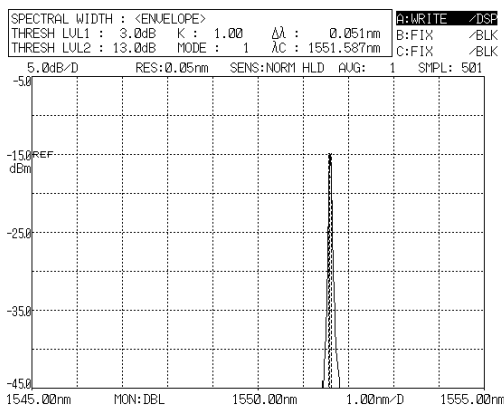
$$R = 4k(1 - k) \quad (1)$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem sprzężenia. Wartość współczynnika odbicia zwierciadła wykonanego ze sprzęgacza 3 dB, którego  $k \approx 0,5$ , jest bliska 1.

Zmiany długości fali lasera wywołane odkształceniem siatki Bragga powinny śledzić zmiany długości centralnej siatki. Z tego względu czułość odkształceniowa przetwornika laserowego powinna być taka sama jak czułość odkształceniowa używanej w laserze siatki Bragga. Czułość odkształceniowa siatki  $K_\varepsilon$ , przy jej osiowym odkształceniu i stałej temperaturze określa zależność [1]

$$K_\varepsilon = \Delta\lambda_B / \varepsilon = \lambda_B(1 - p_e) \quad (2)$$

gdzie  $\lambda_B$  i  $\Delta\lambda_B$  oznaczają centralną długość fali siatki i jej zmiany,  $p_e$  oznacza współczynnik elastooptyczny, którego wartość dla światłowodu kwarcowego domieszkowanego germanem wynosi  $p_e \approx 0,22$ . Centralna długość fali zastosowanej siatki Bragga wynosi 1551,5 nm, zatem jej czułość odkształceniowa na podstawie (2) ma wartość  $1,21 \text{ nm}/10^{-3}$ .



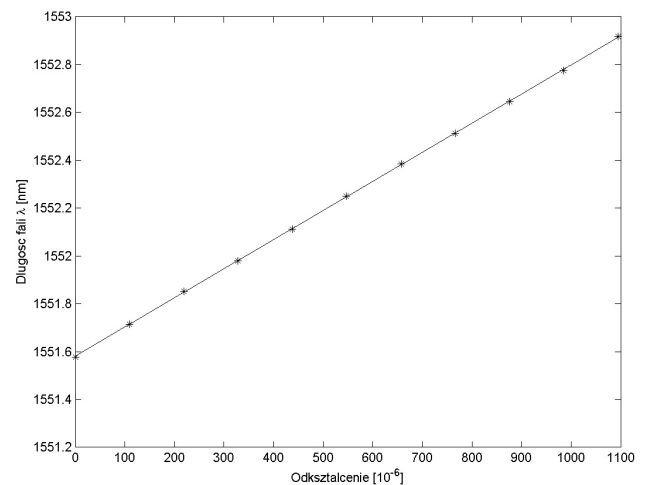
Rys. 2. Widmo gęstości mocy wiązki wyjściowej lasera  
Fig. 2. Power density spectrum of the beam output of the laser

Pracujący laser czujnika generuje wiązkę promieniowania optycznego o szerokości linii widmowej 0,051 nm, natomiast stosunek sygnału do szumu lasera jest większy niż 30 dB. Wartości tych parametrów można odczytać z rysunku 2 przedstawiającego widmo gęstości mocy optycznej wiązki wyjściowej lasera. Dla porównania zmierzone analogiczne parametry spektralne siatki lasera wynoszą: 0,42 nm oraz 20 dB.

Pomiary i analizę charakterystyk spektralnych siatek Bragga czujnika i lasera czujnika przeprowadzono przy pomocy optycznego analizatora widma o rozdzielczości 0,05 nm.

### 3. Wyniki pomiarów charakterystyk statycznych czujnika

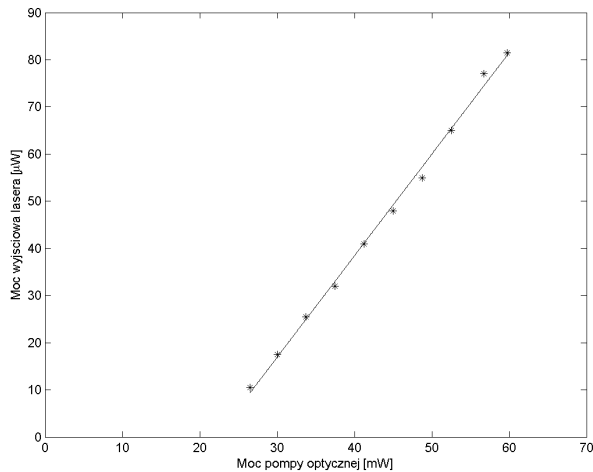
Charakterystyki statyczne czujnika i lasera wyznaczono wykorzystując optyczny analizator widma i woltomierz oraz stabilizowany zasilacz pompy laserowej. Zadawanie osiowych odkształceń rozciągających siatkę Bragga lasera przeprowadzono metodą pośrednią, przykładając siły o znanych wartościach do swobodnego końca światłowodu z siatką i obliczając wywołane odkształcenie przy znajomości parametrów mechanicznych światłowodu. Wyznaczona i przedstawiona w postaci graficznej na rysunku 3 charakterystyka przetwarzania czujnika  $\lambda = f(\varepsilon)$  jest zależnością liniową, której nachylenie ma wartość  $1,21 \text{ nm}/10^{-3}$ . Widać, że wartość ta jest równa czułości odkształceniowej siatki lasera wyznaczonej z zależności (2).



Rys. 3. Zależność długości fali lasera od odkształcenia siatki Bragga  
Fig. 3. Fiber laser wavelength as a function of strain of the Bragg grating

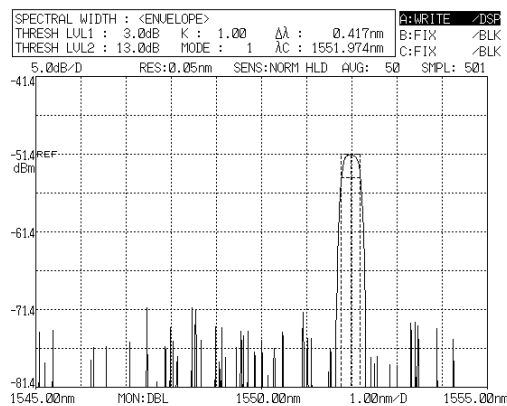
Charakterystykę przetwarzania wyznaczono dla odkształceń rozciągających w zakresie  $(0 - 1100) \cdot 10^{-6}$ , dla ustalonej mocy pompy wynoszącej 38 mW. Z przeprowadzonych pomiarów wynika również, że centralna długość linii widmowej lasera jest taka sama, jak centralna długość fali jego siatki Bragga, z niepewnością wynikającą z dokładności analizatora zastosowanego w pomiarach.

Moc wyjściowa lasera czujnika, powyżej mocy progowej, rośnie liniowo z mocą pompy [3], co przedstawia rysunek 4. Zmierzona, progowa wartość mocy pompującej lasera wynosi 26,5 mW. Sprawność lasera wynosi 0,021%. Jej wartość w głównej mierze jest zdeterminowana współczynnikiem odbicia siatki Bragga, która jest zwierciadłem wyjściowym lasera. Zastosowana siatka o współczynniku odbicia 95,8% przepuszcza 4,2% wygenerowanej mocy promieniowania laserowego. Stosując siatkę Bragga o mniejszym współczynniku odbicia mocy można zwiększyć odpowiednio sprawność lasera.

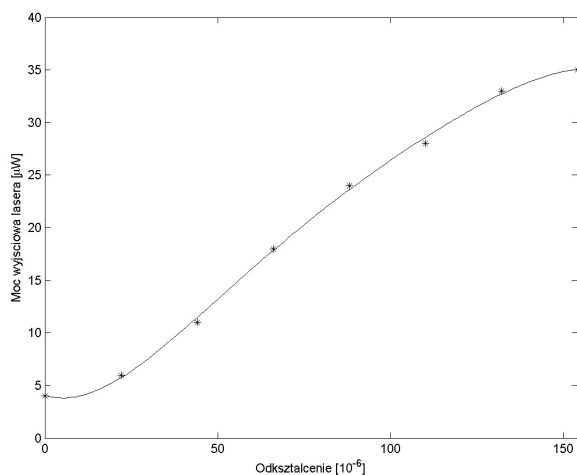


Rys. 4. Zależność mocy wyjściowej lasera od mocy pompy optycznej  
Fig. 4. Laser output power as a function of pumped pump power

Do detekcji sygnału wyjściowego lasera czujnika, o długości fali modulowanej zmianami odkształcenia siatki, zastosowano optyczny dyskryminator długości fali. Wykorzystano w nim równomierną siatkę Bragga o parametrach spektralnych bardzo bliskich odpowiednim parametrom siatki lasera. Widmo wiązki odbitej siatki dyskryminatora przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Widmo gęstości mocy wiązki odbitej siatki dyskryminatora  
Fig. 5. Power density spectrum of the laser grating



Rys. 6. Zależność napięcia wyjściowego czujnika z układem detekcji długości fali w funkcji mierzonego odkształcenia  
Fig. 6. Output voltage of the sensor system as a function of applied strain

Przetwarzania sygnału o modulowanej długości fali w sygnał o modulowanej amplitudzie przeprowadzono na zbroczu narastającym charakterystyki widmowej siatki. Charakterystykę przetwarzania czujnika laserowego wraz z siatkowym dyskryminatorem długości fali  $u = f(\epsilon)$  wyznaczono w układzie jak na rysunku 1. Odbiornik optyczny badanego czujnika tworzyła fotodiody InGaAs ze wzmacniaczem transimpedancyjnym o wzmocnieniu ustawianym skokowo w zakresie 0 – 40 dB. Wyniki pomiarów wyznaczonej charakterystyki przedstawiono na rysunku 6. Liniowy zakres przetwarzania tej charakterystyki, ograniczony liniową częścią zbrocza narastania widma siatki dyskryminującej, wynosi  $\sim 100 \cdot 10^{-6}$ .

#### 4. Wnioski

Praca opisuje wykonany, całkowicie światłowodowy czujnik laserowy odkształcenia z długim rezonatorem liniowym, którego zwierciadła tworzą światłowodowa siatka Bragga o stałym okresie i pętla włókna światłowodowego jednomodowego o małej dwójłomności. Z pomiarów zbudowanego czujnika wynika, że jego stosunek sygnału do szumu jest większy niż 30 dB, a szerokość linii widmowej wynosi 0,051 nm. Zastosowane w czujniku siatki Bragga mają szerokość linii widmowej 0,42 nm, a ich stosunek sygnału do szumu jest nie większy niż 20 dB. Niewielki liniowy zakres przetwarzania czujnika wraz z układem dyskryminatora długości fali wynoszący  $\sim 100 \cdot 10^{-6}$  jest zdeterminowany charakterystyką widmową siatkowego dyskryminatora długości fali. Stosując inny układ demodulacji długości fali można rozszerzyć liniowy zakres przetwarzania systemu. Czujnik wykonano z podzespołów dostępnych w handlu. Dalsze prace będą prowadzone nad światłowodowym układem detekcji o szerszym zakresie przetwarzania, badaniami właściwości dynamicznych czujnika oraz zastosowaniem opracowanego układu do konstrukcji innych typów czujników wielkości mechanicznych i temperatury.

#### 5. Literatura

- [1] Kaczmarek Z.: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006.
- [2] Malinowski M.: Lasery światłowodowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [3] Digonnet M. J. F.: Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers. M. Dekker INC, New York 2001.
- [4] Melle S. M., Alavie A. T., Karr S., Coroy T., Liu K., and Measures R.M.: A Bragg grating-tuned fiber laser strain sensor system, IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 5, 1993, pp.263-266.
- [5] Mandal J., Sun T., Grattan K.T.V., Augosusti A. T at all.: A wide temperature tunable fibre laser using a chirped grating and a type IIA fibre Bragg grating, Measurement Science and Technology 15, 2004, pp. 1113-1119.
- [6] Mandal J., Sun T., Grattan K.T.V., Augosusti A. T: Fiber laser-based temperature sensor systems using uniform wavelength-matched Bragg grating reflectors. Sensors and Actuators A Physical A 120, 2005, pp.451-461.
- [7] Kaczmarek C.: Laserowy czujnik odkształcenia ze światłowodową siatką Bragga i zwierciadłem pętlowym o zmiennym współczynniku odbicia. Pomiary Automatyka Kontrola nr 6, 2010, ss. 519-521.

otrzymano / received: 07.10.2009  
przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany