

Cezary KACZMAREK

POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA ELEKTRONIKI, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

Laserowy czujnik odkształcenia ze światłowodową siatką Bragga i zwierciadłem pętlowym o zmiennym współczynniku odbicia

Dr inż. Cezary KACZMAREK

Ukończył studia magisterskie 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 Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Działalność naukowa dr Kaczmarek obejmuje nieliniową propagację impulsów w światłowodach i czujniki światłowodowe.



e-mail: c.kaczmarek@pollub.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono światłowodowy czujnik laserowy odkształcenia z linowym rezonatorem, utworzonym ze światłowodowej siatki Bragga – ŚSB o stałym okresie i zwierciadła szerokopasmowego o zmiennym współczynniku odbicia z pętlą włókna światłowodowego. Jako ośrodek aktywny wykorzystano odcinek światłowodu kwarcowego domieszkowanego jonami Er^{3+} , pompowany promieniowaniem o długości fali 980 nm przy pomocy sprzęgacza WDM. ŚSB pełni jednocześnie funkcję zwierciadła wyjściowego i przetwornika odkształcenia. Przedstawiono podstawowe właściwości wykonanego czujnika.

Słowa kluczowe: czujnik odkształcenia, czujnik światłowodowy, laser światłowodowy, światłowodowa siatka Bragga, czujnik laserowy, zwierciadło z pętlą światłowodową.

Fiber laser strain sensor with a fiber Bragg grating and a variable reflection coefficient fiber loop mirror**Abstract**

A fiber laser strain sensor is presented, featuring a linear resonator formed by the mirrors: a narrowband mirror - in the form of a fiber Bragg grating with a constant period, and a wideband mirror created by a fiber loop. The constant period grating at the same time acts as a mechano-optic strain transducer retuning the laser, and as the output mirror of the sensor. A section of high birefringence fiber was inserted into the fiber loop, to act as an optical wavelength demodulator. As the active medium, a segment of a silica fiber, doped with Er^{3+} ions, was used, pumped using a WDM coupler. To pump the laser, a 980 nm laser diode was used with a maximal power of 110 mW. It was current and temperature stabilized. The constant period grating changes its central wavelength due to the strain of the fiber on which it is written. Thus it retunes the laser wavelength of the sensor. The investigation results show, that when the central wavelength changes of the Bragg grating are within the linear range of the spectrum of the fiber loop reflector reflection coefficient, then the laser output beam power is a linear function of the laser grating strain. The linear range of conversion and the sensitivity of the sensor are determined by the linear range of the spectrum of the loop reflector, which acts as the optical wavelength discriminator. The required values of those sensor parameters can be obtained by changing the length of the birefringent fiber in the loop reflector. It has to be noted, that the requirements of those two sensor parameters are mutually exclusive.

Keywords: strain sensor, fiber optic sensor, fiber laser, fiber Bragg grating, laser sensor, fiber loop mirror.

1. Wstęp

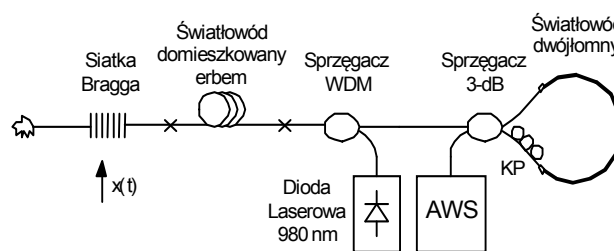
Laserowe czujniki z siatkami Bragga posiadają, poza zaletami zwykłych czujników z siatkami Bragga, znacznie lepszy stosunek sygnału do szumu oraz co najmniej o rząd węższą linię widmową [1, 2]. Te właściwości czujników laserowych pozwalają uzyskać większą rozdzielczość i większą dokładność pomiaru. Z tych względów światłowodowe czujniki laserowe z siatkami Bragga są

szczególnie atrakcyjne do zastosowań w rozległych systemach pomiarowych oraz w środowiskach o dużym poziomie zakłóceń.

Sygnały wyjściowe czujników ze światłowodowymi siatkami Bragga są sygnałami o modulowanej długości fali. Detekcje takich sygnałów przeprowadza się za pomocą optycznych detektorów długości fali, na wyjściu których otrzymuje się sygnał proporcjonalny do składowej zmiennej długości fali, przy wprowadzeniu na ich wejście fali świetlnej o zmiennej długości fali. Istnieje szereg rozwiązanych układów optycznych detektorów długości fali przeznaczonych do detekcji sygnałów wyjściowych czujników z siatkami Bragga. W pracy [3] usystematyzowano je w następujące grupy detektorów: z dyskryminatorami długości fali, z przestrajającymi filtrami optycznymi, z przestrajającymi źródłami światła, spektrometryczne i inne. W detektorach z dyskryminatorami długości fali sygnał optyczny o zmiennej długości fali jest przetwarzany na sygnał o zmiennej amplitudzie a następnie podlega detekcji amplitudowej przy pomocy fotodetektora. Jako optyczne dyskryminatory długości fali stosuje się objętościowe filtry optyczne [1], sprzęgacze WDM [4], światłowodowe siatki Bragga [5] oraz niezrównoważone interferometry światłowodowe [6]. Stosowanie optycznych dyskryminatorów długości fali jest ograniczone ze względu na trudności uzyskania żądanych czułości i zakresów przetwarzania.

2. Układ i sposób działania laserowego czujnika odkształcenia

Schemat układu czujnika przedstawiono na rysunku 1. Rezonator optyczny lasera tworzą zwierciadła: szerokopasmowe o zmiennym współczynniku odbicia, utworzone z pętli dwójłonnego włókna światłowodowego oraz wąskopasmowe, które stanowi światłowodowa siatka Bragga o stałym okresie. Elementy tworzące zwierciadła pełnią jednocześnie inne funkcje w czujniku. ŚSB pełni jednocześnie rolę mechaniczno-optycznego przetwornika pomiarowego, przestrajającego laser, natomiast zwierciadło z pętlą światłowodu dwójłonnego spełnia jednocześnie funkcje optycznego dyskryminatora długości fali.



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

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

W rezonatorze jest umieszczony odcinek włókna kwarcowego domieszkowanego jonami Er^{3+} (typ: ER20-4/125), który stanowi ośrodek aktywny. Długość odcinka światłowodu domieszkowanego erbem, uwzględniając jego parametry, wyniki wcześniejszych eksperymentów oraz wyniki badań zawarte w pracy [7, 8], ustalono na 3 m. Wnęka rezonansowa, zawierająca oprócz odcinka światłowodu aktywnego, sprzęgacz WDM, ramię sprzęgacza 3 dB i odcinek światłowodu z siatką, ma długość 7,4 m. Zastosowany światłowod aktywny ER20-4/125 ma współczynnik absorpcji 20 dB/m przy długości fali 1530 nm, średnicę rdzenia 4 μm , średnicę pola modu 6,5 μm dla długości fali 1550 nm, aperturę numeryczną

0,2 oraz długość fali odcięcia 800-980 nm. Światłowód aktywny jest optycznie pompowany przy pomocy diody laserowej na długości fali 980 nm, o maksymalnej mocy wyjściowej 110 mW, za pośrednictwem sprzęgacza światłowodowego WDM 980/1550 nm. Prąd zasilania i temperaturę diody laserowej stabilizowano za pomocą zasilacza LD500 i stabilizatora temperatury TED200. Zwierciadła z pętlą światłowodową o zmiennym współczynniku odbicia wykonano łącząc końce ramion wyjściowych jednodomowego sprzęgacza kierunkowego 3 dB z odcinkiem światłowodu przenoszącym polaryzację. Różnica faz składowych polaryzacji propagujących w światłowodzie dwójłomnym określa zależność

$$\delta = \frac{2\pi L(n_x - n_y)}{\lambda} \quad (1)$$

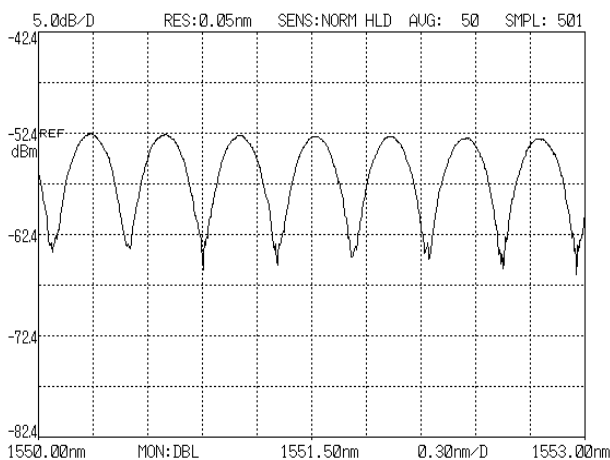
gdzie n_x i n_y oznaczają efektywne współczynniki załamania dla osi szybkiej i wolnej światłowodu, L jest długością światłowodu dwójłomnego, λ oznacza długość fali. Współczynnik odbicia zwierciadła z pętlą ze światłowodu dwójłomnego jest periodyczną funkcją długości fali, którą opisuje wzór [9]

$$R(\lambda) = \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2)$$

Okres funkcji $R(\lambda)$ opisuje relacja [9]

$$T_{R(\lambda)} = \frac{\lambda^2}{(n_x - n_y)L} \quad (3)$$

Do wykonania zwierciadła z pętlą światłowodową zastosowano 15 metrowy odcinek światłowodu dwójłomnego typ PM1550-HP wraz z kontrolerem polaryzacji. Długość dudnień tego światłowodu dla długości fali 1550 nm wynosi 5 mm. Na rysunku 2 przedstawiono widmo współczynnika odbicia w skali decybelowej. Z rysunku tego można wyznaczyć okres i stosunek maksimum do minimum widma. Wynoszą one odpowiednio 0,43 nm i 12 dB. Wyznaczona wartość okresu jest zgodna z wartością obliczoną z zależności (3). W warunkach laboratoryjnych, bez stabilizacji temperatury, nie stwierdzono zauważalnych zmian widma wykonanego zwierciadła z pętlą światłowodową.

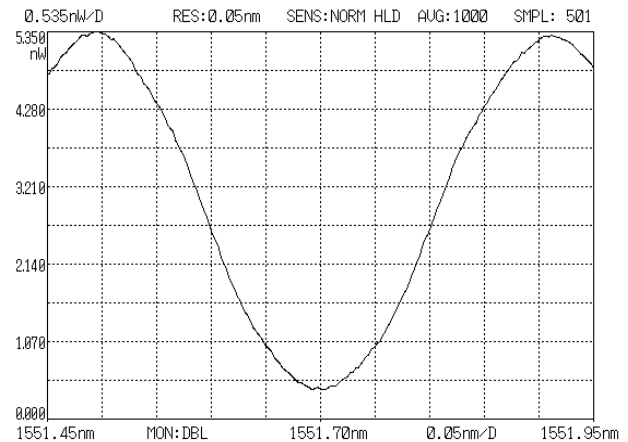


Rys. 2. Widmo współczynnika odbicia zwierciadła pętlowego w skali decybelowej

Fig. 2. Spectrum of the reflection coefficient of the loop reflector in decibel scale

Na rysunku 3 pokazano jeden okres widma współczynnika odbicia zwierciadła w skali liniowej. Z obu stron wartości szczytowych widma istnieje prawie liniowy zakres. Jeżeli centralna długość fali światłowodowej siatki Bragga będzie się przesuwała

w obszarze liniowym widma to zmiany współczynnika odbicia zwierciadła w funkcji długości fali będą liniowe. Zatem można oczekiwać, że istnieje liniowa zależność pomiędzy natężeniem wiązki wyjściowej lasera a odkształceniem wywołującym przesunięcie centralnej długości fali siatki Bragga.



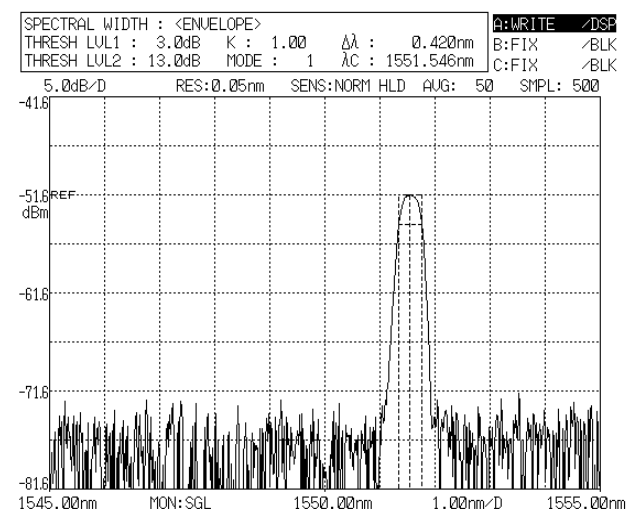
Rys. 3. Widmo współczynnika odbicia zwierciadła pętlowego w skali liniowej

Fig. 3. Spectrum of the reflection coefficient of the loop reflector in linear scale

Światłowodowa siatka Bragga zmienia swoją centralną długość fali pod wpływem odkształcenia światłowodu, na którym jest wykonana, przestrajając jednocześnie długość fali lasera czujnika. Zmianę centralnej długości fali siatki $\Delta\lambda_B$, wykonanej na jednodomowym światłowodzie kwarcowym, pod wpływem poosiowego odkształcenia ε , przy stałej temperaturze $\Delta T=0$, opisuje zależność

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e) \cdot \varepsilon \quad (4)$$

gdzie p_e jest współczynnikiem elastoptycznym, którego wartość dla światłowodu krzemowego domieszkowanego germanem wynosi $p_e \approx 0,22$. W czujniku laserowym zastosowano siatkę Bragga wykonaną na światłowodzie jednodomowym SMF 28 o centralnej długości fali 1551,586 nm, 3 dB paśmie wiązki odbitej równym 0,420 nm oraz współczynnika odbicia mocy wynoszącym 95,8%. Widmo gęstości mocy wiązki odbitej ŚSB przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Widmo gęstości mocy wiązki odbitej siatki lasera

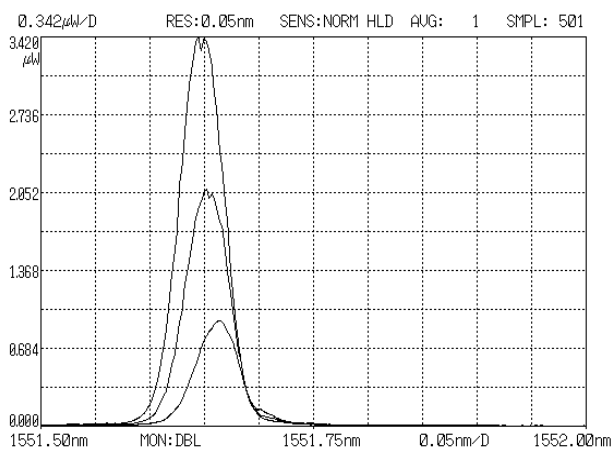
Fig. 4. Power density spectrum of the laser grating

Z rysunku tego widać, że stosunek sygnału do szumu badanej siatki jest nie większy niż 20 dB. Zmierzona szerokość linii widmowej wiązki wyjściowej lasera wynosi 0,051 nm, natomiast stosunek sygnału do szumu lasera jest większy niż 30 dB.

Do pomiaru i analizy widma wiązki odbitej siatki Bragga i wiązki wyjściowej lasera wykorzystano optyczny analizator widma typu AQ6317B o rozdzielczości 0,05 nm.

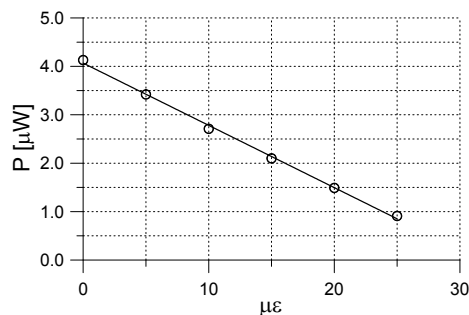
3. Badanie właściwości czujnika

Pomiary charakterystyk czujnika wykonano w układzie pokazanym na rysunku 1. Odształcenia rozciągające siatki czujnika zadawano pośrednio przez obciążanie odważnikami jednego z końców swobodnie opadającego światłowodu z siatką. Drugi koniec tego światłowodu zamocowano stabilnie w odpowiednim uchwycie. Wartości zadawanych odształceń siatki obliczano znając średnicę i moduł Younga światłowodu z naniesioną siatką. Zmiany odształcenia siatki są przetwarzane w czujniku na zmiany długości fali lasera. Z kolei zmiany długości fali lasera są przetwarzane przez optyczny dyskryminator długości fali na zmiany natężenia wiązki wyjściowej lasera. Widmo i moc wiązki lasera mierzono analizatorem widma. Wyniki tych pomiarów przedstawiano w postaci graficznej na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Widmo wiązki wyjściowej lasera przy różnych odształceniach siatki

Fig. 5. Spectrum of the laser output beam at different grating strains



Rys. 6. Widmo współczynnika odbicia zwierciadła pętlowego

Fig. 6. Spectrum of the reflection coefficient of the loop reflector

Na rysunku 5 przedstawiono widma wiązki wyjściowej lasera przy różnych odształceniach siatki Bragga, dla ustalonej wartości mocy pompy wynoszącej 38 mW. Ze zwiększeniem odształcenia

rozciągającego siatkę długość fali lasera przesuwają się w stronę fal dłuższych a natężenie wiązki lasera maleje. Ze względu na to, że zmiany długości centralnej siatki Bragga mieszczą się w liniowym zakresie widma zwierciadła z pętlą światłowodową, można zaobserwować, że zmiany natężenia wiązki wyjściowej lasera są także bliskie liniowym.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów mocy wyjściowej lasera w zależności od odształcenia siatki w zakresie liniowym. Zakres przetwarzania jest wąski $0 \div 25 \mu\epsilon$, dlatego nieliniowość czujnika w tym zakresie jest niewielka.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono budowę i wyniki podstawowych badań światłowodowego czujnika laserowego odształcenia z siatką Bragga i zwierciadłem z pętlą dwójmownego włókna światłowodowego. Wyniki badań pokazują, że jeżeli zmiany centralnej długości fali siatki Bragga mieszczą się w liniowym zakresie widma współczynnika odbicia zwierciadła z pętlą światłowodową, moc wiązki wyjściowej lasera jest w przybliżeniu liniową funkcją odształcenia siatki lasera. Liniowy zakres przetwarzania i czułość czujnika są zdefiniowane liniowym zakresem widma zwierciadła z pętlą, pełniącego rolę dyskryminatora długości fali optycznej. Wymagane wartości tych parametrów czujnika można uzyskać przez zmianę długości światłowodu dwójmownego w zwierciadle z pętlą. Należy zaznaczyć, że wymogi na te dwa parametry czujnika są przeciwstawne. Czujnik jest względnie prosty w budowie, został wykonany z elementów światłowodowych dostępnych w handlu.

5. Literatura

- [1] Melle S. M., Alavie A. T., Karr S., Coroy T., Liu K., Measures R.M.: A Bragg grating-tuned fiber laser strain sensor system. IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 5, 1993, pp.263-266.
- [2] Kaczmarek C.: Światłowodowy czujnik laserowy odształcenia z siatkami Bragga. XII Konferencja Naukowa Światłowody i ich Zastosowania, Krasnobród 2009.
- [3] Kaczmarek Z.: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006.
- [4] Davis M. A., Kersey A.D.: All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler. Electronics Letters Vol. 30, No. 1, 1994, pp. 75-77.
- [5] Fallon R. W., et al.: Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing. Electronics Letters, Vol. 33, No. 8, 1997, pp. 705-706.X.
- [6] Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., et al.: Fiber Grating Sensors. Journal of Lightwave Technology. Vol. 15, No. 8, 1997, pp. 4142-4162.
- [7] Digonnet M. J. F.: Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers. M. Dekker INC, New York 2001.
- [8] Mandal J., Pal S., Sun T., Grattan K.T.V., Augousti A. T.: Optimization of erbium-doped fibre lasers and their sensor applications. Proc. of the Conference on Sensors and their Applications XII, Limerick, Ireland, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2003, pp.271-278.
- [9] Fang, Claus R.O.: Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer base on a Sagnac interferometer. Optics Letters, Vol. 20, 1995, Issue 20, pp. 2146-2148.

otrzymano / received: 02.03.2010

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany