

Cezary KACZMAREK

POLITECHNIKA LUBELSKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH,
Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

Właściwości światłowodowego czujnika ciśnienia zbudowanego w układzie interferometru Sagnaca z dwójłomnym światłowodem fonicznym

Dr inż. Cezary KACZMAREK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej (2001). W 2007 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektronika na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Adiunkt w Instytucie Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Lubelskiej. Działalność naukowa obejmuje czujniki światłowodowe.



e-mail: c.kaczmarek@pollub.pl

Streszczenie

Przedstawiono czujnik ciśnienia w układzie interferometru Sagnaca z dwójłomnym światłowodem fonicznym typu PM-1550-01. Analitycznie wyznaczono jego charakterystykę przetwarzania. Zbadano właściwości metrologiczne czujnika w zakresie ciśnień 0-0,45 MPa. Zmierzono charakterystykę przetwarzania dla różnych długości fali w zakresie 1460-1600 nm i wyznaczono czułość ciśnieniową czujnika. Zbadano wpływ długości fali na czułość ciśnieniową czujnika. Przedstawiono możliwości jego zastosowania.

Słowa kluczowe: czujnik ciśnienia, dwójłomny światłowod foniczny, interferometr Sagnaca.

Properties of a fiber optic pressure sensor in the Sagnac interferometer configuration with a birefringent photonic crystal fiber

Abstract

A pressure sensor in the Sagnac interferometer configuration with a polarization maintaining (PM) photonic crystal fiber (PCF) of the PM-1550-01 type is presented. The application of the PM-PCF instead of a conventional PM fiber provides the sensor with a very low temperature sensitivity and also decreases the required length of the PM fiber because of the higher modal birefringence that can be achieved in a PM-PCF. The scheme of the sensor is shown in Fig. 1. The pressure acting on the PM-PCF causes the output spectrum to shift in the direction of higher wavelengths because of the sensitivity of modal birefringence to hydrostatic pressure. One of the fundamental qualities of the sensor is the fact that the sensitivity to pressure is independent of the length of the birefringent fiber in the Sagnac loop. The conversion characteristic of the sensor was calculated analytically. The metrological properties of the sensor were examined in the pressure range: 0 - 0.45 MPa. The conversion characteristic was measured for different wavelengths in the range of 1460-1600 nm and for different lengths of the birefringent fiber. On that basis the pressure sensitivity of the sensor was determined. It was also investigated how the pressure sensitivity varied with the wavelength in the range: 1460-1600 nm. Other features of the sensor are: high sensitivity (3.6 to 3.0 nm/MPa in the wavelength range: 1460-1600 nm), simple mechanical and optical configuration, frequency output insensitive to amplitude interference, lack of a mechanical transducer (pressure acts directly on the optical fiber) and ability to change the conversion sensitivity by changing the length of the fiber segment subjected to pressure.

Keywords: pressure sensor, birefringent photonic crystal fiber, Sagnac interferometer.

1. Wprowadzenie

Znane właściwości interferometru Sagnaca z odcinkiem światłowodu dwójłomnego, takie jak periodyczność widma, mała wrażliwość na czynniki zewnętrzne, prostota układu optycznego, sprawiają, że jest on często stosowany zarówno w telekomunikacji optycznej, jak i w sensoryce światłowodowej. W telekomunikacji

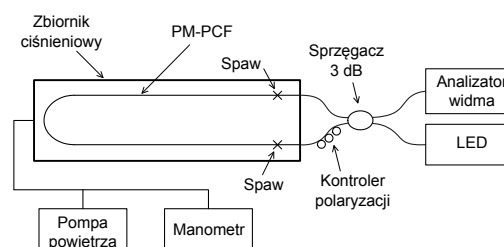
optycznej jest on najczęściej wykorzystywany jako optyczny filtr grzebieniowy - filtr WDM [1]. W sensoryce światłowodowej znalazł on zastosowanie jako czujnik wielu wielkości fizycznych i chemicznych [2-4] oraz jako dyskryminator długości fali dla czujników z siatkami Bragga [5].

Zastąpienie w interferometrze Sagnaca konwencjonalnego światłowodu dwójłomnego jego fonicznym odpowiednikiem, radykalnie poprawia jego parametry metrologiczne i użytkowe. Ma to szczególne znaczenie w zastosowaniach sensorowych interferometru Sagnaca. Ta poprawa wynika z właściwości dwójłomnych światłowodów fonicznych, głównie bardzo małego wpływu zmian temperatury na ich parametry i znacząco większej możliwości do uzyskania dwójłomności modowej w porównaniu z konwencjonalnymi światłowodami dwójłomnymi. Dla interferometru ze światłowodem dwójłomnym produkowanego przez Blaze-Photonics zmiany okresu widma pod wpływem zmian temperatury wynoszą 0,05 pm/K, natomiast przesunięcie widma pod wpływem temperatury wynosi 0,25-0,3 pm/K [6, 7]. Duża wartość dwójłomności modowej światłowodów fonicznych pozwala znacząco zredukować ich wymaganą długość w czujnikach z interferometrem Sagnaca.

W artykule przedstawiono czujnik ciśnienia w układzie interferometru Sagnaca z dwójłomnym światłowodem fonicznym typu PM-1550-01. Na podstawie rozważań analitycznych wyznaczono jego charakterystykę przetwarzania. Zbadano właściwości metrologiczne czujnika w zakresie ciśnień 0-0,45 MPa. Zmierzono charakterystykę przetwarzania dla różnych długości fali w zakresie 1460-1600 nm i wyznaczono na jej podstawie czułość ciśnieniową czujnika. Wyznaczono wpływ zmian długości fali w powyższym zakresie na czułość ciśnieniową czujnika. Przedstawiono możliwości zastosowania czujnika.

2. Układ optyczny i sposób działania czujnika

Na rysunku 1 przedstawiono układ optyczny czujnika i układ zadawania ciśnienia. Układ optyczny czujnika zawiera 3-decybelowy sprzęgacz z konwencjonalnym światłowodem telekomunikacyjnym, odcinek dwójłomnego światłowodu fonicznego (PM-PCF) oraz kontroler polaryzacji. Sprzęgacz 3 dB dzieli wejściową wiązkę światła na dwie równe amplitudowo wiązki propagujące w przeciwnych kierunkach. Wiązki te, po przejściu pętli, w tym światłowodu dwójłomnego, interferują w sprzęgaczu, tworząc obraz interferencyjny zależny od różnicy faz modów polaryzacji powstałych w odcinku PM-PCF. Odcinek światłowodu dwójłomnego poddany ciśnieniu wywołuje przesunięcie widma wiązek wyjściowej i odbitej interferometru Sagnaca w kierunku fal dłuższych. Jest to spowodowane wrażliwością dwójłomności modowej światłowodu dwójłomnego na ciśnienie hydrostatyczne.



Rys. 1. Schemat czujnika ciśnienia i układu zadawania ciśnienia
Fig. 1. Scheme of the pressure sensor and the pressure applying system

Różnica faz pomiędzy modami dwójłomnego światłowodu fotonicznego, w zależności od ciśnienia P , jego długości L i długości fali wyraża się wzorem:

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n(\lambda, P). \quad (1)$$

Zmianę fazy wywołaną zmianami tych wielkości można zapisać wyrażeniem:

$$\Delta\delta = \frac{\partial\delta}{\partial\lambda} \Delta\lambda + \frac{\partial\delta}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial\delta}{\partial L} \Delta L. \quad (2)$$

Po uwzględnieniu (1) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= -\frac{2\pi L \Delta n}{\lambda^2} \Delta\lambda + \frac{2\pi L}{L} \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda} \Delta\lambda + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\partial \Delta n}{\partial P} \Delta P + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} = \\ &= -\frac{2\pi L}{\lambda^2} \left(\Delta n - \lambda \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda} \right) \Delta\lambda + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\partial \Delta n}{\partial P} \Delta P + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} = \\ &= -\frac{2\pi L \Delta n_G}{\lambda^2} \Delta\lambda + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\partial \Delta n}{\partial P} \Delta P + \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\Delta L}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

Zmiana ciśnienia wywołuje zmianę fazy i odpowiadającą jej przesunięcie widma interferometru czujnika. Jeżeli zmiana fazy wynosi 2π , a zatem $\Delta\delta=0$, to z równania (3), przy założeniu $\Delta L=0$, otrzymujemy:

$$K_{IP} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} = \frac{\lambda}{\Delta n_G} \frac{\partial \Delta n}{\partial P}. \quad (4)$$

Z zależności (4) wynika jedna z podstawowych właściwości prezentowanego czujnika, a mianowicie niezależność jego czułości ciśnieniowej od długości L odcinka zainstalowanego światłowodu dwójłomnego w pętli.

Do budowy czujnika wykorzystano odcinek dwójłomnego światłowodu fotonicznego PM-1550-01 o długości 370 mm. Przekrój poprzeczny rdzenia światłowodu jest niekołowy. Rdzeń jest otoczony otworami powietrznymi. Dwa otwory znajdujące się najbliżej rdzenia, po przeciwnych jego stronach, mają większe średnice niż pozostałe otwory.

Podstawowe parametry tego światłowodu są następujące: rozmiary pól modowych wynoszą 3,6 μm na 3,1 μm , grupowa dwójłomność modalowa dla długości fali 1,55 μm wynosi 8,65·10⁻⁴, średnica światłowodu 125 μm , średnica pokrycia 230 μm . Odcinek światłowodu PM-PCF został połączony z resztą układu przy pomocy złączy spawanych. Do spawania zastosowano konwencjonalną spawarkę wykorzystującą łuk elektryczny.

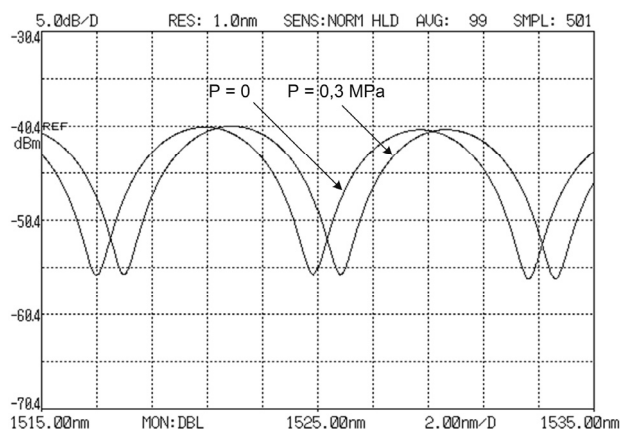
Ze względu na niedopasowanie pól modowych i apertur numerycznych jednomodowego światłowodu SMF-28 i światłowodu PM-1550-01, starty na spawanych złączach są duże i wynoszą na dwóch złączach ≈ 6 dB. Straty te można zmniejszyć optymalizując proces spawania. Tak znaczne straty w układzie optycznym czujnika nie wpływają na jego dokładność przetwarzania ze względu na to, że sygnał wyjściowy tego czujnika jest zmodulowany częstotliwościowo. W badaniach czujnika jako źródło światła o zakresie 1460–1600 nm zastosowano dwie diody elektroluminescencyjne: jedną o centralnej długości fali 1522 nm i 3 dB paśmie 50 nm oraz drugą o centralnej długości fali 1563 nm i 3 dB paśmie 40 nm. Obydwie diody charakteryzują się niespolaryzowaną wyjściową wiązką światła. Pomiar widma wiązki transmitowanej czujnika wykonano analizatorem widma optycznego.

3. Pomiary charakterystyk czujnika

Pomiary charakterystyk czujnika przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 1. Wykorzystano w tym celu prasę powietrzno-hydrauliczną pozwalającą na wytwarzanie ciśnienia powietrza w zakresie 0–0,5 MPa, wyposażoną w manometr. Odcinek

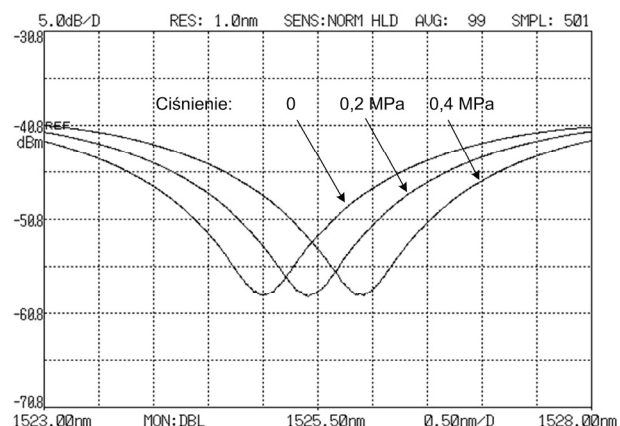
światłowodu PM-1550-01 o długości 370 mm, stanowiący przetwornik ciśnienia, umieszczono w przewodzie pneumatycznym. Jeden koniec tego przewodu podłączono do zaworu wyjściowego prasy, a w drugim końcu zamontowano przepust uszczelniający, przez który wyprowadzono światłowód. Ciśnienie zadawano ręcznie prasy i mierzono manometrem (o klasie 1,5). Pomiary charakterystyki przetwarzania przetwarzającego czujnika wykonano w zakresie 0–0,45 MP.

Z wykonanych pomiarów wynika, że pod wpływem rosnącego ciśnienia widmo amplitudowe czujnika przesuwają się w stronę fal dłuższych, co pokazują rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Widmo wiązki wyjściowej czujnika dla dwóch wartości ciśnienia działającego na światłowód

Fig. 2. Spectrum of the sensor output beam for two values of pressure acting on the fiber



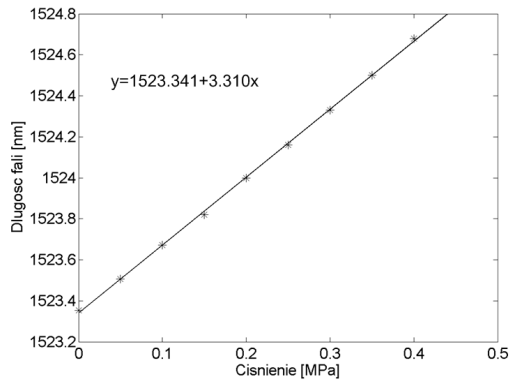
Rys. 3. Widmo wiązki wyjściowej czujnika dla różnych wartości ciśnienia działającego na światłowód

Fig. 3. Spectrum of the sensor output beam for different values of pressure acting on the fiber

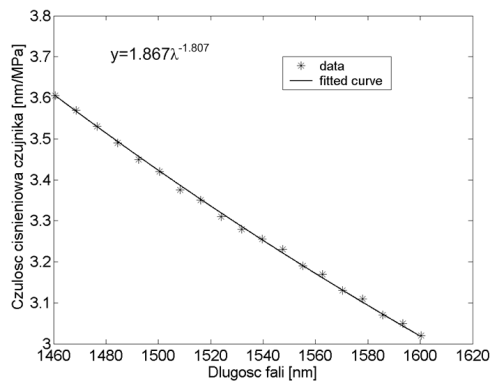
Wykonano pomiary charakterystyk przetwarzania czujnika w zakresie długości fal 1460–1600 nm. Przykładową charakterystykę przetwarzania badanego czujnika dla początkowej długości fali $\lambda = 1523,341$ nm, przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 4. Wyznaczona na jej podstawie czułość ciśnieniowa czujnika dla długości fali $\lambda = 1524,015$ nm wynosi $K_{IP} = 3,31$ nm/MPa.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono czułość ciśnieniową czujnika $K_{IP} = f(\lambda_k)$ dla poszczególnych długości fal odpowiadających minimum widma, a następnie wyznaczono zależność czułości ciśnieniowej w funkcji długości fali $K_{IP} = f(\lambda)$. Zależność tę przedstawiono na rysunku 5. Z rysunku tego widać, że czułość ciśnieniowa czujnika wykazuje nieznaczną zależność od długości fali, przy czym ze wzrostem długości fali czułość maleje. Taki przebieg zmienności czułości ciśnieniowej w funkcji długości fali wynika ze wzoru (4), ponieważ w rozpatrywanym przedziale długości fali, czułość modalowej dwójłomności fazowej

na ciśnienie ma stałą wartość, a iloraz długości fali λ i grupowej dwójłowności modowej Δn_G z długością fali maleje.



Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania czujnika ciśnienia
Fig. 4. Conversion characteristic of the pressure sensor



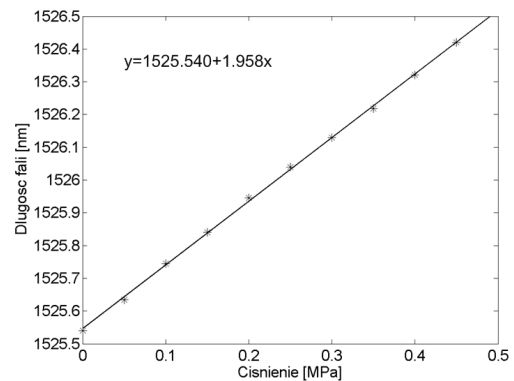
Rys. 5. Zależność czułości ciśnieniowej czujnika od długości fali
Fig. 5. Dependence of the sensor pressure sensitivity on the wavelength

Wykonano także pomiary czujnika z odcinkiem światłowodu fotonicznego PM-1550-01 o długości 241 mm. Wyznaczono jego czułość, której wartość dla długości fali $\lambda = 1553,06$ nm wynosi $K_{IP} = 3,20$ nm/MPa. Pomiary te potwierdzają właściwość czujnika, polegającą na tym, że jego czułość ciśnieniowa nie zależy od długości światłowodu dwójłownego zainstalowanego w jego pętli.

Przeprowadzono pomiary czujnika z odcinkiem światłowodu fotonicznego PM-1550-01 o długości 412 mm, którego tylko część o długości 312 mm poddano działaniu ciśnienia. Charakterystykę przetwarzania tego czujnika dla początkowej długości fali $\lambda = 1525,54$ nm przedstawiono na rysunku 6. Wyznaczona na jej podstawie czułość ciśnieniowa czujnika dla długości fali $\lambda = 1524,015$ nm wynosi $K_{IP} = 1,96$ nm/MPa. Z pomiarów tego czujnika wynika, że w przypadku zaistnienia potrzeby zmniejszenia czułości ciśnieniowej, można tego dokonać poddając działaniu ciśnienia tylko część odcinka światłowodu dwójłownego czujnika.

W czasie przeprowadzanych badań czujnika w warunkach laboratoryjnych nie stwierdzono wpływu zmian temperatury otoczenia na charakterystyki czujnika. Zatem w takich warunkach pracy czujnika, zarówno w pomiarach ciśnień statycznych jak i dynamicznych, nie potrzebna jest kompensacja wpływu zmian temperatury otoczenia.

W badanym czujniku odcinek światłowodu dwójłownego pełni rolę przetwornika pierwotnego, czyli mierzone ciśnienie działa bezpośrednio na niego. W czujniku nie ma przetwornika mechanicznego. Ze względu na bardzo małą masę takiego przetwornika jego bezwładność jest minimalna. Uwzględniając dodatkowo możliwość minimalizacji jego wymiarów przez zwiniecie w pętlę, czujnik może być stosowany w pomiarach ciśnień szybkozmiennych.



Rys. 6. Charakterystyka przetwarzania czujnika ciśnienia dla przypadku, kiedy tylko część światłowodu dwójłownego jest poddawana działaniu ciśnienia
Fig. 6. Conversion characteristic of the pressure sensor for the case when only part of the birefringent fiber is subjected to pressure

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań czujnika wynika, że jest on niewrażliwy na zmiany temperatury otoczenia, nie ma, zatem, potrzeby stosowania kompensacji temperaturowej. Charakteryzuje się dużą czułością przetwarzania - 3,2 nm/MPa dla długości fali 1550 nm. Ponadto nie ma przetwornika mechanicznego, więc ciśnienie działa bezpośrednio na światłowód dwójłowny czujnika. Czułość przetwarzania jest niezależna od długości pętli interferometru czujnika. Istnieje także możliwość zmiany czułości przetwarzania przez zmianę długości oddziaływania ciśnienia na światłowód dwójłowny. Czujnik posiada prosty układ optyczny i mechaniczny. Sygnał wyjściowy czujnika jest częstotliwościowy, dlatego jest on niewrażliwy na zakłócenia amplitudowe.

Powyższe zalety wskazują, że przedstawiony czujnik ciśnienia może znaleźć zastosowanie w zadaniach statycznego i dynamicznego miernictwa ciśnień w przemyśle, a w szczególności w procesach technologicznych o dużym zagrożeniu wybuchowym.

5. Literatura

- [1] Libatique N. Jain R.: A broadly tunable wavelength-selectable WDM source using a fiber Sagnac loop filter, *IEEE Photonics Technology Letters* 11, No.12, 2001, 1283-1285.
- [2] Frazzao O., Baptista J., Santos J.: Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors, *Sensors*, No 7, 2007, 2970-2983.
- [3] Kaczmarek C.: Światłowodowy czujnik siły bazujący na interferometrze Sagnaca z dwójłownym światłowodem fotonicznym, *Elektronika* 53, nr 11, 2012, 67-69.
- [4] Kaczmarek C.: Światłowodowy czujnik odkształcenia bazujący na interferometrze Sagnaca z dwójłownym światłowodem fotonicznym, *Przegląd Elektrotechniczny* 88, nr 11b, 2012, 288-290.
- [5] Kaczmarek C.: Optical wavelength discriminator based on a Sagnac loop with a birefringent fiber, *Electrical Review* 87, No.10, 2011, 325-327.
- [6] Zhao Ch.L., Yang X., Lu Ch., Jin W. Demokan M.S.: Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16, No. 11, 2004, 1535-1537.
- [7] Kim D., Kang J.: Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity, *Optics Express* 12, No. 19, 2004, 4490-4494.

otrzymano / received: 21.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper