

Analiza zastosowania światłowodowych siatek Bragga do pomiaru strzałki ugięcia

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania światłowodowych siatek Bragga do wyznaczenia strzałki ugięcia materiału, poddanego działaniu siły gnącej. Wykorzystana w badaniach metoda pomiarowa bazuje na zjawisku wstecznego odbicia długości fali Bragga, która umożliwia punktowy odczyt odkształceń oraz temperatury. W artykule przedstawiony został wpływ grubości materiału oraz miejsca mocowania siatek Bragga na wartość odczytanych odkształceń materiału, a także na ich podstawie wyznaczona została wartość strzałki ugięcia.

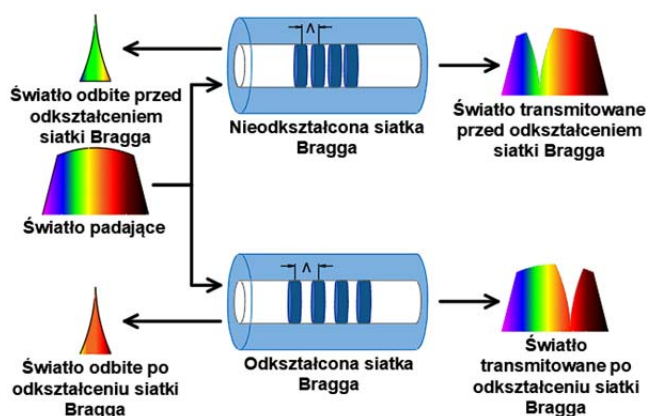
Abstract. This article presents analysis of using fiber Bragg gratings for deflection distance measurement of a material subjected to bending force. The measurement method used in presented research is based on the phenomenon of the back reflection of Bragg wavelength, which enables a point reading of strain and temperature. The article presents the effect of material thickness and the location of Bragg gratings on the value of the material deformation and on their basis deflection distance value was determined. (Analysis of using fiber Bragg gratings for deflection distance measurement)

Słowa kluczowe: czujnik światłowodowy, monitoring strukturalny, strzałka ugięcia, światłowodowe siatki Bragga

Keywords: optical fiber sensor, structural health monitoring, deflection distance, fiber Bragg gratings

Wstęp

Odkąd w latach 70 ubiegłego wieku opracowano metodę wytwarzania światłowodów o akceptowalnej tłumienności poniżej 20 dB/km [1] znacznie wzrosło zainteresowanie techniką światłowodową [2]. Dzięki licznym zaletom takim jak małe wymiary, odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, niskie straty umożliwiające przesyłanie sygnału na duże odległości, wysoka odporność mechaniczna oraz możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur [3] światłowody znalazły zastosowanie nie tylko w telekomunikacji, ale również jako czujniki. Wśród zastosowań tego typu możemy wyróżnić między innymi czujniki wielkości fizycznych takich jak: akustyczne [4], magnetyczne [5] czy temperaturowe [6]. Ponadto można z ich pomocą wykonywać pomiary ciśnienia [7], przyspieszenia [8] czy naprężenia [9], zastępując tym samym klasyczne rozwiązania w postaci sond ciśnieniowych, termistorów, akcelerometrów czy tensometrów [10]. Wśród typów czujników światłowodowych możemy wyróżnić między innymi takie czujniki jak: Mach-Zehndera, Fabry-Perota, Bragga, Ramana oraz czujniki oparte na zjawisku rozpraszanie Rayleigha czy Brillouina [11, 12].



Rys. 1. Zasada działania czujnika odkształceń z wykorzystaniem światłowodowej siatki Bragga.

Czujniki światłowodowe wykorzystujące światłowodowe siatki Bragga (ang. Fiber Bragg Grating – FBG) charakteryzują się bardzo wysoką czułością (1,2 pm/ $\mu\epsilon$), rozdzielczością, a także liniową zależnością przesunięcia długości fali [13] oraz natychmiastową reakcją, wywołaną przyłożoną

siłą, lub zmianą temperatury. Zmiany efektywnego współczynnika załamania światła n_{eff} i/lub stałej siatki Bragga Λ na skutek przyłożonej siły i zmiany temperatury otaczającej FGB powoduje przesunięcie długości fali Bragga co jest opisane przez następującą zależność [14]:

$$(1) \Delta\lambda_B = 2 \left(\Delta \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T$$

gdzie: n_{eff} – efektywny współczynnik załamania światła, Λ – stała siatki, T – temperatura, l – długość siatki, $\Delta\lambda_B$ – zmiana długości fali Bragga.

Pierwsza oraz druga składowa równania (1) reprezentuje wynik oddziaływania siły oraz temperatury na długość fali Bragga. Schemat działania czujnika odkształceń wykorzystującego siatki Bragga został przedstawiony na Rys. 1.

Metoda pomiarowa

Rys. 2 przedstawia schemat ideowy sposobu wywołania odkształceń na próbkach wykonanych z materiału PMMA (moduł Younga $E = 3200$ MPa). Badane profile o przekroju prostokątnym posiadały tę samą wysokość l i szerokość b wynoszącą odpowiednio 1 m i 0,1 m. W ramach określenia wpływu grubości profilu na wartość obserwowanych odkształceń wielkość h wynosiła od 2 do 8 mm. Badane profile odchylane były jednopunktowo wywołując tym samym strzałkę ugięcia f o wartości od 0 do 0,2 m. Teoretyczne odkształcenie belki zostało wyliczone na podstawie prawa Hooke'a i jest ono opisane następującą zależnością:

$$(2) \quad \varepsilon = \frac{M}{EW} = \frac{6Fl}{Ebh^2}$$

gdzie, ε – odkształcenie belki, M – moment gnący, E – moduł Younga, W – wskaźnik wytrzymałości materiału, F – siła gnąca, l – odległość między miejscem przyłożenia siły a punktem mocowania czujnika, b i h odpowiednio szerokość i grubość badanego profilu.

Z kolei dla przypadku ugięcia profilu przedstawionego na Rys. 2a teoretyczna wartość strzałki ugięcia f wynosi:

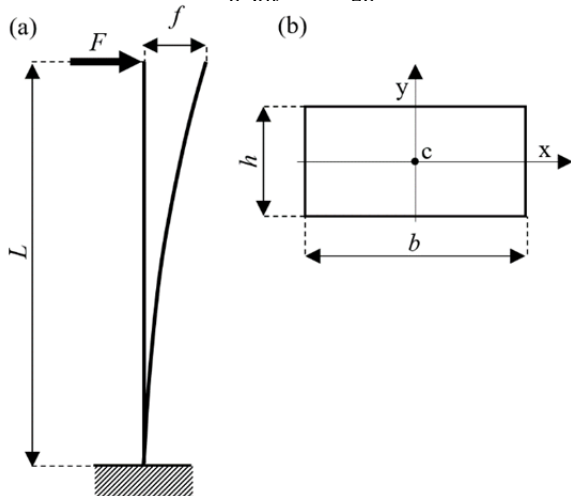
$$(3) \quad f = \frac{FL^3}{3EI}$$

gdzie, L – długość profilu, I – moment bezwładności. Aby uzależnić bezpośrednio wartość odkształcenia ε od wywołanej odległości ugięcia f , w pierwszej kolejności równanie (3) zostało przekształcone do postaci:

$$(4) \quad F = \frac{f3EI}{L^3}$$

Po podstawieniu do równania (2) wyrażenia opisującego siłę F , teoretyczna wartość odkształcenia materiału opisana jest następującą zależnością:

$$(5) \quad \varepsilon = \frac{18fIl}{L^3bh^2} = f \frac{3hl}{2L^3}$$



Rys.2. Schemat ideowy (a) oraz przekrój poprzeczny próbki (b).

Rys. 3 przedstawia badane próbki umieszczone w stole odkształceniowym. Na każdym z profili umieszczona była pojedyncza siatka FBG na wysokości 0,19 m od belki mocującej. W przypadku próbki o największej grubości równej 8 mm rozmieszczone zostały dodatkowe 3 siatki FBG w odstępach równych 0,19 m. Wszystkie czujniki FBG zostały precyzyjnie zintegrowane z powierzchnią PMMA na długości 5 cm przy użyciu dwuskładnikowego kleju epoksydowego.



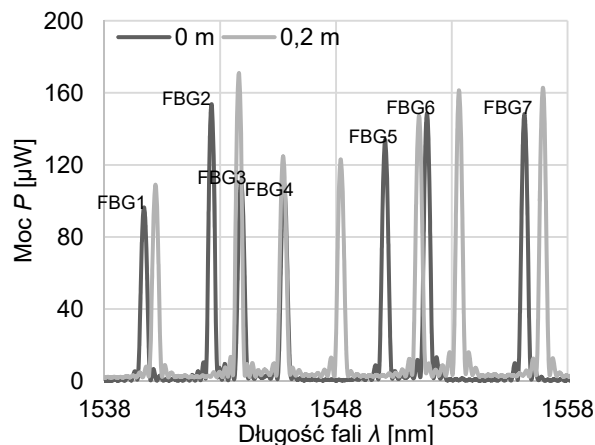
Rys.3. Stanowisko do odkształcania próbek z czujnikami światłowodowymi.

Zastosowane siatki FBG posiadały centralne długości fal mieszczące się w zakresie telekomunikacyjnego okna C (1530-1560 nm). Promieniowanie pochodzące ze źródła szerokopasmowego EXFO FTBx-2250 (1460-1625 nm) było wprowadzane przez cyrkulator optyczny do szeregowo połączonych siatek FBG, a odbite wstecznie widmo z poszczególnych czujników obserwowane było na analizatorze widma optycznego Anritsu MS9740A.

Wyniki

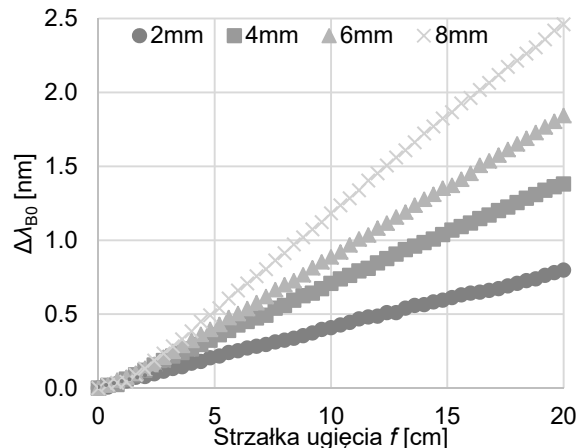
Przed przystąpieniem do pomiarów eksperymentalnych należało zmierzyć charakterystykę widmową wykorzysta-

nych siatek Bragga przy braku ugięcia próbek profili PMMA. Wynik pomiaru referencyjnego przedstawiony został na Rys. 4. Otrzymana charakterystyka stanowi wartość odniesienia dla kolejnych punktów pomiarowych. Na wykresie przedstawione jest również widmo zaobserwowane dla największej wywołanej wartości odchylenia próbek f równej 0,2 m. Widoczne jest przesunięcie centralnych długości fal w kierunku fal o większej długości dla każdej z badanych siatek FBG. Wcześniejsze obliczenia teoretycznych, maksymalnych wartości odkształceń ε pozwoliły na dobór odpowiednich wartości centralnych długości fal λ_{B0} siatek FBG. Dzięki temu możliwa jest obserwacja odpowiedzi widmowych pochodzących z wszystkich czujników jednocześnie, bez efektu wzajemnego nakładania się widm.



Rys.4. Charakterystyka widmowa siedmiu szeregowo połączonych siatek Bragga dla strzałki ugięcia równej 0 i 0,2 m.

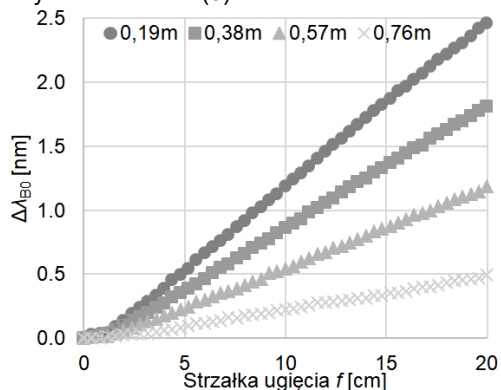
W pierwszej części eksperymentu sprawdzono wpływ grubości materiału na przesunięcie centralnych długości fali Bragga. W tym celu badane próbki za pomocą stanowiska przedstawionego na Rys. 3 zostały poddane odchyleniu w zakresie 0 - 0,2 m z krokiem 4 mm. Otrzymane rezultaty dla siatek umieszczonych w odległości 0,19 m od miejsca mocowania zostały przedstawione na Rys. 5.



Rys.5. Przesunięcie centralnych długości fali dla siatek FBG1-FBG4 rozmieszczonych na próbkach PMMA o różnej grubości.

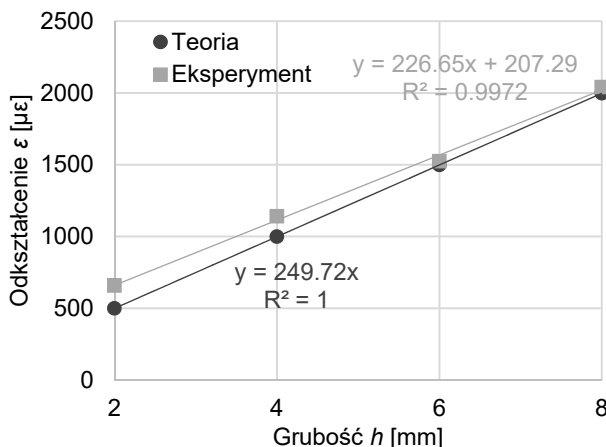
Z otrzymanych wyników można wywnioskować, że wraz ze wzrostem grubości materiału zwiększa się przesunięcie długości fali Bragga, a tym samym odkształcenie próbki. Ponadto można zauważyć liniową zależność wpływu ugięcia materiału na wartość przesunięcia centralnej długości fali wszystkich siatek FBG. Następnie sprawdzono wpływ wysokości punktu mocowania na wartość przesunięcia długości fali Bragga siatek FBG4-FBG7 rozmieszczonych na profilu o grubości 8 mm. Na podstawie otrzymanych rezultatów widocznych na Rys. 6 można zauważyć, że

otrzymane charakterystyki odznaczają się wysoką liniowością. Ponadto wraz ze wzrostem odległości punktu mocowania siatki, odkształcenie materiału powoduje mniejsze przesunięcie długości fali Bragga, a tym samym wartość odkształcenia materiału w tych punktach jest niższa. Tendencja ta zgodna jest z przewidywaniami teoretycznymi opisywanymi równaniem (5).



Rys.6. Przesunięcie centralnej długości fali dla siatek FBG4-FBG7 rozmieszczonych na próbce PMMA o grubości 8 mm.

Na podstawie zebranych wyników na Rys. 7 przedstawiono wpływ grubości profilu PMMA na wielkość obserwowanych odkształceń. Przedstawione wartości dotyczą przypadku odchylenia próbki na wartość maksymalną $f=0,2$ m. Jak można zauważyć, dla mniejszych grubości materiału uzyskane odkształcenie jest zawyżone względem wartości teoretycznych, natomiast im grubszy materiał, tym większa zbieżność otrzymanych wyników. Jest to skutek zbyt dużej elastyczności materiału dla niewielkiej jego grubości, co prowadzi do uginania się belki pod wpływem siły grawitacji.

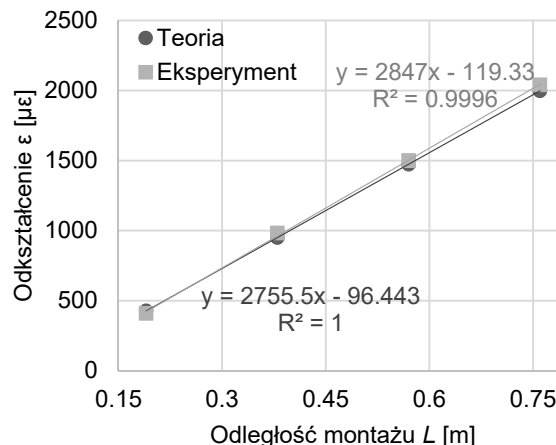


Rys.7. Zależność wpływu grubości próbki na wielkość odkształceń

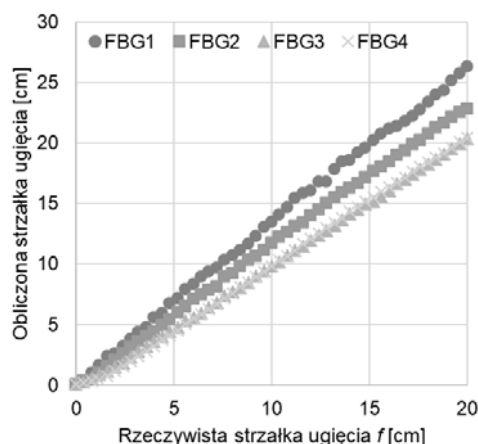
Kolejnym krokiem było porównanie wpływu odległości montażu siatki na wartość odkształcenia materiału. Na podstawie zależności przedstawionych na Rys. 8 można zauważyć, że wraz ze wzrostem odległości montażu siatki od miejsca przyłożenia siły, zwiększa się odkształcenie materiału. Wynika to z wartości momentu gnącego, który w tym przypadku największą wartość przyjmuje w miejscu mocowania belki. Porównując wyniki z teorią widać, że otrzymane rezultaty są zbieżne z obliczeniami teoretycznymi, a charakterystyka odznacza się wysoką liniowością.

Ostatnim etapem było przeprowadzenie obliczeń strzałki ugięcia f badanych profili na podstawie zmierzonych wartości odkształceń występujących na siatkach FBG. Sprawdzono zarówno wpływ grubości belki jak i odległości montażu siatki na wartości wyznaczonego odchylenia. Zebrane

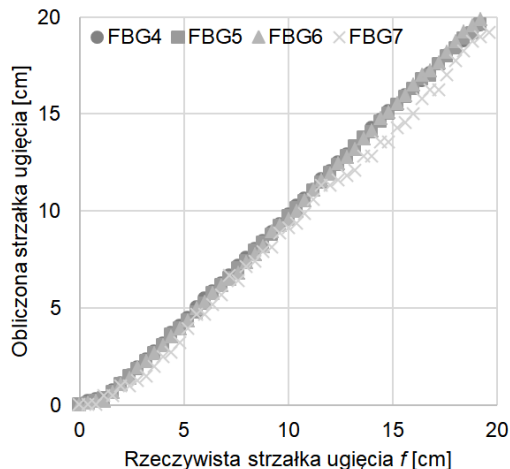
dane porównano z rzeczywistą wartością strzałki ugięcia ustawianą manualnie na stelażu odkształceniowym. Jak można zauważyć na Rys. 9 dla grubości materiału wynoszącej 2 oraz 4 mm stwierdzono wyraźne zawyżenie obliczonej wartości odchylenia belki w stosunku do wartości rzeczywistej. Jest to najprawdopodobniej spowodowane elastycznością materiału przy niewielkiej jego grubości, co skutkowało uginaniem się belki pod wpływem działania siły grawitacji. W przypadku belek o grubości 6 oraz 8 mm to zjawisko nie występowało, dzięki czemu otrzymane rezultaty są zbieżone do teoretycznych.



Rys.8. Zależność wpływu odległości montażu światłowodowej siatki Bragga na wielkość odkształceń.



Rys.9. Porównanie wartości obliczonej oraz rzeczywistej strzałki ugięcia dla siatek Bragga umieszczonych na profilach o różnej grubości.



Rys.10. Porównanie wartości obliczonej oraz rzeczywistej strzałki ugięcia dla siatek Bragga rozmieszczonych na różnej wysokości montażowej dla profilu 8 mm.

Obliczone wartości strzałki ugięcia przedstawione na Rys. 10 dotyczą przypadku, w którym wszystkie cztery siatki FBG umieszczone były na tym samym profilu lecz na różnej wysokości montażowej. Niezależnie od tej wysokości obliczona wartość strzałki ugięcia dla każdej z siatek FBG bardzo dobrze oddaje rzeczywistą wartość odchylenia f . Wyjątek stanowi siatka FBG7, która zamontowana była najdalej od miejsca gięcia profilu PMMA w wyniku czego obserwowane były najmniejsze wartości odkształceń ϵ .

Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania światłowodowych siatek Bragga do wyznaczenia strzałki ugięcia materiału, poddanego działaniu siły gnącej. Wykorzystując światłowodowe siatki Bragga zbudowano 4 czujniki na profilach PMMA o grubościach odpowiednio 2 mm, 4 mm, 6 mm i 8 mm. Następnie profile te poddano działaniu siły gnącej jednocześnie dokonując pomiarów charakterystyk widmowych pochodzących od siatek FBG. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na określenie odkształcenia, które zmienia się liniowo w funkcji grubości profilu PMMA. Wyniki pomiarów są zbieżne z obliczeniami teoretycznymi. Maksymalne odkształcenie wynoszące 2000 $\mu\epsilon$ uzyskano dla profilu o grubości 8 mm. W kolejnym etapie badań wyznaczono strzałki ugięcia materiału na podstawie obliczonych wartości odkształceń. Sprawdzono wpływ grubości belki jak i odległości montażu siatki na wartości wyznaczonego odchylenia. Dla grubości materiału wynoszącej 2 mm oraz 4 mm stwierdzono wyraźne zawyżenie wartości odchylenia belki w stosunku do obliczeń teoretycznych z uwagi na dużą elastyczność cienkich profili. W przypadku belek o grubości 6 oraz 8 mm to zjawisko nie występowało, dzięki czemu otrzymane rezultaty są zbliżone do teoretycznych.

Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić iż wykonane czujniki są odpowiednie do pomiaru odkształceń profili PMMA, a liniowość odczytów tej wielkości pozwala na obliczenie wartości strzałki ugięcia.

Podziękowania

Praca została współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: Projekty Aplikacyjne 4.1.4, numer projektu POIR.04.01.04-00-0034/18.

Artykuł został zrealizowany, gdy pierwszy z autorów był doktorantem w Interdyscyplinarnej Szkole Doktorskiej Politechniki Łódzkiej.

Autorzy: mgr inż. Arkadiusz Woźniak, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: arkadiusz.wozniak@dokt.p.lodz.pl; mgr inż. Mateusz Łakomski, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: mateusz.lakomski@p.lodz.pl; dr inż. Grzegorz Tosik, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: grzegorz.tosik@p.lodz.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl

LITERATURA

1. G. P. Agrawal, „Fiber-Optic Communication Systems,” *John Wiley & Sons*, 2012.
2. P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B. T. Chorpeneing, M. P. Buric i P. R. Ohodnicki, „Distributed optical fiber sensing: Review and perspective,” *Applied Physics*, 2019.
3. X. Sun, J. Li, D. T. Burgess, M. Hines i B. Zhu, „A multicore optical fiber for distributed sensing,” *Fiber Optic Sensors and Applications XI*, 2015.
4. D. Chen, Q. Liu i Z. He, „High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution,” *OPTICS EXPRESS*, tom 13, nr 26, pp. 16138-16146, 2018.
5. L. Youngxi, P. Shengli, Z. Yongliang, Z. Rui, J. Zixuan, Y. Jilei, H. Zijian, H. Zhongxue, L. Dihui i L. Xinjie, „All-fiber-optic vector magnetic field sensor based on side-polished fiber and magnetic fluid,” *Optics Express*, tom 24/25, nr 27, pp. 35182-35188, 2019.
6. T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, JR., J. H. Cole, S. C. Rashleigh i R. G. Priest, „Optical Fiber Sensor Technology,” *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, 1982.
7. E. Vorathin, Z. Hifizi, N. Ismail i M. Loman, „Review of high sensitivity fibre-optic pressure sensors for low pressure sensing,” *Optics and Laser Technology*, pp. 1-18, 2020.
8. P. F. da Costa Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. de Lemos Pinto, R. N. Nogueira, H. Varum, A. G. Costa i P. S. de Brito Andre, „Optical Fiber Accelerometer System for Structural Dynamic Monitoring,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, pp. 1347-1354, 2009.
9. A. D. Kersey i T. A. Berkoff, „Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection,” *OPTICS LETTERS*, pp. 72-74, 1993.
10. A. D. Kersey, „A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology,” *OPTICAL FIBER TECHNOLOGY*, 1996.
11. S. S. Yin i P. Ruffin, „FIBER OPTIC SENSORS,” w *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*, 2006.
12. Y. Muanenda, C. J. Oton i F. Di Pasquale, „Application of Raman and Brillouin Scattering Phenomena in Distributed Optical Fiber Sensing,” *Frontier in Physics*, 2019.
13. K. Iniewski i G. Rajan, *Optical Fiber Sensors - Advanced Techniques and Applications*, Boca Raton: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
14. A. Othonos, „Fiber Bragg gratings,” w *Review of Scientific Instruments*, AIP Publishing LLC., 1997, pp. 4309-4341.