

Aleksandra SIKORA, Zdzisław KACZMAREK

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, SAMODZIELNY ZAKŁAD ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ I METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Praca wybranych rodzajów światłowodowych siatek Bragga jako przetworników odkształceń impulsowych

Mgr inż. Aleksandra SIKORA

Jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W roku 2002 obroniła pracę magisterską na specjalności: Informatyka. Po studiach podjęła pracę na swoim macierzystym wydziale na stanowisku asystenta w Samodzielnym Zakładzie Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii Elektrycznej. Przygotowuje pracę doktorską z zakresu zastosowania światłowodowych siatek Bragga w miernictwie szybkozmiennych wymuszeń mechanicznych.

e-mail: asikora@tu.kielce.pl



Dr hab. inż. Zdzisław KACZMAREK

Ukończył studia na Wydziale Łączności Politechniki Wrocławskiej w 1964 r. W 1977 r. uzyskał stopień doktora w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej a w 1990 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Jest autorem ponad 70 prac naukowych w tym jednej monografii z zakresu niemiernictwa dynamicznego, elektrycznych i światłowodowych czujników pomiarowych, odtwarzania sygnałów pomiarowych.

e-mail: etmzk@eden.tu.kielce.pl

**Streszczenie**

W pracy przeanalizowano wpływ długości światłowodowej równomiernej siatki Bragga z apodyzacją na dokładność przetwarzania odkształceń impulsowych. Wykorzystując wynikający z teorii modów sprzężonych macierzowy opis siatki obliczono przebiegi widma mocy wiązki odbitej przez siatkę, wywołane propagującym wzdłuż niej impulsem odkształcenia. W oparciu o wprowadzoną częstotliwość centroidalną siatki wyznaczono średniokwadratowy błąd przetwarzania siatki w funkcji stosunku wartości jej długości i długości fali odkształcenia, dla prostokątnego impulsu odkształcenia.

Abstract

The influence of the length of a uniform fiber Bragg grating with apodization on the accuracy of transducing an impulsive strain was analyzed. Using the matrix description of the grating, derived from the coupled mode theory, the waveforms were calculated of the power spectrum of the beam reflected by the grating, caused by the strain impulse propagating along it. On the basis of the introduced centroidal frequency of the grating, the mean square transducing error of the grating was calculated, as a function of the ratio between its length and the strain wave length, for a rectangular strain impulse.

1. Wprowadzenie

W miernictwie wielkości nieelektrycznych światłowodowe siatki Bragga wykorzystywane są jako przetworniki odkształcenia i temperatury [1][2]. Ich główne zalety to, oprócz zalet charakterystycznych dla wszystkich czujników światłowodowych, częstotliwościowy sygnał wyjściowy i małe wymiary. Uwzględniając przy tym bardzo szerokie pasmo przenoszenia światłowodu (10 THz w oknie transmisyjnym 1,5 μm), na którym wytwarzane są siatki Bragga, należy oczekiwać w najbliższej przyszłości powszechnego stosowania tych przetworników w miernictwie przemysłowym. Światłowodowe siatki Bragga mają znikomą masę w porównaniu z masą elementów na których są instalowane. Można je uważać, w szerokim zakresie częstotliwości zmian odkształceń, za przetworniki bezinercyjne. Przy dużych częstotliwościach mierzonych odkształceń, istotnym ograniczeniem powodującym powstawanie zniekształceń sygnału wyjściowego tych przetworników jest ich czynna długość (baza pomiarowa).

W artykule przedstawiono sposób i wyniki analizy wpływu długości światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie z apodyzacją na dokładność przetwarzania przez nią prostokątnych impulsów odkształcenia.

2. Metoda analizy widma mocy wiązki odbitej przez siatkę

Do wyznaczania widma wiązki odbitej przez siatkę nierównomiernie stosowanych jest kilka metod numerycznych. Najczęściej wykorzystywaną do tego celu, ze względu na dużą dokładność i małe nakłady obliczeniowe, jest metoda macierzy przejścia [3].

Na podstawie teorii modów sprzężonych siatkę równomierną można opisać macierzą przejścia T wiążącą widma wiązki wejściowej i wyjściowej siatki [4]:

$$\begin{bmatrix} A_o \\ B_o \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie A_i jest amplitudą fali wejściowej propagującą w kierunku dodatnim, B_i jest amplitudą fali propagującą w kierunku ujemnym, A_o i B_o są amplitudami fal na wyjściu, propagującymi odpowiednio w kierunku dodatnim i ujemnym. Macierz T jest określona przez długość fali Bragga, parametry siatki i długość fali światła λ .

W celu obliczenia widma wiązki odbitej przez siatkę pod wpływem oddziaływania na nią impulsów odkształcenia, podzielono ją na M mniejszych, równomiernych sekcji. Wówczas macierz T opisująca całą siatkę jest iloczynem macierzy T_M, T_{M-1}, \dots, T_1 , które to opisują każdą sekcję siatki osobno:

$$T = T_M * T_{M-1} * \dots * T_1 \quad (2)$$

Dla każdej sekcji siatki macierz T_k (gdzie $k \in \langle 1, M \rangle$) definiujemy następująco:

$$T_k = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie poszczególne elementy macierzy są dane zależnościami[1]:

$$t_{11} = \cosh(\Omega dz) - i \frac{\zeta}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \quad (4)$$

$$t_{12} = -i \frac{\kappa}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \quad (5)$$

$$t_{21} = \overline{t_{12}} \quad (6)$$

$$t_{22} = \overline{t_{11}} \quad (7)$$

We wzorach: dz oznacza długość k -tej równomiernej sekcji siatki, κ i ζ są lokalnymi współczynnikami sprzężenia dla k -tej sekcji, Ω jest określona wzorem:

$$\Omega = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^2} \quad (8)$$

Widmo wiązki odbitej przez siatkę obliczono przy następujących warunkach brzegowych: $A_i(L) = 1$ oraz $B_o(L) = 0$, gdzie L – długość siatki. Wówczas współczynnik odbicia mocy dla całej siatki wyraża się wzorem:

$$R(l, \lambda) = \left| -\frac{t_{21}}{t_{22}} \right|^2 \quad (9)$$

Propagowane przez siatkę odkształcenie zmienia długość fali Bragga każdej jej sekcji. Związek pomiędzy przesunięciem długości fali Bragga $\Delta\lambda_B$ i odkształceniem ε działającym wzdłuż osi światłowodu, przy stałej temperaturze, jest dany zależnością [1]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_e \varepsilon \quad (10)$$

gdzie $K_e = 0,78$ - współczynnik względnej czułości odkształcenia.

Parametry siatki dobranej do obliczeń są następujące: długość fali Bragga wynosi 1550 nm, efektywny współczynnik załamania $n_e = 1,447$, szerokość połówkowa widma wiązki odbitej wynosi 0,3 nm.

Wstęgi boczne widma odbitego wyeliminowano stosując w obliczeniach profil Gaussa $g(z)$ do funkcji współczynnika załamania[5]:

$$\delta n_e(z) = \delta n_e g(z) \quad (11)$$

gdzie:

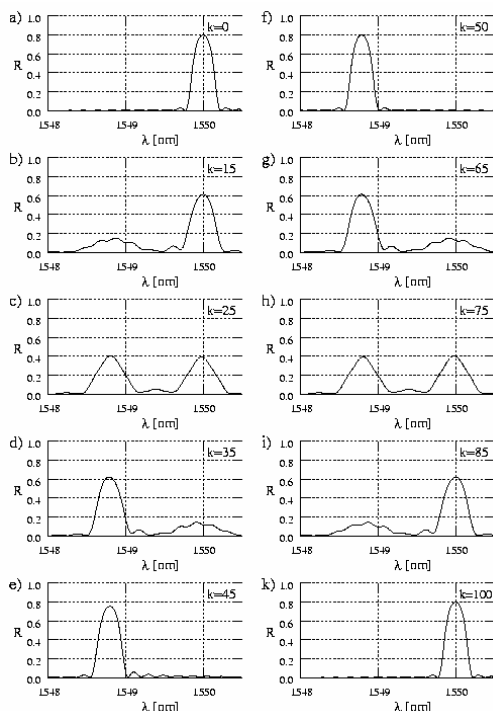
$$g(z) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-a_0}{a_1}\right)^2\right] \quad (12)$$

przy czym $z \in (0, L)$, L - długość siatki, a_0 i a_1 - parametry równania Gaussa.

Ze względu na stosowaną metodę macierzy przejścia podzielono siatkę na 50 sekcji ($M = 50$), co spełnia warunek ograniczający ważność tej metody [2]:

$$M \ll \frac{2n_e L}{\lambda_B} \quad (13)$$

Rysunek 1 przedstawia zmiany widma wiązki odbitej przez siatkę wywołane propagacją impulsu odkształcenia wzdłuż jej kolejnych sekcji [6].



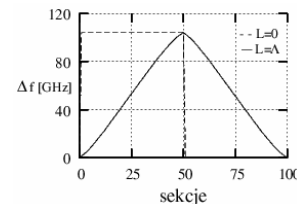
Rys. 1. Zmiany widma mocy wiązki odbitej siatki równomiernej z apodyzacją, podczas propagacji wzdłuż jej osi podłużnej, ścisającego impulsu odkształcenia o kształcie prostokąta, o długości impulsu równej długości siatki i amplitudzie 1000µε

3. Analiza wpływu długości siatki na dokładność przetwarzania odkształcenia impulsowego

Wyniki przeprowadzonej analizy widma mocy wiązki odbitej przez siatkę, wskazują, że wyznaczenie częstotliwości Bragga siatki podczas propagacji impulsu odkształcenia przez siatkę nie jest możliwe. W celu dokonania ilościowej analizy wpływu długości siatki na dokładność przetwarzania odkształcenia impulsowego wprowadza się częstotliwość centroidalną siatki jako odciętą środka ciężkości widma mocy jej wiązki odbitej określoną wzorem [7]:

$$f_{cen} = \frac{\int_0^{\infty} f * R(l, f) df}{\int_0^{\infty} R(l, f) df} \quad (14)$$

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany częstotliwości centroidalnej siatek o długościach $L = 0$ i $L = \Lambda$ pod wpływem działającego na nie prostokątnego odkształcenia impulsowego o długości siatki $\Lambda = L$ i wartości odkształcenia 1000µε

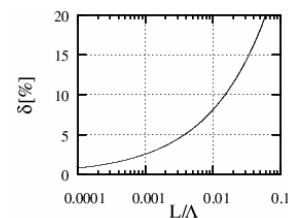


Rys. 2. Zmiany częstotliwości centroidalnej siatek Bragga o długościach $L = 0$ i $L = \Lambda$ pod wpływem działania prostokątnego odkształcenia impulsowego o długości siatki $\Lambda = L$ i wartości odkształcenia 1000µε

Analizę wpływu długości SSB na dokładność przetwarzania propagowanych odkształceń impulsowych można przeprowadzić, przyjmując za miarę dokładności przetwarzania wartość względnego błędu średniokwadratowego. Błąd ten określa się wzorem [8]:

$$\delta_w^2 = \frac{\int_0^{\infty} [\Delta f(t) - \Delta f_i(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} \Delta f_i^2(t) dt} \quad (15)$$

gdzie f - częstotliwość rzeczywista, f_i - częstotliwość poprawna (dla siatki o długości $L = 0$). Na podstawie zależności (12) można wyznaczyć przebieg błędu średniokwadratowego powodowanego przetwornikiem w funkcji stosunku długości siatki i długości impulsu wymuszającego dla wymuszenia jednorazowego prostokątnego.



Rys. 3. Zależność błędu średniokwadratowego δ_w^2 przetwornika, przetwarzającego jednorazowe przebiegi wymuszeń impulsowych o kształcie prostokątnym, w funkcji stosunku długości siatki i długości impulsu

4. Wnioski

Dobór właściwej długości siatki Bragga jest podstawowym zadaniem przy stosowaniu jej jako przetwornika pomiarowego

w pomiarach odkształceń impulsowych. Z przeprowadzonych rozważań i obliczeń wynika, że można to zadanie rozwiązać wykorzystując analizę widma mocy wiązki odbitej siatki na podstawie jej modelu macierzowego. Przyjmując jako wielkość wyjściową siatki jej częstotliwość centroidalną, a za miarę dokładności przetwarzania wartość błędu średniokwadratowego, można z obliczonej numerycznie zależności błędu średniokwadratowego w funkcji stosunku długości siatki i długości impulsu, wyznaczyć długość siatki zapewniającą przetwarzanie impulsów odkształcenia o kształcie prostokątnym, z założoną dokładnością.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 3T10C 02527.

5. Literatura

- [1] Othonos A., Kalli K.: *Fiber Bragg Gratings. Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Boston London, Artech House, 1999.
- [2] Kersey A. D., et al.: *Fiber Grating Sensors*. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 15, no. 8, 1997, pp 1442-1462.
- [3] Dionisio R. P., et al.: *Numerical methods for fiber Bragg gratings*. *Proceedings of 5th International Conference on Transparent Optical Networks*, Warsaw, 2003, pp.185-188.
- [4] Kashyap R.: *Fiber Bragg gratings*. San Diego Toronto, Academic Press, 1999, Chapter 4.
- [5] Peters K. Et al.: *Experimental verification of response of embedded optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields*. *Optic and Lasers Engineering*, no. 33, 2000, pp.107-119.
- [6] Sikora A., Kaczmarek Z.: *Przetwarzanie odkształceń impulsowych apodyzowaną światłowodową siatką Bragga o stałym okresie*. *Analiza numeryczna*. Sympozjum nt. *Pomiarów Dynamicznych – prace komisji Metrologii oddziału PAN w Katowicach*, Seria: *Konferencje nr 10*, Gliwice 2005, str 103-112.
- [7] Bracewell R.: *Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania*. Warszawa, WNT, 1968.
- [8] Kaczmarek Z.: *Pomiar i odtwarzanie przebiegów sił i ciśnień impulsowych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, seria *Monografie*, nr 26, Kielce 2002.

Title: Operation of selected types of fiber Bragg gratings as impulsive strain transducers

Artykuł recenzowany

RECENZJE

Podstawy Metrologii

Jan Cieplucha

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2005, ISBN 83-7283-159-9

liczna stron: 238, wymiary: B5, oprawa: miękka,

literatura 36 pozycji, 7 załączników, a także indeks i kalendarium polskiej metrologii

W czasopiśmie *Pomiary Automatyka Kontrola* systematycznie umieszczane są doniesienia o nowych podręcznikach metrologii. Pomimo wielu dobrych książek z tej tematyki brakuje opracowań dla początkujących studentów nauk technicznych, w szczególności na kierunkach nieelektrotechnicznych.

Prof. Jan Cieplucha wykorzystał wieloletnie doświadczenia metrologicznego zespołu dydaktycznego stworzonego w Łodzi przez prof. Władysława Gundlacha przy pisaniu wydanego w 2005 r. podręcznika akademickiego.

Autor zwrócił uwagę na służebną rolę metrologii wobec różnych dziedzin nauki i techniki i jej powiązanie z projektowanymi, badanymi i eksploatowanymi obiektami. Założył pełną korelację wykładu z zajęciami seminaryjnymi i laboratoryjnymi, dostosowując poziom pomocy dydaktycznych do wiedzy opanowanej przez studenta w szkole średniej i na pierwszym roku studiów. Umiejętnie połączył podstawy teoretyczne z opisem i przykładami stosowania metod pomiarowych.

Podręcznik oprócz wykazu oznaczeń i wstępu zawiera 7 rozdziałów, w których w sposób uporządkowany zawarte są niezbędne informacje dotyczące podstawowych zagadnień metrologicznych.

Proces poznawczy obejmujący schematy pomiarowe, obiekty badań i modele przedstawione są w rozdziale 2-gim, jednostki miar w rozdziale 3-cim, a struktura procesu pomiarowego w rozdziale 4-tym. Dwa następne rozdziały dotyczą opracowania wyników pomiarów m.in. z wykorzystaniem metod statystyki matematycznej i przedstawienia danych eksperymentalnych równaniem analitycznym. Obszerny 90-cio stronicowy rozdział 7-my dotyczy struktury przyrządów pomiarowych i ich właściwości metrologicznych. Wykorzystując schemat blokowy Autor omawia właściwości statyczne i dynamiczne przyrządów i przechodzi dalej do różnego rodzaju przetworników pomiarowych: mechanicznych, pneumatycznych, optycznych, elektrycznych. Ostatni 15-sto stro-

nicowy 8-my rozdział wprowadza czytelnika w problematykę automatyzacji i komputeryzacji procesu pomiarowego.

Niemal każdy rozdział zawiera przykłady oraz zadania do samodzielnego rozwiązania. Zadania te pozwalają studentom na bieżąco sprawdzać i upewniać się, czy właściwie zrozumieli wykład i materiał zawarty w podręczniku. Na przydatność tego typu sprawdzianu zwrócił uwagę J.R. Taylor, który w drugim wydaniu książki „*Wstęp do analizy błędów pomiarowego*” PWN, Warszawa, 1999 podwoił liczbę takich zadań do 264.

Podręcznik napisany jest w sposób przystępny i na dobrym poziomie merytorycznym.

Wspomagają go skorelowane z nim:

- podręcznik akademicki *Laboratorium podstaw metrologii*, Łódź 2004
- skrypt *Podstawy metrologii. Ćwiczenia audytoryjne*, Łódź 1994 tego samego autora.

Racjonalne podejście do metrologii, które prezentuje omawiany podręcznik akademicki polega na próbie przekazania studentom nie tylko wiedzy jak można mierzyć wielkości fizyczne, ale także wiedzy i przesłanek do czego pomiar ma być wykorzystany i z jaką uzasadnioną niepewnością ma być wykonany. Autor podręcznika wskazuje na konieczność połączenia wiedzy metrologicznej z problematyką interdyscyplinarną, niezbędną przy projektowaniu procesów, budowie modeli i programów oraz konstruowaniu obiektów inżynierskich.

Napisana w formie podręcznika akademickiego książka, wraz ze wzmiankowanymi wyżej pomocami dydaktycznymi stanowią znakomite materiały do nauczania podstaw metrologii na pierwszym roku studiów na kierunkach: automatyka i robotyka, budowa i eksploatacja maszyn, energetyka, inżynieria środowiska, mechanika i na innych pokrewnych w uczelniach technicznych, rolniczych i ekonomicznych.

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza