

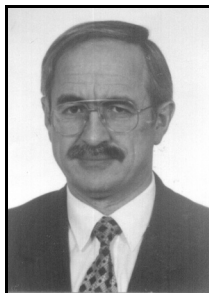
Tomasz WIĘCEK, Andrzej WASILEWSKI

KATEDRA FIZYKI, POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Czułość dyfrakcyjnego pomiaru małych przemieszczeń

Dr inż. Tomasz WIĘCEK

Ukończył studia na Politechnice Rzeszowskiej w 1978 r. oraz obronił pracę doktorską w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w 1986 r. W 1992 roku założył Fundację Nauka dla Przemysłu i Środowiska, w której jest prezesem. Jest członkiem krajowych i międzynarodowych towarzystw naukowych: PSNPP, PTF, SPIE, IEEE. W swoim dorobku ma ponad 50 publikacji z dziedziny techniki laserowej i metrologii optoelektronicznej.



e-mail: ftkwiece@prz.rzeszow.pl

Dr inż. Andrzej WASILEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej. W latach 1979 – 1992 pracował w Zakładach Radiowych UNITRA-RZESZÓW. Uzyskał w 2002 roku stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Włókienniczej i Ochrony Środowiska Akademii Techniczno – Humanistycznej w Bielsku-Białej. Zainteresowania: optomechanika, zastosowanie technik laserowych do badań własności mechanicznych, optyczne układy pomiarowe, własności materiałów auksetycznych.



e-mail: optlabwa@prz.edu.pl

Streszczenie

Tematem pracy jest wykorzystanie zjawiska dyfrakcji Fraunhofera wiązki laserowej w pomiarach długości. Jednym z parametrów metrologicznych układu pomiarowego jest czułość. Przedstawiono czułość dyfrakcyjnego pomiaru małych przemieszczeń dla różnych sposobów korzystania z rozkładu prążków dyfrakcyjnych. Rozpatrzono pomiar zmian szerokości szczeliny z użyciem prążka rzędu zerowego oraz pomiar szerokości szczeliny poprzez analizę rozkładu prążków dyfrakcyjnych.

Słowa kluczowe: czułość, prążki dyfrakcyjne, przemieszczenie.

Sensitivity of diffraction measurements of small displacements

Abstract

The theoretical analysis of influence of measurement conditions on sensitivity and linearity of a measurement set-up was performed. The results obtained from theoretical considerations were compared with the experimental effects which included measurement of the slit with the diffraction pattern received from the analysis. The measurement set-up sensitivity was determined by statistical trials when assuming that it will be proportional to the intensity difference square at unitary change of the slit width. If there is a need to determine a mechanical element frequency, detection of the zero fringe can be performed. In such a case there are taken dynamic measurements. They can be used in a pulse mechanical spectrometer for determination of the Young's modulus or dumping coefficient for several kinds of vibrations. The measurement set-up realised, as a result of some modification, is applicable to investigations of longitudinal, torsion or banding vibrations. In case of necessity to evaluate the mechanical element elongation, static measurements should be taken. The analysis of a diffraction pattern determines the slit width and, simultaneously, elongation of the material. This method allows determining the static Young's modulus and, in consequence, after some modification also the modulus for torsion vibrations.

Keywords: sensitivity, diffraction fringes, displacement.

1. Wstęp

Laser wykorzystywany jest w wielu układach pomiarowych między innymi w dyfraktometrii. Pomiar optyczny charakteryzuje się specyficznymi właściwościami. Pomiar małych przemieszczeń z użyciem światła laserowego może być zdalny, bezstykowy i bezinercyjny. Prezentowana praca wykorzystuje zjawisko dyfrakcji Fraunhofera na szczelinie utworzonej pomiędzy ostrzem ruchomym i nieruchomym do pomiaru małych przemieszczeń. Jednym z parametrów układu pomiarowego jest czułość metody, która jest rozpatrywana w dwóch wariantach zależnie od sposobu analizy pola dyfrakcyjnego.

2. Opis układu pomiarowego

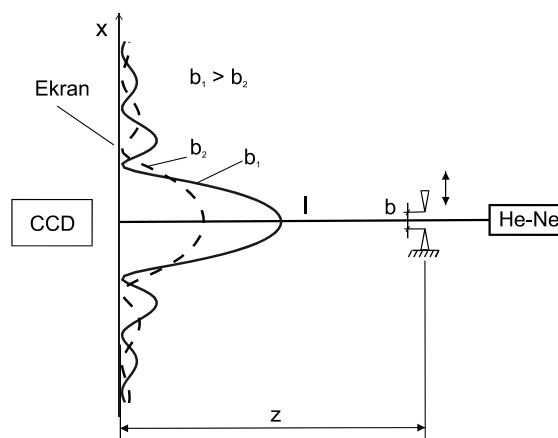
Laser zastosowany jako źródło światła generuje falę [1] prawie płaską. Falę sferyczną uważa się za falę płaską w dyfrakcji

Fraunhofera jeżeli odchyłka frontu falowego w obszarze szerokości b szczeliny jest mniejsza od $\lambda/20$. Założenie to określa maksymalną szerokość szczeliny dla danej wartości z , którą można wyznaczyć z warunku podanego przez Francisca T.S. Yu [1]:

$$z_{\min} \geq \frac{10b^2}{4\lambda} \quad b_{\max} \leq \sqrt{0,4\lambda z}, \quad (1)$$

gdzie: λ - długość fali świetlnej, b - szerokość szczeliny, z - odległość ekranu od szczeliny.

Wiązka światła laserowego przechodząc przez szczelinę b ulega dyfrakcji co pokazano na rys. 1. Natężenie światła w zerowym prążku dyfrakcyjnym rejestruje umieszczona tam fotodiody. Zmieniając wartość szczeliny wpływamy na szerokość zerowego prążka dyfrakcyjnego a tym samym na wartość oświetlenia fotodiody. Aby otrzymać stały rozkład prążków dyfrakcyjnych wzdłuż długości szczeliny ostrza powinny być równoległe do siebie, typowa utworzona w ten sposób szczelina ma szerokość rzędu stu kilkudziesięciu μm .



Rys. 1. Pomiar przemieszczenia ostrza (I – natężenie światła, CCD – kamera lub detektor, b – szerokość szczeliny)

Fig. 1. Measurement of edge displacement (I – light intensity, CCD – camera or detector, b – slit width)

Jeżeli zmieniamy szerokość szczeliny b to rozkład natężenia światła w prążkach dyfrakcyjnych zmienia się zgodnie z poniższą zależnością [2, 3]:

$$I(x, b) = A^2 b^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b x}{\lambda z}\right)}{\left(\frac{\pi b x}{\lambda z}\right)^2}, \quad (2)$$

gdzie: A - amplituda fali elektromagnetycznej, $I(x, b)$ - natężenie światła.

Pomiar szerokości szczeliny można zrealizować poprzez pomiar natężenia prążka zerowego rzędu z wykorzystaniem detektora lub przez analizę rozkładu prążków dyfrakcyjnych matrycą detektorów (kamera CCD). Do pomiarów dynamicznych zmian szerokości szczeliny zastosowano pojedynczy detektor umieszczony w polu prążka zerowego rzędu. Natomiast do pomiarów statycznych wykorzystano analizę pola dyfrakcyjnego przy pomocy kamery CCD. Charakterystyczną właściwością prążka zerowego jest to, że jego natężenie zależy od szerokości szczeliny natomiast jego położenie nie ulega zmianie. Jednocześnie występuje minimalny wpływ zniekształceń pola dyfrakcyjnego na natężenie światła mierzone w tym prążku. Ten sposób analizy jest szczególnie przydatny do badania zmian szerokości szczeliny. W przypadku konieczności pomiaru szerokości szczeliny należy wcześniej układ skalibrować. Dla drugiego sposobu pomiaru szerokości szczeliny kalibracja nie jest wymagana - rozkład prążków dyfrakcyjnych jednoznacznie określa wymiar szczeliny.

3. Pomiary dynamiczne – czułość układu

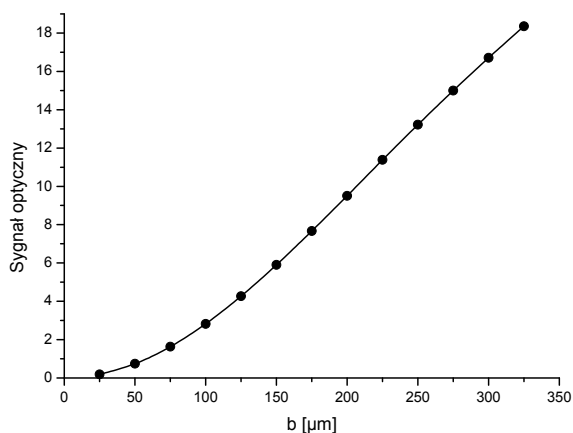
Wartość natężenia światła w prążkach dyfrakcyjnych określona jest równaniem (2). Jest ona zależna od szerokości szczeliny b . Detektor nie jest obiektem punktowym (powierzchnia światłoczuła detektora ma wymiary 3×3 mm). Uwzględniając to, sygnał optyczny I_p odbierany przez detektor można określić w następujący sposób:

$$I_p = \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} I(x, b) dx, \quad (3)$$

gdzie a - oznacza szerokość powierzchni światłoczułej detektora wzdłuż współrzędnej x pola prążków dyfrakcyjnych.

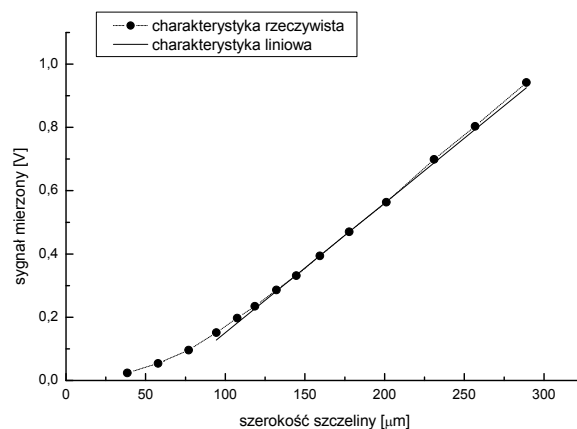
Zależność sygnału optycznego w funkcji szerokości szczeliny wyznaczono teoretycznie i doświadczalnie co przedstawiono na rys. 2 i 3.

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że przy odpowiednim dobraniu szczeliny wstępnej zależność sygnału optycznego I_p w funkcji zmian szczeliny b może być w przybliżeniu liniowa. Dla badanego zakresu zmian szerokości szczeliny określono czułość układu pomiarowego, którą przedstawiono na rys. 4.

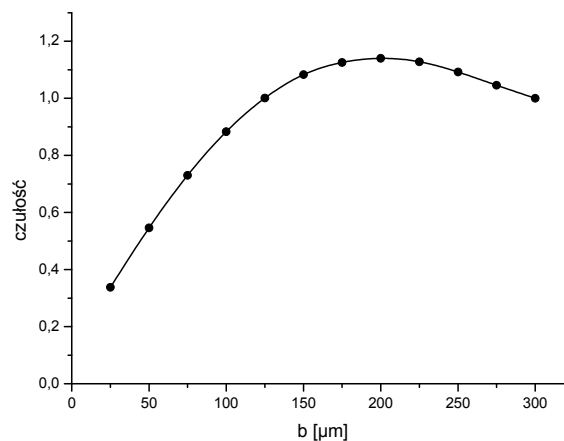


Rys. 2. Obliczona z równania (3) zależność sygnału optycznego od szerokości szczeliny

Fig. 2. Theoretical relationship between the optical signal and the slit width



Rys. 3. Doświadczalna zależność sygnału optycznego od szerokości szczeliny
Fig. 3. Experimental relationship between the optical signal and the slit width



Rys. 4. Teoretyczna względna czułość w zależności od szerokości szczeliny
Fig. 4. Theoretical and relative sensitivity vs. the slit width

Czułość została unormowana dla szczeliny o wartości $300 \mu\text{m}$. Z analizy teoretycznej wynika, że czułość układu pomiarowego w zakresie zmian szczeliny od 150 do $200 \mu\text{m}$ powinna być maksymalna.

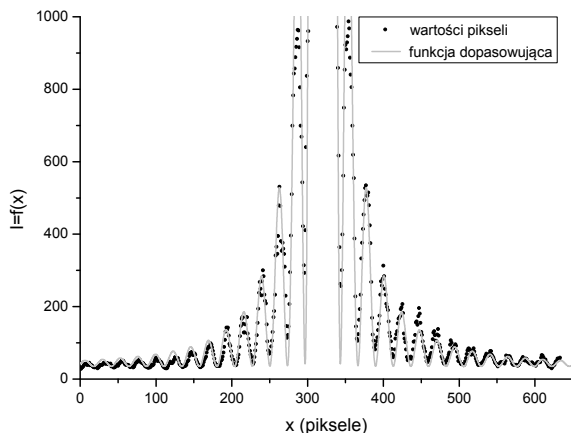
Pomiar zmian szerokości szczeliny został wykorzystany w impulsowym spektrometrze mechanicznym, którego opis prezentuje praca [4].

4. Pomiary statyczne – czułość układu

W porównaniu z pomiarami dynamicznymi szerokości szczeliny w pomiarach statycznych analizuje się położenie prążków dyfrakcyjnych. Rozkład prążków dyfrakcyjnych dla wąskiej, długiej szczeliny utworzonej pomiędzy ostrzem ruchomym i nieruchomym wykazuje dużą dynamikę zmian natężenia. Stosunek natężenia prążka zerowego do prążka rzędu pierwszego wynosi $1: 0,04719$. Zastosowana kamera CCD wraz z 10 bitowym przetwornikiem AC nie pozwala na rejestrację tak dużej dynamiki zmian. W celu zmniejszenia dynamiki zmian natężeń prążków dyfrakcyjnych wyeliminowano prążek rzędu zerowego przez zastosowanie maski. Po zarejestrowaniu rozkładu prążków dyfrakcyjnych przeprowadzono dopasowanie funkcji wyrażonej równaniem:

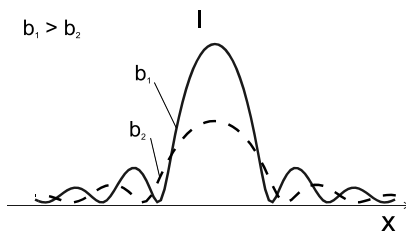
$$I(x, b) = y_0 + A^2 b^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b(x-x_0)}{\lambda z}\right)}{\left(\frac{\pi b(x-x_0)}{\lambda z}\right)^2} \quad (4)$$

z następującymi parametrami dopasowania: y_0 - poziom tła, A - amplituda fali elektromagnetycznej, b - szerokość szczeliny, x_0 - położenie prążka zerowego.



Rys. 5. Rozkład prążków dyfrakcyjnych i funkcja dopasowująca
Fig. 5. Fitting function and experimental image of the diffraction pattern

Zmiany natężenia i położenia prążków dyfrakcyjnych dla dwóch różnych wartości szerokości szczeliny przedstawiono na rys. 6.



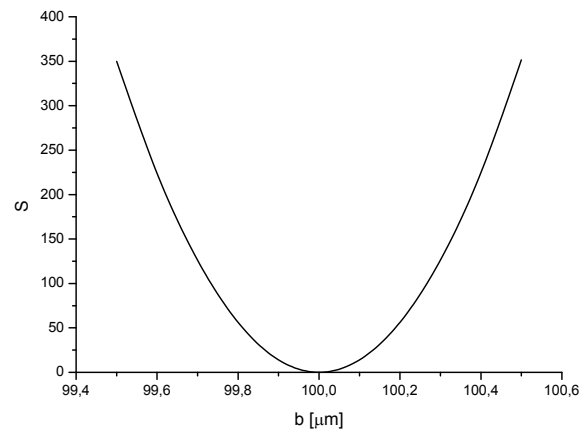
Rys. 6. Rozkład prążków dyfrakcyjnych dla różnych szczelin
Fig. 6. Diffraction patterns for different slit width

Dopasowanie funkcji (4) wykonano przy pomocy programu Origin, którego algorytm oparty jest na metodzie najmniejszych kwadratów. Czułość układu będzie proporcjonalna do kwadratu różnicy wartości natężeń (5) przy jednostkowej zmianie szerokości szczeliny.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{600} [I_i(x, b_1) - I_i(x, b_2)]^2}{600}, \quad (5)$$

Przykładowo dla szczeliny $b_1 = 100 \mu\text{m}$ określono sumę kwadratów różnicy natężeń gdy b_2 zmieniało się od wartości $99,5 \mu\text{m}$ do $100,5 \mu\text{m}$ rys. 7.

Stacyczny pomiar szerokości szczeliny wykorzystywany jest w układzie pomiarowym do wyznaczania modułu sprężystości podłużnej.



Rys. 7. Suma kwadratów natężeń w funkcji zmian szerokości szczeliny
Fig. 7. Sum of intensity squares vs. the slit width

5. Podsumowanie

Pomiary statyczne i pomiary dynamiczne w dyfraktometrze służącym do określenia szerokości szczeliny wykazują charakterystyczne cechy.

W przypadku potrzeby określenia częstotliwości drgań elementu mechanicznego wystarczy wykonać detekcję prążka rzędu zerowego. Metoda optyczna, dyfrakcyjna daje pomiar zdalny bezstykowy i bezinercyjny. W tym przypadku zastosowanie mają pomiary dynamiczne, które mogą być wykorzystywane w impulsowym spektrometrze mechanicznym [5] do określenia dynamicznego modułu Young'a oraz współczynnika tłumienia różnych rodzajów drgań. Układ pomiarowy po modyfikacji nadaje się do badania drgań wzdłużnych skrętnych i giętych.

W przypadku potrzeby określenia wydłużenia elementu mechanicznego należy stosować pomiary statyczne. Położenie prążków dyfrakcyjnych jednoznacznie określa szerokość szczeliny a tym samym wydłużenie materiału. Ta metoda pozwala wyznaczyć statyczny moduł Young'a a układ pomiarowy po modyfikacji nadaje się do wyznaczania modułu skrętnego.

6. Literatura

- [1] Yu F. T. S.: Wprowadzenie do teorii dyfrakcji i obróbki informacji, Moskwa 1978.
- [2] Born M., Wolf E.: Principles of optics. Cambridge, London 1999.
- [3] Malacara D., Thompson B.J.: Handbook of Optical Engineering, Marcel Dekker, New York 2001.
- [4] Wasilewski A., Więcek T., Pękała Ł., Podkościelny A.: Investigation of filament using mechanical spectroscopy methods, Proceedings of SPIE, vol.5484, 2004, s.354-358.
- [5] Wasilewski A., Więcek T., Magalas L.: A New Impulse Mechanical Spectrometer to Study the Dynamic Mechanical Properties of Filaments, Solid State Phenomena, vol.89, s.343-348, 2003.

otrzymano / received: 02.03.2010
przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany