

## Waveguide grating microinterferometer for in-plane microdisplacements measurement

# Falowodowy mikrointerferometr siatkowy do pomiaru mikroprzemieszczeń w płaszczyźnie próbki



DOI: 10.15199/62.2024.11.19

The phys. basis of the grating (moiré) interferometry method and its advantages and limitations were presented. The concept of a waveguide grating microinterferometer designed for the anal. of displacement distributions in the plane of microelements or in small measurement areas, such a around joints or cracks, was presented. The construction of the waveguide grating microinterferometer head was described, together with the anal. of basic design, optical and metrological parameters. Examples of the microinterferometer's use in mech. tests of MEMS/MOEMS microelements and in studies of crack propagation in various materials were presented.

**Keywords:** full-field optical methods, grating (moiré) interferometry, in-plane micro-displacements measurement

Przedstawiono podstawy fizyczne metody interferometrii siatkowej oraz jej zalety i ograniczenia. Zaprezentowano koncepcję falowodowego mikrointerferometru siatkowego przeznaczonego do analizy rozkładów przemieszczeń w płaszczyźnie mikroelementów lub w niewielkich obszarach pomiarowych, np. wokół złączy lub pęknięć. Omówiono budowę falowodowej głowicy mikrointerferometru siatkowego wraz z analizą wybranych parametrów konstrukcyjnych, optycznych i metrologicznych. Na zakończenie przedstawiono przykładowe zastosowania mikrointerferometru w badaniach mikroelementów MEMS/MOEMS oraz propagacji pęknięć w węglkach spiekanych i stopach aluminium.

**Słowa kluczowe:** pomiary w całym polu widzenia, interferometria siatkowa (moiré), pomiar mikroprzemieszczeń w płaszczyźnie badanego obiektu

Metoda interferometrii dwuwiązkowej z wykorzystaniem sprzężonych rzędów ugięcia siatki dyfrakcyjnej, w skrócie nazywana metodą interferometrii siatkowej (IS) lub interferencyjną metodą mory (*moiré interferometry*), służy do wyznaczania map przemieszczeń w płaszczyźnie badanej próbki<sup>1,2</sup>. Czujnikiem przemieszczeń jest naniesiona na powierzchnię próbki siatka dyfrakcyjna oświetlona symetrycznie dwiema wzajemnie koherentnymi wiązkami świetlnymi. Ugięte na siatce wiązki dyfrakcyjne interferują, a w obserwowanym rozkładzie intensywności zakodowana jest informacja o rozkładzie przemieszczeń na powierzchni obciążonego obiektu. Wykorzystanie zautomatyzowanych metod analizy obrazów prążkowych<sup>2</sup> umożliwi detekcję tych przemieszczeń z bardzo dużą czułością, rzędu kilku

nanometrów, w całym polu widzenia. Opracowanych zostało wiele rozwiązań interferometrów siatkowych przystosowanych do badań obiektów o różnej wielkości oraz w różnych warunkach pomiarowych, także pozalaboratoryjnych<sup>1,3</sup>. Znalazły one szerokie zastosowanie w mechanice i mikromechanice eksperymentalnej, elektronice oraz inżynierii materiałowej<sup>1,4</sup>.

### Podstawy fizyczne interferometrii siatkowej

Zasadę interferometrii siatkowej ze sprzężonymi rzędami dyfrakcyjnymi zilustrowano na rys. 1. Naniesiona na powierzchnię badanego obiektu siatka dyfrakcyjna, zwana siatką przedmiotową SP, jest oświetlana przez dwie wzajemnie koherentne wiązki A i B o płaskich czołach falowych. Kąty padania  $\pm\theta$  tych wiązek są równe kątom ugięcia rzędów dyfrakcyjnych +1 i -1 siatki przedmiotowej. Przy takim oświetleniu wiązki ugięte na siatce propagują się wspólnie wzdłuż normalnej do powierzchni badanego elementu. Przyłożone obciążenie  $F$  powoduje odkształcenia badanego elementu, a co za tym idzie deformację linii nałożonej siatki dyfrakcyjnej. W efekcie czoła falowe wiązek A' i B' ugiętych na zdeformowanej siatce przestają być płaskie i niosą informację o przemieszczeniach poprzecznych oraz o składowej przemieszczeń w płaszczyźnie próbki w kierunku prostopadłym do linii siatki. W wyniku interferencji obydwu



Prof. dr hab. inż. Leszek SAŁBUT (ORCID: 000-0003-1390-1708) w roku 1984 ukończył studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. W 1996 r. uzyskał stopień doktora, a w 2007 r. stopień doktora habilitowanego nauk technicznych na Wydziale Mechatroniki tej samej uczelni. W 2020 r. otrzymał tytuł profesora. Pracuje na stanowisku profesora w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki PW. Specjalność – inżynieria fotoniczna.

#### \* Adres do korespondencji:

Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, Politechnika Warszawska, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, tel.: (22) 234-82-83, e-mail: leszek.salbut@pw.edu.pl

wiązek w płaszczyźnie obserwacji  $D$ , sprzężonej optycznie za pomocą układu optycznego  $OB$  z płaszczyzną próbki, powstaje rozkład intensywności opisany równaniem (1):

$$I(x, y) = 2 \left[ 1 + \cos \frac{4\pi}{d} u(x, y) \right] \quad (1)$$

w którym  $u(x, y)$  jest funkcją opisującą przemieszczenia w płaszczyźnie próbki w kierunku prostopadłym do linii dyfrakcyjnej siatki przedmiotowej o okresie  $d$ . Z równania (1) wynika, że rozkład intensywności  $I(x, y)$  nie zależy od przemieszczeń pozapłaszczyznowych i osiąga maksimum opisane zależnością (2):

$$u(x, y) = N \frac{d}{2}, \text{ gdzie } N = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Oznacza to, że otrzymane prążki interferencyjne odpowiadają izotetom przemieszczeń  $u(x, y)$  w płaszczyźnie próbki z czułością równą połowie okresu zastosowanej dyfrakcyjnej siatki przedmiotowej ( $d/2$ ).

Czynnikiem ograniczającym czułość interferometrii siatkowej jest fakt, że dla kąta ugięcia pierwszego rzędu dyfrakcyjnego siatki przedmiotowej opisanego zależnością  $\sin \theta = \lambda/d$ , kąt padania  $\theta$  wiązek oświetlających musi być mniejszy

niż  $90^\circ$ . Maksymalna teoretyczna częstość przestrzenna siatki przedmiotowej wynosi więc  $1/\lambda$ , dla której czułość detekcji przemieszczeń wynosi  $\lambda/2$ . Dla  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  (laser He-Ne) graniczna częstość siatki to 1580 linii/mm. W praktyce najczęściej stosowane są siatki o częstości 1200 linii/mm, co umożliwia pomiary z czułością bazową 417 nm/prążek. Zastosowanie cieczy immersyjnej oraz źródeł promieniowania o krótszej długości fali pozwala na wykorzystanie siatek o wyższej częstości przestrzennej i uzyskanie czułości bazowej rzędu 150 nm/prążek<sup>1)</sup>.

Zastosowanie metod automatycznej analizy obrazów prążkowych (AAOP)<sup>2)</sup>, np. metody dyskretnej zmiany fazy (DZF) w wersji czasowej lub przestrzennej, umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości detekcji fazy rzędu 1/100 prążka interferencyjnego, co odpowiada rozdzielczości pomiaru mikroprzemieszczeń rzędu pojedynczych nanometrów.

## Falowodowa głowica siatkowa

Schemat falowodowej głowicy mikrointerferometru siatkowego przedstawiono na rys. 2a. Ma ona postać

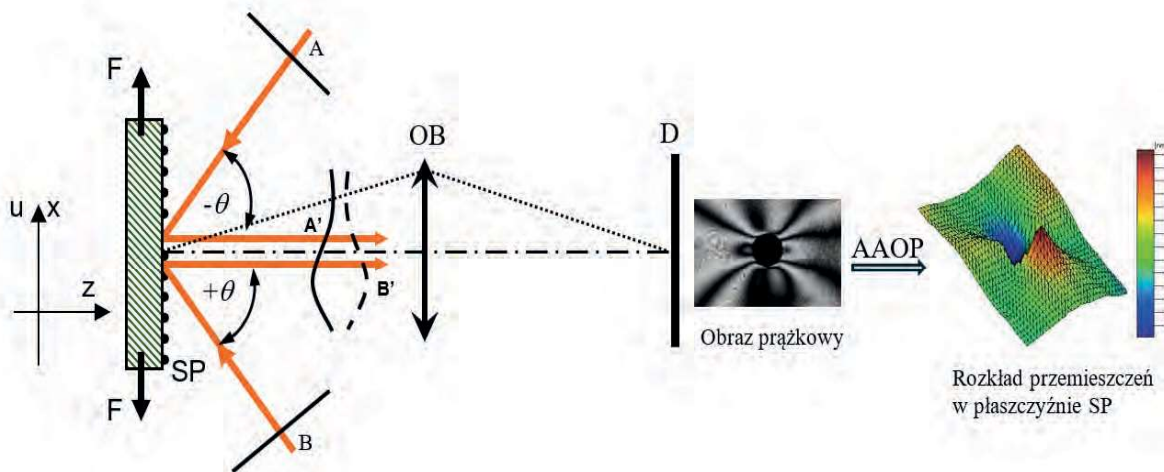


Fig. 1. Principle of grating interferometry; SP – specimen grating attached to the tested object, D – observation plane optically conjugated with the plane of the tested object by the OB optical system, A and B – illuminating beams, A' and B' – diffracted beams,  $\theta$  – angle of the first diffraction order, F – load, AAOP – automatic fringe pattern analysis system

Rys. 1. Zasada działania interferometrii siatkowej; SP – siatka przedmiotowa naniesiona na badany obiekt, D – płaszczyzna obserwacji sprzężona optycznie z płaszczyzną badanego obiektu przez układ optyczny OB, A i B – wiązki oświetlające, A' i B' – wiązki ugięte,  $\theta$  – kąt ugięcia pierwszego rzędu dyfrakcyjnego, F – obciążenie, AAOP – system automatycznej analizy obrazów prążkowych

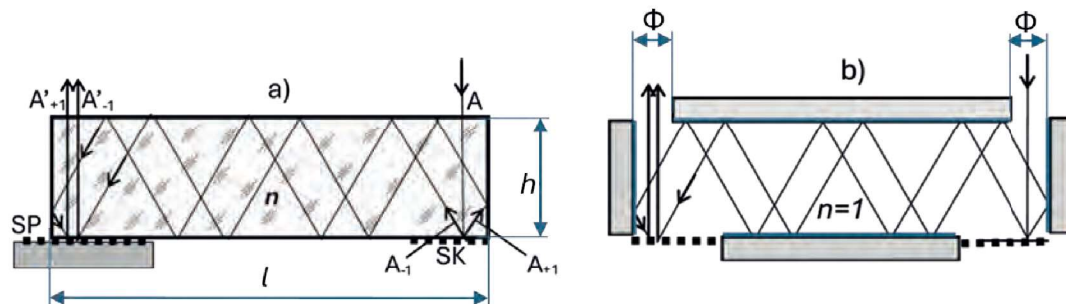


Fig. 2. Scheme of the waveguide head of the grating microinterferometer in the monolithic (a) and cavity (b) versions; A – illuminating beam, A' and A'' – diffraction beams diffracted on the compensating grating SK, A' and A'' – diffraction beams diffracted on the specimen grating SP, n – refractive index of the waveguide plate material,  $\Phi$  – diameter of the entrance and exit window

Rys. 2. Schemat falowodowej głowicy mikrointerferometru siatkowego w wersji monolitycznej (a) i wnękowej (b); A – wiązka oświetlająca, A' i A'' – wiązki dyfrakcyjne ugięte na siatce kompensującej SK, A' i A'' – wiązki dyfrakcyjne ugięte na siatce przedmiotowej SP, n – współczynnik załamania materiału płytki falowodowej,  $\Phi$  – średnica okna wejściowego i wyjściowego

prostopadłościenną płytki szklanej o współczynniku załamania  $n$ . Wiązka oświetlająca  $A$  pada na siatkę kompensującą  $SK$ . Wiązki dyfrakcyjne  $A_{+1}$  i  $A_{-1}$  są prowadzone wewnątrz płytki będącej rodzajem falowodu optycznego i w efekcie symetrycznie oświetlają siatkę przedmiotową  $SP$ . Ponieważ obie siatki mają równe częstotliwości przestrzenne, to kąty padania wiązek na siatkę  $SP$  są równe kątowi ugięcia pierwszych rzędów dyfrakcyjnych, tak jak jest to wymagane w metodzie IS. Ugięte na siatce przedmiotowej  $SP$  wiązki  $A'_{+1}$  i  $A'_{-1}$  rozchodzą się wzdłuż normalnej do powierzchni siatki i interferują, tworząc w płaszczyźnie obserwacji rozkład intensywności z zakodowaną informacją o rozkładzie przemieszczeń w płaszczyźnie próbki.

W zależności od współczynnika załamania materiału płytki i częstotliwości przestrzennej siatek dyfrakcyjnych, wiązki propagują się w falowodzie, bazując na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia lub odbicia zwierciadlanego. Zależy to od częstotliwości siatek dyfrakcyjnych i współczynnika załamania materiału płytki<sup>5)</sup>. W przypadku standardowych siatek o częstotliwości przestrzennej 1200 linii/mm i płytki wykonanej z popularnego szkła BK7 warunek całkowitego wewnętrznego odbicia, tzn. kąt padania większy od kąta granicznego  $\alpha_g = \arcsin(1/n)$ , spełniony jest tylko dla ścianek bocznych płytki. Na górną i dolną powierzchnię trzeba nanieść warstwy zwierciadlane. W przypadku współczynnika załamania  $n = 1$  (tzw. płytka powietrzna), wszystkie powierzchnie muszą być oczywiście zwierciadlane. Schemat głowicy zbudowanej ze zwierciadeł, zwanej wężkową głowicą mikrointerferometru siatkowego, jest przedstawiony na rys. 2b. W obydwu omawianych przypadkach należy zapewnić okna o średnicy  $\Phi$  do wprowadzenia wiązki oświetlającej i wyprowadzenia wiązek ugiętych na siatce przedmiotowej, uwzględniając fakt, że średnica okien ogranicza także wymiar pola pomiarowego. Wymiary geometryczne głowicy wiąże zależność (3):

$$l = 2Kh \tan \theta \quad (3)$$

w której  $l$  oznacza długość płytki,  $K = 1, 2, 3 \dots$  liczbę odbić od górnej powierzchni,  $h$  wysokość płytki,  $\theta = \arcsin(\lambda/fn)$  kąt ugięcia pierwszego rzędu dyfrakcyjnego,  $\lambda$  długość fali światła,  $f$  częstotliwość przestrzenną siatki, a  $n$  współczynnik załamania.

Istotnym parametrem jest grubość płytki falowodowej,

która ze względu na ograniczoną odległość czoła obiektywu odwzorowującego od obserwowanego obiektu powinna być jak najmniejsza. Minimalna grubość płytki falowodu zależy od kąta ugięcia  $\theta$  pierwszego rzędu dyfrakcyjnego siatki oraz od średnicy okna wejściowego  $\Phi$  i wynika z zależności (4):

$$h_{\min} = 2\Phi / \tan \theta \quad (4)$$

Interferometryczna głowica falowodowa z siatką kompensującą o takiej samej częstotliwości przestrzennej jak siatka przedmiotowa jest układem achromatycznym, a w przypadku zastosowania światła monochromatycznego jest nieczuła na wpływ drgań<sup>6)</sup>.

## Mikrointerferometr siatkowy

Ogólny schemat mikrointerferometru siatkowego z wężkową głowicą falowodową przedstawiono na rys. 3a. Laboracyjną wersję z wykorzystaniem standardowego mikroskopu optycznego zaprezentowano na rys. 3b. Ze względu na to, że konfiguracja głowicy falowodowej jest praktycznie nieczuła na drgania, opracowana została także przenośna wersja mikrointerferometru (rys. 3c) umożliwiająca pomiary w warunkach pozalaboratoryjnych, także warsztatowych.

Parametry techniczne mikrointerferometru siatkowego: (i) pole pomiarowe układu mikroskopowego  $0,8 \times 0,6$  mm (z obiektywem  $4\times$ ), (ii)  $0,3 \times 0,2$  mm (z obiektywem  $10\times$ ), (iii) pole pomiarowe układu warsztatowego  $2 \times 3$  mm, (iv) siatka przedmiotowa 1200 linii/mm, (v) czułość bazowa 417 nm/prążek, (vi) niedokładność (z zastosowaniem

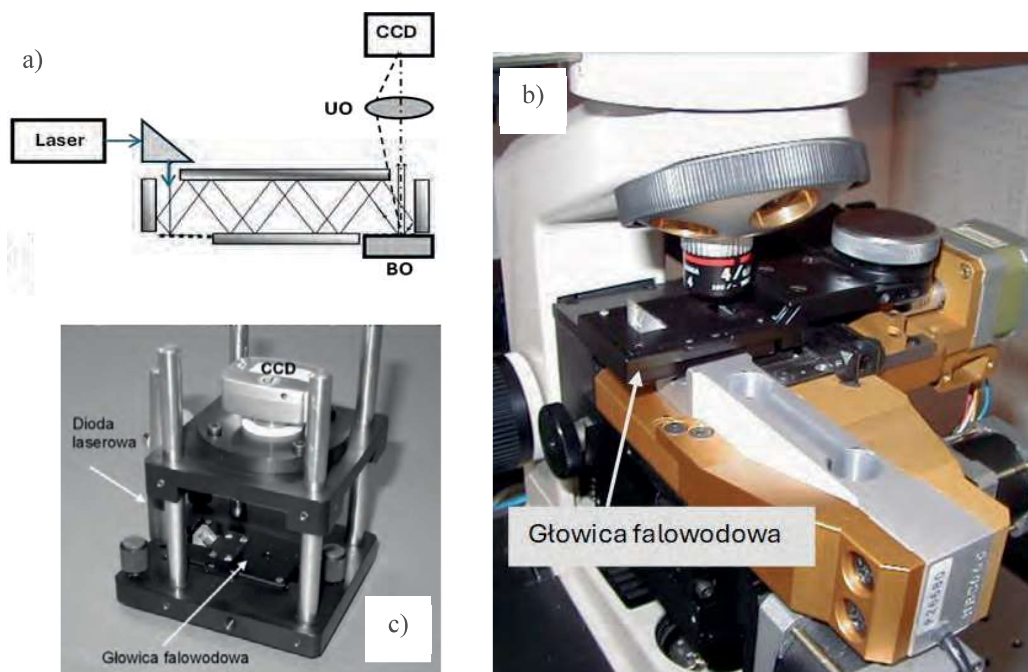


Fig. 3. Schemat (a), photograph of the laboratory (b) and workshop (c) stand of the grating microinterferometer with a waveguide head; UO – optical imaging system, BO – tested object

Rys. 3. Schemat ogólny (a), fotografia stanowiska laboratoryjnego (b) i warsztatowego (c) mikrointerferometru siatkowego z głowicą falowodową; UO – optyczny układ odwzorowujący, BO – badany obiekt

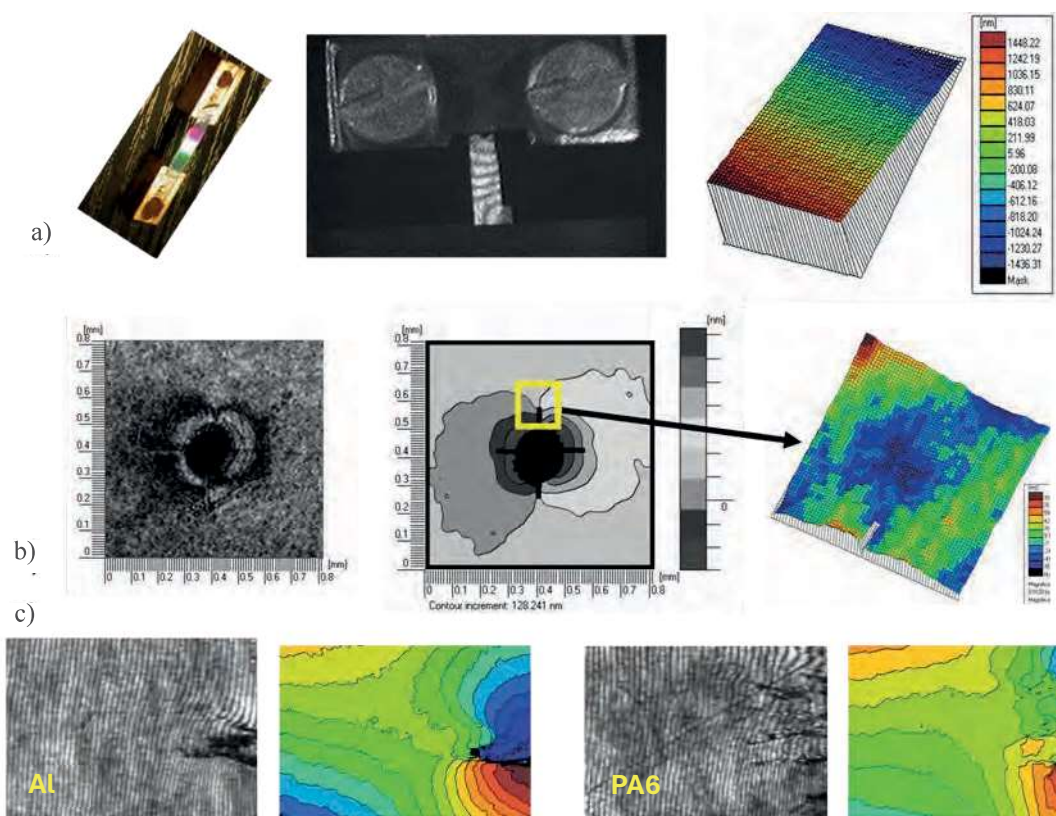


Fig. 4. Examples of the application of the grating microinterferometer: studies of the mechanical properties of silicon microcantilevers (a), cemented carbide elements (b) and crack propagation in aluminum alloys (c)

Rys. 4. Przykłady zastosowania mikrointerferometru siatkowego: badania właściwości mechanicznych mikrobelki krzemowej (a), elementów z węglików spiekanych (b) i propagacji pęknięć w stopach aluminium (c)

AAOP)  $\pm 10$  nm (układ mikroskopowy),  $\pm 20$  nm (układ warsztatowy).

## Przykładowe zastosowania

Metoda interferometrii siatkowej służy do otrzymania danych w postaci map przemieszczeń w płaszczyźnie badanych obiektów. Dane te następnie mogą być użyte do dalszych specjalistycznych analiz<sup>1-4)</sup>, takich jak wyznaczenie stałych materiałowych, parametrów zmęczenia, analizy odkształceń i naprężeń, niezawodności, weryfikacji analiz numerycznych i wielu innych. Na rys. 4a przedstawiono przykładowy wynik pomiaru przemieszczeń w płaszczyźnie rozciąganej mikrobelki krzemowej o wymiarach  $10 \times 2 \times 0.3$  mm. Uzyskane wyniki wykorzystane zostały do wyznaczenia modułu Younga. Przykładowe wyniki pomiaru rozkładu przemieszczeń wokół odcisku węgelnika w próbce z węglików spiekanych (6% kobaltu, 94% węgla wolframu) oraz wokół końca pęknięcia wywołanego węgelnikiem przedstawiono na rys. 4b. Uzyskane dane zostały wykorzystane do analizy kryteriów oceny jakości materiałów z węglików spiekanych. Przykładowe wyniki badań inicjacji i propagacji pęknięć w próbkach z aluminium i jego stopów poddanych obciążeniu zmęczeniowym są pokazane na rys. 4c.

## Podsumowanie

Omówiono koncepcję falowodowej głowicy interferometru siatkowego w wersji monolitycznej i wnękowej wraz z analizą wybranych parametrów konstrukcyjnych i optycznych. Głowice zostały wykorzystane do budowy mikrointerferometrów siatkowych w wersji laboratoryjnej i przenośnej, służących do pomiaru rozkładu mikroprzemieszczeń w płaszczyźnie badanych próbek z submikrometrową czułością. Pokazane zostały przykładowe zastosowania mikrointerferometrów do badań właściwości mechanicznych mikrobelki krzemowej oraz właściwości materiałowych węglików spiekanych i stopów aluminium.

Otrzymano: 30-09-2024

Zrecenzowano: 11-10-2024

Zaakceptowano: 24-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

### LITERATURA

- [1] D. Post, B. Han, P. Ifju, *High sensitivity Moiré interferometry*, Springer-Verlag, Berlin 1994.
- [2] K. Patorski, M. Kujawińska, L. Sałbut, *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, OWPW, Warszawa 2023.
- [3] W. Osten (red.), *Optical inspection of microsystems*, CRC Press, 2019.
- [4] C.A. Walker (red.), *Handbook of Moiré measurement*, Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia 2004.
- [5] L. Sałbut, *Optical Eng.* 2002, **41**, nr 3, 626.
- [6] R. Czarnek, *Optics Laser Eng.* 1990, **13**, 93.