

Półautomatyczny układ pomiarowy multispektralnego interferometru laserowego do wzorcowania długich płytek wzorcowych

Semi-automatic measuring system of the multiwavelength laser interferometer for calibration of long gauge blocks

Robert Szumski (Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Długości)

Artykuł opisuje wyniki prac nad multispektralnym interferometrem laserowym do wzorcowania długich płytek wzorcowych, który powstał jako wynik współpracy Laboratorium Długości Głównego Urzędu Miar z Instytutem Mikromechaniki i Fotoniki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zaprezentowany został zautomatyzowany układ pomiarowy z systemem stabilizacji i monitorowania warunków środowiskowych oraz oprogramowaniem do analizy obrazu i sterowania układem.

This paper describes the results of work on the multiwavelength laser interferometer for calibration of long gauge blocks, which was a result of the cooperation between the Length Laboratory of Central Office of Measures and the Institute of Micromechanics and Photonics at Warsaw University of Technology. The automated measuring setup with the system of environmental condition controlling and monitoring was presented together with image analysis and controlling software.

Wprowadzenie

Wzorce końcowe, takie jak długie płytki wzorcowe, czyli te o długościach nominalnych przekraczających 100 mm, wymagają przy najdokładniejszych pomiarach zastosowania metod interferencyjnych połączonych z różnymi technikami analizy obrazu. Podczas pomiarów należy uwzględnić dodatkowo szereg innych informacji pomiarowych, np. związanych z warunkami środowiskowymi.

Dawniej pomiar interferencyjny tych wzorców przeprowadzany był w dużej mierze przy znaczącym zaangażowaniu osoby wykonującej ten pomiar. Z powodu braku komunikacji wyposażenia pomiarowego z komputerem stanowiskowym, wyznaczenie końcowego wyniku wzorcowania wymagało zastosowania dodatkowych narzędzi kalkulacyjnych i „ręcznego” przenoszenia danych pomiarowych.

Zdecydowana większość układów pomiarowych obecnie budowanych interferometrów jest sterowana przez komputer wbudowany w stanowisko pomiarowe, który odpowiada zarówno za komunikację z wyposażeniem pomiarowym, steruje przebiegiem pomiaru, jak i dokonuje analizy obrazów

interferencyjnych oraz obliczeń właściwego wyniku. Taki interferometr powstał w Głównym Urzędzie Miar, jako efekt współpracy z Instytutem Mikromechaniki i Fotoniki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Nie jest to jednak układ całkowicie automatyczny, gdyż pełna automatyzacja procesu pomiarowego w przypadku wzorcowania płytek wzorcowych nie jest osiągalna [1-5].

Układ pomiarowy

Multispektralny interferometr laserowy do wzorcowania długich płytek wzorcowych, zbudowany w Laboratorium Długości (obecnie Pracownia Długości), jest interferometrem służącym do wzorcowania długich płytek wzorcowych o długości nominalnej do 1000 mm, służących jako wzorce odniesienia przy pomiarach metodą porównawczą. Umożliwia on wyznaczenie odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytek wzorcowych metodą reszt fazowych.

Interferometr jest zbudowany na bazie klasycznego interferometru Twyman-Greena z wykorzystaniem wysokiej jakości laserów stabilizowanych

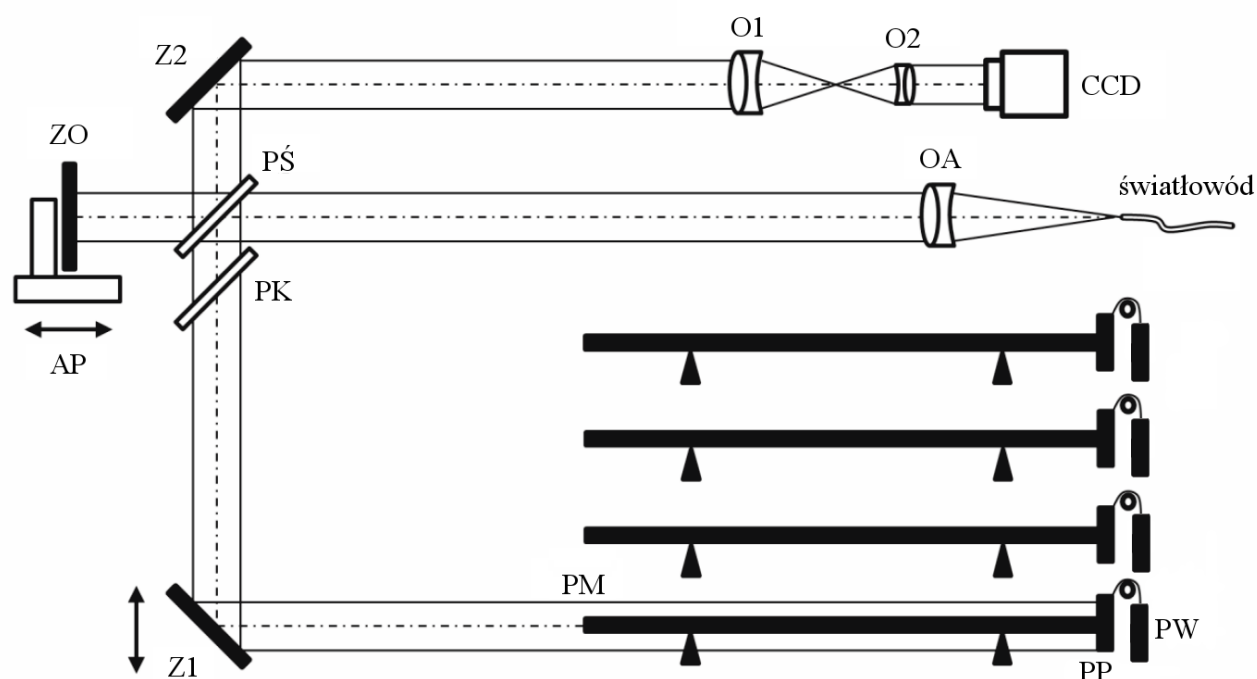
częstotliwościowo i oprzyrządowania umożliwiające sterowanie przez komputer. Układ pomiarowy działa w oparciu o metodę kroku fazowego (phase stepping), wykorzystując techniki numerycznego przetwarzania obrazu do analizowania interferogramów otrzymanych z kamery CCD. Źródłem wzorcowych długości fal światła są trzy stabilizowane częstotliwościowo lasery helowo-neonowe o długościach fal promieniowania 633 nm (czerwony), 594 nm (żółty) i 543 nm (zielony). Układ pomiarowy składa się z trzech podstawowych części: optycznej, mechanicznej (z aktuatorami) oraz układu do pomiaru i stabilizacji warunków środowiskowych. Schemat układu optycznego interferometru przedstawia rys. 1.

Lasery wzorcowe połączone są z modułem sprzęgająco-przełączającym umożliwiającym wybranie, z którego lasera światło będzie w danej chwili doprowadzone do układu optycznego interferometru. Światło laserów, doprowadzane do układu pomiarowego przy pomocy światłowodu wielomodowego, jest kolimowane przy użyciu obiektywu apochromatycznego (OA). Układ taki umożliwia, dla ogniskowej przekraczającej 500 mm, uzyskanie wiązki pomiarowej o średnicy ok. 50 mm oraz skorygowanie aberracji chromatycznej dla długości fal zapewnianych przez lasery wzorcowe. Wiązka laserowa rozdzielana jest na dwie przez półprzepuszczalną płytkę światłodzielącą (PŚ). Wiązka w ramieniu pomiarowym, odbita

od zwierciadła kierunkowego (Z1), oświetla powierzchnię pomiarową mierzonej płytki wzorcowej (PM) z płytką pomocniczą (PP), przywartą do jej drugiej powierzchni pomiarowej. Zwierciadło kierunkowe (Z1) używane jest również do wybierania płytki wzorcowej w jednym z czterech torów pomiarowych. Wiązka w ramieniu odniesienia pada na zwierciadło odniesienia (ZO) zamontowane na aktuatorze piezoelektrycznym (AP), realizującym przesunięcia fazowe wymagane przez automatyczną metodę kroku fazowego. Następnie wiązki odbite od płytek w ramieniu pomiarowym (PM i PP) i zwierciadła (ZO) łączą się ponownie na płytce światłodzielącej (PŚ) i kierowane są przez zwierciadło (Z2) do bezogniskowego układu optycznego (O1, O2), który dopasowuje wiązkę pomiarową odpowiednio do rozmiarów matrycy detektora (CCD). Kamera zapewnia 16-bitową głębię szarości i maksymalną rozdzielczość 1624×1224 .

Do sterowania układem pomiarowym wykorzystywane są cztery rodzaje aktuatorów, a do przemieszczania i pozycjonowania zwierciadła kierunkowego (Z1) w ramieniu pomiarowym służy sterowany programem pomiarowym silnik krokowy, sprzężony ze stolikiem liniowym.

Samo zwierciadło może być obracane wokół osi pionowej przy użyciu serwonapędu. Do poruszania zwierciadła odniesienia zastosowany został prze-



Rys. 1. Schemat układu optycznego interferometru

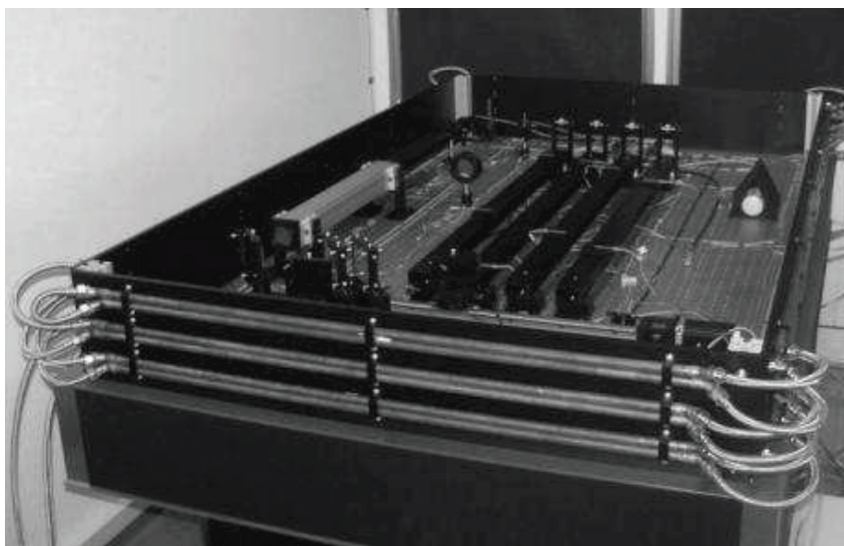
twornik piezoelektryczny z modulem serwo-kontrolera, który pracując z pętlą sprzężenia zwrotnego zapewnia wymaganą precyzję i powtarzalność ruchu zwierciadła. Ta wysoka dokładność zapewnia prawidłowe funkcjonowanie algorytmu kroków fazowych. Właściwe pochylenie mierzonej płytki wzorcowej uzyskuje się poprzez sterowanie wysokością jednego z końców łoża płytki, realizowane poprzez serwonapęd (po jednym dla każdego z czterech torów pomiarowych). Płytki wzorcowe układane są z kolei na specjalnych podporach, o sześciokątnym przekroju, umieszczonych na łożach, w punktach Airy'ego. Wewnątrz podpór umieszczone są czujniki termistorowe do pomiaru temperatury płytki. W celu skompensowania masy płytki pomocniczej i zapewnienia równoległości powierzchni pomiarowych płytki mierzonej stosowana jest dodatkowa płytka (PW) wykorzystywana w roli przeciwwagi.

Ostatnim ruchomym elementem systemu jest układ wibracyjny światłowodu, który redukuje efekt plamkowania powstający w związku z używaniem koherentnych źródeł światła, poprzez wprowadzenie odcinka światłowodu w drgania o różnym kierunku i częstotliwości. Poglądowy widok układu optycznego i części stabilizowanej temperaturowo osłony przedstawia rys. 2.

Proces pomiarowy

Wzorcowanie płytek wzorcowych na stanowisku interferometru multispektralnego przebiega w dwóch etapach. W pierwszym płytki wzorcowe z przywartymi płytkami pomocniczymi i przeciwwagami umieszczone są w torach pomiarowych, a ich położenie jest wstępnie korygowane w celu uzyskania obrazu prążków. Po zamknięciu osłony termoizolacyjnej wymagana jest kilkugodzinna przerwa, w celu wyrównania warunków za pomocą aktywnego układu stabilizacji temperatury, złożonego z termostatu i osłony stanowiska z systemem chłodzenia wodnego.

W drugim etapie wykonywane są pomiary, dla których dokładności kluczowe jest kontrolowanie warunków środowiskowych, występujących



Rys. 2. Widok poglądowy układu optycznego i części osłony

wewnątrz komory pomiarowej interferometru. Komora osłania układ umieszczony na stole optycznym, który odizolowany jest od drgań podłoża i jest podstawą dla kluczowych urządzeń i elementów stanowiska. W trakcie pomiarów monitorowane są cztery podstawowe parametry powietrza: temperatura, ciśnienie, wilgotność i zawartość CO_2 . Temperatura powietrza i płytek wzorcowych jest monitorowana za pomocą sieci 40 czujników termistorowych, umieszczonych na słupkach z tworzywa PTFE na wysokości wiązki pomiarowej i podłączonych do multimetru Keithley, model 2700. Ciśnienie i wilgotność powietrza oraz zawartość CO_2 mierzone są przyrządami pomiarowymi produkcji firmy VAISALA: barometrem PTB330, higrometrem MT333 i czujnikiem CO_2 GMP343.

W trakcie pomiaru, dzięki automatyzacji stanowiska, oprogramowanie pomiarowe:

- analizuje dane przyrządów monitorujących warunki środowiskowe,
- zapewnia możliwość przełączania źródeł światła,
- umożliwia sterowanie opisanymi wcześniej aktuatorami, zapewniając zdalną adiustację układu optycznego,
- steruje pracą układu przechwytywania obrazu z kamery, przetwornika piezoelektrycznego zwierciadła odniesienia i układu wibracyjnego światłowodu.

Udział operatora w procesie pomiarowym, poza przygotowaniem płytki wzorcowej do pomiaru, sprowadza się do zainicjowania komunikacji z wyposa-

żeniem pomiarowym, zdalnego ustawienia właściwego obrazu prążków interferencyjnych, wprowadzenia informacji ogólnych i o mierzonej płytce wzorcowej oraz po skompletowaniu danych pomiarowych wskazania właściwych obszarów odniesienia w obrazie fazowym.

Niepewność pomiaru

Charakterystycznymi źródłami niepewności pomiaru dla metody reszt ułamkowych są błędy frontu falowego wprowadzane przez elementy układu optycznego (kolimacja, aberracje) oraz źródło światła. Dominujące składowe związane są z efektami temperaturowymi. Interferometr multispektralny charakteryzuje się stosunkowo małymi wartościami składowych pochodzących od adiustacji, a także od zmieniających się w czasie pomiaru warunków środowiskowych, dzięki dużej stabilności tych warunków i krótko trwającemu pomiarowi.

Najlepsza zdolność pomiarowa związana z wyznaczeniem odchylenia długości środkowej od długości nominalnej długiej płytki wzorcowej na multispektralnym interferometrze laserowym wynosi:

$$U = \sqrt{0,045^2 + 0,24^2 \cdot L_n^2} \quad \mu\text{m} \quad (1)$$

gdzie L_n jest wartością liczbową długości nominalnej wyrażonej w metrach.

Podczas wzorcowania krótkich płytek wzorcowych możliwe jest uzyskanie w stosunkowo łatwy sposób informacji o poprawce fazowej wynikającej z innej zmiany fazy fali światła przy odbiciu od powierzchni pomiarowej płytki mierzonej i płytki pomocniczej do niej przywartej. Wyznaczana jest ona najczęściej tzw. metodą stosu. W przypadku długich płytek wzorcowych zastosowanie tej metody nie jest możliwe, w związku z czym opracowanych zostało kilka metod alternatywnych wyznaczania poprawki fazowej. Jedną z nich jest wynikiem badań prowadzonych w Laboratorium Długości [10].

Zdolności pomiarowe

W trakcie międzynarodowych porównań kluczowych EURAMET.L-K1 zweryfikowane zostały zdolności pomiarowe europejskich krajowych instytucji metrologicznych (NMIs) w zakresie wzorcownia płytek wzorcowych metodami interferencyjnymi. Laboratorium Długości Głównego Urzędu Miar

uczestniczyło w porównaniach między innymi w zakresie wzorcowania płytek wzorcowych (do 500 mm) na opisywanym interferometrze multispektralnym.

Była to też pierwsza poważna okazja do sprawdzenia sprawności wykonywania pomiarów na zautomatyzowanym interferometrze, gdyż stosunkowo krótki przedział czasu przydzielony laboratorium nie pozwoliłby na wykonanie odpowiednio dużej liczby pomiarów na mało wydajnym stanowisku pomiarowym.

Podstawowym wynikiem pomiaru każdej płytki wzorcowej w ramach porównań, przekazany przez uczestniczące laboratoria, było odchylenie długości środkowej od długości nominalnej Δl z oszacowaną niepewnością pomiaru $u(\Delta l)$. Wyniki przekazane przez poszczególne laboratoria zostały wykorzystane do wyznaczenia wartości odniesienia porównań kluczowych (Δl_{ref}).

Odchylenie wyniku każdego uczestnika od wartości odniesienia wynosiło:

$$d = \Delta l - \Delta l_{\text{ref}} \quad (2)$$

a jego niepewność standardowa dla wyników biorących udział w obliczeniu Δl_{ref} wyraża się następująco:

$$u(d) = \sqrt{u^2(\Delta l) - u^2(\Delta l_{\text{ref}})} \quad (3)$$

Minus pod pierwiastkiem pochodzi od korelacji wyników uczestnika Δl z wartością odniesienia Δl_{ref} . Jeżeli wyniki laboratorium nie brały udziału w wyznaczeniu Δl_{ref} (ponieważ okazały się niespójne z pozostałymi), nie przewiduje się korelacji i niepewność standardowa przyjmuje postać:

$$u(d) = \sqrt{u^2(\Delta l) + u^2(\Delta l_{\text{ref}})} \quad (4)$$

Dla każdego laboratorium wyznaczono następnie wartość wskaźnika E_n , zdefiniowanego wyrażeniem:

$$E_n = \left| \frac{d}{U(d)} \right| \quad (5)$$

gdzie $U(d)$ jest niepewnością rozszerzoną dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$.

Uzyskane przez laboratoria wartości E_n przedstawia tabela 1. Laboratorium Długości GUM uzyskało, łącznie z NPL najlepszą średnią zgodność wyników z wartością odniesienia na tle wyników wszystkich uczestników porównań. Najnowsze stanowisko laboratorium, multispektralny interferometr laserowy, będący owocem współpracy GUM i Politechniki Warszawskiej, uzyskał najniższe wartości E_n , nie

biorąc wcześniej udziału w żadnych porównaniach międzylaboratoryjnych. Uzyskane wyniki w pełni potwierdzają możliwości pomiarowe laboratorium do wykonywania wzorcowań zgłoszonych do bazy CMC stanowiącej Dodatek C do porozumienia CIPM MRA [15].

Tabela 1. Zestawienie wartości E_n dla płytek o długości L , uzyskane przez laboratoria NMI

NMI	$L = 150 \text{ mm}$	$L = 300 \text{ mm}$	$L = 500 \text{ mm}$	E_n średnie
GUM	0,1	0,0	0,1	0,07
NPL	0,1	0,0	0,1	0,07
METAS	0,3	0,0	0,0	0,10
MIKES	0,2	0,0	0,1	0,10
BEV	0,1	0,1	0,3	0,17
UME	0,3	0,2	0,1	0,20
SMD	0,0	0,4	–	0,20
MIKES'	0,1	0,2	0,3	0,20
CMI	0,1	0,3	0,3	0,23
VSL	0,4	0,3	0,1	0,27
LNE	0,4	0,3	0,2	0,30
METAS'	0,4	0,3	0,2	0,30
BIM	0,7	0,3	0,0	0,33
SP	0,3	0,4	0,7	0,47
BEV	0,9	0,5	0,2	0,53
IPQ	0,1	38,0	–	19,05

Podsumowanie

Zaprezentowany układ pomiarowy multispektralnego interferometru laserowego do wzorcowania długich płytek wzorcowych jest stanowiskiem pomiarowym zapewniającym możliwość wzorcowania płytek wzorcowych z niepewnością charakterystyczną dla metody reszt ułamkowych z wykorzystaniem wzorców laserowych, a jednocześnie jest układem zautomatyzowanym.

Dzięki zastosowaniu szeregu aktuatorów możliwe jest wykonywanie adiustacji układu bez zaburzania stabilności warunków środowiskowych oraz przeprowadzenie zautomatyzowanych pomiarów, a komunikacja komputera stanowiskowego z wyposażeniem pomiarowym pozwala na wygodny dostęp do kompletu danych pomiarowych i uzyskanie ostatecznego wyniku zaraz po zakończeniu pomiaru.

Uzyskiwana na stanowisku dobra odtwarzalność wyników pomiarów pozwoliła na skuteczne zweryfikowanie możliwości pomiarowych interferometru, wpisanie usługi do międzynarodowej bazy oraz wykonywanie wzorcowań z najniższą niepewnością pomiaru w kraju.

Literatura

- [1] Lewis A. J., Absolute length measurement using multiple-wavelength phase-stepping interferometry. PhD Thesis. University of London, 1993.
- [2] Bitou Y., Hirai A., Yoshimori H., Hong F., Zhang Y., Onae A., Seta K., Gauge block interferometer using three frequency-stabilized lasers. Proc. SPIE 4401 (2001), s. 288-297.
- [3] Ikonen E., Riski K., Gauge-block interferometer based on one stabilized laser and a white-light source. Metrologia 30 (1993), s. 95-104.
- [4] Wengierow M., Salbut L., Ramotowski Z., Interferometric multiwavelength system for long gauge blocks measurements. Proc. SPIE (Munich) 8082, 80822R, (2011).
- [5] Wengierow M., Salbut L., Pakula A., Lukaszewski D., Multi-wavelength interferometer for high accuracy measurement of long gauge blocks Proc. SPIE (San Diego), 7064, 70640N (2008).
- [6] Edlén B., The refractive index of air. Metrologia 2 (1996), s. 71-80.
- [7] Birch K. P., Downs M. J., An updated Edlén equation for the refractive index of air, Metrologia 30 (1993), s. 155-162.
- [8] Birch K. P., Downs M. J., Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air, Metrologia 31 (1994), s. 315-316.
- [9] Bönsch G., Potulski E., Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae, Metrologia 35, (1998), s. 133-139.
- [10] Ramotowski Z., Sałbut L., Practical aspects of phase correction determination for gauge blocks measured by optical interferometry. Measurement Science and Technology 23 (2012).
- [11] Decker J. E., Pekelskym J. R., Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry, Metrologia 34, 1997, s. 479-493.
- [12] JCGM 100:2008 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. BIPM.
- [13] Vegesna R. K., Hocken R. J., A study of gauge block wringing Proc. ASPE 1-4 (2005).
- [14] Matus M. i in., Measurement of gauge blocks by interferometry, Metrologia 53 (2016), Technical Supplement.
- [15] Lewis A., Running of MRA comparisons in length metrology and monitoring their impact on CMCs. CCL/WG-MRA/GD-1 (2012).

Artykuł powstał na podstawie referatu zgłoszonego i przedstawionego na konferencji XI Szkoła-Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo” MWK'2017