

Pomiary długich płytek wzorcowych na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym z interferometrem laserowym

Robert Szumski (Zakład Długości i Kąta, GUM)

Przeczytaj o modernizacji komparatora interferencyjnego do wzorcowania długich płytek wzorcowych o zakresie pomiarowym do 500 mm.

Wprowadzenie

Stosowany od lat układ pomiarowy do wzorcowania długich płytek wzorcowych, oparty o zjawisko interferencji w świetle białym, został poddany modernizacji, w wyniku której stanowisko pomiarowe rozszerzone zostało o możliwość wykonywania pomiarów metodą reszt ułamkowych (ang. *exact fractions*). Do podstawowych zmian zastosowanych w układzie pomiarowym należy doprowadzenie do układu optycznego odpowiednio uformowanej wiązki światła laserowego oraz zastosowanie nowego rozwiązania w zakresie adiustacji zwierciadeł odniesienia. Rezultatem zmian w układzie pomiarowym jest możliwość wykonywania wzorcowania obiema metodami [1-4].

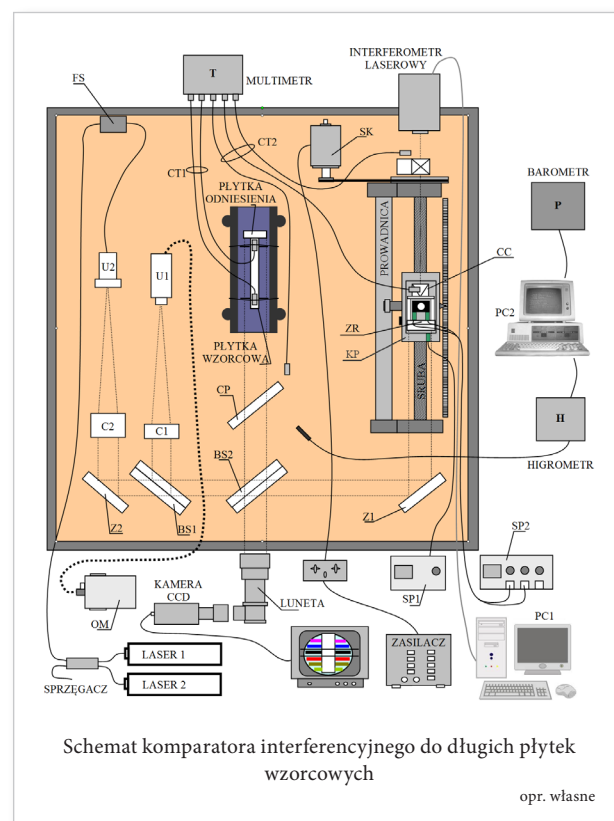
Tym, co odróżnia opisywane stanowisko pomiarowe od rozwiązań znanych od lat [4], jest przede wszystkim zastosowanie dwóch laserów stabilizowanych jako źródeł wzorcowych długości fal 633 nm i 543 nm. Zakres pomiarowy zapewniany przez jeden laser jest znacznie mniejszy i wymaga wstępnej znajomości długości płytki wzorcowej z niepewnością mniejszą niż $\lambda/4$. Taka niepewność pomiaru jest trudno osiągalna nawet przy pomiarach interferencyjnych ze światłem białym. Zastosowanie powyższych dwóch długości fal laserów zwiększa praktyczny zakres pomiarowy dla metody reszt ułamkowych do około $1,9 \mu\text{m}$.

Zmodernizowany układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku obok.

Źródłem światła białego jest oświetlacz mikroskopowy OM, z którego światło za pomocą kabla światłowodowego doprowadzane jest do uchwyty U1, gdzie poprzez filtr otwórkowy i kolimator C1 wprowadzane jest do dalszej części układu optycznego. Źródłem światła quasi-monochromatycznego są dwa lasery stabilizowane helowo-

neonowe o długościach fal $\lambda_1 = 633 \text{ nm}$ (barwa czerwona) i $\lambda_2 = 543 \text{ nm}$ (barwa zielona). Światło laserów, poprzez asymetryczny sprzęgacz światłowodowy i układ wibracyjny do redukcji niejednorodności rozkładu natężenia światła (ang. *speckle pattern*) trafia światłowodem wielomodowym do uchwyty U2. Płytką światłodzielną BS1 łączy tory optyczne od obu źródeł światła. Płytką światłodzielną zapewniającą interferencję oraz płytką kompensacyjną dla światła białego oznaczone są odpowiednio przez BS2 i CP. Wiązka przedmiotowa odbija się od powierzchni pomiarowych płytki wzorcowej, mierzonej i przywartej do niej płytki odniesienia umieszczonych na regulowanym stoliku pomiarowym. Zwierciadło Z1 kieruje wiązkę odniesienia do zwierciadła odniesienia ZR, które wspólnie ze



zwierciadłem odniesienia (retroreflektorem CC) interferometru laserowego, umieszczone jest na karetkce pomiarowej KP poruszanej przez śrubę napędową i silnik krokowy SK. Po modernizacji układu ustawienie kątowe połączonych zwierciadeł odniesienia może być zmieniane w trakcie pomiaru za pomocą aktuatorów piezoelektrycznych sterowanych przez zasilacz trójkanałowy.

Mikroprzesuw karetki pomiarowej realizowany jest również za pomocą układu piezoelektrycznego. Zmiana położenia karetki mierzona jest przez interferometr laserowy. Wyjściowa wiązka pomiarowa poprzez lunetę skupiającą trafia na matrycę kamery CCD, a obraz jest obserwowany na dodatkowym monitorze. Do pomiaru warunków środowiskowych służy barometr, higrometr oraz multimetr z zestawem termistorowych czujników temperatury materiału płytki wzorcowej i powietrza.

Zaprezentowany zmodernizowany komparator interferencyjny jest stanowiskiem pomiarowym zapewniającym możliwość kompleksowego wzorcowania długich płytek wzorcowych z niepewnością charakterystyczną dla metody reszt ułamkowych, a jednocześnie bez ograniczeń wynikających z jej zakresu pomiarowego.

Dzięki zastosowaniu obu metod pomiarowych na jednym stanowisku pomiarowym, znaczna liczba elementów układu jest wspólna dla obu metod, a tym samym mniejsza niż w przypadku dwóch niezależnych układów pomiarowych.

Brak konieczności przenoszenia płytki wzorcowej na inne stanowisko pomiarowe znacznie skraca czas wzorcowania dwiema metodami (płytką i układ pomiarowy stabilizują się temperaturowo przed pomiarem tylko raz).

Osiągane niepewności pomiaru

Najlepsza zdolność pomiarowa związana z wyznaczeniem odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowanej metodą reszt ułamkowych wynosi:

$$U = \sqrt{0,038^2 + 0,4^2 \cdot L_n^2} \mu\text{m} \quad (1)$$

gdzie L_n jest wartością liczbową długości nominalnej wyrażonej w metrach.

Dla metody wykorzystującej interferencję w świetle białym najlepsza zdolność pomiarowa wynosi

$$U = \sqrt{0,04^2 + 0,5^2 \cdot L_n^2} \mu\text{m} \quad (2)$$

Tabela: Zestawienie składowych niepewności pomiaru

Składowa niepewności	Rozkład	Współczynnik wrażliwości c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ [nm]
Określenie długości z reszt ułamkowych* Odczyt reszty ułamkowej * Długość fali lasera *	normalny normalny normalny	$\lambda/2$ L/λ	3,0 $2,04 \cdot 10^3 L$
Wzorcowanie lasera Stabilność długoterminowa	normalny prostokątny		
Określenie długości za pomocą interferometru Renishaw ** Odczyt wskazań ** Rozdzielczość Powtarzalność wskazań Naprowadzanie prążka Długość fali interferometru ** Wzorcowanie interferometru Stabilność długoterminowa	prostokątny normalny prostokątny normalny prostokątny	1 L	18,7 $5,20 \cdot 10^3 L$
Efekty temperaturowe Pomiar temperatury płytki Wzorcowanie multimetru Równanie interpolacyjne Dryf wskazań czujnika Zmiany temp. w trakcie pomiaru ** Gradient temperatury w płytce Wsp. rozszerzalności liniowej składowa drugiego rzędu	normalny normalny prostokątny prostokątny prostokątny	αL L θ	$1,66 \cdot 10^3 L^*$ $(1,72 \cdot 10^3 L^{**})$ $1,33 \cdot 10^3 L$ $9,62 \cdot 10^3 L$
Współczynnik załamania powietrza Temperatura powietrza Wzorcowanie multimetru i czujników Równanie interpolacyjne Dryf długoterminowy wskazań Zmiana temp. w trakcie pomiaru ** Gradient temperatury powietrza Ciśnienie powietrza Wzorcowanie barometru Zmiana ciśnienia w trakcie pom. Dryf długoterminowy wskazań Gradient ciśnienia Rozdzielczość barometru Wilgotność powietrza Wzorcowanie miernika Zmiana wskazań w trakcie pom.** Dryf długoterminowy Rozdzielczość interfejsu Zawartość CO ₂ w powietrzu Równanie Edlęna	normalny normalny prostokątny prostokątny prostokątny normalny prostokątny prostokątny prostokątny normalny prostokątny prostokątny normalny	$-9,44 \cdot 10^3 L$ $2,68 \cdot 10^3 L$ $-8,67 \cdot 10^3 L$ $1,43 \cdot 10^2 L$	$1,74 \cdot 10^3 L^*$ $(1,82 \cdot 10^3 L^{**})$ $1,84 \cdot 10^3 L^*$ $(4,94 \cdot 10^3 L^{**})$ $8,28 \cdot 10^3 L^*$ $(8,29 \cdot 10^3 L^{**})$ $1,65 \cdot 10^2 L$ $1 \cdot 10^2 L$
Adiustacja układu optycznego * Średnica światłowodu Ogniskowa kolimatora Przesunięcie osi optycznej (wyraz II rzędu)	normalny normalny normalny	$aL/(8f^2)$ $-a^2L/(8f^3)$ $L/(f^2\sqrt{2})$	$4,42 \cdot 10^2 L$ $7,82 \cdot 10^4 L$ $1,57 \cdot 10^4 L$ $4,42 \cdot 10^3 L$
Adiustacja interferometru ** Błąd kosinusowy Justowanie interferometru	prostokątny prostokątny	L	$1,37 \cdot 10^4 L$
Błąd czoła fali * Odchylenie od płaskorównoległości Warstwa przywarcia Punkty podparcia płytki Poprawka na zmianę fazy	prostokątny normalny normalny normalny prostokątny	1 1 1 L 1	11,55 6,95 10 $4,70 \cdot 10^3 L$ 11,55

opr. własne

*) Występuje tylko przy metodzie reszt ułamkowych.

**) Występuje tylko przy wykorzystaniu światła białego i interferometru Renishaw.

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), 288-297.
- [3] Iwasińska-Kowalska O., Dobosz M.: *A new method of non-contact gauge block calibration using the fringe counting technique: II. Experimental verification*. Optics & Laser Technology 42 (2010), 149-155.
- [4] Ikonen E., Riski K.: *Gauge-block interferometer based on one stabilized laser and a white-light source*. Metrologia 30 (1993), 95-104.