

Robert SZUMSKI

GLÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD DŁUGOŚCI I KĄTA

Interferometr laserowy GBI300 do pomiarów materialnych wzorców długości – płytek wzorcowych

mgr inż. Robert SZUMSKI

Absolwent wydziału elektrycznego Politechniki Warszawskiej na kierunku elektrotechnika. Od 2003 roku pracownik Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar.



e-mail: robert.szumski@wp.pl

Streszczenie

Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM posiada najdokładniejszy w kraju, automatyczny interferometr laserowy do wzorcowania płytek wzorcowych o zakresie pomiarowym 305 mm. Interferometr GBI300 służy do wzorcowania płytek wzorcowych o przekroju prostokątnym, kwadratowym i okrągłym, służących następnie jako wzorce odniesienia przy pomiarach metodą porównawczą. Umożliwia on wyznaczenie takich parametrów płytek wzorcowych, jak odchylenie długości środkowej od długości nominalnej, zmienność długości oraz odchylenie od płaskości powierzchni pomiarowych. GBI300 jest zbudowany na bazie klasycznego interferometru „Twyman-Greena” z wykorzystaniem wysokiej jakości laserów stabilizowanych częstotliwościowo i oprzyrządowania sterowanego komputerowo. Układ pomiarowy działa w oparciu o metodę kroku fazowego (ang. phase stepping) wykorzystując techniki numerycznego przetwarzania obrazu do analizowania interferogramów otrzymanych z kamery CCD. Źródłem wzorcowych długości fal światła są dwa stabilizowane częstotliwościowo lasery helowo neonowe o długościach fal promieniowania: 633 nm (czerwony) i 543 nm (zielony). Dzięki zastosowaniu napędu do stolika pomiarowego możliwe jest wykonanie pomiarów do dwunastu płytek wzorcowych w krótkim okresie czasu, co znacznie zwiększa wydajność i pozwala na wykonanie większej ilości pomiarów każdej płytki. Stanowisko pomiarowe umieszczone jest w klimatyzowanym pomieszczeniu, zapewniającym stabilizację temperatury wewnątrz komory w zakresie $(19,9 \div 20,1) \text{ }^\circ\text{C}$. Komora pomiarowa umieszczona jest na stole z układem wibroizolacyjnym i połączona z jednostką sterującą-pomiarową, wyposażoną w urządzenia i komputer, sterujące pracą całego stanowiska oraz przyrządy pomiarowe do monitorowania warunków środowiskowych. Walidacja stanowiska pomiarowego i szacowanie niepewności pomiaru przeprowadzone zostały na podstawie badań przeprowadzonych w laboratorium oraz przy wykorzystaniu płytek wzorcowych posiadających świadectwo wzorcowania z National Physical Laboratory - Anglia.

Słowa kluczowe: płytki wzorcowe, interferometr laserowy GBI300, metoda interferencyjna, niepewność, walidacja.

GBI300 laser interferometer for measuring of material standards of length – gauge blocks

Abstract

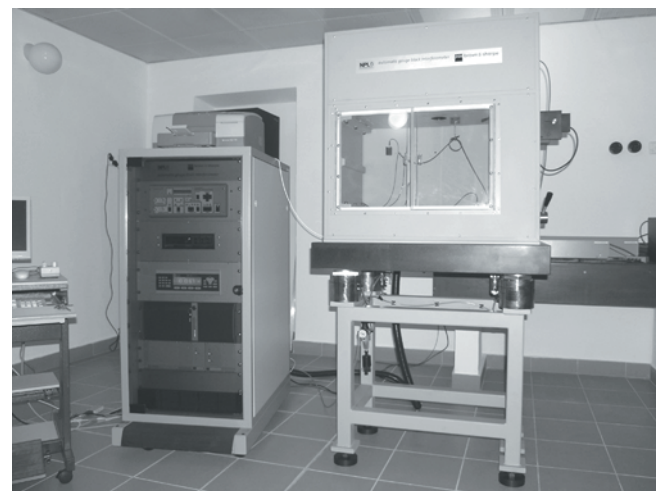
Length Laboratory of Length and Angle Division of GUM uses the most accurate in Poland automatic laser interferometer for calibration of gauge blocks, with measurement range of 305 mm. The GBI300 interferometer can be used for calibration of both rectangular or square (Hoke) gauge blocks and round (British) length bars. The GBI300 allows to calculate of central deviation, flatness and variation in length of measured gauge blocks. The Automatic Gauge Block Interferometer combines a conventional Twyman-Green Interferometer with high quality frequency

stabilised lasers and computer interfaced instrumentation. The combination of phase-stepping method, image processing and computing techniques for analysis of the interferogram makes the instrument less dependent on operator skills. Two frequency-stabilized He-Ne lasers provide the light sources for the interferometry (633 nm and 543 nm). During the measurement up to twelve gauges can be wrung to a platen that has servo motor rotation control. It allows to measure gauge blocks faster and more accurate. The interferometer is placed in air conditioned laboratory with temperature change in interferometer chamber in range $(19,9 \div 20,1) \text{ }^\circ\text{C}$. The measuring chamber is placed on the granite table with vibroisolation system. The control cabinet houses the control equipment and instrumentation for measuring ambient conditions. The calibration method validation was performed by comparing measurement results with results from calibration certificate issued by National Physical Laboratory in United Kingdom. The uncertainty was evaluated on the basis of tests and measurements carried out in the laboratory.

Keywords: gauge blocks, laser interferometer GBI300, interferometry, uncertainty, validation.

1. Wprowadzenie

Definicją jednostki miary długości układu SI, metra, jest droga przebyta przez światło w próżni, w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy [1]. W 1896 roku, C. E. Johansson ze Szwecji, wynalazł płytki wzorcowe, które od tego czasu są powszechnie używane jako materialny wzorec długości [2]. Posiadają one na końcach odpowiednio wypolerowane powierzchnie pomiarowe, które mają własności dobrego odbijania światła. Podczas pomiarów interferencyjnych, płytki wzorcowe przywierane są do stolików pomiarowych, posiadających również odpowiednio wykonane powierzchnie pomiarowe. Interferometry stosowane do wzorcowania płytek wykorzystują metodę określania ilości długości fal światła mieszczących się w długości mierzonej płytki. Długość środkowa płytki wzorcowej zdefiniowana jest dla $20 \text{ }^\circ\text{C}$, jako odległość w kierunku prostopadłym między punktem środkowym powierzchni pomiarowej nieprzywaranej a powierzchnią płaską płytki pomocniczej, do której druga powierzchnia pomiarowa płytki wzorcowej została przywarana. Rys. 1 przedstawia automatyczny interferometr laserowy GBI300 stosowany w Laboratorium Długości Głównego Urzędu Miar.



Rys. 1. Automatyczny Interferometr Laserowy w Laboratorium Długości GUM
Fig. 1. Automatic Gauge Block Interferometer at Length Laboratory of GUM

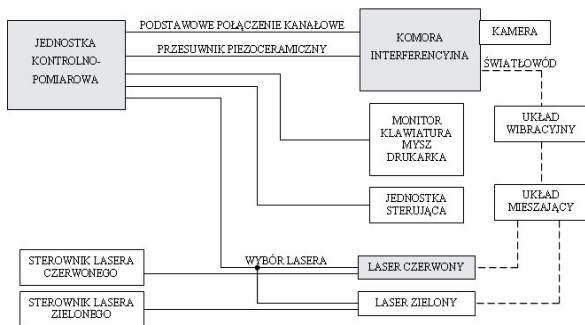
Najlepsza zdolność pomiarowa związana z wyznaczeniem odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowanej na opisywanym interferometrze wynosi:

$$U = \sqrt{20,3^2 + 0,24^2 \cdot L_n^2} \text{ nm} \quad (1)$$

gdzie L_n jest wartością liczbową długości nominalnej wyrażonej w milimetrach.

2. Konstrukcja interferometru GBI300

Na stanowisko pomiarowe z interferometrem laserowym GBI300 składa się bogate wyposażenie przedstawione schematycznie na rys. 2. Jednostką główną interferometru jest wykonana z odlewu żeliwnego struktura komory interferencyjnej, w której umieszczony jest układ optyczny i mechanizmy współpracujące, takie jak napęd stolika pomiarowego. Napęd ten umożliwia zdalny obrót stolika pomiarowego, pozwalając na ustawianie kolejnych płytek wzorcowych w polu widoku optyki interferometru. Komora interferometru posiada również ścianki wykonane z materiału izolacyjnego, który wraz z metalową strukturą zapewnia stabilność temperaturową podczas pomiarów. Temperatura podczas wzorcowania mierzona jest za pomocą czujników termorezystancyjnych umieszczonych wewnątrz komory. Kamera CCD, umieszczona „na wyjściu” układu optycznego, rejestruje obrazy prążków interferencyjnych widoczne na powierzchni płytki wzorcowej i stolika pomiarowego. Lasery wzorcowe połączone są z komorą interferometru za pomocą światłowodu. Na stanowisku pomiarowym zainstalowane są dwa lasery o długościach fal 633 nm (barwa czerwona) i 543 nm (barwa zielona). Jednostka kontrolno-pomiarowa zawiera przyrządy do pomiaru temperatury (mostek oporowy), wilgotności (miernik punktu rosy) oraz ciśnienia atmosferycznego (miernik ciśnienia absolutnego), które połączone są za pomocą interfejsu GPIB z komputerem [3]. Oprogramowanie pomiarowe FLAP zainstalowane na komputerze monitoruje warunki środowiskowe oraz dokonuje rejestracji i analizy interferogramów przy wykorzystaniu techniki kroku fazowego.



Rys. 2. Schemat interferometru laserowego GBI300
Fig. 2. Diagram of the GBI300 laser interferometer

3. Podstawy funkcjonowania

GBI300 jest zbudowany na bazie klasycznego interferometru typu „Twymana-Greena”. Długość (L) płytki wzorcowej przy otaczających warunkach pomiarowych wynosi [4]:

$$L_f = (\kappa + F) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

gdzie:

κ – ilość całkowitych połówek długości emitowanej fali świetlnej mieszczących się w danej długości nominalnej płytki wzorcowej (rząd interferencji),

F – zmierzona wartość reszty ułamkowej,
 λ – długość emitowanej fali świetlnej.

Jeżeli długość płytki byłaby znana z dokładnością do $\lambda/2$ wówczas mogłaby być wyznaczona poprawna wartość κ . W praktyce, odchylenie długości środkowej od długości nominalnej niektórych płytek przekracza tą wartość, w związku z czym wykonuje się drugi pomiar, wykorzystując laser o innej długości fali światła. Dla takiego przypadku:

$$L_f = (\kappa_1 + F_1) \cdot \frac{\lambda_1}{2} = (\kappa_2 + F_2) \cdot \frac{\lambda_2}{2} \quad (3)$$

Gdzie indeksy 1 i 2 odnoszą się do dwóch różnych źródeł światła: 633 nm (barwa czerwona) i 543 nm (barwa zielona). Przy takim rozwiązaniu teoretyczny zakres pomiarowy interferometru wynosi ponad $\pm 3 \mu\text{m}$.

Długość mierzona w określonych warunkach musi być skorygowana do temperatury 20 °C za pomocą poprawki temperaturowej:

$$l_t = \theta \cdot \alpha \cdot L \quad (4)$$

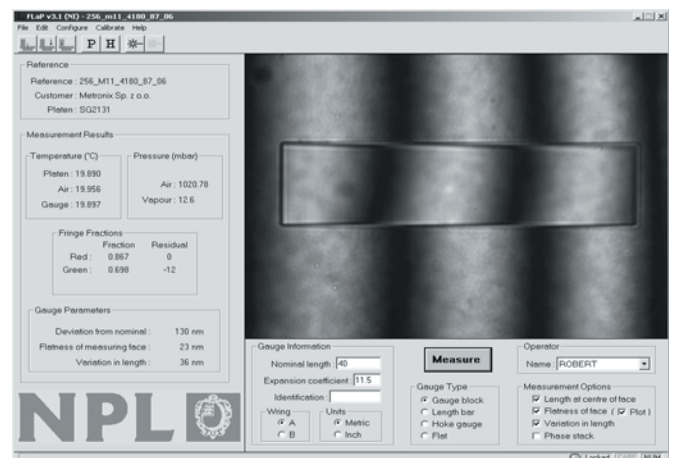
gdzie:

θ – różnica pomiędzy temperaturą płytki wzorcowej, a temperaturą odniesienia 20 °C wynosząca $\theta = (20 - t_p)$ °C,
 α – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału płytki wzorcowej.

Temperatury w komorze interferometru utrzymywane są w zakresie (19,9 ÷ 20,1) °C. Lasery wzorcowe są stabilizowane częstotliwościowo, a system monitoruje warunki środowiskowe w komorze interferometru, dzięki czemu, przy zastosowaniu wzoru Edlena, możliwe jest wyznaczenie długości fali światła w powietrzu.

4. Metoda kroku fazowego

Podczas procedury pomiarowej interferometr rejestruje serię zdjęć dla kilku przesunięć fazy prążków interferencyjnych. Do wykonywania drobnych przesunięć zwierciadła odniesienia układu optycznego wykorzystywany jest przesuwnik piezoceramiczny. Reszty ułamkowe dla poszczególnych barw światła określane są na podstawie analizy interferogramów uzyskanych z uśrednienia uzyskanych obrazów. Technika polega na znalezieniu reszty ułamkowej w kilku punktach interferogramu. Przykładowy widok prążków w głównym oknie programu pomiarowego FLAP przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Widok głównego okna programu
Fig. 3. The view of the program main window

GBI300 rejestruje pięć interferogramów dla każdej barwy światła podczas przesuwania zwierciadła odniesienia kolejno o $1/4$ prążka pomiędzy zdjęciami, co odpowiada przesunięciu

