



## Interferometr multispektralny do pomiaru długości płytek wzorcowych klasy K

ANNA PAKUŁA, LESZEK SAŁBUT, DARIUSZ ŁUKASZEWSKI,  
MICHAŁ WENGIEROW

Politechnika Warszawska, Instytut Mikromechaniki i Fotoniki,  
02-525 Warszawa, ul. Św. A. Boboli 8

**Streszczenie.** Przedstawiony niżej tekst opisuje problem pomiaru długości długich płytek wzorcowych klasy K, o długości do 1000 mm, przy wykorzystaniu interferometru multispektralnego. W artykule przedstawiono wymagania, założenia i koncepcję interferometru multispektralnego opartego na układzie Twymana-Greena z automatyczną analizą obrazów prążkowych, wykorzystującego promieniowanie o długości fali:  $\lambda_1 = 632,8$  nm i  $\lambda_2 = 543$  nm.

**Słowa kluczowe:** płytki wzorcowe, pomiary długości, interferometria multispektralna, interferometr Twymana-Grena

**Symbole UKD:** 535.8

### Wstęp

Możliwość dokonywania pomiarów długości długich płytek wzorcowych klasy K, o długości do 1000 mm, jest kluczową dla laboratoriów pomiarowych (w tym Głównego Urzędu Miar, GUM), zwłaszcza przy zwiększonym zapotrzebowaniu na długie wzorce krańcowe stosowane do wzorcowania maszyn współrzędnościowych. Obecnie w kraju nie ma takiej możliwości, przez co przedsiębiorcy zmuszeni są do korzystania z usług zagranicznych biur i laboratoriów akredytowanych.

Pomiary długości długich płytek wzorcowych klasy K przeprowadzane są głównie metodami optycznymi, przy zastosowaniu multispektralnych technik interferencyjnych, ze względu na ich polowy charakter, najwyższe dokładności i najniższe niepewności pomiaru.

Wykorzystanie projektowanego układu przez laboratoria pomiarowe nakłada określone restrykcje na jego metrologiczne własności oraz stabilność pracy i powtarzalność wyników.

W dalszej części artykułu przedstawiono rozważania prowadzące do budowy interferometru multispektralnego do wyznaczania długości długich płytek wzorcowych klasy K.

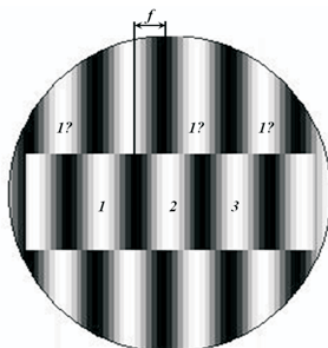
## Rozważania teoretyczne — metoda pomiaru

Zastosowanie klasycznych, optycznych metod pomiaru długości wykorzystujących interferometrię laserową w przypadku długich obiektów jest wykluczone. Jest to spowodowane nieoznaczonością numeracji prążków, która pojawia się przy pomiarze długości/wysokości obiektu wyższego niż pół długości fali wykorzystywanej w pomiarze. Problem nieoznaczoności został przedstawiony na rysunku 1. Na skutek różnic wysokości badanego obiektu prążki interferencyjne przestają być ciągłe, przez co tracona jest informacja o numerze prążka, niezbędna do wyznaczenia całkowitej wielokrotności długości fali  $m$  między badanymi powierzchniami.

Istnieje kilka sposobów na rozwiązanie problemu nieoznaczoności numeracji prążków opartych na zastosowaniu dwóch długości fali oraz różnych technik analizy otrzymanych wyników. Najczęściej stosowaną jest technika fali ekwiwalentnej  $\lambda_{ekw}$  o długości wyznaczonej ze wzoru 1 [1-5]:

$$\lambda_{ekw} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}, \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda_1, \lambda_2$  to długości fali świetlnej wykorzystane w pomiarze.



Rys. 1. Przykład nieoznaczoności numeracji prążków przy pomiarze długości/wysokości obiektu z uskokiem większym niż 1/2 długości fali przy zastosowaniu klasycznej interferometrii laserowej,  $f$  — reszta ułamkowa

Wykorzystanie tej metody jest jednak ograniczone ze względu na zakres długości fal ekwiwalentnych możliwych do uzyskania tą metodą przy stosowaniu dostępnych na rynku źródeł laserowych. Najefektywniejsze zwiększenie zakresu pomiarowego przez zmianę długości fali ekwiwalentnej  $\lambda_{ekw}$ , jest uzyskiwane przez zastosowanie jak najbardziej zbliżonych długości fal źródeł składowych  $\lambda_1, \lambda_2$ . Dobór długości tych fal zależy także od stopnia stabilizacji częstotliwości promieniowania laserów [6].

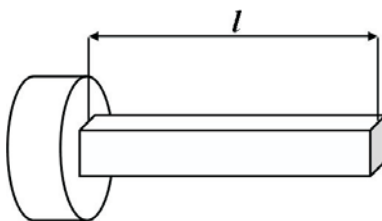
Kolejną wykorzystywaną metodą jest ponownie zastosowanie dwóch długości fali, jednakże w połączeniu z metodą analizy opartą na wyznaczaniu reszt ułamkowych [7, 8, 9]. Reszta ułamkowa to zaobserwowane przesunięcie  $f$  w obrazie prążkowym na powierzchni płytki wzorcowej w stosunku do analogicznego obrazu prążkowego na powierzchni referencyjnej (rys. 1). Na rysunku 2 przedstawiono położenie powierzchni płytki wzorcowej i referencyjnej. Wyznaczanie reszt ułamkowych przeprowadza się kolejno dla dwóch długości fali  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ .

Metoda reszt ułamkowych wykorzystuje sekwencyjny pomiar dla poszczególnych fal promieniowania i może być również stosowana przy wykorzystaniu trzech lub więcej długości promieniowania.

Długość mierzonej płytki  $l$  uzyskiwana jest przez porównanie wyników według wzoru 2:

$$l = (m_1 + f_1) \frac{\lambda_1}{2} = (m_2 + f_2) \frac{\lambda_2}{2} = \dots = (m_i + f_i) \frac{\lambda_i}{2}, \quad (2)$$

gdzie:  $m_i$  — liczba całkowita reprezentująca numer prążka interferencyjnego;  
 $f_i$  — reszta ułamkowa prążka interferencyjnego;  
 $i$  — numer kolejnej fali światła.



Rys. 2. Położenie płytki wzorcowej na powierzchni referencyjnej,  $l$  — długość płytki,  $l = (m + f) \lambda / 2$

Najczęściej, by uzyskać najbardziej wiarygodny wynik, sprawdza się wszystkie kombinacje  $m_i$  w zakresie pomiarowym zawierającym długość nominalną badanej płytki  $l_n$ . Szukanym rozwiązaniem jest kombinacja  $m$  znajdująca się w lokalnym minimum funkcji RMS wyrażonej wzorem 3:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left[ l_n - (m_i + f_i) \frac{\lambda_i}{2} \right]^2}, \quad (3)$$

gdzie  $n$  to liczba fal promieniowania wykorzystanych w pomiarze.

Oprócz wyżej wymienionych metod prowadzone są badania nad metodami wykorzystującymi jednocześnie oświetlenie badanego przedmiotu kilkoma długościami fali i następnie analizę zmian obwiedni funkcji kontrastu obrazu prążkowego [6, 10, 11].

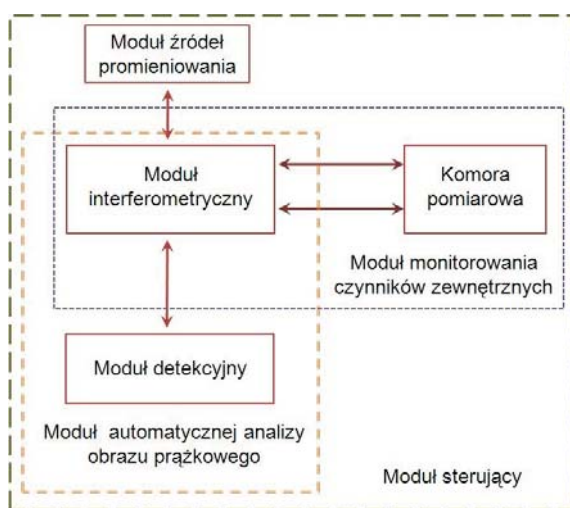
W projektowanym układzie interferometru multispektralnego wykorzystywane są dwie długości fali z zakresu widzialnego promieniowania elektromagnetycznego oraz metody wyznaczania reszt ułamkowych [9] lub reszt fazowych [12]. Przewidywana niepewność wyznaczania długości płytki wzorcowej wynosi  $0,3 \mu\text{m}$ .

## Wymagania

- Projektowany układ pomiarowy przeznaczony jest do pomiaru długości długich, z zakresu  $500 \div 1000 \text{ mm}$ , płytek wzorcowych klasy kalibracyjnej K. Odchyłki graniczne długości  $\pm t_e$  płytek względem ich długości nominalnej  $l_n$  zawierają się w przedziale od  $2,2 \mu\text{m}$ , dla płytek o długości  $500 \text{ mm}$ , do  $4,2 \mu\text{m}$ , dla płytek o długości  $1000 \text{ mm}$  [9].
- Głównym założeniem dotyczącym interferometrycznego systemu pomiarowego jest jego prawidłowa praca bez potrzeby wstępnego pomiaru długości badanej płytki. Wiąże się to z potrzebą odpowiedniego doboru metody pomiarowej i wykorzystywanych źródeł promieniowania, ze względu na długości fali, jak również na stabilizację ich częstotliwości.
- Wykorzystanie projektowanego interferometru przez laboratoria akredytowane wymusza określone wielkości niepewności pomiarów na poziomie  $0,3 \mu\text{m}$ .
- W bilansie niepewności muszą być uwzględnione błędy wynikające ze zmiany długości fali, frontu falowego, elementów mechanicznych interferometru oraz samej płytki wzorcowej spowodowane zmianami czynników zewnętrznych [13].
- Z przeprowadzonych symulacji numerycznych wynika, że aby uzyskać pomiar z wymaganą niepewnością, przy metodzie analizy z wykorzystaniem reszt ułamkowych, wystarczy zastosowanie dwóch długości fali ( $\lambda_1 = 632,8 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 543 \text{ nm}$ ) o stabilizacji częstotliwości nie gorszej niż  $1 \times 10^{-8}$  [12].

## Koncepcja układu pomiarowego

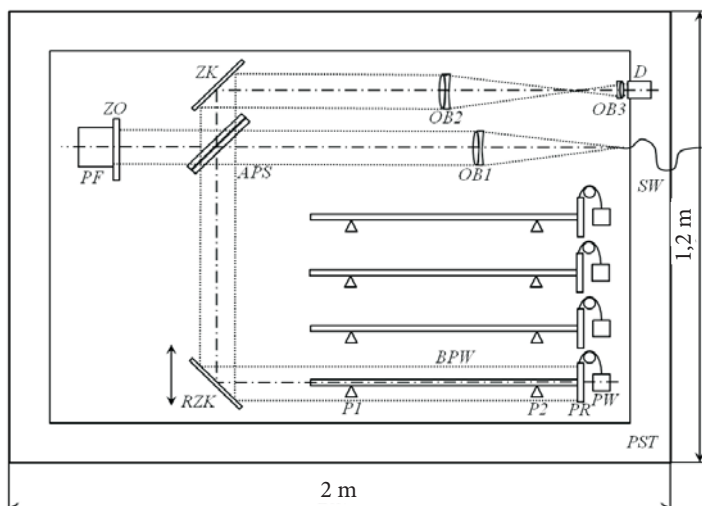
Projektowany układ interferometru multispektralnego do pomiaru długości długich płytek wzorcowych ma budowę modułową. W jego skład wchodzi: moduł źródeł promieniowania, moduł interferometryczny, komora pomiarowa, moduł detekcyjny, moduł automatycznej analizy obrazu prążkowego, moduł monitorowania czynników zewnętrznych oraz moduł sterujący. Połączenia pomiędzy modułami przedstawione zostały na rysunku 3.



Rys. 3. Relacje między modułami układu interferometru multispektralnego

Moduł źródeł promieniowania jest odseparowany od reszty interferometru i połączony z nim torem światłowodowym ze względu na położenie laserów w specjalnym, oddzielnym pomieszczeniu. Pozwala to na izolację układu interferencyjnego od wpływu temperatury wydzielanej przez wykorzystywane lasery i ich jednostki zasilające. W skład tego modułu wchodzi dwa źródła laserowe o długościach fali:  $\lambda_1 = 632,8 \text{ nm}$  (czerwony, stabilizacja częstotliwości  $1 \times 10^{-8}$ , model SR, HEXAGON Metrology Limited),  $\lambda_2 = 543 \text{ nm}$  (zielony, stabilizacja częstotliwości  $1 \times 10^{-8}$ , model SG, HEXAGON Metrology Limited).

Schemat interferometru multispektralnego został przedstawiony na rysunku 4. Moduł interferometryczny zbudowany jest w oparciu o konfigurację interferometru Twymana-Greena. Wiązka laserowa dostarczona torem światłowodowym do modułu interferometrycznego jest rozszerzona i skolimowana przez specjalnie projektowany obiektyw apochromatyczny *OBI*. Następnie fala płaska o średnicy 50 mm jest dzielona na achromatycznej płycie światłodzieliącej *APS* na dwie wiązk-



Rys. 4. Schemat budowy interferometru multispektralnego: SW — światłowod; *OB1* — obiektów kolimujący; *APS* — achromatyczna płytki światłdzielająca; *ZO* — zwierciadło odniesienia; *PF* — piezoelektryczny przesuwnik fazy; *RZK* — ruchome zwierciadło kierujące; *BPW* — badana płytki wzorcowa; *PR* — płytki referencyjna; *PW* — przeciwwaga płytki referencyjnej; *P<sub>N</sub>* — regulowane podpory badanej płytki; *ZK* — zwierciadło kierujące; *OB2, OB3* — obiektywy odwzorowujące; *D* — detektor matrycowy; *PST* — płaszcz obudowy stabilizujący temperaturę

ki, przedmiotową i referencyjną. Płytki światłdzielająca zbudowana jest z dwóch klinów optycznych, w celu kompensacji dyspersji chromatycznej.

Wiązka referencyjna ulega odbiciu na zwierciadle odniesienia *ZO* o maksymalnej odchyłce płaskości nie przekraczającej  $\lambda/20$ . Zwierciadło to jest umieszczone na trójkanałowym przesuwniku piezoelektrycznym THORLABS KC1-T-PZ/M. Umożliwia to pochył zwierciadła w dwóch prostokątnych kierunkach z rozdzielczością 0,1" w zakresie  $\pm 10^\circ$ . Rolą przesuwnika jest również równomierna zmiana fazy promieniowania w całym polu pomiarowym wzdłuż osi optycznej. Przesuw ten wykorzystywany jest w metodzie czasowej dyskretnej zmiany fazy, techniki do automatycznej analizy obrazów prążkowych uzyskiwanych w systemie pomiarowym.

Badana płytki wzorcowa znajduje się w komorze pomiarowej. Fala przedmiotowa ulega odbiciu na jej czołowej powierzchni i na powierzchni płytki referencyjnej *PR* przywarłej do jej drugiego końca. By zapobiec niepożądanemu ugięciu płytki badanej spowodowanemu masą płytki referencyjnej, zastosowano specjalny układ kompensacyjny *PW*.

Obraz prążkowy uzyskany w wyniku interferencji wiązki przedmiotowej i referencyjnej jest pomniejszany do rozmiarów detektora *D* (matrycy CCD), przez odwrócony układ ekspandera *OB2, OB3*, a następnie zapisywany w pamięci

jednostki centralnej. Projektowana komora pomiarowa pozwala na jednoczesne umieszczenie czterech płytek wzorcowych.

Do automatycznej analizy obrazów prążkowych wybrano pięcioramkową metodę czasowej dyskretnej zmiany fazy [14, 15]. Moduł automatycznego przetwarzania interferogramów współpracuje z przesuwnikiem fazy *PF*. Oprócz wprowadzenia zmiany fazy o wartości  $\pi/4$  podczas rejestracji sekwencji interferogramów moduł ten wyposażony jest w algorytm samokalibrujący. Kalibracja przesunięcia przesuwników piezoelektrycznych jest kwestią kluczową przy pomiarach, ze względu na ich wymaganą dokładność (rzędu 1 nm) [15] i powinna być wykonywana przed każdym pomiarem. Algorytm samokalibrujący pozwala na zmniejszenie czasu kalibracji w stosunku do procedury ręcznej oraz pozwala na przeprowadzenie pomiarów przez techników, bez konieczności manualnej ingerencji w zwartą budowę układu.

Uzyskanie wymaganej niepewności pomiarów wymaga stabilnych warunków otoczenia w czasie ich wykonywania. Projektowany układ jest eksploatowany w pomieszczeniu o monitorowanej temperaturze i wilgotności. Temperatura pomieszczenia podczas pomiaru wynosi  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , a wilgotność  $57,5 \pm 0,5\%$ .

Oprócz monitorowania temperatury i wilgotności w pomieszczeniu, w którym znajduje się projektowany układ, wymagana jest również ścisła kontrola temperatury, wilgotności, ciśnienia atmosferycznego oraz stężenia zawartości dwutlenku węgla w obszarze pomiarowym, gdyż czynniki te oraz ich zmiany wpływają na długość fali promieniowania elektromagnetycznego, front falowy, elementy układu pomiarowego oraz badaną płytkę. Monitorowanie zmian powyższych czynników pozwala na jednoznaczne określenie długości fali przy konkretnym pomiarze [16, 17]. W tym celu zbudowano moduł monitorowania czynników zewnętrznych.

Do pomiaru temperatury został zaprojektowany układ czterdziestu termistorów rozmieszczonych w komorze pomiarowej. Badana jest temperatura w otoczeniu, w punktach podparcia badanej płytki wzorcowej oraz wzdłuż biegu wiązki laserowej. Dodatkowo kilka termistorów rozmieszczonych jest przy krańcach komory pomiarowej, by uzyskać informację o gradiencie temperatur. Praca układu termistorów (Measurement SPECIALTIES, 44031RC Precision Thermistor) jest synchronizowana i kontrolowana przez jednostkę centralną (KEITHLEY, 2700 Integra Series). Pomiar pozostałych czynników zewnętrznych jest prowadzony w jednym punkcie komory pomiarowej. Do ich pomiaru służą następujące czujniki: miernik wilgotności (VAISALA, HUMICAP Humidity and Temperature Transmitter Series HMT330), miernik ciśnienia (VAISALA, BAROCAP Digital Barometer PTB330) oraz miernik stężenia dwutlenku węgla (VAISALA, CARBOCAP Carbon Dioxide Probe GMP343).

Istnieje potrzeba szybkiej analizy danych otrzymanych z pomiaru wyżej wymienionych czynników. W tym celu system interferometryczny wyposażono w układ monitorujący sprzężony z układem analizy, w którym automatycznie uwzględniane są poprawki do długości fali spowodowane warunkami odbiegającymi od normalnych. Oprócz zmian długości fali ciągle monitorowanie zmian czynników

zewnątrznych pozwala na uwzględnienie ich wpływu także na front falowy, elementy mechaniczne, optyczne i elektroniczne układu oraz badaną płytkę wzorcową przez wykorzystanie specjalnie zaprojektowanego algorytmu sterującego sprzęgającego moduł analizy z modulem monitoringu.

Praca wszystkich modułów wchodzących w skład systemu pomiarowego jest kontrolowana i synchronizowana przez moduł sterujący.

Wszystkie moduły interferometru, poza modulem źródeł promieniowania, znajdują się w odizolowanym pomieszczeniu, na antywibracyjnym podłożu. Całość układu umieszczona jest w zamkniętej obudowie z płaszczem do stabilizacji temperatury PST. Wewnątrz obudowy monitorowany jest rozkład temperatur, ciśnienie, wilgotność i stężenie dwutlenku węgla. Dodatkowo elementy wydzielające ciepło w czasie swojej pracy, takie jak detektor i sterownik przesuwnika piezoelektrycznego znajdują się poza komorą pomiarową.

## Wnioski

Budowany układ pomiarowy do wyznaczania długości długich płytek wzorcowych klasy kalibracyjnej K pozwoli polskim laboratoriom akredytowanym i pomiarowym na rozszerzenie swojej działalności. Urządzenie to będzie unikatowym w skali kraju, a jednym z kilku w Europie. Obecnie na swoim wyposażeniu podobne interferometry mają jednostki certyfikujące między innymi w następujących krajach: Niemcy, Szwajcaria, Wielka Brytania, Finlandia.

Budowa tego urządzenia jest nie tylko odpowiedzią na zwiększone zapotrzebowanie przemysłu krajowego na wzorce krańcowe, lecz także pozwoli na uczestnictwo polskich jednostek laboratoryjnych w łańcuchu pomiarów porównawczych w obrębie Unii Europejskiej oraz całego świata.

Opisany system interferometryczny, budowany w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej będzie docelowo umieszczony i wykorzystywany w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie.

Praca jest finansowana przez MNiSW w ramach projektu rozwojowego nr R01 013 02.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

## LITERATURA

- [1] K. PATORSKI, M. KUJAWIŃSKA, L. SAŁBUT, *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [2] J. E. DECKER, J. R. PEKELSKY, *Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry*, Metrologia, 34, 1997, 479-493.



- [3] H. HAITJEMA, G. J. KOTTE, *Long gauge block measurements based on a Twyman-Green interferometer and three stabilized lasers*, Proceedings of SPIE, 3477, 1998.
- [4] G. BONSH, *Automatic gauge block measurement by stepping interferometry with three laser wavelengths*, Proceedings of SPIE, 4001, 2001.
- [5] E. IKONEN, K. RISKI, *Gauge-block Interferometer Based on One Stabilized Laser and a White — light Source*, Metrologia, 30, 1993, 95-104.
- [6] D. ŁUKASZEWSKI, L. SAŁBUT, *Wpływ doboru długości fali na zakres pomiarowy interferometru multispektralnego*, Metrologia wspomagana komputerowo, Waplewo, 2008.
- [7] M. BORN, E. WOLF, *Principles of Optics*, 6th ed., Pergamon Press, New York, 1980.
- [8] J. E. B. DECKER, J. R. MILES, A. A. MADEJ, R. F. SIEMSEN, K. J. SIEMSEN, S. DE BONT, K. BUSTRAAN, S. TEMPLE, J. R. PEKELSKY, *Increasing the range of unambiguity in step — height measurement with multiple — wavelength interferometry — application to absolute long gauge block measurement*, Applied Optics, 42, 28, 2003, 5670-5678.
- [9] Polska Norma PN-EN ISO 3650:2000, *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Wzorce długości. Płytki wzorcowe*, Polski Komitet Normalizacyjny, sierpień 2000.
- [10] P. DE GROOT, *Unusual techniques for absolute distance measurement*, Optical Engineering, 40, 1, 2001, 28-32.
- [11] P. DE GROOT, *Three wavelength optical measurement apparatus and method*, United States Patent no. 5, 153, 669, United States Patent, 1992.
- [12] M. WENGIEROW, L. SAŁBUT, *Numeryczna symulacja interferometru multispektralnego do pomiaru długości płytek*, Metrologia Wspomagana Komputerowo, Waplewo, 2008.
- [13] *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik, Główny Urząd Miar, 1999.
- [14] D. W. ROBINSON, G. T. REID, *Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, Institute of Physics Publ., Bristol and Philadelphia, 1993.
- [15] K. PATORSKI, A. STYK, L. BRUNO, P. SZWAYKOWSKI, *Tilt-shift error detection In phase-shifting interferometry*, Optics Express, 14, 12, 2006, 5232-5249.
- [16] K. P. BIRCH, M. J. DOWNS [NPL], *An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air*, Metrologia, 30, 3, 1993, 155-162.
- [17] K. P. BIRCH, M. J. DOWNS [NPL], *Letter to the Editor: Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air*, Metrologia, 31, 4, 1994, 315-316.

A. PAKUŁA, L. SAŁBUT, D. ŁUKASZEWSKI, M. WENGIEROW

### Multispectral interferometer for length measurements of long gauge blocks class K

**Abstract.** The paper is dedicated to a problem of long gauge blocks, class K, length measurements. The main concept, requirements and assumptions concerning the multispectral interferometer based on the Twyman-Green setup with automatic fringe pattern analysis, working with the laser wavelengths  $\lambda_1 = 632.8$  nm and  $\lambda_2 = 543$  nm were presented.

**Keywords:** gauge blocks, length measurement, multispectral interferometry, Twyman-Green interferometer

**Universal Decimal Classification:** 535.8

