

doi:10.15199/48.2015.12.74

Zastosowanie fotodiody kwadrantowej do precyzyjnego justowania interferometru laserowego

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób precyzyjnego justowania interferometrów laserowych na stanowiskach komparatorów interferencyjnych używanych w Laboratorium Długości w Głównym Urzędzie Miar. Przeprowadzono analizę wpływu błędu kosinusowego wynikającego z nieprawidłowego wyjustowania interferometru laserowego na wyniki pomiarów długości. Zastosowano i zweryfikowano doświadczalnie układ pomiarowy z fotodiody kwadrantową oraz napisano program komputerowy ułatwiający proces justowania.

Abstract. A precision method of laser interferometer alignment was described. Influence of cosine error due to misalignment of laser interferometer on displacement measurement was presented. Measuring system for precision alignment of laser interferometer has been done and experimentally verified and application to visualisation laser interferometer adjustment process was developed. (An accurate method of alignment of the laser interferometer using quadrant photodiode)

Słowa kluczowe: justowanie interferometru laserowego, błąd kosinusowy, fotodiody kwadrantowa.

Keywords: laser interferometer alignment, cosine error, quadrant photodiode.

Wstęp

W precyzyjnych pomiarach długości i zapewnieniu spójności pomiarowej istotną rolę odgrywają różnego typu wzorce długości tj. płytki wzorcowe, wzorce nastawcze do mikrometrów, wzorce kreskowe, przymiary sztywne itp. Do ich wzorcowania wykorzystywane są komparatory interferencyjne [1, 2], na których długość mierzonego wzorca materialnego porównywana jest ze ściśle określoną długością fali świetlnej emitowanej przez laser, wchodzący w skład interferometru laserowego. Jednym z głównych czynników wpływających na dokładność interferencyjnych pomiarów długości jest poprawne wyjustowanie toru optycznego interferometru laserowego, a tym samym ograniczenie błędu kosinusowego, proporcjonalnego do kąta rozbieżności wiązki laserowej względem ruchu karetki pomiarowej i mierzonej odległości.

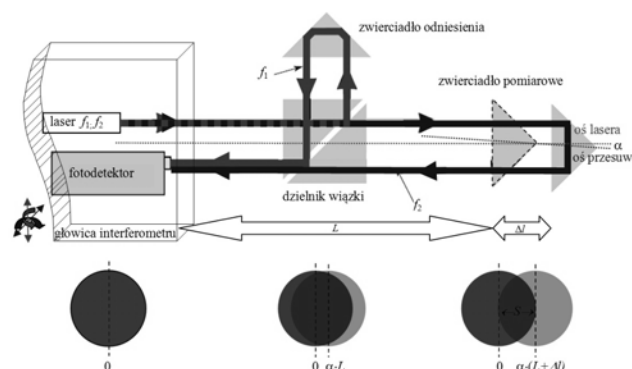
Dotychczas stosowana metoda justowania opierała się na wzrokowej obserwacji nakładających się plamek wiązek odniesienia i pomiarowej, w celu uzyskania możliwie maksymalnej mocy interferujących wiązek. Dokładność tej metody nie jest wystarczająca szczególnie w przypadku pomiarów wzorców o długości poniżej 500 mm. Dlatego też wykorzystano układ pomiarowy z fotodiody kwadrantową do precyzyjnej adiustacji interferometrów laserowych oraz napisano program komputerowy ułatwiający ten proces. Ponadto przeprowadzono badania wpływu rozjustowania układu optycznego interferometru na wyniki pomiarów przemieszczenia karetki pomiarowej.

Poprawne wyjustowanie toru optycznego interferometru laserowego polega na ustawieniu pozycji głowicy laserowej (regulując pokrętkami przesuwu wzdłużnego i kąтового) względem zwierciadła odniesienia zespolonego z dzielnikiem wiązki i retroreflektora (zwierciadła pomiarowego) w taki sposób, aby wiązka laserowa była równoległa do osi przesuwu. Głównym celem tego procesu jest zapewnienie maksymalnego poziomu sygnału mocy na fotodetektorze, poprzez dostosowanie optyki do centrum wiązki laserowej padającej na wejście fotodetektora oraz minimalizacja błędu kosinusowego, poprzez równoległe ustawienie wiązki laserowej względem osi ruchu przesuwanej karetki pomiarowej.

Na rysunku 1 przedstawiono układ optyczny interferometru laserowego. Oś wiązki laserowej jest ustawiona równoległe do osi przesuwu karetki pomiarowej z retroreflektorem, a plamki wiązek odniesienia i pomiarowej padają na fotodetektor, który mierzy tylko część nakładających się wiązek laserowych. Dla uzyskania

maksymalnego sygnału, plamki wiązek odniesienia i pomiarowej muszą dokładnie pokrywać się padając centralnie na fotodetektor.

Jeśli tor optyczny nie jest wyjustowany poprawnie, to mogą wystąpić efekty, jak pokazane na dole rysunku 1, tj. pozycja wiązki powrotnej do głowicy będzie zmieniała się wraz z ruchem retroreflektora. W wyniku tego może dojść do pogorszenia dokładności pomiarów (tzw. błąd kosinusowy) oraz, w skrajnym przypadku, do niemożności wykonania pomiarów (wiązka powrotna wychodzi poza obszar fotodetektora głowicy laserowej).



Rys. 1. Skutki kąтового rozjustowania osi interferometru laserowego względem osi przesuwu

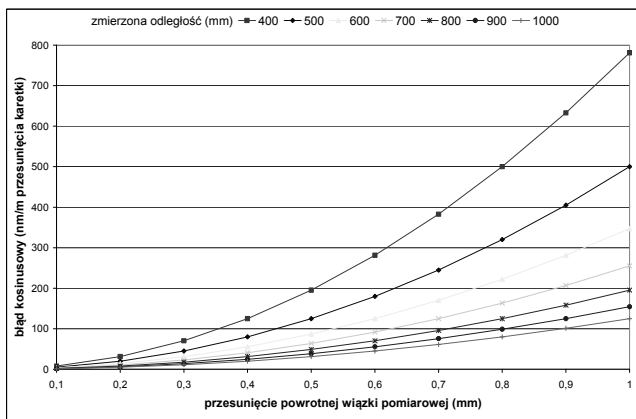
Rysunek 1 przedstawia sytuację, w której plamki wiązek odniesienia i pomiarowej nie pokrywają się całkowicie, wobec czego nie są również wyśrodkowane na fotodetektorze, powodując zanik sygnału pomiarowego w trakcie przesuwu karetki pomiarowej. Instrukcja obsługi interferometru laserowego [3] dopuszcza poprzeczne przesunięcie między interferującymi wiązkami o 1/4 ich średnicy. Przy zastosowaniu, w trakcie justowania, przesłony wiązki wyjściowej z głowicy laserowej o średnicy 3 mm, dopuszczalne przesunięcie wynosi 0,75 mm. Takie przesunięcie na odległości 500 mm powoduje błąd kosinusowy równy 280 nm na każdy metr przesunięcia karetki pomiarowej. Jednocześnie producent podaje, że ze względu na fakt, iż wzrok ludzki jest w stanie zaobserwować przemieszczenie wiązek ok. 0,3 mm, to metoda wizualna może być zastosowana dla pomiaru przemieszczeń powyżej 500 mm. W tym przypadku popelnia się błąd kosinusowy poniżej 50 nm na każdy metr przesunięcia karetki pomiarowej.

Instrukcja obsługi interferometru laserowego podaje wzór na błąd kosinusowy, wynikający z rozjustowania interferometru laserowego:

$$(1) \quad \delta I_{\cos I} = \frac{S^2}{8 \cdot L^2}$$

gdzie: S – przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru (mm), L – zmierzona odległość (mm).

Na rysunku 2 przedstawiono wykres zależności błędu kosinusowego dla danego przesunięcia karetki pomiarowej, w funkcji rozbieżności wiązek odniesienia i pomiarowej.



Rys. 2. Błąd kosinusowy wynikający z rozjustowania interferometru laserowego

Układ do detekcji położenia wiązki laserowej

Jednym z najpowszechniej stosowanych czujników położenia wiązki laserowej jest fotodioda kwadrantowa, która mierzy położenie plamki świetlnej w dwóch wymiarach na powierzchni czujnika. Ze względu na proste przetwarzanie sygnału, wysoką czułość i szybkość działania jest ona również stosowana w autokolimatorach, elipsometrach, laser trackerach lub pomiarach kąta [4, 5, 6]. Składa się ona z czterech aktywnych obszarów fotodiod krzemowych ułożonych symetrycznie wokół środka czujnika i fizycznie odseparowanych od siebie niewielką szczeliną wynoszącą od kilku do kilkuset μm [7, 8]. Każde pole detektora kwadrantowego posiada osobną wyjściową elektrodę sygnałową. Wiązka światła padając na segment powoduje generację fotoprądu. Kiedy wiązka laserowa pada dokładnie w środek detektora kwadrantowego i na każdy detektor pada taka sama ilość energii to na każdy segment przypada taka sama wartość natężenia światła.

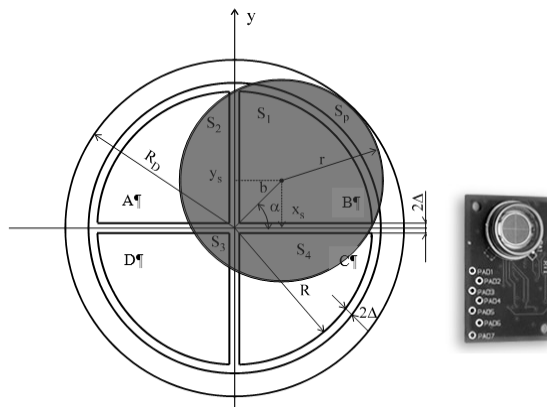
Analizowany model geometryczny fotodiody kwadrantowej i plamki świetlnej przedstawia rysunek 3, na którym:

- A, B, C, D - obszary fotoczułe fotodiody kwadrantowej,
- P - fotoczuły pierścień fotodiody,
- S_k - oświetlona powierzchnia k-tego obszaru,
- S_p - oświetlona powierzchnia pierścienia,
- R_D - promień fotodiody,
- R - promień powierzchni pomiarowej,
- r - promień plamki źródła promieniowania, optymalnie $r/R = 0,5$,
- x_s, y_s - współrzędne plamki źródła promieniowania,
- x, y - osie układu współrzędnych,
- 2Δ - szczelina między powierzchniami fotoczułymi,
- b - odległość środka plamki od środka fotodiody,
- α - kąt zawarty między b a osią x .

Sygnały z poszczególnych elementów światłoczułych można opisać następującymi zależnościami:

$$(2) \quad I_k = n_k \cdot S_k$$

gdzie: I_k - prąd fotoelektryczny dowolnego elementu fotodiody, n_k - współczynnik proporcjonalności k-tego elementu, S_k - oświetlona powierzchnia elementu.



Rys. 3. Model geometryczny fotodiody i plamki świetlnej (po lewej) i moduł z fotodiodą QD-50 (po prawej)

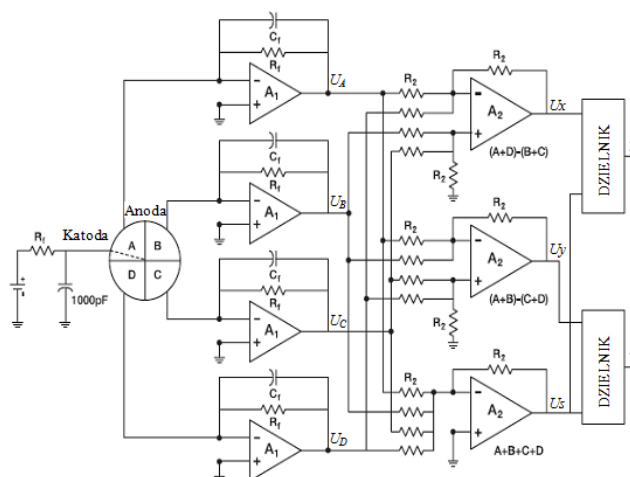
Współczynnik n_k zależy od czułości elementu, rozkładu i gęstości energetycznej plamki

$$(3) \quad n_k = f(S_{\lambda k} \cdot I(x, y))$$

gdzie: $I(x, y)$ - dwuwymiarowy rozkład mocy w plamce, $S_{\lambda k}$ - czułość widmowa k-tego elementu.

Dla idealnej fotodiody współczynniki segmentów są sobie równe ($n_1 = n_2 = n_3 = n_4$). W rzeczywistych warunkach istnieją niewielkie różnice między współczynnikami proporcjonalności poszczególnych segmentów. Współczynnik n_p pierścienia różni się od współczynnika segmentów.

W związku z tym, że cztery segmenty fotodiody są od siebie odizolowane niewielką szczeliną, a anoda każdego elementu jest dostępna oddzielnie, to rozkład energii plamki świetlnej na segmenty diody może posłużyć do wyznaczenia względnego położenia plamki w stosunku do środka detektora. Cztery niezależne wartości fotoprądów są zamieniane na napięcia U_A, U_B, U_C, U_D za pomocą czterech konwerterów prąd-napięcie i dalej przetwarzane w celu uzyskania trzech wartości napięć wyjściowych U_x, U_y, U_s , co realizowane jest przez układ sumaryczno-różnicowy [9] przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu do rejestracji pozycji wiązki laserowej

W metodzie tej jednoznaczność określenia wielkości U_x i U_y występuje przy zachowaniu stałości mocy promieniowania padającego na fotodiody. W rzeczywistych warunkach pomiaru spełnienie powyższego jest trudne

(zmienność warunków atmosferycznych, niestabilność mocy lasera). Uniezależnienie się od wpływu zmian mocy na wynik pomiaru można zrealizować poprzez dokonanie operacji dzielenia sygnałów U_x i U_y przez sumę sygnałów wyjściowych U_A, U_B, U_C, U_D z poszczególnych segmentów fotodiody. Suma sygnałów wyjściowych niesie także informację o mocy promieniowania optycznego padającego na powierzchnię pomiarową fotodiody. Dlatego w układzie obróbki sygnałów wyodrębnia się sygnał wyjściowy spełniający zależność:

$$(4) \quad U_S = U_A + U_B + U_C + U_D$$

W metodzie tej współrzędne określone są następującymi równaniami: współrzędna X:

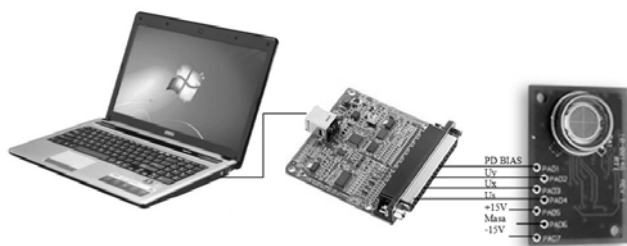
$$(5) \quad X = \frac{U_x}{U_S} = \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D}$$

współrzędna Y:

$$(6) \quad Y = \frac{U_y}{U_S} = \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D}$$

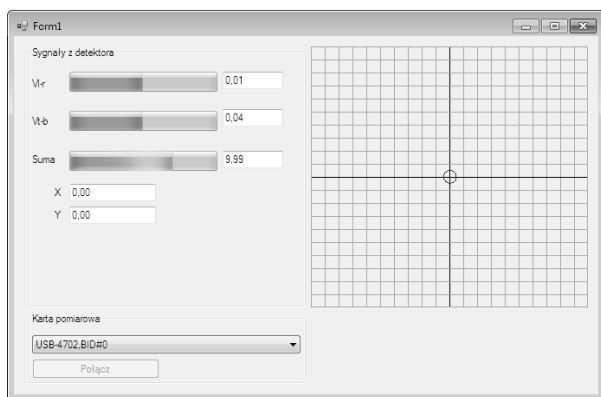
gdzie: U_A, U_B, U_C, U_D - napięcia na wyjściach przetworników poszczególnych segmentów, U_x - napięcie proporcjonalne do przemieszczenia plamki wzdłuż osi x , U_y - napięcie proporcjonalne do przemieszczenia plamki wzdłuż osi y , U_S - napięcie proporcjonalne do mocy światła padającego na segmenty fotoczule.

Sygnały wyjściowe U_x, U_y i U_S z układu sumaryczno-różnicowego są podłączone do odpowiednich wejść karty kontrolno-pomiarowej USB-4702 [10], podłączonej przez USB do komputera, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Realizacja układu do obserwacji pozycji wiązki laserowej

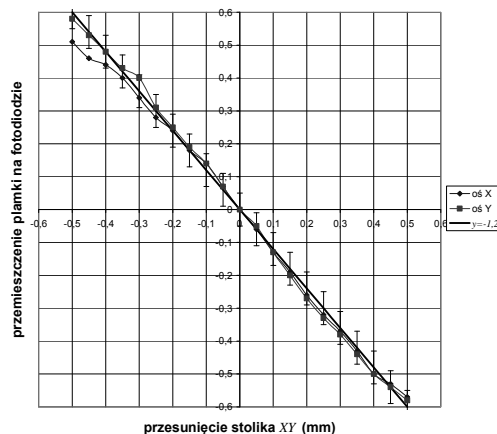
Oprogramowanie Detektor, przedstawione na rysunku 6, umożliwia obserwację przesunięcia wiązki odniesienia lub pomiarowej i określenie wartości tego przesunięcia względem środka układu współrzędnych.



Rys. 6. Okno programu Detektor

W celu wyskalowania podziałki X i Y w programie Detektor, dokonano porównania wartości przesunięć plamki w osi X i Y z wartościami przesunięć zadawanych przez

śrubę mikrometryczną stolika XY, na którym zamontowano moduł do rejestracji pozycji wiązki. Wyznaczoną zależność przedstawia rysunek 7.



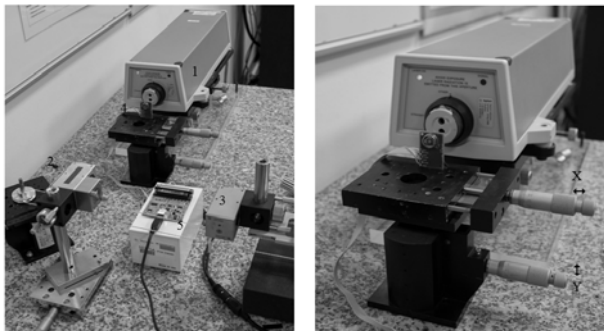
Rys. 7. Wyniki skalowania podziałki X i Y w programie Detektor

Z wykresu 7 wynika, że odpowiedź detektora kwadrantowego na przesunięcie wiązki laserowej jest liniowa w zakresie $\pm 0,5$ mm, dla średnicy wiązki 3 mm i wynosi $y = -1,2x$ (mm), gdzie $x = 0,1$ jest podziałką siatki widocznej w programie Detektor. Tak długo, jak wiązka usytuowana jest blisko środka detektora, natężenia promieniowania padającego na każdy segment są prawie równe i małe przesunięcie wiązki, w rezultacie, daje małe zmiany sygnału wyjściowego. Gdy wiązka przesuwa się blisko krawędzi detektora, wówczas na jeden lub dwa segmenty (zależnie od położenia wiązki) pada bardzo małe natężenie promieniowania i niewielkie przesunięcie w rezultacie powoduje duże zmiany sygnału wyjściowego dla wspomnianych segmentów.

Justowanie interferometru z użyciem układu do detekcji położenia wiązki laserowej

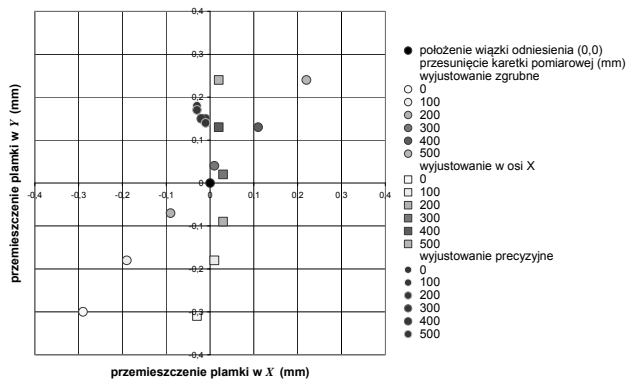
Na wstępnym etapie należy zgrubnie wyjustować tor optyczny interferometru, przy pomocy elementów mechanicznych głowicy, ustawiając pozycję głowicy laserowej w taki sposób, aby wiązka laserowa była równoległa do osi przesuwu karetki pomiarowej. Jeśli tor optyczny nie jest wyjustowany poprawnie, to pozycja wiązki powrotnej do głowicy będzie zmieniała się z odległością retroreflektora od głowicy, powodując tzw. błąd kosinusa lub w skrajnym przypadku, niemożliwość wykonania pomiarów, gdy wiązka powrotna znajdzie się poza obszarem fotodetektora głowicy laserowej. Podczas justowania na głowicy laserowej ustawiamy przesłonę wiązki laserowej, w takim położeniu, aby wychodziła ona przez otwór o średnicy 3 mm. W następnym etapie przechodzimy do dokładnej adiustacji z użyciem układu z fotodiodą kwadrantową, którego widok przedstawia rysunek 8. W tym celu należy przysłonić fotodetektor głowicy laserowej fotodiodą kwadrantową, zamontowaną na stoliku przesuwym XY, uruchomić program Detektor i połączyć się z kartą kontrolno-pomiarową USB-4702. Na ekranie pojawi się pole siatki z podziałką $0,1 = 0,12$ mm, na którym można obserwować położenie wiązek, co prezentuje rysunek 6. Następnie dostosowujemy położenie fotodiody do centralnego położenia plamki wiązki odniesienia (przy przysłoniętym reflektorze pomiarowym), wstępnie wyjustowanego interferometru. Po przesunięciu karetki pomiarowej z zamocowanym reflektorem pomiarowym w kierunku końca zakresu pomiarowego i elementami regulacji położenia kąтового głowicy laserowej sprowadzić położenie wiązki do pozycji (0,0), a po jej powrocie do pozycji początkowej, skorygować położenie plamki wiązki

laserowej przesuwaniem głowicy interferometru na boki i góra-dół. Justowanie kontynuujemy do momentu aż dwie wiązki: odniesienia i pomiarowa będą padały centralnie w środek fotodiody kwadrantowej, w całym zakresie przesuwu karetki pomiarowej.



Rys. 8. Układ pomiarowy do justowania interferometru laserowego 1 – głowica interferometru laserowego, 2 – kostka światłodzielną z reflektorem odniesienia, 3 – reflektor pomiarowy, 4 – układ detekcji położenia wiązki laserowej, zainstalowany na stoliku XY, 5 – karta kontrolno-pomiarowa USB-4702

Na wykresie 9 zaprezentowano wyniki pomiarów przemieszczenia plamki wiązki pomiarowej względem wiązki odniesienia w poszczególnych etapach justowania interferometru laserowego, w zakresie przesuwu karetki pomiarowej od 0 do 500 mm, z krokiem co 100 mm, w kierunku wskazań rosnących i malejących. Wyniki pomiarów zamieszczono w Tabeli 1.



Rys. 9. Wykres pomiarów przemieszczenia plamki wiązki pomiarowej względem wiązki odniesienia w poszczególnych etapach justowania interferometru laserowego

Tabela 1. Wyniki przemieszczenia plamki wiązki pomiarowej w poszczególnych etapach justowania

przesunięcie karetki pomiarowej [mm]	wyjustowanie [mm]					
	zgrubne		w osi X		precyzyjne	
	x	y	x	y	x	y
0	-0,33	-0,31	-0,03	-0,31	-0,04	0,16
100	-0,21	-0,18	0,01	-0,18	-0,03	0,17
200	-0,10	-0,09	0,03	-0,09	-0,02	0,17
300	0,03	0,02	0,03	0,02	-0,02	0,15
400	0,12	0,13	0,02	0,13	-0,01	0,14
500	0,22	0,24	0,02	0,24	-0,01	0,14
400	0,11	0,15	0,02	0,15	-0,02	0,15
300	0,01	0,04	0,01	0,04	-0,01	0,15
200	-0,09	-0,07	0,01	-0,07	-0,03	0,17
100	-0,19	-0,18	-0,02	-0,18	-0,03	0,18
0	-0,29	-0,30	-0,04	-0,30	-0,03	0,17
	max przesunięcie (x,y) względem (0,0)					
	0,54 mm		0,37 mm		0,22 mm	

Przedstawione wyniki pokazują skuteczność zaproponowanej metody justacji interferometru

laserowego. Można zauważyć, że precyzyjne wyjustowanie interferometru z użyciem układu z fotodiody kwadrantową pozwoliło na zmniejszenie przesunięcia wiązki pomiarowej względem wiązki odniesienia 2,5-krotnie, z 0,54 mm do 0,22 mm. Tym samym wynikający z tego błąd kosinusowy zmniejszył się ponad 5-krotnie, z 70 nm do 12 nm, przy przesunięciu karetki pomiarowej o 500 mm.

Wnioski

Opracowanie precyzyjnej metody justowania interferometrów laserowych pozwala na uniwersalne zastosowanie jej na stanowiskach komparatorów interferencyjnych używanych w Laboratorium Długości m.in. do wzorcowania wzorców kreskowych, przymiarów, długich płytek wzorcowych lub wzorców nastawczych do mikrometrów. Ponadto zmniejszenie błędu kosinusowego wynikającego z niedokładnego wyjustowania interferometru laserowego, z 70 nm do 12 nm, przy wzorcowaniu wzorców o długości nominalnej do 500 mm, spowodowało zmniejszenie niepewności standardowej związanej z adiacją interferometru laserowego z 39 nm do 7 nm na każdy metr mierzonego przesunięcia L . Napisane oprogramowanie Detektor ułatwiło proces justowania interferometrów laserowych i umożliwiło zaobserwowanie niemożliwych do wykrycia metodą wizualną rozbieżności wiązek odniesienia i pomiarowej, mniejszych od 0,3 mm.

Przeprowadzone badania wpływu rozjustowania układu optycznego interferometru na wyniki pomiarów przemieszczenia karetki pomiarowej, pokazały konieczność precyzyjnego justowania interferometrów laserowych, szczególnie przy pomiarach wzorców o długościach nominalnych do 500 mm.

LITERATURA

- [1] Sosinowski P., Modernizacja przesuwu karetki pomiarowej na stanowisku komparatora interferencyjnego do wzorcowania wzorców kreskowych, *PAK*, vol. 59, nr 5 (2013), 452-455
- [2] Szumski R., Pomiar długości płytek wzorcowych na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym z interferometrem laserowym, *PAK* vol. 59, nr 4 (2013), 304-307
- [3] HP 5528A – Laser Measurement System-User's Guide
- [4] Yu Feng, He Ye, et al., Improvement of positioning algorithm for four quadrant optoelectronic detection system, *J. Appl. Opt.* 29 (4) (2008), 493-497
- [5] L.P. Salles, D.W. de Lima Monteiro, Designing the response of an optical quad-cell as position-sensitive detector, *IEEE Sens. J.* 10 (2) (2010), 286-293
- [6] Hau-Wei Lee, Chieh-Li Chen, Chien-Hung Liu, Development of an optical threedimensional laser tracker using dual modulated laser diodes and a signal detector, *Rev. Sci. Instrum.* 82 (3) (2011) 035101-135101
- [7] C.B. Shen, B.G. Sun, et al., Research of signal-processing methods in fourquadrant photodetector, *Electr. Mach. Syst.* 10 (2008) 917-919
- [8] A. Vera-Marquina, A. Diaz Sanchez, J. Miguel Rocha-Pérez, D. Berman-Mendoza, Ivan Padilla, Quadrant photodiode for electronic processing, *Proc. of SPIE* Vol. 7419 (2009)
- [9] Sum and Difference Amplifier Modules firmy OSI Optoelectronics
- [10] USB-4702 User Manual

Autor: mgr inż. Piotr Sosinowski, Główny Urząd Miar, Zakład Długości i Kąta, Laboratorium Długości, ul. Elektralna 2, 00-139 Warszawa, E-mail: p.sosinowski@gum.gov.pl