

Optymalizacja konstrukcyjna układu interferometrycznego do pomiaru mikroodchyień kątowych

Optimization of the design of the interferometer for angular micro deflection measurement

MAREK DOBOSZ *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.497

Przedstawiono metodę i interferencyjny czujnik do pomiaru wzajemnych mikroodchyień kątowych wiązki laserowej i czujnika. Przeanalizowano wybrane konfiguracje układów optycznych. Oceniono wpływ błędów wykonania elementów optycznych w wybranym układzie interferometru.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiary odchyień kątowych, interferometr laserowy

Method and the interference sensor for measuring micro-deviations of a laser beam in relation to the sensor is presented. Selected configurations of optical system are analyzed. Influence of fabrication errors in optical components in the selected layout is presented.

KEYWORDS: measurement of the angular deflection, laser interferometer

Jedną z bardziej użytecznych cech wiązki światła laserowego jest fakt, że może się ona propagować na duże odległości, definiując przy pomocy własnej osi linię prostą. Wymieniona cecha wiązki laserowej wykorzystywana jest w olbrzymiej ilości układów optycznych zarówno w badaniach naukowych, jak i w nowoczesnej technice. Kluczową sprawą w wykorzystaniu wspomnianej właściwości światła laserowego jest uzyskanie stabilności i precyzyjna kontrola kierunku kąтового wiązki.

Detekcja odchylenia kąowego wiązki laserowej zwana jest jako *optical-beam deflection sensing* (OBDS). Najwyższą rozdzielczość i dokładność uzyskuje się przy użyciu tzw. profilierów wiązki laserowej (*laser beam profilers*) [1, 2]. Drugą grupę tworzą układy w tzw. konfiguracji triangulacyjnej [np. 3–5]. Trzeci rodzaj technik OBDS jest oparty na tzw. układzie autokolimacyjnym [np. 1, 3, 6].

Znane techniki OBDS, poza wyjątkami, pozwalają uzyskać maksymalną rozdzielczość rzędu 1 μ rad. Jednak podstawową wadą większości czujników tego rodzaju, w szczególności w zastosowaniu do pomiaru niestabilności przestrzennej osi wiązki laserowej, są duże wymiary gabarytowe urządzeń mieszczące się w granicach rzędu od 100 mm do 1000 mm. Z reguły im większa czułość metody, tym większe wymiary układu pomiarowego. W efekcie systemy te mogą być zastosowane do pomiaru tej cechy wiązki w warunkach laboratoryjnych. Z powodu tego ograniczenia nie ma możliwości użycia tych metod do systemu aktywnej stabilizacji wiązki który byłby wprowadzony do konstrukcji lasera.

Możliwość uniknięcia tego ograniczenia dają tylko niektóre ze znanych technik OBDS, określane jako *angle sensitive devices* (ASD). Nadają się one w większości również do pomiarów mikroodchyień kątowych w sytuacji gdy wiązka lasera pozostaje stabilna a kątowno odchyli się zespół pomiarowy. Większość rozwiązań w tej grupie to układy wykorzystujące graniczny kąt odbicia [np. 7, 8].

Kilka najnowszych rozwiązań w grupie ASD to interferometry laserowe [np. 9, 10].

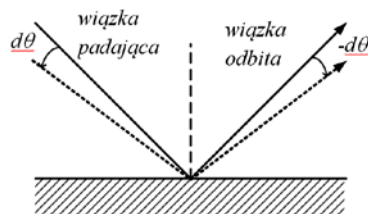
Posiadają one te same wady, co opisane techniki OBDS – czyli zbyt duże wymiary, gdy wymagana jest wysoka czułość.

Proponowana metoda pomiarowa [11, 12] pozwala zbudować układ do pomiaru odchyień kątowych wiązki laserowej lub zespół do pomiaru odchyień względem wiązki laserowej o rozdzielczości o rząd lub dwa wyższej niż większość stosowanych obecnie metod przy gabarytach zespołu pomiarowego rzędu kilku centymetrów sześciennych, eliminując wady znanych rozwiązań.

Metoda ta stanowi podstawę budowy czujnika typu ASD jednocześnie należącego do grupy OBDS. Podstawą proponowanej metody pomiarowej jest analiza okresu prążków interferencyjnych w wybranej płaszczyźnie obserwacji mierzonej wiązki.

Idea metody pomiarowej

Znane są liczne rodzaje interferometrów dwuwiązkowych do pomiaru różnicy faz między interferującymi falami świetlnymi. We wszystkich tego typu systemach odpowiedni element światłodzielący rozdziela wiązkę lasera na dwie części, tworząc dwa tzw. ramiona interferometru. W tak powstałych dwóch torach interferometru wzajemnie koherentne fale świetlne doznają szeregu odbić, najczęściej od płaskich powierzchni zwierciadlnych. Załóżmy że w obu ramionach interferometru propagowane są wiązki światła o płaskim czole fali. Załóżmy że wiązka wejściowa interferometru (czyli padająca na pierwszy element światłodzielący) odchyli się o niewielki kąt $d\theta$. W trakcie odbicia wiązki od dowolnej płaskiej powierzchni odbijającej następuje zmiana zwrotu odchylenia wiązki wejściowej na przeciwny, co pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Zmiana kierunku odchylenia kąowego wiązki pod odbiciu od płaskiej powierzchni zwierciadlanej

Jeżeli w obu ramionach interferometru występuje taka sama liczba odbić lub ogólnie w obu, parzysta lub w obu nieparzysta liczba odbić, to gdy wiązka wejściowa odchyli się na wejściu układu kątowno, to w jednakowy sposób odchyli się wiązki interferujące na wyjściu takiego układu. W efekcie nie zmienia się kąt interferencji, czyli nie zmienia się okres prążków interferencyjnych. Natomiast jeżeli w jednym torze interferometru występuje parzysta, a w drugim nieparzysta liczba odbić, czyli różnica liczby odbić jest

* Dr hab. inż. prof. PW Marek Dobosz (m.dobosz@mchtr.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska

nieparzysta, to odchylenie jednej z interferujących na wyjściu interferometru wiązek będzie miało przeciwny zwrot niż odchylenie drugiej z interferujących wiązek. Zmieni się kąt interferencji o wartość kątową $2d\theta$. Spowoduje to zmianę okresu obserwowanych prążków interferencyjnych. Na podstawie zaobserwowanej zmiany okresu prążków można wyliczyć wartość odchylenia kąowego [11], co jest istotą opracowanej metody. Zmiana okresu prążków może być zmierzona z wysoką rozdzielczością przy użyciu wielu typów układów fotodetekcyjnych (można użyć kamerę CCD z programem do analizy obrazu, układ odpowiednio połączonych fotoelementów, fotolinijkę). W rezultacie możliwy jest pomiar kąta odchylenia wiązki wchodzącej do tak skonstruowanego interferometru.

Rolę zwierciadeł w ramionach interferometru mogą pełnić również pryzmaty optyczne z powierzchnią odbijającą lub światłodziącą pochyloną odpowiednio do kierunku propagacji wiązek.

Można łatwo wykazać, że jeżeli w omawianym interferometrze interferują wiązki dobrze skolimowane (charakteryzujące się zgodnie z założeniem w przybliżeniu płaskim czołem fali) to system jest nie czuły na poprzeczne przemieszczenia osi wiązki laserowej wchodzącej do układu. W dalszej części przedstawimy kilka możliwych rozwiązań konstrukcyjnych układów interferometrycznych realizujących prezentowaną metodę

Ogólne założenia i wymagania co do układu optycznego

Układ optyczny interferometru realizującego zaproponowaną metodę pomiarową powinien spełniać następujące wymagania:

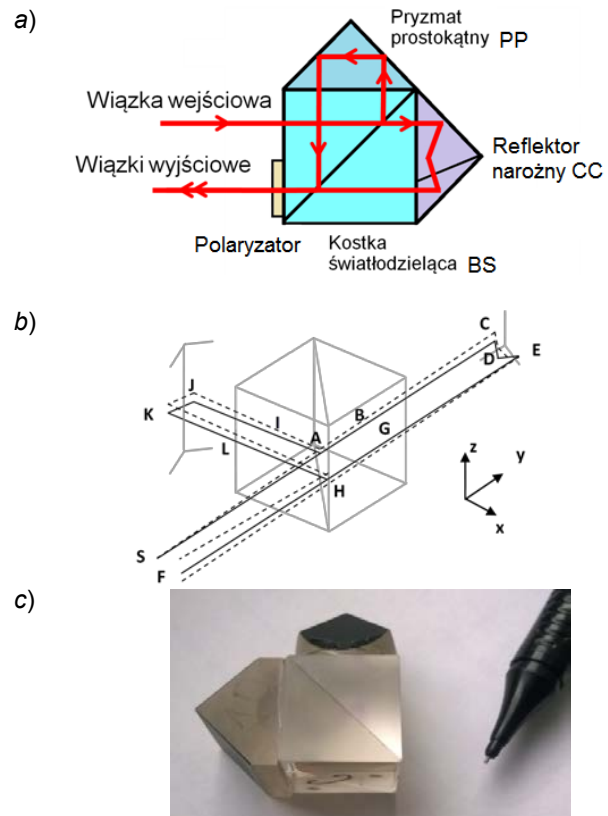
- Zmiana kąta padania wiązki na zespół interferometru musi powodować zmianę kąta pomiędzy interferującymi czołami fal świetlnych (spełnienie warunku nieparzystej różnicy w liczbie odbić w obu ramionach interferometru);
- Układ powinien być czuły na przemieszczenia kątowe wiązki wejściowej tylko w jednej płaszczyźnie. Przy pomocy równocześnie pracujących dwóch układów możliwe jest wyznaczenie przemieszczeń wiązki wejściowej w całej przestrzeni;
- Różnica dróg optycznych między interferującymi wiązkami powinna być jak najmniejsza w szczególności w układzie do stabilizacji kierunku wiązki laserowej. Wynika to z faktu, że faza prążka interferencyjnego wpływa na położenie punktu stabilizacji wartości kątovej wskazywanej przez czujnik;
- układ powinien zapewniać małe straty sygnału optycznego celem użycia go w pętli sprzężenia zwrotnego do stabilizacji kątovej wiązki wyjściowej lasera;
- zespół interferometru powinien zapewniać zwartą kompaktową budowę tak by jego sztywność zapewniała stabilność kątovej interferujących wiązek.

Można skonstruować wiele praktycznych interferencyjnych układów optycznych realizujących postulat nieparzystej liczby odbić w jednym ramieniu i parzystej liczby w drugim. W prowadzonych badaniach przeanalizowano teoretycznie wiele możliwych rozwiązań. W kolejnych rozdziałach przedstawimy analizę wybranych układów optycznych interferometru.

Zespół interferometryczny z pryzmatem prostokątnym i narożem sześcianu

Układ z pryzmatem prostokątnym i narożem sześcianu składa się z kostki światłodziącej *BS* (rys. 2a), do której

dołączono reflektor narożny *CC*, oraz pryzmat prostokątny *PP*. Wiązka lasera oznaczona jako *S* na rys. 2b biegnąca w kierunku osi *Y*, rozdzielona jest na kostce światłodziącej i pada w jednym ramieniu interferometru na naroże sześcianu, a w drugim na pryzmat prostokątny. W układzie przedstawionym na rys. 2a i 2b część odbita biegnie do pryzmatu prostokątnego, a przechodząca do naroża sześcianu. Po odbiciu od nich powraca, przechodzi przez polaryzator, który sprowadza polaryzację obu wiązek do tej samej płaszczyzny, łączy się, interferując, i biegnie do układów fotodetekcyjnych.



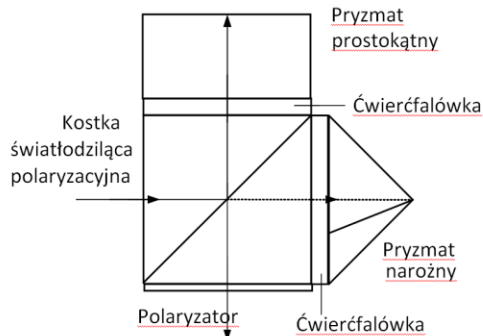
Rys. 2. Przykład propozycji zwartego układu interferometru, który może być zbudowany przy użyciu standardowych komercyjnie dostępnych elementów optycznych: a) schemat układu interferometru, b) schemat biegu wiązki w interferometrze, c) widok sklejonego kompaktowego zespołu optycznego (bez polaryzatora)

Wiązka odbijana przez pryzmat prostokątny biegnie torem $S \rightarrow A \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow L \rightarrow H \rightarrow F$. Wiązka odbijana przez pryzmat narożny biegnie torem $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow F$. Wiązkę wprowadzoną prostopadle względem zespołu przedstawiono linią ciągłą, natomiast wiązkę odchyloną kątowo na wejściu reprezentuje linia przerywana. Z przedstawionego biegu wiązki wynika, że w ramieniu z pryzmatem prostokątnym *PP* występują cztery odbicia podczas gdy w ramieniu z narożem sześcianu *CC* wiązka odbija się trzykrotnie.

Odchylenie kątovej wiązki względem zespołu powoduje przemieszczenie liniowe wiązki odbitej od naroża oraz, zależnie kierunku zamiany kąta na oś *X* lub *Z*, odchylenie liniowe lub kątovej wiązki odbitej w pryzmacie prostokątnym. Zmiana kąta wiązki w kierunku osi *Z* w pryzmacie prostokątnym powoduje zmianę okresu obserwowanych prążków interferencyjnych. Odchylenia liniowe w kierunku osi *Y* (poprzeczne do kierunku biegu wiązki) nie wywołuje efektu interferencyjnego.

Zaletą rozwiązania jest możliwość jego skonstruowania z komercyjnie dostępnych elementów optycznych. Możliwe jest także dopasowanie wysokości pryzmatów, by różnica dróg optycznych w interferometrze była bliska zeru.

Z kolei wadą rozwiązania jest fakt, że rozmiar elementu światłodzielnego musi być co najmniej dwa razy większy niż średnica użytej wiązki laserowej. Możliwa jest modyfikacja układu rozwiązująca ten problem, a pokazana na rys. 3.



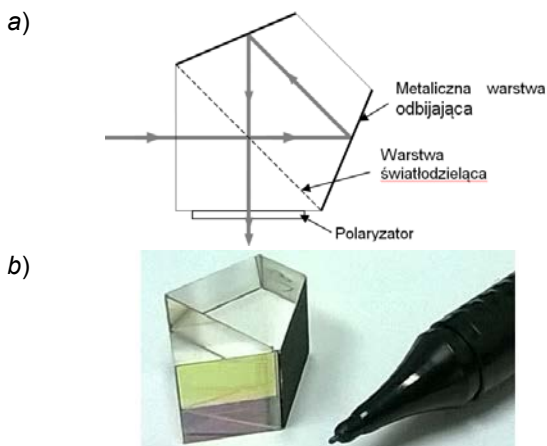
Rys. 3. Kompaktowy układ zbudowany z pryzmatu prostokątnego i narożnika o zmniejszonych gabarytach

W tym układzie wiązki odbite od pryzmatu prostokątnego oraz od pryzmatu narożnego kierowane są na prostopadłą do wejściowej powierzchnię kostki światłodzielną poprzez wstawienie płytek ćwierćfalowych. Poprzez dwukrotne przejście przez te płytki polaryzacja obu odbitych wiązek zmienia się o 90° , przez co wiązka transmitowana staje się odbijana, a wiązka poprzednio odbita jest teraz transmitowana.

Zaletą, rozwiązania jest to, że wymiar kostki światłodzielną może być w przybliżeniu równy średnicy wiązki wejściowej. Wadą rozwiązania są jego wyższe koszty ze względu na wprowadzenie dwóch płytek opóźniających, oraz wymagania, by krawędzie pryzmatów odbijających światło były bardzo ostre celem uniknięcia zakłóceń dyfrakcyjnych na wyjściu.

Układ interferometru z pryzmatem w konfiguracji pentagonalnej

Ideę kolejnego układu przedstawiono na rys. 4.



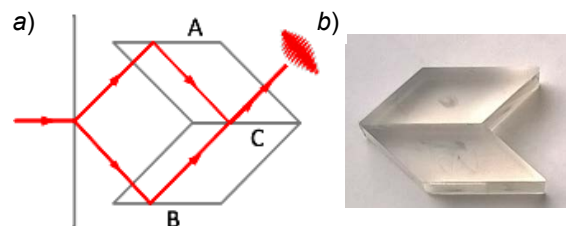
Rys. 4. Idea budowy pryzmatu w konfiguracji pentagonalnej (a). Widok testowanego zespołu monolitycznego (b)

Zespół interferometru przedstawiony na rys. 4a składa się z pryzmatu prostokątnego oraz pryzmatu z pojedynczym kątem 45° , które są sklejone, tworząc pryzmat pentagonalny. Między sklejonymi pryzmatami znajduje się warstwa światłodzielną polaryzacyjna (dla uniknięcia wielokrotnych odbić wiązki w pryzmacie z kątem 45°). Do zespołu wprowadzana jest wiązka o polaryzacji liniowej pod kątem 45° do płaszczyzny interferencji (płaszczyzny rysunku). Warstwa światłodzielną odbija wiązkę o skła-

dowej polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny rysunku, a transmituje składową o polaryzacji równoległej. Ponieważ promień transmitowany przez warstwę światłodzielną pada następnie na płaszczyzny odbijające pod kątami mniejszymi od granicznego, płaszczyzny te muszą być pokryte metaliczną warstwą odbijającą. Wiązki biegnące w pryzmacie prostokątnym i w pryzmacie z pojedynczym kątem 45° biegną w kierunku płaszczyzny pryzmatu prostokątnego prostopadłej do płaszczyzny wejściowej, a następnie po przejściu przez odpowiednio ustawiony polaryzator interferują, generując interesujące nas prążki interferencyjne. Wiązka odbita w pryzmacie prostokątnym doznaje tylko jednego odbicia. Wiązka transmitowana wewnątrz pryzmatu z pojedynczym kątem 45° doznaje dwóch odbić. Główne wady rozwiązania to duża różnica dróg optycznych (w praktyce kilka cm) oraz konieczność wykonywania układu w całości na zamówienie co podnosi koszty w przypadku małej liczby sztuk.

Układ z wykorzystaniem siatki dyfrakcyjnej lub pryzmatu Wollastona

Na rys. 5 przedstawiono proste niedrogie w realizacji rozwiązanie z siatką dyfrakcyjną. Światło rozdzielane jest przy pomocy siatki (lub w innej wersji pryzmatu Wollastona) na dwie równo energetyczne części, (w tym przypadku rzędy dyfrakcyjne ± 1), które doprowadzane są do interferencji przy pomocy zespołu dwóch sklejonych pryzmatów romboidalnych. Jedna z klejonych powierzchni pokryta jest warstwą światłodzielną, która odbija rząd $+1$ oraz transmituje rząd -1 . Światło ugięte rzędu -1 (górna wiązka) ulega dwukrotnemu odbiciu, podczas gdy wiązka rzędu $+1$ odbija się tylko raz. Układ charakteryzuje się zerową różnicą dróg optycznych, co jak pokażą dalsze badania, stanowi istotną zaletę. Wadą tego rozwiązania są duże straty mocy wiązki wejściowej przy ugięciu na siatce dyfrakcyjnej. Można je zmniejszyć przez zastosowanie siatki odbiciowej lub usunąć, zastępując siatkę dyfrakcyjną pryzmatem Wallastona. W drugim przypadku podnosi to jednak istotnie koszty budowy



Rys. 5. Schemat ideowy układu z wykorzystaniem siatki dyfrakcyjnej (a). Zdjęcie wykonanego i testowanego pryzmatu (b)

Wybór układu docelowego

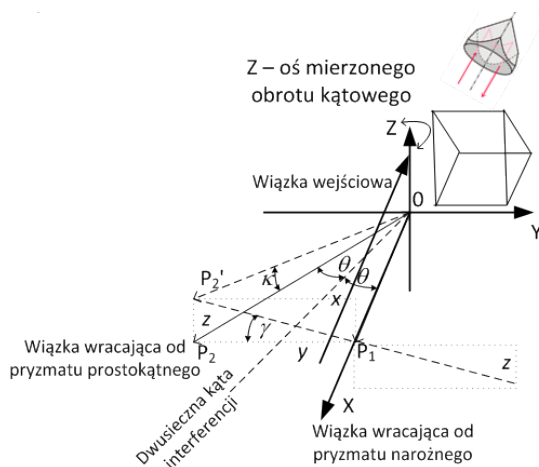
Wcześniej przedstawione konfiguracje układów interferometrycznych, jak również wiele innych tutaj nie prezentowanych, poddano analizom teoretyczno-doświadczalnym. Doprowadziły one do wyboru ostatecznego rozwiązania przeznaczonego zarówno do budowy czujnika odchyłek kątowych, jak i systemu stabilizacji kierunku osi wiązki laserowej. Wybrano układ z narożem sześcianu i pryzmatem prostokątnym. O wyborze zdecydowały następujące jego cechy:

- wykorzystanie w dużym stopniu komercyjnych elementów optycznych co istotnie obniża cenę;
- mała różnica dróg optycznych (<50 mm);
- niewrażliwość układu na przemieszczenia kątowe w płaszczyźnie nieczułości interferometru, co upraszcza znacznie procedurę adiustacji;

- możliwość sklejania zespołu w stosunkowo prostym opracowanym w tym celu stanowisku;
- nieistotny wpływ większych gabarytów układu w porównaniu np. z układem w konfiguracji pentagonalnej co wynika z faktu, że o gabarytach czujnika będą decydowały przede wszystkim dużo większe od optyki rozmiary układu elektronicznego.

Wpływ niedokładności wykonania elementów wybranego układu

W układzie interferometrycznym z pryzmatem narożnym i pryzmatem prostokątnym błąd wykonania kąta prostego pryzmatu prostokątnego spowoduje zakłócające odchylenie kątowe wiązki laserowej w ramieniu pomiarowym interferometru. Na rys. 6 przedstawiono biegi promieni wychodzących z układu interferometru z pryzmatem prostokątnym i narożnym.



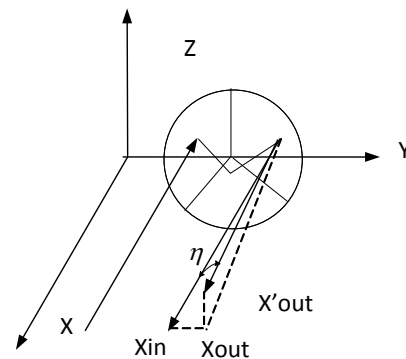
Rys. 6. Biegi promieni wychodzących z układu interferometru z pryzmatem prostokątnym i narożnym

Załóżmy że wiązka powracająca od pryzmatu narożnego biegnie wzdłuż osi X , przechodząc przez punkt P_1 . Załóżmy na wstępie, że oba pryzmaty są wykonane idealnie i płaszczyzna XY jest teoretyczną płaszczyzną interferencji. Krawędź pryzmatu prostokątnego równoległa jest do osi Y , a więc układ jest czuły na obroty zespołu wokół osi Z . Obrót wiązki wejściowej lub zespołu o kąt θ spowoduje obrót wiązki odbitej od pryzmatu prostokątnego wokół tej samej osi o kąt 2θ , tak że będzie ona przechodziła przez punkt P_2 . Kierunek wiązki odbitej od pryzmatu narożnego mimo jego obrotu nadal pozostanie niezmienny, tzn. będzie się pokrywał z osią X .

W przypadku błędu wykonania pryzmatu prostokątnego (kąta 90°) wiązka odbita dozna dodatkowego przemieszczenia o kąt κ do pozycji P_2' . Po odchyleniu pryzmatu, jak na rysunku, płaszczyznę interferencji definiują punkty $0-P_1-P_2'$. Dla zerowego odchylenia pryzmatu prostokątnego płaszczyzną interferencji jest płaszczyzna XZ , a prążki są wtedy równoległe do osi Y . W pozostałych przypadkach płaszczyzna interferencji zostaje odchylna o kąt γ od płaszczyzny teoretycznej (P_1-P_2-0) co generuje obrót prążków. Jak wynika z rys. 6 kąt γ zależy od kąta θ .

Niedokładność wykonania kątów 90° pryzmatu narożnego powoduje, że wiązka wyjściowa nie jest równoległa do wiązki wchodzącej do pryzmatu. Możemy mieć do czynienia z dwoma składowymi odchyleniami wiązki. Jedną składową można zdefiniować jak składową leżącą w płaszczyźnie, w której leżą wiązka wejściowa i wyjściowa dla pryzmatu bezbłędnego (płaszczyzna XY na rysunku), a drugą w płaszczyźnie do niej

prostopadłej jak to pokazano na rys. 7. Łatwo zauważyć, że odchylenie wiązki o kąt η generuje te same zjawiska, co odchylenie wiązki o kąt κ spowodowanej błędem wykonania kąta prostego pryzmatu prostokątnego



Rys. 7. Biegi promieni wychodzących z układu interferometru z pryzmatem prostokątnym i narożnym

Podsumowanie

W artykule przedstawiono nową metodę pomiaru mikroodchylenia wiązki laserowej i układu względem wiązki laserowej. Zaprezentowano i przeanalizowano pod kątem metrologiczno-użytkowym cztery wybrane konfiguracje układów optycznych. Wybrano zespół z pryzmatem narożnym i prostokątnym jako najlepiej spełniający postawione wymagania. Oceniono w tym układzie wpływ błędów wykonania głównych elementów optycznych, stwierdzając, że błędy te wprowadzają zakłócający obrót analizowanych prążków interferencyjnych

Praca została wykonana w ramach projektu NCBiR nr PBS3/A6/21/2015 oraz w części w ramach prac statutowych.

LITERATURA

1. <http://www.photonicsonline.com/article.mvc/Measuring-Laser-Position-Pointing-Stability-0002> Measuring, "Laser Position & Pointing Stability – Application Note", Photon Inc. Precision Beam Profiling, Photonics Online, 2009.
2. <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/beam-profilers/products/slit-based-profilers/nanoscan>.
3. Putman C.A.J., De Grooth B.G., van de Hulst N.F., Greve J. "A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy". *Appl. Phys.* Vol. 72 (1992): pp. 6–12.
4. Meyer G., Amer N.M. "Optical beam deflection atomic force microscopy: The NaCl(001) surface". *Appl. Phys. Lett.* Vol. 56, pp. 2100–2101.
5. Levesque M., Mailloux A., Morin M., Galarnau P., Champagne Y., Plomteux O., Tiedtke M. "Laser pointing stability measurements". *Proc. SPIE*. Vol. 2870 (1996): pp. 216–224.
6. "Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam parameters – Beam positional stability", International Standard ISO 11670, 2003.04.01.
7. Villatoro J., García-Valenzuela A. "Measuring optical power transmission near the critical angle for sensing beam deflection". *Appl. Opt.* Vol. 37, No. 28 (1998): pp. 6649–6653.
8. García-Valenzuela A., Sandoval-Romero G.E., Sánchez-Pérez C. "High-resolution optical angle sensors: approaching the diffraction limit to the sensitivity". *Appl. Opt.* Vol. 43, No. 22 (2004): pp. 4311–4321 and references therein.
9. García-Valenzuela A., Peña-Gomar M., Villatoro J. "Sensitivity analysis of angle sensitive detectors based on a film resonator". *Opt. Eng.* Vol. 42 (2003): pp. 1084–1092 and references therein.
10. Gray J., Thomas P., Zhu X.D. "Laser pointing stability measured by an oblique-incidence optical transmittance difference technique". *Review of Scientific Instruments*. Vol. 72, No. 9 (2001): pp. 3714–3717.
11. Dobosz M., Iwasińska-Kowalska O. "Interference method for ultra-precision measurement and compensation of laser beam angular deflection". *Appl. Opt.* Vol. 53, No. 1 (2014): pp. 111–122.
12. Dobosz M., Iwasińska-Kowalska O. Polish patent application P-397925 (in Polish).