

**Mariusz ŻABA, Marek DOBOSZ**

INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, POLITECHNIKA WARSZAWSKA

## Wyznaczanie długości i względnej niestabilności fali światła diody laserowej w układzie interferometru Michelsona ze stabilizowaną różnicą dróg optycznych

Mgr inż. Mariusz ŻABA

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej na specjalności Metrologia i Komputerowe Systemy Pomiarowe w 2005r. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się pomiarami długości oraz względnej niestabilności długości fali światła diod laserowych.



e-mail: m.zaba@mchtr.pw.edu.pl

Prof. dr hab. Inż. Marek DOBOSZ

Ukończył studia mgr na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki) Politechniki Warszawskiej w 1980r. Na tym samym wydziale obronił doktorat w 1984, pracę habilitacyjną w 1996r oraz uzyskał tytuł profesora w 2005r. Obecnie kierownik Zakładu Metrologii i Inżynierii Jakości, Instytutu Metrologii i Systemów Pomiarowych Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się laserowymi technikami pomiarowymi wielkości geometrycznych



e-mail: m.dobosz@mchtr.pw.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono budowę i działanie stanowiska do pomiaru długości oraz względnej niestabilności długości fali światła diody laserowej. Idea pomiaru polega na wyznaczeniu i porównaniu absolutnej wartości fazy rozkładu prążków interferencyjnych lasera badanego i wzorcowego w układzie interferometru Michelsona z systemem automatycznej stabilizacji różnicy dróg optycznych. Wiązki obu laserów są spolaryzowane względem siebie pod kątem prostym i wprowadzane są do układu interferometru po tym samym torze. Prostopadła polaryzacja wiązek laserowych, pozwala na późniejsze rozdzielenie i identyfikację pól interferencyjnych. W interferometrze określana jest zerowa różnica dróg optycznych a następnie jej wartość jest zwiększana z jednoczesnym pomiarem rzędów interferencji dla obu laserów. Po osiągnięciu zamierzonego rzędu interferencji lasera wzorcowego, uruchamiana zostaje procedura automatycznej stabilizacji różnicy dróg optycznych. Znajomość bezwzględnej wartości faz prążków obu laserów i długości fali lasera wzorcowego pozwala wyznaczyć długość fali diody laserowej, oraz względną niestabilność długości fali.

**Słowa kluczowe:** interferometr Michelsona, stabilizacja różnicy dróg optycznych, zerowa różnica dróg optycznych

### Determination of wavelength and wavelength relative instability of laser by means of optical path difference stabilized Michelson interferometer

#### Abstract

The method of laser diode wavelength and wavelength instability determination for metrological application is presented. The measurement idea is based on absolute phase change measurement in the Michelson interferometer having optical path difference stabilization. Laser diode beam and He-Ne laser beam are used simultaneously as a source of light in the same Michelson interferometer. Interferometer reflectors positions referring to the zero optical path difference are located. Next optical path difference is increased and interference order of fringes of both lasers lights are evaluated by counting fringe method. Increase of the optical path difference is stopped when fringe order of He-Ne laser is equal about to 10000. At that point the optical path difference is stabilized using He-Ne laser light. Relation of the fringes phases values of both laser appoints wavelength and its relative wavelength instability.

**Keywords:** Michelson interferometer, stabilization of the optical path difference, null optical path difference

### 1. Wstęp

Interferencyjne systemy do pomiaru przemieszczeń, wykorzystują fałę światła laserowego jako wzorzec długości. Systemy te osiągają względną niedokładność pomiaru na poziomie  $10^{-6}$ . Wynika to z błędów określenia cech fizycznych powietrza jak w obrębie toru wiązki laserowej. Lasery wykorzystywane do budowy takich systemów to najczęściej lasery He-Ne, ponieważ mogą uzyskać wysoką stabilizację długości emitowanej fali. W standardowych, laserowych systemach pomiarowych względna niestabilność takiego lasera wynosi  $10^{-8}$ . Dodatkowo lasery He-Ne świecą światłem widzialnym co ułatwia proces adjustacji interferometru.

Trwają obecnie próby zastąpienia w systemach pomiarowych laserów He-Ne diodami laserowymi, które są tańsze i mniejsze. Wymagają jednak dodatkowego układu kształtowania wiązki jak również precyzyjnego ustalenia prądu zasilania i temperatury pracy, ponieważ wielkości te silnie wpływają na długość emitowanej przez nie fali. Zatem chęć wykorzystania diod laserowych do zastosowań metrologicznych wymaga zastosowania układu, który zapewni względną niestabilność fali diody laserowej co najmniej na poziomie  $10^{-7}$ [1]. Oprócz określenia niestabilności długości fali emitowanej przez diodę laserową należy wyznaczyć długość samej fali ze względną niedokładnością na poziomie nie większym niż  $10^{-7}$ . Istniejące obecnie systemy do pomiaru omawianych wielkości są przystosowane głównie do długości fali emitowanej przez laser He-Ne, czyli około 632,8 nm (w próżni). Różnica pomiędzy długością badanej fali a długością lasera He-Ne nie może przekroczyć ok. 0,003nm (dane z Głównego Urzędu Miar). Pojawia się zatem problem, pomiaru długości fali diody laserowej wynikły z faktu, że rzeczywista długość fali może się różnić od nominalnej, podanej przez producenta nawet o  $\pm 5$ nm. Stosowany jest również szeroki wybór możliwych długości fal jak np. 635, 650 czy 670 [nm]. Istniejący system do pomiaru długości i niestabilności długości fali w bardzo szerokim zakresie tzw. comb-generator pozwala uzyskać względną niedokładność pomiarów na poziomie  $6 \cdot 10^{-14}$ [2]. Jest jednak niedostępny w Polsce a tylko w niewielu światowych ośrodkach naukowych. Inne metody i komercyjnie dostępne urządzenia charakteryzują się bardzo wysoką ceną. W poniższym artykule zaprezentowane zostaną wstępne badania nad możliwością zbudowania systemu do pomiaru długości i niestabilności długości fali światła różniącej się znacznie do fali lasera He-Ne.

## 2. Idea pomiaru

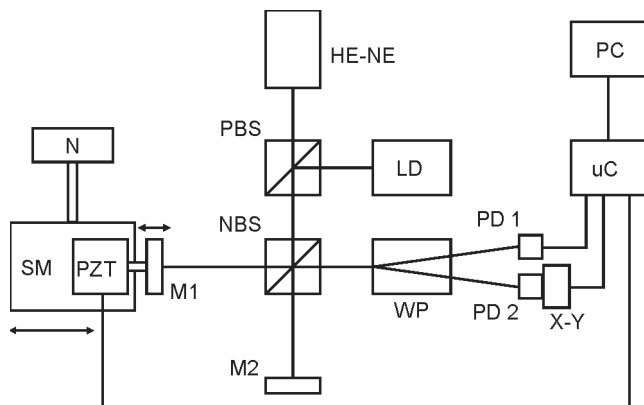
Wyznaczanie długości i jej niestabilności odbywa się poprzez porównanie wartości faz [3] rozkładów intensywności prążków interferencyjnych uzyskanych jednocześnie dla lasera badanego i wzorcowego w układzie interferometru Michelsona. Jako laser wzorcowy wykorzystuje się laser He-Ne o względnej niestabilności długości fali co najmniej  $10^{-8}$ . Fazę  $\varphi$  rozkładu prążków w interferometrze Michelsona opisuje poniższa funkcja

$$\varphi = \frac{2\pi nl}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie:  $n$  jest to współczynnik załamania ośrodka,  $l$  różnica dróg geometrycznych w interferometrze,  $\lambda$  długość fali światła laserowego dla określonych warunków fizycznych powietrza (temperatura, ciśnienie i wilgotność), w którym propaguje się dana fala światła. Oznacza to, że przy zerowej różnicy dróg geometrycznych (przy założeniu wyrównania dróg optycznych) dla każdej długości fali, faza rozkładu natężenia prążków interferencyjnych jest zerowa. Zwiększając różnicę dróg geometrycznych w interferometrze, zmienia się faza rozkładu prążków interferencyjnych. Wartość tej zmiany jest ściśle związana z długością fali  $\lambda$ . Znając długość fali światła lasera wzorcowego przy określonych cechach powietrza, oraz wartość fazy dla lasera wzorcowego i diody laserowej przy określonej różnicy dróg geometrycznych w interferometrze Michelsona wyznaczana jest długość fali lasera badanego. Stosując dodatkowo stabilizację różnicy dróg optycznych w oparciu o śledzenie wartości fazy lasera wzorcowego, określa się niestabilność długości fali diody laserowej. W tym celu dokonuje się pomiarów zmian rozkładu fazy prążków lasera badanego przy założeniu, niezmienności cech powietrza, w którym propagują się wiązki obu laserów.

## 3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys.1.) składa się z wzorcowego lasera He-Ne oraz badanej diody laserowej LD (wraz z układem kształtującym wiązkę). Polaryzacyjny pryzmat światło-dzielący PBS zapewnia wzajemnie prostopadłą polaryzację wiązek obu laserów oraz umożliwia ich współosiowe wprowadzenie do interferometru Michelsona. W skład interferometru wchodzi niepolaryzacyjna kostka światłodzielną NBS oraz dwa zwierciadła. Zwierciadło M2 jest umieszczone na stoliku pochylnym, zaś zwierciadło M1 przymocowane jest do



Rys.1. Schemat układu pomiarowego  
Fig.1. Scheme of the measuring set-up

piezotranslatora PZT, który umieszczony jest na stoliku ze śrubą mikrometryczną SM. Śrubę obraca napęd N. Interferujące wiązki laserowe kierowane są do pryzmatu Wollastona WP, który rozdziela je na wiązki lasera badanego i wzorcowego dzięki ich

wcześniej wzajemnie prostopadłej polaryzacji. Tak rozdzielone wiązki trafiają do fotodetektorów PD1 i PD2. Fotodetektor PD2 znajduje się dodatkowo na stoliku X-Y, tak aby można było zmieniać jego położenie względem pola interferencyjnego. Sygnały z fotodetektorów trafiają do układu mikrokontrolera uC, który odpowiedzialny jest za obróbkę sygnału, sterowanie piezotranslatora PZT oraz wysyłanie danych do komputera PC.

## 3. Procedura pomiarowa

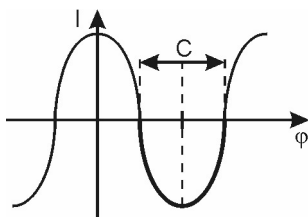
Po uruchomieniu laserów przeprowadzana jest adjustacja stanowiska polegająca na zapewnieniu współosiowości wiązek laserowych, tak aby biegły one w interferometrze po tych samych torach. Następnie wyłączana jest stabilizacja długości fali diody laserowej i zmniejszane jest natężenie prądu diody. Spadek natężenia prądu poniżej określonej wartości powoduje zmianę charakteru pracy z akcji laserowej na pracę podobną do diody LED, która charakteryzuje się niską koherencją czasową emitowanej wiązki. Dzięki temu, możliwa staje się detekcja zerowej różnicy dróg optycznych w interferometrze, ponieważ dla źródła światła o niskiej koherencji, prążki interferencyjne powstają tylko w okolicy zerowej różnicy dróg optycznych. Amplituda prążków interferencyjnych jest największa dla zerowej różnicy dróg optycznych co umożliwia identyfikację zerowego rzędu interferencji. Po określeniu prążka zerowego, podnoszone jest natężenie prądu diody laserowej do punktu, w którym powraca akcja laserowa diody i nie występują przeskoki modów, czyli nagłe zmiany długości fali.

Kolejnym krokiem jest wprawienie w drgania zwierciadła M1 o częstotliwości około 1,5kHz za pomocą piezotranslatora PZT. Amplitudę drgań ustala się na poziomie jednej czwartej długości fali lasera wzorcowego. Centrum drgań zwierciadła przemieszcza się do zerowej różnicy dróg optycznych tak, aby uzyskać symetryczną zmianę amplitudy prążków interferencyjnych. Położenie centrum drgań względem zerowej różnicy określa się poprzez ustalenie zerowej różnicy amplitud prążków przy maksymalnych wychyleniach drgającego zwierciadła. Następnie przeprowadza się korektę położenia fotodetektora PD2 za pomocą stolika X-Y tak, aby również uzyskać symetryczny rozkład amplitudy. Korekcja ta jest wprowadzana celem zminimalizowania wpływu błędów kształtu zwierciadeł oraz nie polaryzacyjnej kostki światło-dzielącej na rozkład intensywności prążków interferencyjnych. W przypadku płaskich elementów mamy do czynienia z interferencją wiązek laserowych o płaskich czołach falowych a zatem otrzymujemy jednolite pole interferencyjne. Oznacza to, że zmiana intensywności rozkładu prążków interferencyjnych na fotodetektorze wynika tylko ze zmiany różnicy dróg optycznych w interferometrze lub zmiany długości interferujących fal. Nie zależy natomiast od położenia fotodetektora względem pola interferencyjnego. W przypadku gdy, elementy nie są płaskie, zostają zniekształcone czoła falowe i otrzymywane jest pole prążkowe a to oznacza, że amplituda w tym polu zmienia się wraz oddalaniem się od osi wiązki. Zatem aby móc porównywać fazę rozkładu prążków dla obydwu interferometrów należy ustawić je dokładnie a takiej samej odległości od osi interferujących wiązek laserowych.

Dalszym etapem procedury pomiarowej jest zwiększanie różnicy dróg geometrycznych w interferometrze. Uzyskuje się to poprzez przemieszczanie zwierciadła M1 wraz z piezotranslatorem PZT za pomocą stolika ze śrubą mikrometryczną SM. Obrót śruby jest realizowany przez zespół silnika krokowego wraz z reduktorem. Zastosowanie przekładni i pół-krokowego sterowania silnikiem, zapewnia stabilny i powolny przesuw stolika SM. Prędkość obrotową silnika dobrano tak, aby uzyskać zmianę różnicy dróg optycznych w interferometrze na poziomie dwóch prążków na sekundę. Wraz ze zwiększaniem różnicy dróg geometrycznych, zliczane są pełne okresy prążków interferencyjnych dla obu laserów począwszy od prążka zerowego. Zwiększanie różnicy dróg geometrycznych, jest

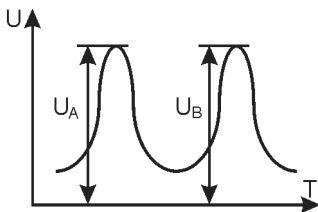
prowadzone aż do uzyskania dziesięciotysięcznego rzędu interferencji dla lasera wzorcowego. Dla badanej diody laserowej, otrzymany numer rzędu interferencji jest zależny od emitowanej długości fali. Po zatrzymaniu przesuwu stolika SM zostaje wprowadzona korekta amplitudy drgań zwierciadła M1. Ma ona na celu osiągnięcie drgań zwierciadła na poziomie jednej czwartej długości fali diody laserowej. Uzyskuje się to poprzez obserwację rozkładu prążków interferencyjnych diody laserowej. Centrum drgań umieszcza się w punkcie, w którym dla skrajnych wychyleń zwierciadła M1 intensywność rozkładu prążków interferencyjnych osiąga wartość maksymalną i minimalną. Otrzymuje się wtedy przebieg sinusoidalny w czasie. W przypadku przekroczenia tej wartości uzyskuje się dodatkowe maksima i minima.

Końcowym etapem przygotowawczym jest uruchomienie stabilizacji różnicy dróg optycznych w interferometrze. Uzyskuje się to poprzez korygowane przez mikrokontroler uC położenie punktu centralnego drgań zwierciadła M1 w punkcie C (rys.2.).



Rys.2. Punkt drgań zwierciadła M1  
Fig.2. Centre of mirror M1 oscillation

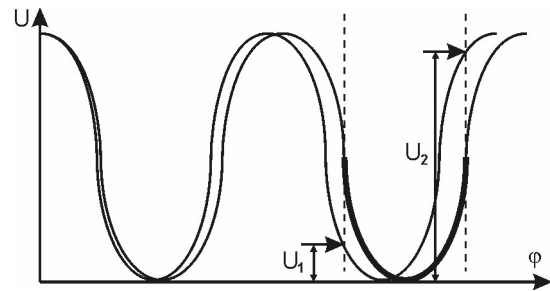
W przypadku drgań zwierciadła wokół punktu C napięcia szczytowe  $U_A$  i  $U_B$  na fotodetektorze PD1 będą sobie równe (rys.3.) Jeśli pod wpływem czynników zewnętrznych (temperatura, ciśnienie, wilgotność) zmienia się różnica dróg optycznych, wtedy zmienia się faza prążka interferencyjnego w punkcie C i co za tym idzie powstaje różnica napięć pomiędzy  $U_A$  i  $U_B$ . W takiej sytuacji mikrokontroler koryguje składową stałą drgań piezotranslatora PZT, aby centrum drgań zwierciadła M1 powróciło do punktu C. Zapewnia to stabilizację w punkcie  $\pi$  określonego rzędu interferencji.



Rys.3. Poziom napięć obserwowanych przy prawidłowej stabilizacji różnicy dróg geometrycznych  
Fig.3. Observed voltages level at correct stabilization of optical path difference

Określenie absolutnej fazy prążków diody laserowej uzyskuje się poprzez określenie fazy rozkładu prążków w rzędzie interferencji, który otrzymano po ustabilizowaniu różnicy dróg optycznych w interferometrze. Jest to możliwe dzięki pomiarom wartości napięć  $U_1$  i  $U_2$  uzyskanych na fotodetektorze PD2 (rys.4.) w określonym rzędzie interferencji wiązki diody laserowej. Pogrubiona linia na rysunku 4. oznacza analogicznie do rysunku 2. obszar drgań zwierciadła M1 w przy stabilizacji różnicy dróg optycznych. Układ elektroniczny mierzy napięcia międzyszczytowe  $U_1$ ,  $U_2$  na fotodetektorze diody laserowej i podaje napięcie  $U_{max}$ , które oznacza wyższe z mierzonych napięć  $U_1$ ,  $U_2$ . Dzieje się tak dlatego, że układ elektroniczny nie rozpoznaje kolejności napięć  $U_1$ ,  $U_2$ . Oprócz  $U_{max}$  układ podaje wartość  $\Delta U$  różnicy napięć  $U_1$ ,  $U_2$ . W przypadku gdy  $U_2 > U_1$  układ podaje wartość  $\Delta U$  ze znakiem minus. Ta metoda pozwala na pomiar fazy prążków w danym rzędzie interferencji w zakresie od  $\pi/2$  do  $2\pi/3$ . W przypadku przekroczenia tej wartości

uzyskane napięcia międzyszczytowe  $U_1$ ,  $U_2$  nie są mieszane w punktach maksymalnego wychyleń zwierciadła M1.



Rys.4. Wpływ różnicy faz na sposób generacji mierzonych napięć  $U_1$ ,  $U_2$   
Fig.4. Influence of the phase difference on the way of  $U_1$ ,  $U_2$  voltages generation

Napięcie  $U_1$  na fotodetektorze możemy opisać zależnością

$$U_1 = \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

gdzie:  $\pi/2$  oznacza przesunięcie punktu pomiarowego napięcia  $U_1$  względem fazy  $\varphi$  w centrum drgań zwierciadła M1. Po przekształceniu i normalizacji zależności (2) otrzymano zależność (3). Odwrócenie znaków następuje gdy  $U_2 > U_1$ .

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \pm \arccos\left(\frac{U_{max}}{U_{max} \mp \frac{\Delta U}{2}} - 1\right) \quad (3)$$

#### 4. Wyniki badań i wnioski

Poprawność działania stanowiska sprawdzono wykorzystując stabilizowany, dwuczęstotliwościowy laser He-Ne o znanych długościach emitowanych fal. Mierzając jedną długość fali względem drugiej, otrzymano błąd względny na poziomie  $3 \cdot 10^{-6}$ . Przyczyną tego błędu może być nierówne ustawienie fotodetektorów względem początkowych faz prążków interferencyjnych oraz nieprawidłowe ustawienie wartości amplitudy drgań zwierciadła M1. Przeprowadzono kilka serii pomiarowych dla różnych wartości amplitud, wprowadzając zmianę długości fali diody laserowej (nominalnie 635nm) poprzez zmianę jej temperatury. Nie ma jednak pewności, że pomimo zmian temperatury o taką samą wartość, zmiany długości fali były identyczne dla każdej serii. Początkowe badanie pozwalają stwierdzić, że metoda pomiarowa może stać się alternatywną metodą do pomiarów długości i niestabilności długości fal różniących się od długości fali lasera He-Ne. Autorzy, pracując obecnie nad wyeliminowaniem stałych czynników błędów tak, aby otrzymać względny błąd pomiaru długości i niestabilności długości fali na poziomie nie większym niż  $10^{-7}$ .

Referat powstał w rezultacie badań realizowanych z grantu KBN nr T07D 021 23

#### 5. Literatura

- [1] Dobosz M., Interferometric stabilization of laser diode wavelength. International, 5th Conference MECHATRONICS 2004. Warszawa, 23-25.09.2004, p. 273-275.
- [2] Brzozowski T., Nobel 2005: precyzyjna spektroskopia laserowa i grzebienie częstotliwości, Foton 91, Zima 2005
- [3] Gornall W. S., Extreme Photonics: Wavelength Measurement, in: Photonics Spectra, February 2000, p. 94-98