



Badania interferencyjnego etalonu do stabilizacji długości fali diody laserowej

MARIUSZ ŻABA, MAREK DOBOSZ

Politechnika Warszawska, Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych,
02-525 Warszawa, ul. Św. A. Boboli 8

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały metoda pomiarowa i wyniki badań interferencyjnego etalonu, przeznaczonego do stabilizacji częstotliwości fali światła emitowanego przez diodę laserową. Etalon stanowił stabilizowany termicznie klin optyczny. W badaniach jako wzorzec częstotliwości wykorzystano stabilizowany częstotliwościowo laser He-Ne. W trakcie przeprowadzonych doświadczeń obserwowana była niestabilność fazy prążków powstałych w etalonie przy zmiennej temperaturze otoczenia. Uzyskano względną termiczną zmianę różnicy dróg optycznych etalonu na poziomie $2 \cdot 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ zmiany temperatury otoczenia.

Słowa kluczowe: etalon interferencyjny, dioda laserowa, różnica dróg optycznych, stabilizacja długości fali

Symbole UKD: 535.2

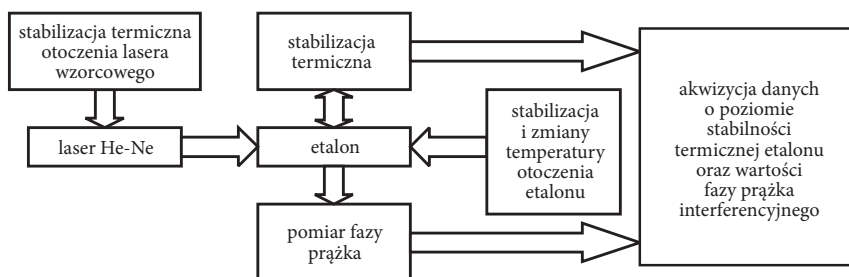
Wstęp

W IMiSP prowadzone są badania nad opracowaniem interferometru do pomiarów wielkości geometrycznych zasilanego diodą laserową [1]. Proponowane jest zastosowanie stabilizowanego termicznie klina optycznego [2] jako etalonu do stabilizacji częstotliwości [3] lasera półprzewodnikowego. Głównym elementem etalonu jest klin wykonany ze szkła, charakteryzującego się małymi zmianami wartości współczynnika załamania światła w funkcji temperatury, a także blisko zerowym współczynnikiem rozszerzalności termicznej. Oba te parametry wpływają jednak na zmianę różnicy dróg optycznych w interferometrze kontrolnym wraz ze zmianą temperatury szkła etalonu. Poniższy artykuł przedstawia metodę pomiarową, stanowisko i wyniki badań stabilności proponowanego etalonu.

Metoda pomiarowa

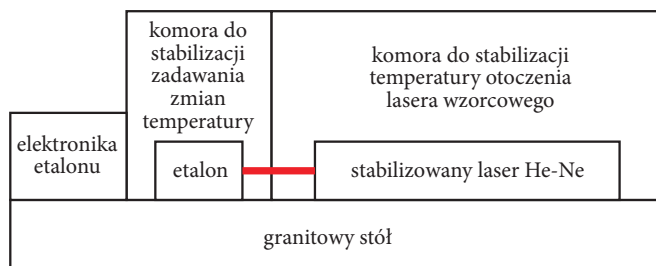
Zaproponowana metoda pomiarowa polega na pomiarze fazy prążka interferencyjnego generowanego w interferometrze kontrolnym przy założeniu pomijalnie małych zmian częstotliwości światła użytego stabilizowanego lasera He-Ne, przy równoczesnej kontroli warunków otoczenia zespołu interferometru kontrolnego. W czasie od jednej do kilku godzin rejestrowane są: temperatura etalonu, temperatura otoczenia oraz temperatura otoczenia lasera wzorcowego zarówno przy stabilizacji, jak i zadawanych zmianach temperatury otoczenia etalonu.

Rysunek 1 przedstawia schemat metody badań.



Rys. 1. Schemat ideowy metody badania etalonu interferencyjnego

Etalon jest dogrzewany do określonej temperatury (stabilizacja termiczna), którą mierzy umieszczony tuż przy etalonie termistor. Utrzymując temperaturę etalonu w odpowiednio wąskim zakresie, obserwowane zmiany rozkładu fazy prążków interferencyjnych w etalonie powinny wynikać tylko ze zmian długości fali emitowanej przez laser. Podczas badań źródłem fali światła laserowego był stabilizowany laser He-Ne, którego względna niestabilność częstotliwości emitowanej fali wynosi 10^{-9} w ciągu godziny. Względna niestabilność częstotliwości wynikająca ze zmian temperatury otoczenia lasera o jeden stopień Celsjusza również wynosi 10^{-9} . Poprzez stabilizację temperatury otoczenia lasera do $0,05^{\circ}\text{C}$ zminimalizowano niestabilność termiczną lasera do poziomu pozwalającego ją zaniedbać w dalszych rozważaniach. Zatem obserwowane zmiany rozkładu prążków interferencyjnych w etalonie będą wywołane niestabilnością samego etalonu. Ponieważ głowica interferencyjna powinna działać prawidłowo w temperaturze z zakresu $17\div 37^{\circ}\text{C}$, niestabilność etalonu w tym zakresie powinna być rzędu 10^{-8} . Dlatego też badany etalon był umieszczony w komorze, w której można było stabilizować temperaturę, jak również zadawać jej zmiany we wspomnianym wcześniej zakresie. Temperatura etalonu, rozkład prążków interferencyjnych oraz temperatury otoczenia lasera i etalonu były automatycznie rejestrowane w trakcie badań. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2.

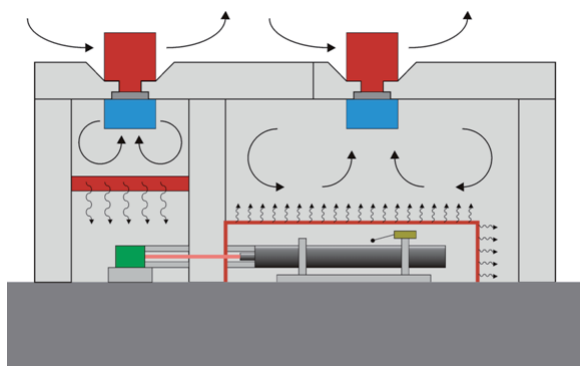


Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska badawczego

Laser wzorcowy i etalon umieszczono na granitowym stole (o grubości 20 cm), który miał pomóc w zachowaniu sztywności mechanicznej układu. Dodatkowo, jako duży akumulator ciepły wspomagał stabilizowanie temperatury. Stworzono dwie komory z materiału termoizolującego — styropianu. Poprzez odizolowanie się od warunków temperaturowych panujących w laboratorium umożliwiały stabilizację oraz zmiany temperatury wybranego elementu, nie zaburzając stabilności termicznej innych elementów. Elektronika odpowiedzialna za stabilizację termiczną etalonu i pomiar fazy prążków interferencyjnych w etalonie znajdowała się poza komorami i była wystawiona na zmiany temperatury nie większe niż jeden stopień Celsjusza.

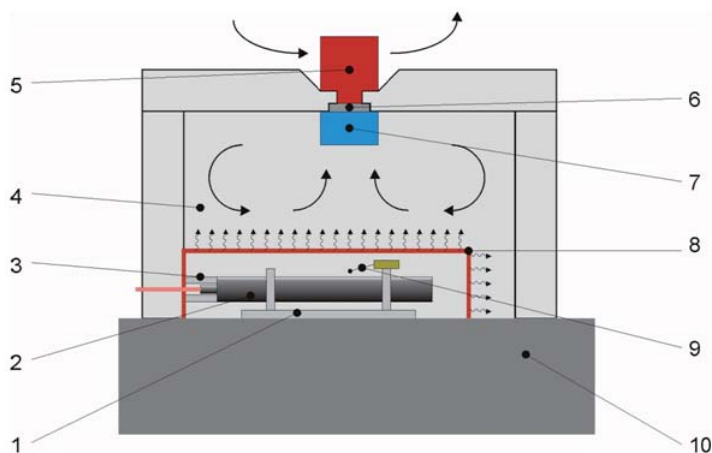
Budowa stanowiska

Badania etalonu przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rysunku 3. Dla polepszenia czytelności opisu, schemat stanowiska rozdzielono na dwie części; komorę z laserem He-Ne oraz na komorę z badanym etalonem.



Rys. 3. Schemat budowy stanowiska do badania niestabilności interferometru kontrolnego

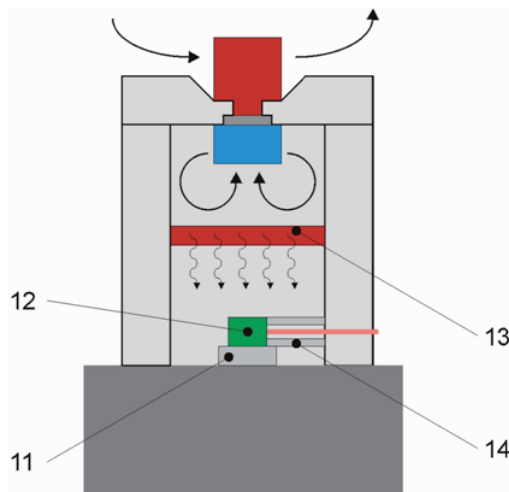
Budowa komory stabilizacji temperatury otoczenia lasera He-Ne została przedstawiona na rysunku 4. Na stole granitowym (10) jest ustawiony laser He-Ne (2), do którego mocowania wykonano uchwyt (1). Kolimator lasera i wychodząca z niego wiązka są osłonięte od ruchów powietrza za pomocą elastycznej, piankowej rurki (3). Cały laser jest osłonięty szczelnie przez miedziany radiator (8), którego zadaniem jest odbieranie ciepła od otoczenia lasera i przekazywanie go do głównej części komory (4), a jednocześnie izolowanie go od ruchów powietrza w komorze. Temperatura otoczenia lasera jest rejestrowana poprzez czujnik-termistor (9) umiejscowiony nad laserem w odległości nie większej niż 0,5 cm. Do stabilizacji temperatury wykorzystano moduł Peltiera (6) o mocy 89 W. Jego „zimna” strona odbierała ciepło z wnętrza komory. Wydajność przepływu ciepła była zwiększona przez układ radiatora z wentylatorem (7). Podobny układ (5) znajdował się po „gorącej” stronie modułu Peltiera.



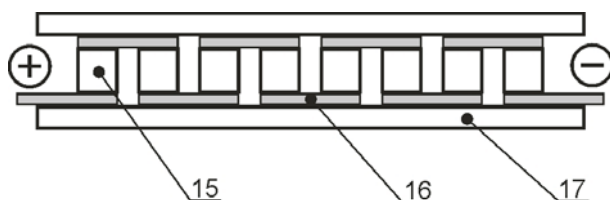
Rys. 4. Schemat budowy komory z laserem He-Ne

Budowa komory etalonu została przedstawiona na rysunku 5. Budowa komory i umiejscowienie modułu Peltiera wraz z wentylatorami są takie same jak na rysunku 4. Badany etalon (12) jest przymocowany w stabilnym uchwycie (11) do stołu granitowego. Wchodząca do etalonu wiązka lasera He-Ne jest osłonięta za pomocą elastycznej, piankowej rurki (14), w celu minimalizacji ruchów powietrza. Stabilizacja i zmiany temperatury otoczenia etalonu były zadawane poprzez metalowy radiator (13) wykonany z pofalowanej, miedzianej blachy. Do budowy stanowiska wykorzystano moduł Peltiera (rys. 6), który jest elementem półprzewodnikowym będącym rodzajem pompy cieplnej umożliwiającej w zależności od polaryzacji modułu grzanie lub chłodzenie wybranego elementu.

Elementy czynne modułu wykonane są z półprzewodnikowego tellurku bizmutu (15), które są ze sobą na przemian połączone za pomocą warstw miedzi (16). Całość okrywają płytki ceramiczne (17).



Rys. 5. Schemat budowy komory z etalonem



Rys. 6. Schemat budowy modułu Peltiera

Warunkiem efektywnej pracy modułu jest zapewnienie dobrego odprowadzenia ciepła ze strony gorącej. Wynika to z faktu, że po gorącej stronie mamy ciepło odprowadzone ze strony zimnej modułu, jak również ciepło powstałe wewnątrz modułu na skutek przepływu prądu elektrycznego przez moduł. Wymaga to stosowania radiatorów o rozwiniętej powierzchni, a także past termoprzewodzących pomiędzy radiatorom i modułem Peltiera. Efektywność radiatora zwiększa się poprzez użycie wentylatora.

Układ tranzystorów zasilających moduł Peltiera sterowano mikrokontrolerem z wykorzystaniem funkcji PWM (*Pulse Width Modulation*) [4], czyli regulacji wypełnienia sygnału sterującego. Wypełnienie sygnału mogło się zmieniać w zakresie od 0 do 1024, przy czym 0 oznacza brak jakiegokolwiek zasilania modułu, zaś 1024 odpowiada zasilaniu napięciem stałym. Jeden okres poddawany modulacji PWM trwał zaledwie 1 ms. Takie rozwiązanie zapewnia szeroką regulację poziomu odbieranego ciepła przez moduł, minimalizując jednocześnie straty ciepła w układzie sterującym.

Sposób mocowania etalonu

Analiza teoretyczna wykazała, że już zmiana wysokości położenia etalonu względem stołu o 1 μm powoduje znaczące przesunięcie fazy prążków etalonu. Wspomnianą wartość przemieszczenia na skutek rozszerzalności termicznej materiałów wywoła już zmiana temperatury uchwytu etalonu o 1°C. Dlatego też pomiędzy stołem granitowym a uchwytem etalonu znajdowały się ceramiczne płytki, które ograniczały przepływ ciepła pomiędzy elementami uchwytu, a także ograniczały odpływ ciepła z etalonu, którego temperatura jest ustalana poprzez dogrzewanie.

Z powyższego względu kąt klina etalonu ustalono w płaszczyźnie równoległej do stołu tak, aby ewentualne zmiany wysokości, na której znajduje się etalon nie powodowały w nim zmiany różnicy dróg optycznych OPD (*Optical Path Difference*).

Czynniki wpływające i zakłócające działanie etalonu

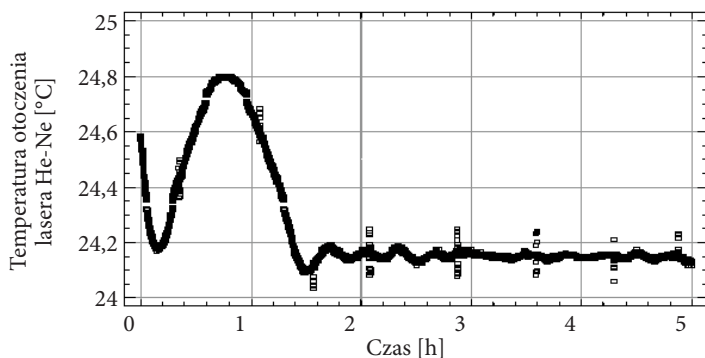
Etalon działa w układzie klina optycznego, w którym prążki powstają w wyniku odbicia wiązki laserowej od dwóch powierzchni klina i wzajemnej interferencji. Okres obserwowanych prążków zależy od wielkości kąta pochylenia powierzchni w klinie względem siebie. Dlatego układ ten jest bardzo wrażliwy na odchylenia kątowe wiązki wchodzącej do etalonu. Stabilność kątowna wiązki wynika ze stabilności kątownej wiązki wychodzącej z rezonatora laserowego (tzw. *pointing stability*). Zależy ona również od stabilności kolimatora oraz samego mocowania lasera. Na stabilność kątowną wiązki ma również wpływ zmiana gradientu temperatury powietrza, w którym propaguje się wiązka laserowa. Ostatnim czynnikiem zakłócającym stabilność kątowną wiązki wprowadzanej do etalonu jest sposób jego mocowania, powstające w wyniku zmian temperatury otoczenia naprężenia i przemieszczenia w uchwycie etalonu oraz kostki światłodzielącej.

Niestabilność mechaniczna etalonu i fotodetektora wpływa na stabilność położenia prążków interferencyjnych na strukturze fotodetektora. Powoduje to pozorną zmianę fazy prążków niezależną od różnicy dróg optycznych w etalonie niewynikającą z niestabilności częstotliwości fali wiązki laserowej.

Uzyskane parametry techniczne stanowiska

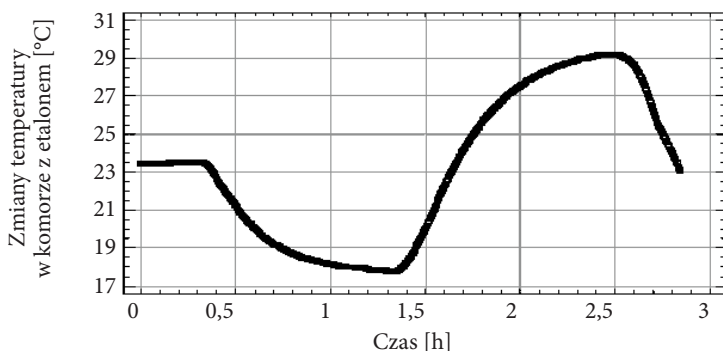
Przebieg stabilizacji temperatury w komorze wzorcowego lasera He-Ne przedstawia rysunek 7. Początkowo temperatura w komorze spadała, ponieważ układ chłodził powietrze, ale laser był w fazie rozgrzewania. Po około 15 minutach laser rozgrzewał się do swojej standardowej temperatury i zaczynał generować większą ilość ciepła (około 50 W). Powodowało to wzrost temperatury w komorze. Układ

sterujący zwiększał moc chłodzenia i po około 2 godzinach niestabilność temperatury była nie większa niż $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Czas dojścia układu jest długi, ponieważ wielkość komory i metalowy radiator wprowadzają konieczność zastosowania dużej histerezy w układzie sterującym temperaturą.



Rys. 7. Stabilizacja temperatury otoczenia lasera He-Ne

W komorze z badanym etalonem stabilizacja temperatury przebiegała podobnie, z tą tylko różnicą, że nie występował wzrost temperatury w początkowej fazie stabilizacji. Przebieg zadawania zmian temperatury w komorze z etalonem przedstawia rysunek 8. Zakres zmian temperatury w tej komorze wynosił nominalnie $(10 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ jednak zakres ten ulegał niewielkim zmianom w zależności od temperatury w laboratorium.



Rys. 8. Zmiany temperatury w komorze z etalonem

Rejestracja wyników

Zmiany temperatury interferometru kontrolnego są mierzone jako zmiany napięcia na termistorze znajdującym się bezpośrednio przy Zerodurze. Zmiany napięcia na termistorze i zmiany napięcia na fotodetektorze mierzone są za pomocą cyfrowego multimetru, który zbiera 10 próbek każdego z napięć, uśrednia je i wysyła do komputera. Prędkość próbkowania multimetru to około 0,5 s. Temperatura w obu komorach jest mierzona za pomocą czujników stacji meteo systemu interferencyjnego do pomiaru przemieszczeń. Wszystkie dane są zapisywane w komputerze w postaci plików txt.

Pomiar stabilności termicznej Zeroduru

Pomiary stabilności termicznej Zeroduru były prowadzone przy stałej i przy zmieniającej się temperaturze otoczenia. Komora interferometru kontrolnego zadawała zmiany temperatury w przedziale od 17 do 27°C w cyklu chłodzenie–grzanie–chłodzenie, startując od temperatury otoczenia, czyli około 21÷23°C. Pomiary w stałej temperaturze odbywały się przy nie działającej komorze interferometru kontrolnego po odczekaniu około dwóch godzin. Po tym czasie temperatura interferometru i elementów znajdujących się w komorze nie zmieniała się więcej niż 0,5°C na 8 godzin.

Pomiar fazy prążka

Pomiar fazy prążka w interferometrze kontrolnym był realizowany poprzez zastosowanie fotodetektora dwusegmentowego. Wielkość struktury była dostosowana do okresu prążków interferencyjnych powstających w interferometrze kontrolnym. Przed rozpoczęciem pomiarów, ustawienie fotodetektora względem prążków było tak korygowane, aby sygnał różnicowy z obu segmentów był bliski zeru. Otrzymywano w ten sposób największą czułość układu fotodetekcyjnego przy zachowaniu maksymalnego zakresu pomiarowego. Napięcie na fotodetektorze mogło zmieniać się w zakresie ± 5 V.

Badania krótko- i długoterminowe

Badania krótkoterminowe trwały około 1,5 godziny i były prowadzone przy zadawaniu zmian temperatury. Miały one na celu określenie poziomu niestabilności etalonu wynikającej ze zmian temperatury otoczenia. Badania długoterminowe,

trwające około 8 godzin, prowadzono w stałej temperaturze. Ich celem było określenie długoterminowej stabilności poszczególnych elementów etalonu.

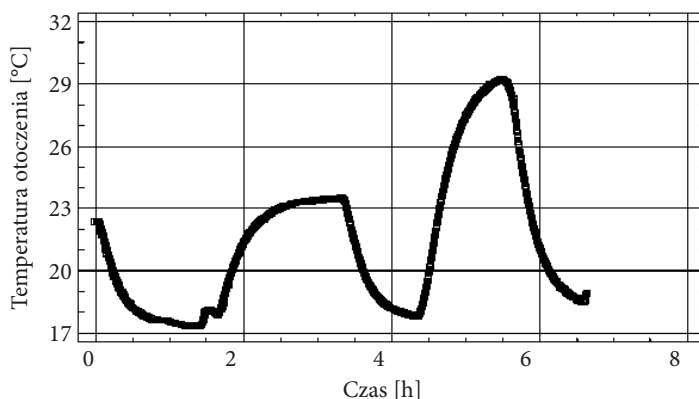
Pomiary z włączoną i wyłączoną stabilizacją termiczną etalonu

Pomiary fazy prążka w interferometrze kontrolnym z aktywną stabilizacją termiczną etalonu pozwalały wyznaczyć całkowitą niestabilność etalonu. Na niestabilność tą składała się niestabilność układu stabilizującego temperaturę etalonu, odpływ ciepła z etalonu poprzez powierzchnie czołowe etalonu oraz niestabilność mocowania fotodetektora. Pomiary fazy prążka w interferometrze kontrolnym, w którym wyłączona została stabilizacja termiczna miały na celu zweryfikowanie doświadczalne zależności zmiany różnicy dróg optycznych w Zerodurze w funkcji zmian temperatury otoczenia w wyniku termicznej rozszerzalności i termicznej zmiany współczynnika załamania światła Zeroduru.

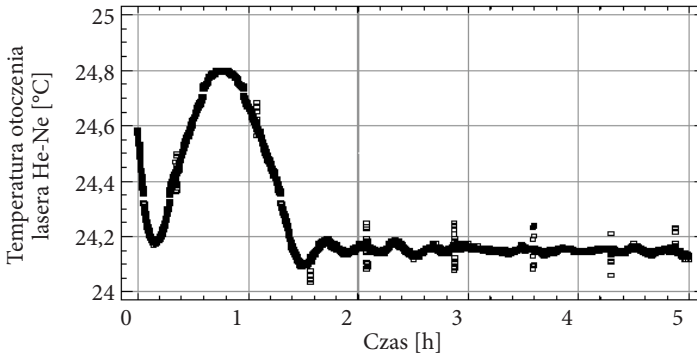
Wyniki badań

Poniżej przedstawione zostały wyniki przykładowej serii pomiarowej, wybranej z grupy najbardziej reprezentatywnych, przeprowadzonych dla zbudowanej eksperymentalnej jednej z wersji etalonu. Na rysunku 9 przedstawione zostały zmiany temperatury wokół etalonu, przy czym pełne możliwości komory zostały uruchomione dopiero w drugiej części badań.

Na rysunku 10 przedstawiono poziom niestabilności temperatury w komorze z laserem He-Ne. Ponieważ czujnik układu umieszczono bliżej lasera, wskazania temperatury są wyższe niż na rysunku 7.

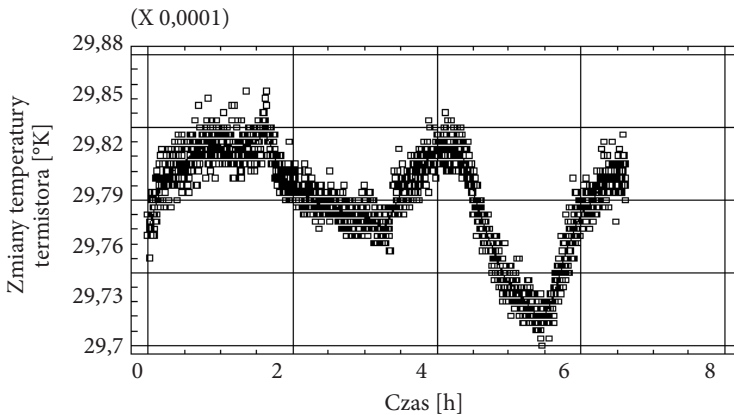


Rys. 9. Zadawane zmiany temperatury otoczenia etalonu



Rys. 10. Stabilność temperatury otoczenia lasera He-Ne

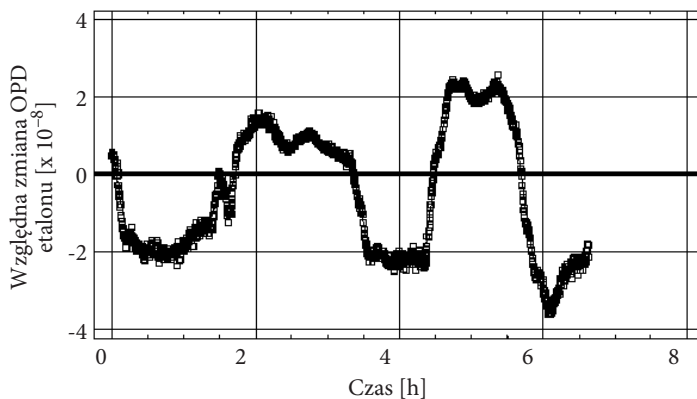
Zmiany temperatury otoczenia wpływały na temperaturę etalonu (rys. 11), co przejawia się w postaci zmian temperatury termistora kontrolującego temperaturę etalonu.



Rys. 11. Zmiany temperatury termistora kontrolnego etalonu

Najbardziej interesujące informacje niesie wykres z rysunku 12. Pokazuje on zmianę fazy prążka przeliczoną na odpowiadającą jej względną zmianę różnicy dróg optycznych (OPD) etalonu podczas zadawania cyklicznych zmian temperatury przedstawionych na rysunku 8.

Łatwo zauważyć, że przebieg zmian obserwowany na rysunku 12 jest skorelowany z zaobserwowanymi zmianami temperatury termistora kontrolnego etalonu. Analiza teoretyczna uwzględniająca termiczną zmianę współczynnika załamania zastosowanego szkła etalonu wykazała, że obserwowany poziom zmian OPD etalonu wynika dokładnie ze zmian temperatury wzorca. Widoczne różnice w przebiegach spowodowane są dokładnie niezidentyfikowanymi jeszcze czynnikami losowymi.



Rys. 12. Względna zmiana OPD etalonu przy zmianach temperatury otoczenia

Wnioski

Przedstawiono metodę pomiarową, stanowisko i wyniki badań doświadczalnych interferencyjnego etalonu, przeznaczonego do stabilizacji częstotliwości fali światła emitowanego przez diodę laserową. Opracowana komora termiczna do zadawania zmian temperatury w przedziale $17 \div 27^\circ\text{C}$ pozwoliła badać niestabilność etalonu w zakresie temperatury, w której docelowo ma pracować etalon. Osiągnięto względną niestabilność termiczną etalonu na poziomie $2 \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}$ zmiany temperatury otoczenia. Uzyskanie w badaniach ścisłej zależności różnicy dróg optycznych w etalonie w funkcji temperatury otoczenia pozwoli w przyszłości na wprowadzenie do systemu stabilizującego częstotliwość diody laserowej współczynnika korekcji wpływu temperatury na etalon.

Praca powstała w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego R01 011 02.

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

LITERATURA

- [1] M. DOBOSZ i in., *Opracowanie interferometru laserowego do pomiaru przemieszczeń liniowych z diodą laserową stabilizowaną interferencyjnie*, Raport z realizacji projektu badawczego KBN nr 5 T07D 005 25.
- [2] T. Y. FAN, J. L. DANEU, *Thermal coefficients of the optical path length and refractive index in YAG*, Applied Optics, vol. 37, 9, 1998, 1635-1637.
- [3] A. A. ZHMUD, *Differential Method of Diode Laser Wavelength Stabilization*, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, 2001, 5947-5948.

M. ŽABA, M. DOBOSZ

**Experimental analysis of interference etalon
for laser diode laser wavelength stabilization**

Abstract. Measuring method and experimental results of the interference etalon designed for the purpose of laser diode frequency stabilization is presented. Thermally stabilized optical wedge acts as the etalon. He-Ne wavelength stabilized laser has been used as the frequency reference. During experiments instability of the interferometer fringe phase generated by the etalon has been observed when the ambient temperature was changed. The obtained relative thermal change of the optical path difference of the etalon is equal to $2 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ of the ambient temperature change.

Keywords: interferometrical etalon, laser diode, optical path difference, wavelength stabilization

Universal Decimal Classification: 535.2