

N3 光熱変調を用いたフィードバック型2重正弦波位相変調半導体レーザ干渉計

須田広美* 鈴木孝昌** 佐々木修己**

*新潟大学大学院自然科学研究科 **新潟大学工学部

1. はじめに

通常のレーザ干渉計では、光の伝播距離を位相変化として検出するため光波長以上の光路差の変化を測定することはできない。本研究では光波長を時間的に正弦波状に走査する2重正弦波位相変調(DSPM)干渉法¹⁾を用いる。干渉信号の位相変調振幅は光路差と波長走査幅に比例する。従って位相変調振幅を検出することで波長以上の光路差の変化が求められる。従来 DSPM 干渉計はピエゾ素子のような機械的駆動要素を必要としていたが、測定精度向上の面からはそのような駆動機構を用いない静的なレーザ干渉計が望ましい。

半導体レーザ(LD)の波長は注入電流により容易に変えることができる。しかしキャリア信号を電流変調により作る場合、波長だけでなく光強度まで変化し、測定精度が低下するという問題がある。そこで、光源レーザのレーザチップに外部より光強度変調を施したレーザを照射し、その光熱効果によって変調を施す光熱変調²⁾を用い、この問題を解決した。この方式によると、光源レーザの駆動電流を変化させることなく波長変調でき、干渉信号の強度変調成分を大幅に低減できる。

以上のように光熱変調を用いた DSPM 干渉計を構成し、光波長以上の光路差変化の測定を行う。

2. 原理

不等光路長を持つ LD 干渉計において電流変調と熱変調をそれぞれ

$$b \cos \omega_s t \quad (1)$$

$$a \cos(\omega_s t + \theta) \quad (2)$$

のように同時に施した時、強度変調成分と波長は、

$$g(t) = g_0 [1 + \gamma_1 b \cos \omega_s t + \gamma_2 a \cos(\omega_s t + \theta)] \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \lambda_0 - \beta_1 b \cos \omega_s t - \beta_2 a \cos(\omega_s t + \theta) \quad (4)$$

であり、ここで g_0 は平均強度、 γ_1, γ_2 はそれぞれ電流変調、熱変調による強度変調振幅、 β_1, β_2 は電流変調および熱変調の変調効率を表す。干渉信号は

$$S(t) = g(t) + g(t) \cos[Z_c \cos(\omega_s t + \theta) + \Phi(t)] \quad (5)$$

ここで、

$$\Phi(t) = Z_0 \cos \omega_s t + \alpha \quad (6)$$

$$Z_c = \frac{2\pi\beta_1 a}{\lambda_0^2} L, \quad Z_0 = \frac{2\pi\beta_1 b}{\lambda_0^2} L, \quad \alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} L \quad (7)$$

である。 $S(t)$ を n 次ベッセル関数 J_n を用いて展開すると、
 $S(t) = g(t) + g(t) \cos\{\Phi(t)\} [J_0(Z_c) - 2J_2(Z_c) \cos(2\omega_s t + 2\theta)] + \dots$
 $- g(t) \sin\{\Phi(t)\} [2J_1(Z_c) \cos(\omega_s t + \theta) - \dots]$ (8)

干渉信号 $S(t)$ のフーリエ変換を $F(\omega) = \mathcal{F}\{S(t)\}$ とし、 $\omega_c/2 < \omega \leq 3\omega_c/2$ および $3\omega_c/2 < \omega \leq 5\omega_c/2$ の範囲の周波数分布に対して、 $\omega = \omega_c$ および $\omega = 2\omega_c$ が $\omega = 0$ となるように周波数軸をシフトすると、

$$F_1(\omega) = -J_1(Z_c) \exp(j\theta) \mathcal{F}\{g(t) \sin\{\Phi(t)\}\} \quad (9)$$

$$F_2(\omega) = -J_2(Z_c) \exp(j2\theta) \mathcal{F}\{g(t) \cos\{\Phi(t)\}\} \quad (10)$$

となる。 $F_1(\omega), F_2(\omega)$ から次式によって $\Phi(t)$ が得られる。

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \frac{\mathcal{F}^{-1}\{F_1(\omega)/J_1(Z_c) \exp(j\theta)\}}{\mathcal{F}^{-1}\{F_2(\omega)/J_2(Z_c) \exp(j2\theta)\}} \quad (11)$$

$\Phi(t)$ をフーリエ変換し、 ω_c の周波数成分の振幅から Z_c を求めることで、波長以上の光路差 L が求められる。

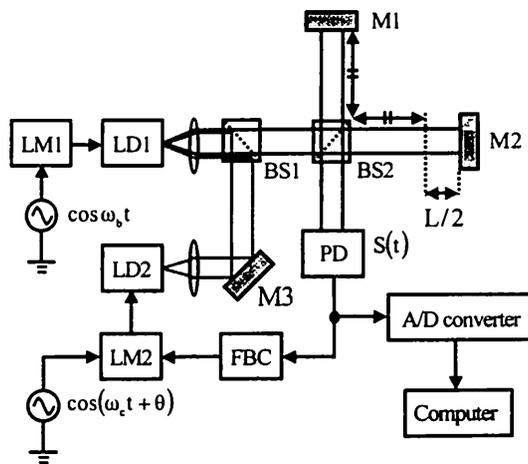


Fig.1 Experimental setup

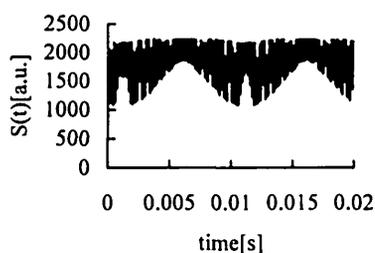
3. 実験

Fig.1 に実験装置の構成を示す。光源用レーザ LD1 にレーザ変調器 LM1 を通して周波数 $\omega_s / 2\pi = 100\text{Hz}$ で電流変調を施すと同時に加熱用レーザ LD2 にレーザ変調器 LM2 を通して周波数 $\omega_s / 2\pi = 6.4\text{kHz}$ で光強度変調を施す。LD2 からの光を LD1 に照射し、LD1 に光熱変調を施す。初期光路差を約 50mm とし、M2 をマイクロメータ

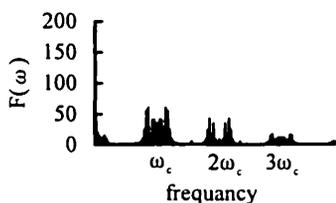
で移動させることにより0.1mm 間隔で光路差変化 ΔL を与える。そのときフォトダイオード(PD)で得られる干渉信号をサンプリング周波数 $16 \times (\omega_c / 2\pi)$ でA/D変換し、高速フーリエ変換 FFT を用いて位相項 $\Phi(t)$ から変調振幅 Z_b を求める。また外乱除去として、干渉信号の位相 α の変動をフィードバックコントローラ(FBC)により抑えることで測定精度の向上を図った。

4.実験結果

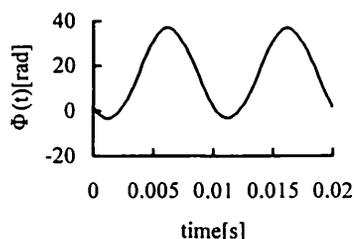
Fig. 2 に信号処理の結果を示す。(a)はA/Dコンバータで取得した干渉信号、(b)は $S(t)$ のフーリエ変換 $F(\omega)$ である。これらの周波数スペクトルに式(9)~(11)の計算処理を行った結果 $\Phi(t)$ が(c)のように求められた。



(a) Interference signal $S(t)$



(b) Fourier transform of $S(t)$



(c) Phase variation $\Phi(t)$

Fig.2 Signal processing to obtain Z_b .

Fig. 3 に ΔL を0mm から1mm まで変化させたときの Z_b の変化量を示す。このグラフの傾きから、 $L[\text{mm}] = 2.60 \times Z_b$ の関係が得られた。 $\Delta L = 0\text{mm}$ のとき $Z_b = 19.92\text{rad}$ より $L = 51.81\text{mm}$ 、また $\Delta L = 1\text{mm}$ のとき $Z_b = 20.31\text{rad}$ より $L = 52.80\text{mm}$ となる。

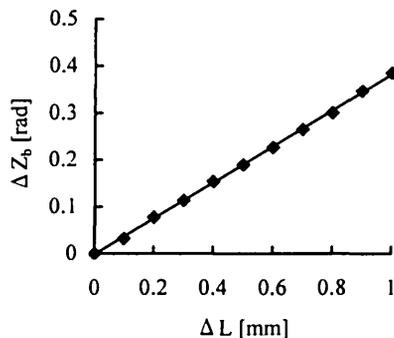


Fig.3 Relation between ΔZ_b and ΔL

同じ距離において10回ずつ測定を行った結果 Fig. 4 に示すように Z_b にはrmsで $\pm 1.22 \times 10^{-2}$ rad のばらつきが観測された。測定精度はこのばらつきで決定され、これを距離に換算すると約 $\pm 30\mu\text{m}$ となる。

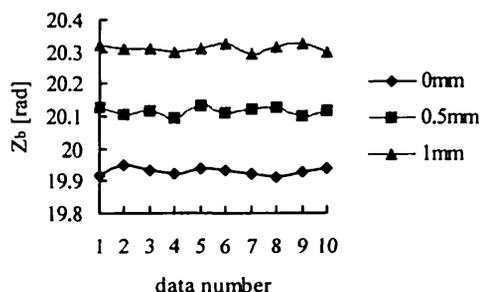


Fig.4 Fluctuation of Z_b .

5.まとめ

光熱変調を用いた2重正弦波位相変調干渉計を構成し、光波長以上の距離変化を測定した。測定値 Z_b のばらつきはフィードバックシステムにより低減できた。その結果、測定精度は約 $\pm 30\mu\text{m}$ であった。さらに測定精度を向上するために波長変化量の大きなレーザを用いて Z_b の感度を高める方法が考えられる。

[参考文献]

- Osami Sasaki, et. al., "Double sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer for distance measurement" Appl. Opt. 30, pp. 3617-3621(1991)
- Takamasa. Suzuki, et. al., "Laser-diode interferometer with a photothermal modulation" Appl. Opt. 38, pp. 7069-7075(1999)
- 須田広美、鈴木孝昌、佐々木修己 "光熱変調を用いた2重正弦波位相変調半導体レーザ干渉計" 第10回電気学会新潟支所研究発表会予稿集, pp. 129(2000)