

最近の技術から

フェーズロック半導体レーザー干渉計 による表面形状計測

佐々木修己・鈴木 孝昌

新潟大学工学部電気電子工学科 〒950-21 新潟市五十嵐 2

1. ま え が き

半導体レーザーの発振波長は注入電流によって容易に変化させることができる。この特性を、ヘテロダイン干渉法^{1,2)}、縞走査干渉法^{3,4)}、正弦波位相変調干渉法⁵⁾などによる高精度レーザー干渉計に応用すれば、これらの干渉法で必要とされるレーザー光の位相変調は半導体レーザーの注入電流を変調することによって行える。

さらに、外乱の影響を受けないレーザー干渉計を構成する場合にも、半導体レーザーの発振波長可変性を利用できる⁶⁻⁷⁾。干渉計装置の機械的振動、あるいは温度による半導体レーザーの発振波長の変化などによって干渉信号の位相が変動する。フィードバック制御を用いて、これらの位相変動をゼロにするように半導体レーザーの注入電流を変化させることにより、外乱の影響を除去できる。

また、発振波長の可変性を積極的に利用し、動きの計測^{8,9)}、表面形状の計測^{10,11)}を行うことができる。物体の動き、あるいは表面形状に応じて変化する干渉信号の位相変化に対し、この場合も、この位相変化をゼロにするように半導体レーザーの注入電流を変化させる。注入電流の変化から、動きあるいは表面形状の計測が行える。とくに表面形状の計測では、各測定点に対して干渉信号の位相を一定にすることにより、この操作をフェーズロックと呼んでいる。表面形状計測の基本原理はすでに報告されているフェーズロック干渉計¹²⁾と同じであり、ここでは、半導体レーザーと CCD イメージセンサーを用い、フェーズロック干渉計を構成する。

2. 干渉計の原理と構成

干渉計の構成を図 1 に示す。半導体レーザーの注入電流を角周波数 ω_c の正弦波信号で変調することによって、正弦波位相変調干渉計となっている。測定物体の表面位置を x 、その表面形状を $D(x)$ とする。得られる

干渉信号の交流成分を

$$S(t, x) = S_0 \cos[x \cos \omega_c t + \alpha(x)] \quad (1)$$

で表現する。いま、半導体レーザーの発振波長を λ_0 とする。ある基準点 x_0 に対する物体光と参照光の伝播距離差を $2D_0$ とすると、

$$\alpha(x_0) = (4\pi/\lambda_0)D_0 \quad (2)$$

となる。一方、測定点 x に対しては、

$$\alpha(x) = (4\pi/\lambda_0)[D_0 + D(x)] \quad (3)$$

である。測定点 x に対して $\alpha(x)$ は変化するが、半導体レーザーの発振波長を測定点ごとに $\lambda_c(x)$ だけ変えることによって $\alpha(x)$ を一定値 $\alpha_L = \alpha(x_0)$ にロックする。すなわち、

$$\alpha_L = [4\pi/(\lambda_0 + \lambda_c)][D_0 + D(x)] \quad (4)$$

また、 β を半導体レーザーの変調効率、 $I_c(x)$ を注入電流の変化とすると、

$$\lambda_c(x) = \beta I_c(x) \quad (5)$$

である。(2)、(4)および(5)式より、

$$D(x) = (D_0/\lambda_0)\beta I_c(x) \quad (6)$$

が得られる。したがって、 $\alpha(x)$ を α_L にロックするときに必要な注入電流 $I_c(x)$ の変化を検出することによって、表面形状 $D(x)$ が得られる。

3. フィードバック信号と制御系

各測定点 x に対する干渉信号は CCD イメージセンサーで検出する。CCD イメージセンサーの蓄積時間を正弦波位相変調の周期 $T = 2\pi/\omega_c$ の半周期 $T/2$ とし、

$$y_i(x) = \int_{(T/2)(i-1)+\tau_0}^{(T/2)i+\tau_0} S(t, x) dt \quad i=1, 2 \quad (7)$$

の出力信号をイメージセンサーより得る。そして、

$$Y(x) = y_1(x) - y_2(x) = S_0 B \sin \alpha(x) \quad (8)$$

を求め、この信号をフィードバック信号とする。 B は z 、 τ_0 で決まる定数である。信号 $Y(x)$ を利得 K_P の増幅器と積分時間 T_I の積分器に入力し、それぞれの出力信号の和を $I_c(x)$ とする。この $I_c(x)$ を半導体レー

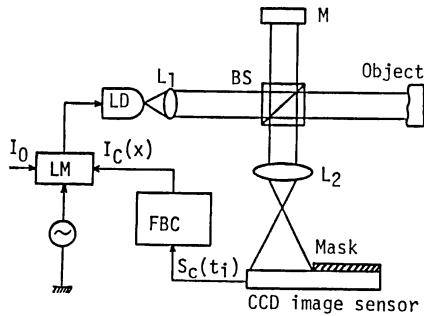


図1 フェーズロック半導体レーザー干渉計の構成

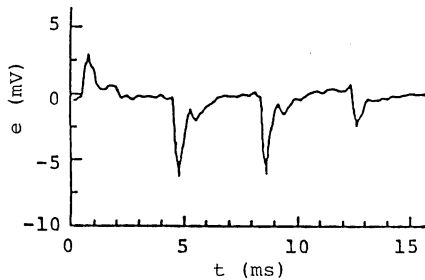


図2 測定点の移動による誤差信号 $e = \sin \alpha$ の変化

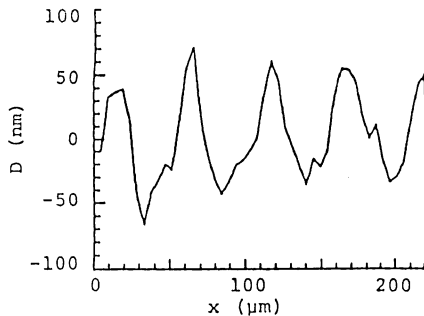


図3 表面形状の測定結果

ザーの注入電流にフィードバックすることにより、 $\alpha(x) = \alpha_L = 0$ にロックする。各測定点での $Y(x)$ は T 秒ごとに N 回得られ、 $T_{scan} = NT$ ごとに、測定点が移動する。

4. 表面形状の測定

中心波長 $\lambda_0 = 789 \text{ nm}$ の半導体レーザーを用い、図1

の干渉計を構成した。 $2D_0 = 100 \text{ mm}$, $\beta = 6 \times 10^{-3} \text{ nm/mA}$ であった。測定物体はダイヤモンドバイトで切削された磁気ディスク用のアルミニウム円板である。 $T = 250 \mu\text{s}$ のとき $K_F = 2$, $T_i = 0.5 \text{ ms}$ でフィードバック制御系が安定となった。図2に、各測定点に対し、 $\alpha(x)$ が $\alpha_L = 0$ にロックされる様子を示す。測定点が変わった直後には誤差信号 $e = \sin \alpha$ は大きな値をとるが、 $N = 16$ の $T_{scan} = 4 \text{ ms}$ 後には、ほぼ $\sin \alpha = 0$ となっている。このときの $I_C(x)$ を検出し、(6)式より表面形状 $D(x)$ を求める。測定結果を図3に示す。測定点の数は50個であり、1回の測定時間は200msとなる。この測定時間内においては、温度変化による半導体レーザーの波長ドリフトの影響はほとんどなかった。数回の測定結果の比較より、繰返し測定誤差は約10nm以下と思われる。

5. むすび

半導体レーザーの発振波長可変性を積極的に利用することにより、計算機による演算処理を用いることなしに、フィードバック制御処理によって表面形状を測定する方法について述べた。本干渉計によれば、簡単なハードウェアを用いて、容易に表面形状を実時間で計測することができる。

文 献

- 1) 立野公男, ほか: 光学, **16** (1987) 149-153.
- 2) J. Chen, *et al.*: Appl Opt., **27** (1988) 124-128.
- 3) Y. Ishii, *et al.*: Opt. Lett., **12** (1987) 233-235.
- 4) K. Hotate, *et al.*: Appl. Opt., **26** (1987) 2956-2961.
- 5) 佐々木修己, ほか: 第13回光学シンポジウム講演予稿集 (1988) pp. 11-12.
- 6) O. Sasaki, *et al.*: SPIE Proc., **1163** (1989) 印刷中.
- 7) Y. Ishii, *et al.*: SPIE Proc., **1163** (1989) 印刷中.
- 8) T. Yoshino, *et al.*: Appl. Opt., **26** (1987) 892-897.
- 9) 鈴木孝昌, ほか: 光学, **17** (1988) 670-675.
- 10) 鈴木孝昌, ほか: 第14回光学シンポジウム講演予稿集 (1989) pp. 23-24.
- 11) T. Suzuki, *et al.*: Appl. Opt., **28** (1989) 4407-4410.
- 12) D. T. Moore, *et al.*: Appl. Opt., **24** (1978) 3959-3963.

(1989年10月31日受理)