



2種類の半導体レーザーの周波数変調を用いた 2波長位相シフト干渉法

小野寺理文・石井 行弘

職業訓練大学校電子工学科 〒229 相模原市橋本台 4-1-1

(1991年8月26日受付, 1991年10月30日受理)

Two-Wavelength Phase-Shifting Interferometry Using the Frequency Modulation of Dual Laser-Diodes

Ribun ONODERA and Yukihiro ISHII

Department of Electronics, University of Industrial Technology,
4-1-1, Hashimotodai, Sagami-hara 229

(Received August 26, 1991; Accepted October 30, 1991)

A two-wavelength laser-diode (LD) interferometry has been studied that is based on a phase-shifting technique using two wavelengths changed stepwise by separately varying the currents in dual LDs. An equivalent wavelength is produced by the addition of two single-wavelength interferograms without the need of an amplitude demodulation technique. The phases are equally shifted in opposite directions to each other on an unbalanced interferometer. The phase-shift calibration is made by synchronizing the fringe-shift interference signals with the variations of modulated currents with the help of lock-in amplifiers. The influence of the interferometric intensity changes due to current alternations and the phase-shift error on a common four-stepping phase-extraction algorithm are numerically investigated. The interferometry insensitive to the intensity changes of interferograms has been demonstrated. The experimental results are shown.

1. はじめに

光波干渉法は、物体の長さや形状、表面の粗さなどの計測技術として古くから利用されており、種々の新しい干渉計測法の研究が進められている。特に、光技術とコンピュータ技術とを融合した位相シフト干渉法により位相測定を行うと、100分の1波長を越える精度が得られている¹⁾。この位相シフト法による干渉計では、参照光路の位相変化を与えるため、 piezoelectric (PZT) で駆動された可動鏡が必要である²⁾。近年、半導体レーザー(LD)は光エレクトロニクスの分野で広範に利用されている。LDの特徴の一つに、波長のチューニング特性があり、レーザーの発振波長は注入電流や雰囲気温度により変化することができる。したがって、レーザーの周波数変調を行うことにより、干渉に寄与する二つの光ビームの間の位相差を変化することができ、従来の位相測定

干渉計と同様な干渉計を構成することができる^{3,4)}。本研究では、位相シフト法を2種類のLDを光源とする2波長干渉法へ応用し、測定領域の拡大を図る干渉測定法について報告する。

2波長干渉法は、早くからホログラフィ干渉法に応用され、大きな非球面度を有するレンズの位相分布が測定されている⁵⁾。2波長ヘテロダイン干渉法に関して、波長 λ_1 と λ_2 で合成される等価波長 $\lambda = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ による被検位相は、各々の波長の位相を独立にヘテロダイン検出しその差から計測される方法⁶⁾、矩形波電流により一つのLDを変調し、2波長を交互に発振させてビート周波数成分に位相変調を加えFM復調することで求められる手法⁷⁾、正弦波電流により2種類のLDを変調し、各々の波長の干渉信号の基本波、第2高調波成分を用いて測定されるもの⁸⁾と周波数偏移量の異なるヘテロダイン信号を合成し、スーパーヘテロダイン光源を生成して

計測されている⁹⁾。他方、空間的な2次元位相分布の測定は、撮像されたモアレ干渉縞のビデオ信号により縞の空間周波数を時間周波数へ変換し、AM復調によりモアレ成分を導出し実行できる¹⁰⁾。また、2種類のレーザーを使用して位相シフト干渉計を構成し、それらの測定位相の差から位相計測が実行されている¹¹⁾。

本報告の2波長半導体レーザー位相シフト干渉法は、2種類のLDを使用して階段的、しかもお互いに反対方向に変化した注入電流により干渉縞を走査し、干渉計測を行うことができる¹²⁾。ここでLDの注入電流変化による位相シフト量は、電流変化に比例してお互いに大きさが等しく反対方向に与えられている。その位相シフト量の校正は、電流変化により生ずる正弦波干渉信号を変調電流変化と同期をとることにより行われる。

一般に、波長 λ を用いた干渉計による段差試料の測定限界は、 $\lambda/2$ である。ここでは、2波長干渉計により測定領域を拡張し、 $\lambda/2$ 以下の試料の測定結果を示している。また、LDの注入電流の変化により光強度の変動があるので、二つの強度の異なる干渉縞のインコヒーレントな和は、所望のモアレ縞を生成しない。そこで、位相変調を受ける光路差を長くとり作動電流範囲が小さいとして、光出力の増加分を無視して問題の解決を図っている。加えるに、光出力の増加による干渉縞の強度変化に不感な位相導出アルゴリズムを提案し、実験により確かめている。さらに本研究は、4ステップ法を用いる際の干渉縞の強度変化と位相シフト量の誤差による測定精度について数値的に解析している。

2. 測定原理

Fig. 1 の光路差 l を持つ不等光路トワイマン・グリ

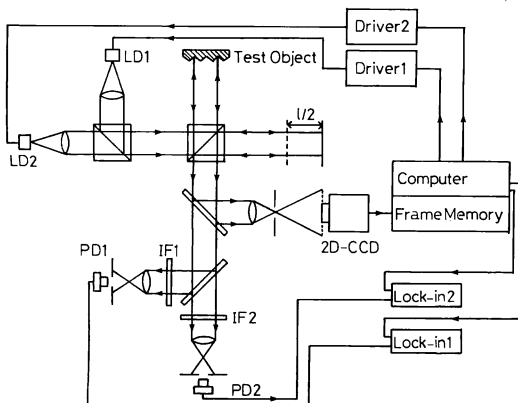


Fig. 1 Experimental setup for two-wavelength phase-shifting interferometry with dual FM LDs.

ン干渉計の測定面において、各々のLDの波長 λ_k ($k=1, 2$)に対する干渉縞強度分布 $I_k(x, y)$ は、

$$I_k(x, y) = I_{kM}(x, y) [1 + \gamma_k(x, y) \cos\{\phi_k(x, y)\}] \quad (1)$$

となる。ここで I_{kM} はバイアス強度、 γ_k は可視度、 ϕ_k は被検位相分布で $\phi_k(x, y) = 2\pi\{2w(x, y) + l\}/\lambda_k$ 、 $w(x, y)$ は被検面の形状を表す。それぞれの干渉縞の変調成分 ($I_{kM}\gamma_k$) が等しいと仮定すると、(1)式のインコヒーレントな和すなわち2波長干渉縞強度分布は、

$$i(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) \\ = a(x, y) + b(x, y) \cos[\pi\{2w(x, y) + l\}/\Gamma] \\ \times \cos[\pi\{2w(x, y) + l\}/\Lambda] \quad (2)$$

となる。ここで、 $a = I_{1M} + I_{2M}$ 、 $b/2 = I_{1M}\gamma_1 = I_{2M}\gamma_2$ 、 Γ は平均波長で $\Gamma = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ である。位相シフト量 δ_k は、二つのLDの注入電流を独立に変化させて、 λ_k から $\lambda_k + \Delta\lambda_k$ への波長の偏移により、 $\delta_k = \pi l \Delta\lambda_k / \lambda_k^2$ で与えられる。階段的に干渉縞を走査することを考えると、 j 番目の位相シフト量は、

$$\delta_{kj} = j\pi\alpha_k \Delta i_k / (N\lambda_k^2) \quad (j=1, \dots, N) \quad (3)$$

となる。ここで、 α_k は電流チューニング比、 Δi_k は干渉縞を1縞走査するのに必要な注入電流の変化量、 N は1縞内の走査点の数 (ステップ数) である。LDの注入電流の変化により、(2)式に(3)式の位相シフト量が与えられた場合の干渉縞強度分布 i_j は、

$$i_j = a_j + b_j \cos(\Psi - \delta_{1j} - \delta_{2j}) \cos(\Phi - \delta_{1j} + \delta_{2j}) \quad (4)$$

となる。ここで、 $l \gg w$ の関係が使用され、 $\Psi = \pi(2w + l)/\Gamma$ 、 $\Phi = \pi(2w + l)/\Lambda$ である。もし、位相シフト量が

$$\delta_j \equiv \delta_{1j} = -\delta_{2j} \quad (5)$$

の条件に合うように変化すると、(4)式の強度は、

$$i_j = a_j + b_j \cos(\Psi) \cos(\Phi - 2\delta_j) \quad (6)$$

となる。(6)式の第1項の \cos 関数は位相シフト量に独立であり、第2項の \cos 関数は位相シフト量 $2\delta_j$ を含み、このモアレ縞を慣用的に用いられる位相シフト干渉法¹³⁾へ適応できることを示している。(5)式の位相シフト量の条件に従い、LDの注入電流が4段階に互いに反対方向で変化すると、(3)、(5)式に示す位相シフト量が、

$$\delta_j = (j - 5/2)\pi/4 \quad (j=1 \sim 4) \quad (7)$$

となる。よってモアレ縞の強度が i_1^* から i_4^* まで変動する。これらの測定量から、4ステップ法による被検位相 ϕ は、

$$\phi = \arctan \{ (-i_1^* - i_2^* + i_3^* + i_4^*) / (-i_1^* + i_2^* + i_3^* - i_4^*) \} \quad (8)$$

により導出される。

3. 実験と実験結果

Fig. 1 は、2 波長半導体レーザー干渉計の構成を示す。光源には、InGaAlP の可視 LD ($\lambda_1=672\text{nm}$, TOLD 9211) と AlGaAs の近赤外 LD ($\lambda_2=788\text{nm}$, HL 7801) を使用し、各々の電流チューニング比は、 $\alpha_1=0.0089\text{nm/mA}$ (6.0GHz/mA), $\alpha_2=0.0086\text{nm/mA}$ (4.2GHz/mA) である。電流変化による発振波長の偏移は、モードホップがなく線形に変化する範囲を利用している。LD の温度は、温度制御回路により $20\pm 0.01^\circ\text{C}$ に保たれ、温度による発振波長の変動を抑えている。等価波長 $\Lambda=4.6\mu\text{m}$ (波長差 116nm) の合成光は、同じ直線偏光状態の二つの LD からの光をビームスプリッタにより重ね合わせることににより作られ、光路差 $l=40\text{mm}$ のトワイマン・グリーン干渉計へ導かれる。被検測定面と参照面からの反射光の干渉により生じたモアレ干渉縞は、ハーフミラーで分岐され、一方は位相測定用の干渉信号として、他方は位相シフト量の校正用信号として利用される。校正用干渉信号は、LD₁ と LD₂ に対応する中心波長を有する干渉フィルタ IF₁, IF₂ を通してフォトダイオード PD₁, PD₂ で検出され、ロックインアンプへ入力される。三角波変調電流は、D/A 変換器を通してコンピュータにより発生され、2 台の LD ドライバの変調信号とロックインアンプの参照信号に使用される。

位相シフト量の校正は、以下の手順で行われる。Fig. 2 に示すように、互いに反転する三角波電流により LD を変調し、それによって生ずる干渉縞信号の初期位相が三角波電流の折り返し点に一致するように LD のバイア

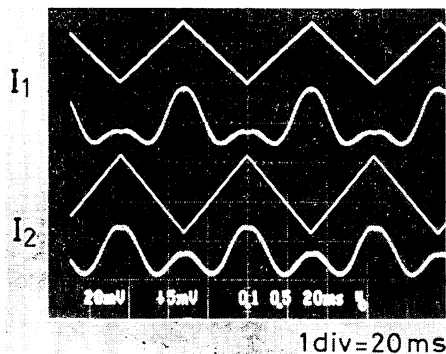


Fig. 2 Interference signals (each lower trace), corresponding to I_1 and I_2 interferograms, satisfy the phase-shift condition in Eq. (5) introduced by mutually inverted triangular waves (each upper trace) of the two LD currents.

ス電流が設定される。その後ロックインアンプにより参照信号の 2 倍の周波数で干渉縞信号を同期検波して、その検出信号が最大となるように LD の変調電流幅 Δi_k を調整し、(5) 式の位相シフト量の条件が満足されることになる。その結果、Fig. 2 で示す LD₁ と LD₂ のバイアス電流は、43.8 mA と 57.0 mA である。LD の変調電流幅 Δi_1 , Δi_2 は、それぞれ 1.26 mA と 1.80 mA であり、注入電流の増加量 $\Delta i_i/4=0.32\text{mA}$, $\Delta i_i/4=0.45\text{mA}$ が LD₁ と LD₂ に注入され、(7) 式の位相シフト量が変化しモアレ縞を走査する。

(7) 式で示した 4 ステップでのモアレ干渉縞強度分布は、 768×493 ピクセルを有する CCD カメラにより横倍率 2 をもって撮像される。CCD カメラのビデオ信号は、フレームメモリによりサンプル点 256×256 量子化 8 ビットの画像データに変換され、コンピュータに転送し (8) 式の計算により位相分布が導出される。その 3 次元位相分布は、X-Y プロットに表示される。

(7) 式の位相シフト量に起因するシフト量間隔における LD₁ と LD₂ の光出力の変動は、それぞれ 0.13 mW と 0.11 mW である。これらの値は、1 縞の走査により生ずる平均的な光出力の変化分に相当している。干渉縞の強度変化の交点での LD₁ と LD₂ の光出力は 1.4 mW であるので、上記で示した光出力の変動分をこれらの光出力で除した値は、それぞれ 0.09 と 0.08 となる。位相変調を受ける光路差を 40 mm と長くっており、LD の光出力がこの程度異なっている干渉縞のインコヒーレントの和は、2% の誤差を持って (2) 式の所望のモアレ縞を生成している。

Fig. 3 は、傾斜ミラーを被検物体として 4 ステップの位相シフト量を含む 2 波長干渉縞の断面を比較した結果である。全ての断面強度分布は、CCD カメラの同一ラインから抽出されている。Fig. 3 の (I) と (II) の矢印で示された同一場所での干渉縞の強度分布を比較すると、その位相差が π であることがわかる。同様に (III) と (IV) の干渉縞の強度分布の比較から、その位相差は、 π である。これらの結果は、(6) 式で示した 2 波長干渉縞の生成を表している。

Fig. 4 の下図は、Fig. 1 の干渉計を用いてクロム蒸着された標準段差試料を測定した結果である。等価波長 $\Lambda=4.6\mu\text{m}$ における (8) 式の計算により計測された段差の高さは $\sim 430\text{nm}$ であり、メーカーの校正値 (444 nm) と良い一致が得られている。この結果の平坦部分の rms 測定精度は、 $\sim 0.06\text{rad}$ ($=\Lambda/51$) である。Fig. 4 の上図は、同じ試料を LD₁ の波長 ($\lambda_1=672\text{nm}$) を用い、

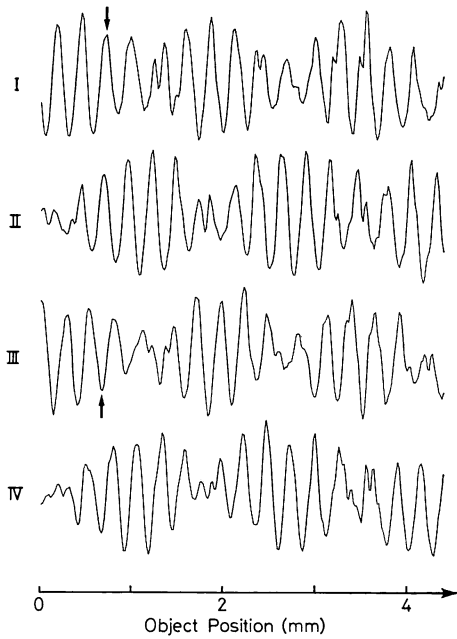


Fig. 3 Cross-sectional profiles of four sequential two-wavelength interferograms produced by two LDs as a function of object position. This shows the π phase difference between the intensities marked by arrows.

単一波長4ステップ位相シフト法により測定した結果で、段差の高さは ~ 96 nmとなっている。これは、段差の高さが測定限界の $\lambda_1/2$ を越えているので、真の高さから $\lambda_1/2$ を減算した測定量が被検位相として計測されており、位相測定の不確かさを残している。よって、2波長干渉法により測定領域の拡大が図られている。

4. 誤差解析

2章の測定原理において、干渉縞強度 I_1 と I_2 は、等しいと仮定されている。しかし、LD の注入電流変化により発振波長の偏移と同時に光出力が変化するので、干渉縞の強度が変動して(2)式の成立を脅かすことになる。本章では、干渉縞の強度変化と位相シフト量の誤差による測定精度の解析を記述する。

Fig. 5 は、(7)式の位相シフト量の変化による(1)式の干渉縞のバイアス強度 I_{kM} ($k=1, 2$) の変動を示している。簡単のためにバイアス強度は、位相シフト量がゼロのときに I_{0M} とおき、各々のステップ間隔の位相シフト量 $\pi/4$ rad に相当するバイアス強度の変化を ΔI とする。 I_{1M} と I_{2M} は、 $I_{1M} = I_{0M} + (j-5/2)\Delta I$, $I_{2M} = I_{0M} - (j-5/2)\Delta I$ となる。(5)式を満足する(7)式の位相シ

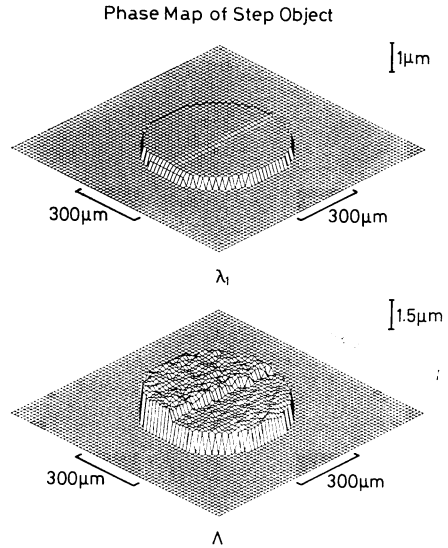


Fig. 4 3-D phase maps of a step height object with single-wavelength (λ_1) interferograms (top) and with two-wavelength (λ) interferograms (bottom) using phase-shifting techniques.

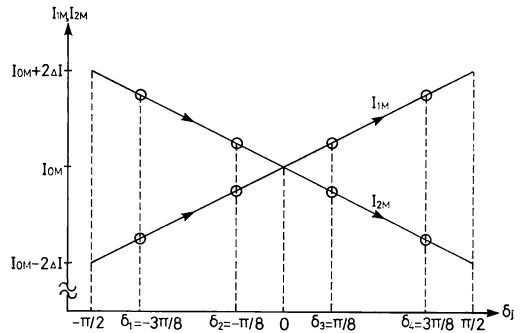


Fig. 5 The variation of the bias intensities of two interferograms as a function of phase shift δ_j . The bias intensity of each interferogram alters upward or downward. The phase shifts are marked by circles.

フト量 $2\delta_j$ の基で、Fig. 5 で示したバイアス強度の変化と位相シフト量に誤差 ϵ_k が付加されると、LD₁ と LD₂ の干渉縞の和からなる2波長干渉縞強度は、

$$i_j = I_{0M} \{1 + (j-5/2)\rho\} [1 + \gamma \cos \{\phi_1 - 2\delta_j(1 + \epsilon_1)\}] + I_{0M} \{1 - (j-5/2)\rho\} [1 + \gamma \cos \{\phi_2 + 2\delta_j(1 + \epsilon_2)\}] \quad (9)$$

となる。ここで $\gamma \equiv \gamma_1 = \gamma_2$, ρ は干渉縞のバイアス強度の変化率を表し $\rho \equiv \Delta I / I_{0M}$ である。LD₁ と LD₂ の ρ は一般に異なるが、3章で示したように干渉縞強度の変化量の割合がLD₁ で $\rho = 0.09$, LD₂ で $\rho = 0.08$ であるので、両者の ρ はほぼ等しい値である。よって、LD₁ と

LD₂ の共通の ρ は、それらの平均をとって $\rho \approx 0.09$ とする。以下 1), 2) の場合について位相誤差の解析を行う。

$$1) \quad \rho \neq 0, \quad \varepsilon_k = 0$$

$\rho \neq 0, \quad \varepsilon_k = 0$ とおき (9) 式の $i_1 \sim i_4$ を (8) 式に代入して導いた位相誤差を含む $\tan \Phi'$ は、

$$\tan \Phi' = \tan \Phi \frac{1 + (\rho/2) \tan \Psi}{1 - (\rho/2) \tan \Psi} \quad (10)$$

となる。(10)式から

$$\tan \Phi' - \tan \Phi = \frac{\rho \tan \Phi \tan \Psi}{1 - (\rho/2) \tan \Psi}$$

が成り立ち、次式

$$\sin(\Phi' - \Phi) = \frac{\rho \cos \Phi' \sin \Phi \tan \Psi}{1 - (\rho/2) \tan \Psi} \quad (11)$$

が成立する。ここで $\Phi = |\phi_1 - \phi_2|/2$ と $\Psi = (\phi_1 + \phi_2)/2$ の関係式を用いている。さらに、 $\Phi' \approx \Phi$ 、 $\rho \ll 1$ の条件を用いると、(11)式の位相誤差は近似的に、

$$\Phi' - \Phi \approx (\rho/2) \sin 2\Phi \tan \Psi \quad (12)$$

となる。

$$2) \quad \rho = 0, \quad \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$$

$\rho = 0, \quad \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ における (9) 式の干渉縞強度 $i_1 \sim i_4$ を (8) 式に代入して導いた $\tan \Phi'$ は、

$$\tan \Phi' = \frac{\tan \Phi - \tan(\pi\varepsilon_1/4) \tan \Psi}{1 - \tan(\pi\varepsilon_1/4) \tan \Phi \tan \Psi} \quad (13)$$

となる。(13)式の ε_1 についての Taylor 展開を行い、(12)式と同様な近似 ($\Phi' \approx \Phi$ 、 $\varepsilon_1 \ll 1$) を使用した場合の (13)式は

$$\Phi' - \Phi \approx (-\pi\varepsilon_1/4) \cos 2\Phi \tan \Psi \quad (14)$$

となる。

Fig. 6 は、 ρ と ε_k の誤差が存在する場合の位相 Φ に対する位相誤差 $\Phi' - \Phi$ を計算により求めた結果である。Fig. 6 (a) は、干渉縞強度の変化のみがある場合 ($\rho = 0.09$ 、 $\varepsilon_k = 0$) である。LD の波長 λ_1 と λ_2 から、等価波長 Λ と平均波長 Γ との比が $\Lambda \approx 13\Gamma$ であるので、位相 Φ と Ψ との比は $\Phi \approx \Psi/13$ となる。よって、Fig. 6 (a) の位相誤差は、(12)式の $\tan \Psi$ による 13 個の繰り返しの飛びと (12)式の $\sin 2\Phi$ で表される包絡線との積で示すことができる。干渉縞に強度変化がなく ($\rho = 0$)、二つの干渉縞に等量の位相シフト量の誤差 ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$) があるときの結果が Fig. 6 (b) で示され、 2Φ の周期を有する正弦関数の位相誤差となっている。これは (5)式の位相シフト条件を満足しているので、単一波長位相シフト干渉法で位相シフト量の誤差による位相誤差の分布と同様な 180° の周期性を表している¹³⁾。Fig. 6 (c) は、互いに符号の異なる位相シフト量の誤差がある

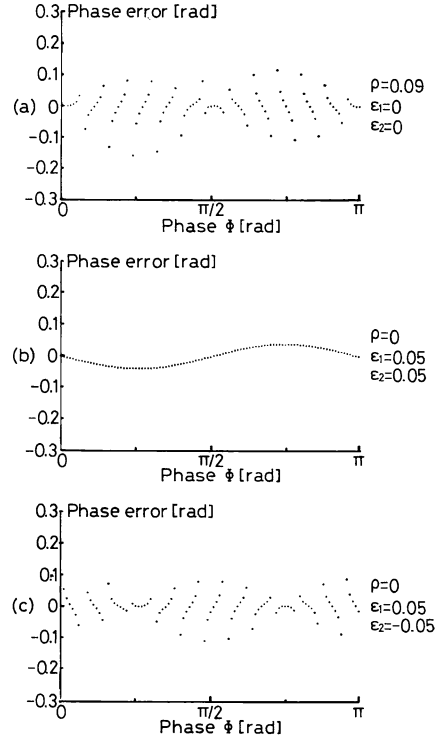


Fig. 6 Numerical results of phase error versus phase Φ for the intensity changes and the phase-shift error: (a) $\rho = 0.09$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$, (b) $\rho = 0$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.05$, and (c) $\rho = 0$, $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = 0.05$.

場合 ($\rho = 0$ 、 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = 0.05$) で、(14)式で示した位相誤差を表し、(12)式と比べると 45° 偏移した位相誤差分布を示している。測定精度 (rms 値) は、(a) が 0.10 rad、(b) が 0.01 rad、(c) が 0.10 rad であり、干渉縞の強度変化の補正と位相シフト量の校正が、測定精度の向上に必要なことがわかる。さらに干渉縞強度変化を補正した後の位相シフト量の誤差が等量に与えられた場合 (Fig. 6 (b)) が、良好な精度を示している。

Fig. 7 は、前述の測定精度を調べるために傾斜された被検ミラーを測定した結果で、横軸が平均波長 Γ で規格化した物体位置、縦軸は被検位相である。Fig. 7 (a) は、干渉縞の強度変化と位相シフト量の校正を行わない結果である。Fig. 6 で解析した Ψ の周期の位相誤差が観察され、rms 値は 0.25 rad である。Fig. 7 (b) は、3章で記述した位相シフト量の校正を行った結果である。測定位相誤差が少なくなり、rms 値は 0.10 rad と改善され、干渉縞の強度変化が存在し、位相シフト量の誤差がない場合の Fig. 6 (a) のシミュレーション結果の rms 測定精度と一致している。Fig. 7 (c) は、位相シフト量の校正の後バイアス強度の変化を補正した結

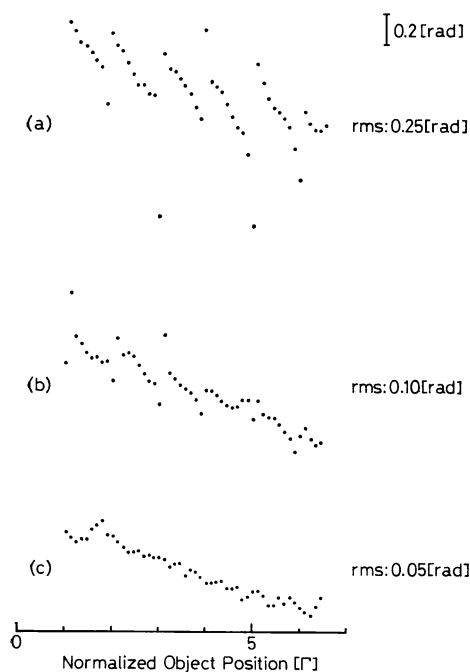


Fig. 7 Cross section of the measured phase distribution of a tilted mirror versus object position normalized by Γ : (a) using a free measurement, (b) performing the phase calibration, and (c) compensating for the changes in the LD intensities by ND filters together with the phase calibration.

果で、rms 値は 0.05 rad とさらに改善されている。強度の補正は、各々の LD の後ろに置かれた 2 枚の ND フィルタにより光強度を調整して、Fig. 1 のフォトダイオードで検出されたそれぞれの干涉縞強度のモニター電圧を基準の LD のバイアス電流における干涉縞強度に合うように行っている。以上の実験結果は、強度変化の補正と位相シフト量の校正が測定精度を向上させることを示している。

5. 強度変化に不感な 5 ステップ法を用いる測定

本章では、LD の電流変化による光出力の変動に不感な 5 ステップの位相導出アルゴリズムを提案する。位相シフト量は、

$$\delta_j = (j-3)\pi/4 \quad (j=1\sim 5) \quad (15)$$

であり、その間隔は $\pi/4$ である。(15)式の位相シフト量の変化によるバイアス強度の変動を考慮し、 $\varepsilon_s=0$ を代入した(9)式の 2 波長干涉縞強度は、

$$i_j = I_{0M} \{1 + (j-3)\rho\} \{1 + \gamma \cos(\phi_1 - 2\delta_j)\}$$

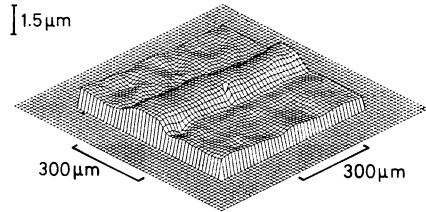


Fig. 8 3-D phase map of a diffraction grating using the five-step phase-extraction algorithm insensitive to the intensity changes of interferograms.

$$+ I_{0M} \{1 - (j-3)\rho\} \{1 + \gamma \cos(\phi_2 + 2\delta_j)\} \quad (16)$$

となる。(16)式の $i_1 \sim i_5$ を用い、被検位相 Φ は、

$$\Phi = \arctan \{(-2i_2 + 2i_4)/(-i_1 + 2i_3 - i_5)\} \quad (17)$$

で計算され ρ の変化を相殺して導出される。

3章の実験で示した LD の電流変化量 Δi_k を使用して、(15)式の位相ステップに従う電流変化により干涉縞を走査し、(17)式のアルゴリズムを用いて標準回折格子を測定した結果が Fig. 8 である。測定された回折格子の高さは ~ 480 nm で、測定ノイズが目立たない位相分布が得られている。この結果から、rms 測定精度は ~ 0.04 rad ($= 1/75$) であり、Fig. 4 の下図のそれに比べ、精度の向上が図られている。よって、(17)式に従う 5 ステップ法による測定は、それぞれの干涉縞強度の変動に依存しない位相計算法である。

6. ま と め

本稿は、発振周波数の異なる 2 種類の LD を使用した 2 波長位相シフト干渉法の原理と実験について記述した。ここでは、LD の注入電流変化による周波数変調特性を利用して、位相シフト量を等しく反対方向へ与える条件の基で干涉縞を走査する。従来の干涉計に使用されている一つの PZT 鏡の移動による位相変化は、二つの波長で異なり同時に本報告の位相シフト条件を満足することができない。このことは、LD の周波数変調特性を用いる 2 波長位相シフト干涉計により実現することができる。さらにこの干涉法は、電気的な復調技術を用いることなしに、等価波長を単位とした空間的な 2 次元位相分布を導出することができる。また、LD の光出力による干涉縞の強度変化と位相シフト量の誤差による測定精度が解析された。さらに、強度変化に対して不感で測定精度が低下しない 5 ステップ法を用いる位相計算法を提案し、その有効性が実験で確かめられている。本干渉法は、LD の発振波長を注入電流や温度により変化させる

ことにより, 等価波長を変化させ測定領域を拡大することが可能である。

文 献

- 1) K. Creath: "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics XXVI*, ed. E. Wolf (Elsevier Science Publishers, London, 1988) pp. 349-393.
- 2) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 3) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 37-40.
- 4) Y. Ishii: "Recent developments in laser-diode interferometry," *Opt. Laser Eng.*, **14** (1991) 293-309.
- 5) J. C. Wyant: "Testing aspherics using two-wavelength holography," *Appl. Opt.*, **10** (1971) 2113-2118.
- 6) A. F. Fercher, H. Z. Hu and U. Vry: "Rough surface interferometry with a two-wavelength heterodyne speckle interferometer," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2181-2188.
- 7) C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe: "Optical ranging by wavelength multiplexed interferometry," *J. Appl. Phys.*, **60** (1986) 1900-1903.
- 8) A. J. den Boef: "Two-wavelength scanning spot interferometer using single-frequency diode lasers," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 306-311.
- 9) R. Dändliker, R. Thalmann and D. Prongué: "Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 339-341.
- 10) C. Polhemus: "Two-wavelength interferometry," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 2071-2074.
- 11) Yeou-Yen Cheng and J. C. Wyant: "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 4539-4543.
- 12) Y. Ishii and R. Onodera: "Two-wavelength laser-diode interferometry that uses phase-shifting techniques," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1523-1525.
- 13) Yeou-Yen Cheng and J. C. Wyant: "Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3049-3052.