

周波数変調半導体レーザーを用いた干渉計測法

小野寺 理文

レーザーが発明され、コヒーレントな光を身近に利用できるようになってから 40 年が経過し、光干渉計測をはじめとして、レーザーがさまざまな分野へ応用されるようになった。その中で、半導体レーザー (laser diode: LD) は、コンパクトなサイズを有し、低消費電力で高効率なレーザー発振が可能であり、他のレーザーと比較しても十分な高コヒーレンス光源であるなどの特徴をもっている。また、半導体レーザーは、閾値以上の電流で駆動するレーザー光の発振波長が注入電流の増加に伴って、長波長側へ偏移 (レッドシフト) する直接周波数変調特性を有しており、この特性を利用した干渉計測法が種々提案されており¹⁻¹⁶⁾、いくつかの解説がなされている^{17,18)}。本稿は、注入電流によって発振周波数を簡便に変調することができる半導体レーザーを電子回路制御技術を利用して、コンピューターや計測機器へ連結した、いくつかの新規な干渉計測法について、筆者らがこれまでに行ってきた研究を主体におき概説する。

1. 位相シフト法への応用

図 1 に示す光路差 l を有するトワイマン・グリーン干渉計において、LD の注入電流を 4 段階で変化させると、次式で示される位相シフトを伴った干渉信号が CCD カメラで検出される。

$$I_j(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - (j-1)\Delta\phi] \quad (j=1, \dots, 4) \quad (1)$$

ここで、 $A(x, y)$ はバイアス強度、 $B(x, y)$ は干渉縞の変調強度、 $\phi(x, y)$ は被検位相分布である。式 (1) の $\Delta\phi$ は、1 段階の電流変化 Δi に伴う波長偏移 $\Delta\lambda = \alpha\Delta i$ に

よって生じる位相シフト量で

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda^2} l\alpha\Delta i \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 λ は光源の波長、 α は LD の電流変調効率で、個体差はあるが通常 $\alpha = 0.006 \text{ nm/mA}$ 程度となっている。光路差 l と注入電流変化 Δi をあらかじめ調整することにより、 $\Delta\phi = \pi/2$ と設定でき、4 段階の注入電流変化により、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相シフトを生成することができる。たとえば、波長 $\lambda = 780 \text{ nm}$ の LD に対して、 $l = 40 \text{ mm}$ 、 $\Delta i = 0.6 \text{ mA}$ とすると $\Delta\phi = \pi/2$ となる。このように、LD の注入電流を変調することによって、容易に干渉縞を位相シフトすることが可能となる。LD 位相シフト干渉法は、4 段階の位相シフトを含んだ干渉縞強度分布をフレームメモリーに取り込み、位相シフト法のアルゴリズムに従って、計算機により被検位相分布 $\phi(x, y)$ を計測することができる。

筆者らは、図 1 の実験系で 4 段階に変化された LD の注入電流と CCD カメラのビデオ出力に含まれるフィールド信号の同期を行い、フレームレート (1/30 秒) で位相シフトされた干渉縞強度をビデオレコーダーで長時間記録し、その後任意の時間での干渉縞の再生を行い、干渉位相のダイナミックな変化を求めることができる干渉システムについて提案した¹⁹⁾。連続して位相シフトされた 4 枚の干渉縞画像は、フレーム番号が記録されているビデオの音声情報を利用して、ビデオテープから再生され、被検位相分布の計算に使用される。図 2 は、実験結果の一例で、はんだごて (iron) を加熱して生じる空気の擾乱を 60 分間観察した中の 12 分 30 秒 1 フレームから 16 フレームまでの 16/30 秒 (約 0.5 秒) にわたる 16 枚の干渉縞画像で、ビデオテープから再生され、フレームメモリーに記録されたものである。おのおのの縦の列にある 4 枚の干渉縞画像

職業能力開発総合大学校電子工学科 (〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1)
E-mail: onodera@uitech.ac.jp

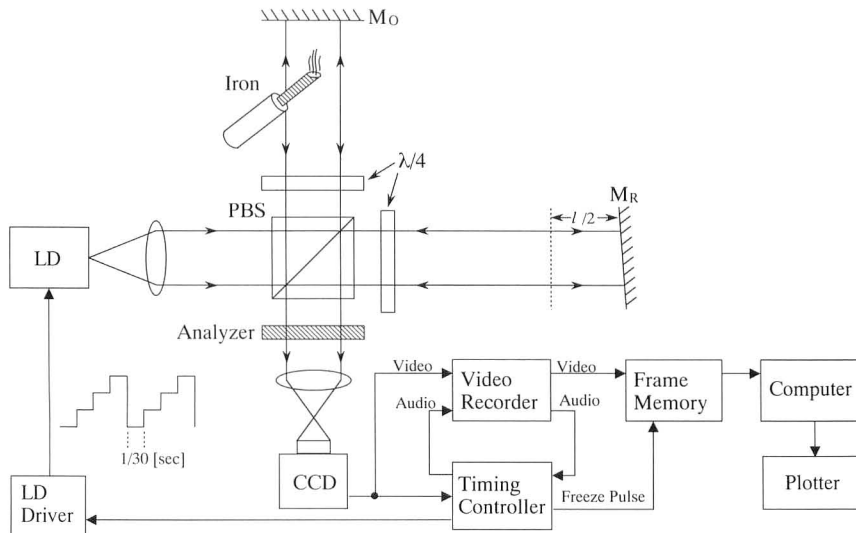


図1 半導体レーザー位相シフト干渉計。



図2 ビデオレートで位相シフトされた干渉縞画像。

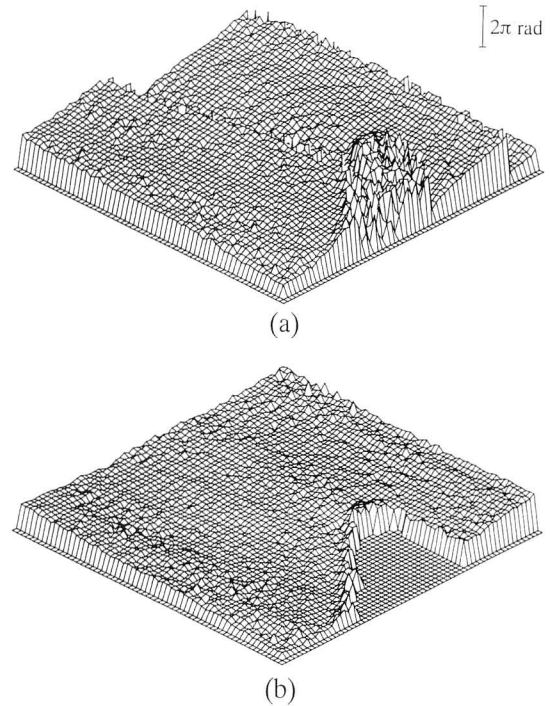


図3 (a) 図2の干渉縞の位相マップ, (b) はんだごての加熱による空気の位相変化。

は、同じ位相シフト量を含んでおり、ほぼ等しい干渉パターンを示している。また縦の4列の比較から、フレームレートで $\pi/2$ ずつ位相シフトされた干渉縞がビデオテープに記録され、その後所望のフレームが再生できることが示された。図3(a)は、図2の2列目にある12分30秒5~8フレームの干渉縞画像から計算された位相マップである。さらに図3(a)を位相アンラップし、図1にある参照鏡 (M_R) のチルト位相を引いたものが図3(b)で、はんだごての加熱によって生じた空気の擾乱による位相変化の2次元分布を表している。図中、はんだごてがある場所の位相は、0としてある。以上より、半導体レーザーの周波数偏移により生じた位相シフトと検出器の撮像レートを同期させることにより、干渉縞のダイナミックな変化を長時間観察し、その中から任意の時間における被検位相分布

を測定できることが示された。

半導体レーザーの光出力は、注入電流とともに増加するので、式(1)の $A(x,y)$, $B(x,y)$ が位相シフトとともに変化することになる。この変動は、 $A(x,y)$, $B(x,y)$ を定数として扱う位相シフト法的前提条件を満足せず、計算された位相分布に位相誤差が生じるようになる。筆者らは、この誤差を周波数面でフーリエ解析し、定量的な誤差式を導出した。さらに、半導体レーザー光出力の変動に不感に、干渉位相を計算できる6点法アルゴリズムを新たに

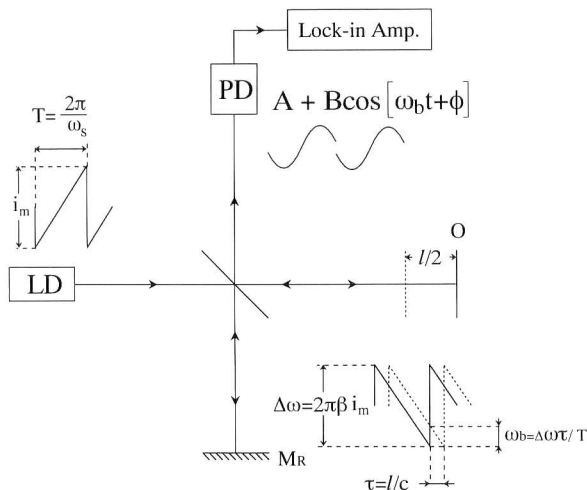


図4 半導体レーザーヘテロダイン干渉計。

開発し、実験によりその有効性を確かめた²⁰⁾。

2. 光ヘテロダイン法への応用

図4の実験系において、LDの注入電流は、周期 $T = 2\pi/\omega_s$ 、変調振幅 i_m の鋸歯状波電流により駆動される。レーザー光の発振周波数は、LDの直接周波数変調特性により、変調振幅 $\Delta\omega = 2\pi\beta i_m$ で鋸歯状に変化する。ここで、 β は式(2)の α と $\beta = -ac/\lambda^2$ で関係づけられ、およそ $\beta = -3\text{GHz}/\text{mA}$ となる。図中に実線で示してある参照光の周波数変化と点線で示してある物体光の周波数変化との間に時間遅れ $\tau = l/c$ が生ずるので、二光束間に周波数差 $\Delta\omega\tau/T$ が生成され、次式で表されるビート周波数となる。

$$\omega_b = \omega_s \frac{l\beta}{c} i_m \quad (3)$$

ビート周波数 ω_b は、変調電流振幅 i_m により、任意に設定でき、通常 $\omega_b = \omega_s$ となるように調整される。フォトダイオード (PD) で検出される干渉縞信号は、

$$s(t) = A + B\cos[\omega_b t + \phi] \quad (4)$$

となり、ロックインアンプへ入力され、 ω_s を参照周波数として、被検位相 ϕ がヘテロダイン検出される。このように、LDの注入電流を鋸歯状波で変調することによって、時間キャリアを干渉システムへ導入することが可能となる。

筆者らは、半導体レーザーヘテロダイン干渉法において、変調周波数 ω_s とビート周波数 ω_b が異なることに起因する位相誤差をフーリエ解析し、干渉信号の $1/2$ 周期 (π の周期) の誤差が生成されることを示した。さらに、位相誤差を除去するため、変調周波数とビート周波数を一致させるための電気的な校正方法を提案している²¹⁾。校正回路は、鋸歯状波電流波形の1周期を基準クロック信号の

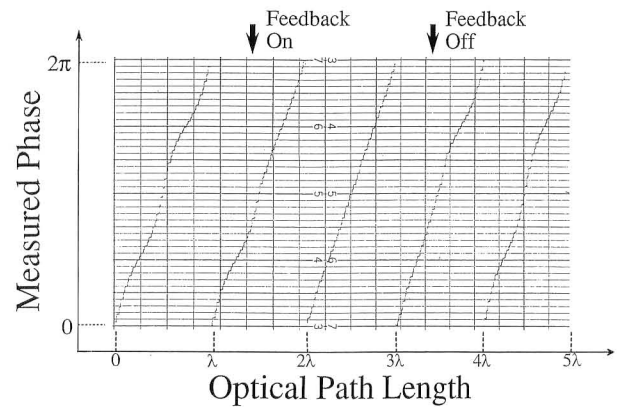


図5 校正回路を用いた光路長変化の測定結果。

256倍と設定し、干渉ビート信号の半周期が基準クロック信号の128倍となるように、鋸歯状波電流振幅を電氣的に制御している。図5は、図4の光学系で物体ミラーOを電歪素子 (PZT) により光軸方向に一定速度で変位させたときの測定結果で、光路長の増加に伴い 0 から 2π に変化する被検位相が測定されている。図中フィードバックオンとオフの間だけ、校正回路は動作しており、校正回路が働いていないときは、 π の周期の位相誤差が生じ、校正回路を動作させると誤差が除去され、光路長に対して線形に変化する位相が測定される。

筆者らは、半導体レーザーヘテロダイン干渉法において、鋸歯状波電流変化に伴うレーザーパワー変動によって生ずる位相誤差を理論的に解析し、実験により確かめた。さらに、スーパーluminescentダイオードを光増幅器として利用した光パワーが一定な周波数変調光源を実現し、位相誤差の除去についての実験結果を記述した²²⁾。その他、LDの周波数変調によって導入された時間キャリアを利用したものとして、次のような研究を行った。時間キャリアの異なる2つの半導体レーザーヘテロダイン干渉計を波長多重し、各波長に対する干渉位相を独立にヘテロダイン検出して、合致法の原理に基づいて干渉次数を実時間で決定し、単一波長の精度を保ちながら、等価波長まで測定領域を拡大した二波長干渉計について発表した²³⁾。鋸歯状波電流で周波数変調された2つの半導体レーザーを光源としたヘテロダイン干渉計で、干渉ビート信号が時間多重され、おのおのの波長における干渉位相の差に相当する等価位相が1台のロックインアンプで測定され、測定領域が等価波長まで拡大することを実験的に確かめた²⁴⁾。

3. 光リフレクトメトリーへの応用

筆者らは、3次元物体の奥行き方向の反射率分布を測定するひとつの方法として、LD注入電流を鋸歯状に変調

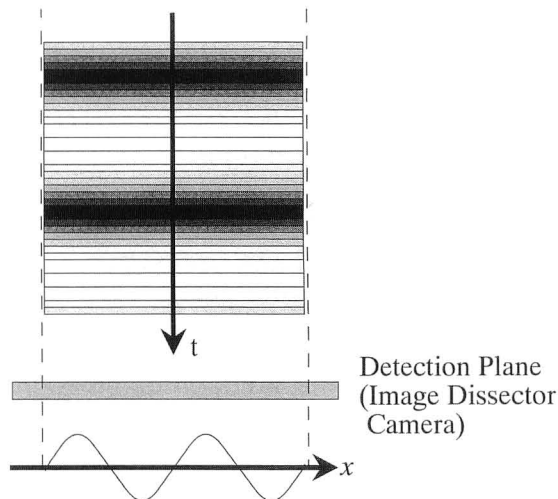
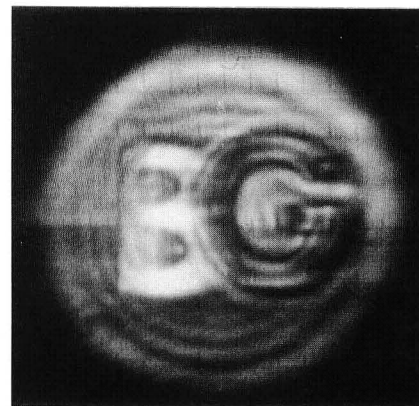
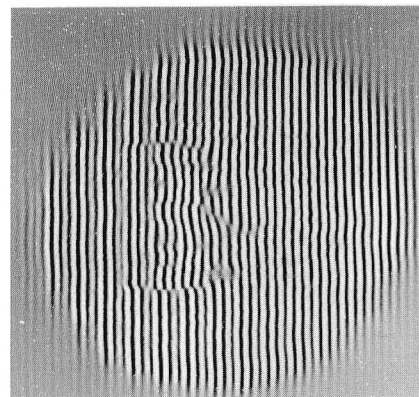


図6 干渉信号の時空間変換の様式図。

し、任意の反射位置にある物体の複素振幅で変調されたビート信号に同期検波を行い、選択的に2次元干渉縞情報を抽出することができる光計測法について提案した²⁵⁾。さらに、複数の多重位相物体の干渉縞情報を同時に取り出すことができる多重イメージング法について報告している²⁶⁾。式(3)で示したように、ビート周波数は光路差 l に比例しているため、LD注入電流を鋸歯状に変調することで、2次元干渉縞強度分布全体に光路差に比例した時間キャリアを与えることができる。ここで、時間キャリアと干渉縞の空間的サンプリングの同期を行い、干渉信号の時空間変換すると、干渉縞の2次元位相分布の情報が時間キャリア信号の振幅変調成分へ変換することができる。時間キャリアと空間的サンプリングの同期は、 x, y 偏向信号によりアドレスされた検出面上の任意の位置における光強度を検出することができるイメージ・ディセクター・カメラを利用し、カメラの x, y 偏向信号と時間キャリアを生成するためのLDの鋸歯状波電流変調信号を同期すれば達成できる。図6は、干渉信号の時空間変換の様子を示した様式図で、実際には干渉縞の x 方向位相分布によって、時間キャリア信号が振幅変調される。イメージ・ディセクター・カメラで検出された時間キャリア信号は、時間領域でフィルタリング処理(電氣的にチューニング)することによって、所望の光路差上にある位相物体の情報を含んでいる時間キャリア信号だけをリアルタイムで取り出すことができる。このようにして、2次元干渉縞情報の選択的な抽出が可能となる。図7は、実験結果の一例で、(a)は光源のLDを無変調のバイアス電流で駆動したときの実験結果で、異なる光路差にある2つの位相物体“B”と“G”の多重化した干渉縞が撮影されている。図7(b)は、位相物体“B”の情報を含んだ干渉縞だけを抽



(a)



(b)

図7 (a) 多重化された干渉縞画像、(b) 選択的にイメージされた干渉縞画像。

出した結果で、光路差に比例した時間キャリアを有する干渉信号がチューナーにより選択され、干渉縞画像としてイメージングされている。選択された干渉縞画像は、時間キャリアが時空間変換してできた空間キャリアを有しているため、フーリエ変換法を適用して、位相分布を求めることができる。

4. 二波長干渉法への応用

半導体レーザーを光源とした干渉計では、式(2)と式(3)で示したようにLDの注入電流変調の幅と向き(電流を増加させるのか、減少させるのか)によって位相シフト、あるいは時間キャリアの大きさと符号を任意に設定することができる。筆者らはこの性質を利用して、2つの半導体レーザーを用いて等価位相分布を測定できる二波長位相シフト干渉計を提案した²⁷⁾。式(1)のインコヒーレントの和で表せる二波長干渉縞分布は、

$$i_j(x, y) = a(x, y) + b_1(x, y) \cos[\phi_1(x, y) - \delta_{1j}] + b_2(x, y) \cos[\phi_2(x, y) - \delta_{2j}] \quad (5)$$

となる。ここで δ_{1j}, δ_{2j} は、2つのLDの注入電流変化に

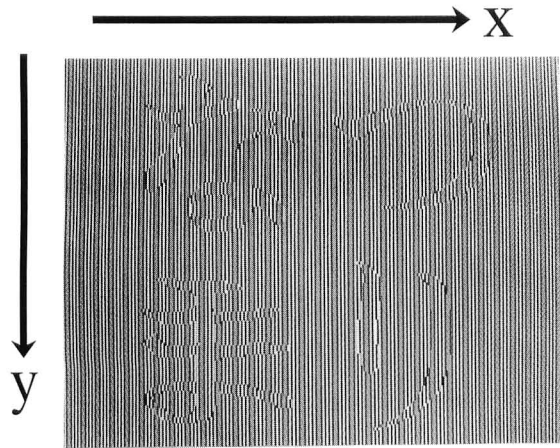


図8 空間キャリアを伴った二波長干渉縞.

より導入された位相シフト量で、注入電流を反対方向へ階段的に変化させることにより、お互いに大きさを等しく、符号が異なるように与えることができる。

$$\delta_{1j} = -\delta_{2j} \quad (6)$$

式(6)の位相シフト条件を用い、各波長での干渉縞の変調強度を等しくすることにより $b_1(x,y) = b_2(x,y)$ を仮定すると、式(5)は

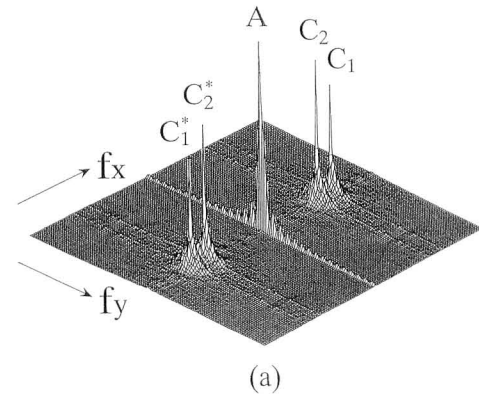
$$i_j = a + 2b_j \cos\left[\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right] \cos\left[\frac{\phi_1 - \phi_2}{2} - \delta_{1j}\right] \quad (7)$$

となり、二波長干渉縞の平均位相成分 $\cos[(\phi_1 + \phi_2)/2]$ を係数項として、等価位相成分 $\cos[(\phi_1 - \phi_2)/2]$ だけを位相シフトさせることができる。等価位相を単位とした空間的な2次元位相成分は、位相シフトされた二波長干渉縞画像から、位相シフト法の位相導出アルゴリズムを用いて求めることができる。さらに、2つのLDの電流変調によるパワー変動に不感な等価位相導出アルゴリズムを開発し、測定領域が等価波長まで拡大した実験結果を示した²⁸⁾。また、位相シフト法による半導体レーザー二波長干渉計における位相測定アルゴリズムをフーリエ面で解析し、2つの波長で符号が異なる位相シフト量を二波長干渉縞に与えることにより、等価位相が測定できることを示した²⁹⁾。二波長位相シフト干渉法で提案された位相シフト条件をLDヘテロダイン干渉計へ応用し、2種類の半導体レーザー注入電流を互いに逆方向の鋸歯状波波形で変調して、

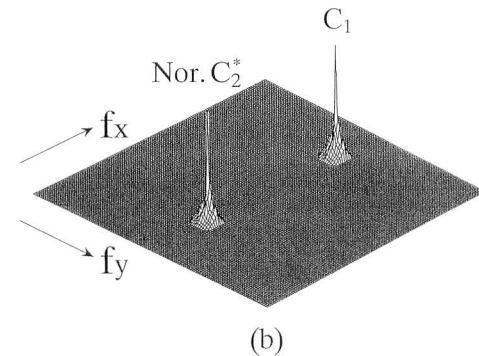
$$\omega_{b1} = -\omega_{b2} \quad (8)$$

で表される干渉ビート周波数の条件を与えると、1台の位相計で等価位相が検出できる二波長ヘテロダイン干渉法が報告された³⁰⁾。このように半導体レーザーの注入電流変調によって、多波長干渉信号のキャリア制御を行い、新規な干渉計測法を提案した。

筆者らは、半導体レーザー二波長干渉法で示した2つの



(a)



(b)

図9 (a) 図8の干渉縞のスペクトル分布, (b) λ_1 波長の+1次のスペクトルと規格化された λ_2 波長の-1次のスペクトル.

波長に対する干渉信号のキャリア条件に着目し、空間キャリアを有する二波長干渉縞画像から、フーリエ変換法を利用して、等価位相分布を求めることができる二波長干渉法について報告した³¹⁾。図8は、2つの波長を $\lambda_1 = 640$ nm, $\lambda_2 = 800$ nm とし、 512×512 のサンプル点で数値計算された等価波長 $\Lambda = 3.2 \mu\text{m}$ での二波長干渉縞である。被検物体は、ひらがなの“な”, “つ”の分布を有する高さ $1 \mu\text{m}$ の位相物体と“ま”, “り”の分布を有する高さ $0.3 \mu\text{m}$ の位相物体である。 x 方向に $102.4 \mu\text{m}$ のチルト成分が加えられており、各波長における空間キャリア一周波数 f_1, f_2 が生じている。二波長干渉縞の強度分布は、

$$g(x,y) = a(x,y) + b_1(x,y) \cos[2\pi f_1 x + \phi_1(x,y)] + b_2(x,y) \cos[2\pi f_2 x + \phi_2(x,y)] \quad (9)$$

と表せ、 $\phi_1(x,y), \phi_2(x,y)$ は波長 λ_1, λ_2 における被検位相分布を表している。式(9)は、

$$g(x,y) = a(x,y) + c_1(x,y) \exp(j2\pi f_1 x) + c_1^*(x,y) \exp(-j2\pi f_1 x) + c_2(x,y) \exp(j2\pi f_2 x) + c_2^*(x,y) \exp(-j2\pi f_2 x) \quad (10)$$

と表せ、 $c_k(x,y) = b_k(x,y) \exp[j\phi_k(x,y)]/2$ ($k=1,2$) である。式(10)をフーリエ変換すると、

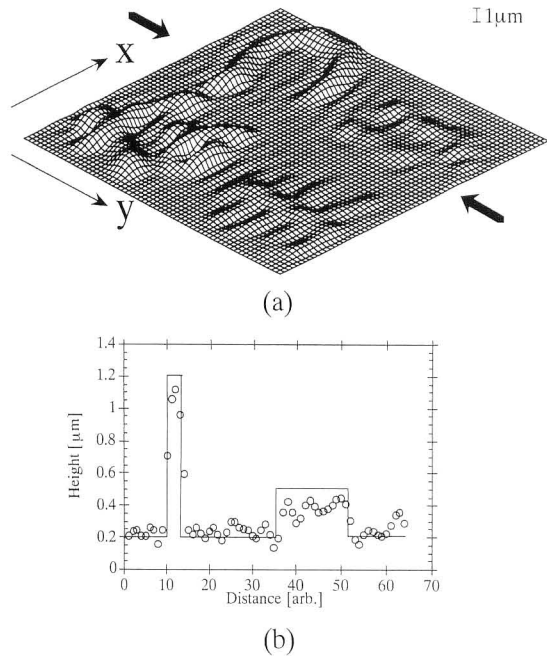


図10 (a) 図9(b) のスペクトルから計算された等価位相マップ, (b) 図(a) の矢印の位置における断面分布.

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C_1(f_x - f_1, f_y) + C_1^*(f_x + f_1, f_y) + C_2(f_x - f_2, f_y) + C_2^*(f_x + f_2, f_y) \quad (11)$$

となる. 図9(a) は, 図8の干渉縞をフーリエ変換して得られたスペクトル図で, 式(11)の5つの項に対応する5個の周波数スペクトルが現れている. ここで, 式(6)の位相シフト条件, 式(8)のビート周波数条件を二波長干渉縞のキャリア周波数の条件へ適用させ, 図9(b)に示してある λ_1 波長の+1次のスペクトル $C_1(f_x - f_1, f_y)$ と λ_2 波長の-1次のスペクトル $C_2^*(f_x + f_2, f_y)$ を取り出し, 原点に移動して逆フーリエ変換すると,

$$\begin{aligned} & \mathfrak{F}^{-1}[C_1(f_x, f_y) + C_2^*(f_x, f_y)] \\ &= b_1(x, y) \exp[j\phi_1(x, y)]/2 \\ &+ b_2(x, y) \exp[-j\phi_2(x, y)]/2 \\ &= b_1(x, y) \cos[(\phi_1 + \phi_2)/2] \exp[j((\phi_1 - \phi_2)/2)] \end{aligned} \quad (12)$$

となり, 式(12)の位相成分から等価位相分布を導出することができる. 式(12)の最後の変形で, 式(7)の導出と同様, $b_1(x, y) = b_2(x, y)$ の関係式が仮定されているが, フーリエ面で分離されたおのおのの周波数スペクトルの大きさが等しくなるように C_2^* を規格化した $Nor. C_2^*$ を用いて $b_1(x, y) = b_2(x, y)$ の条件を等価的に満足させ, 干渉縞の変調強度の不一致の影響を除去して等価位相分布を求めることができる. 図10は, 本手法で導出された等価波長を単位とした位相マップで, (a)の矢印で示された断面の分布が(b)に示してある. 図10(b)中の実

線は, あらかじめ仮定した被検物体の高さ分布であり, 実験結果とよく一致している.

本研究を行うにあたり, 直接ご指導いただきました職業能力開発総合大学校電子工学科教授石井行弘先生に深く感謝いたします. また, 同研究室の高橋毅講師, これまで卒論, 修論とともに仕事をした卒業生各位に感謝いたします. 最後に, これまでいろいろと支えてくれた妻, 久美子と2人の娘, 夏子と鞠子に心より感謝いたします.

文 献

- 1) M. Yonemura: "Wavelength-change characteristics of semiconductor lasers and their application to holographic contouring," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 1-3.
- 2) H. Kikuta, K. Iwata and R. Nagata: "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2976-2980.
- 3) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: "Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 233-235.
- 4) T. Kubota, M. Nara and T. Yoshino: "Interferometer for measuring displacement and distance," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 310-312.
- 5) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 37-40.
- 6) T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian, B. S. Lee and T. C. Strand: "Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 892-897.
- 7) K. Hotate and D.-T. Jong: "Quasiheterodyne optical fiber sensor with automated adjustment of the driving wave parameter," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2956-2961.
- 8) 小林喬郎: "半導体レーザーによる干渉測長技術", *光学*, **17** (1988) 279-284.
- 9) J. Ohtsubo and T. Aoshima: "A new method to separate the Doppler signal from the drift component using a laser diode frequency change," *Opt. Commun.*, **73** (1989) 101-105.
- 10) M. Imai and K. Kawakita: "Optical-heterodyne displacement measurement using a frequency-ramped laser diode," *Opt. Commun.*, **78** (1990) 113-117.
- 11) O. Sasaki, T. Yoshida and T. Suzuki: "Double sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer for distance measurement," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 3617-3621.
- 12) M. Suematsu and M. Takeda: "Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4046-4055.
- 13) K. Oka, T. Takeda and Y. Ohtsuka: "Optical heterodyne polarimeter for studying space- and time-dependent state of polarization of light," *J. Mod. Opt.*, **38** (1991) 1567-1580.
- 14) J. Kato, I. Yamaguchi and Q. Ping: "Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 77-83.
- 15) I. Yamaguchi and K. Hamano: "Multiplexed heterodyne fiber interferometer that uses laser-diode modulation," *Opt.*

- Lett., **20** (1995) 1661-1663.
- 16) Y. Otani, A. Tanahashi and T. Yoshizawa: "Light source with orthogonally linear polarized two-frequency beam from laser diode and surface profile measurement," *Opt. Eng.*, **35** (1996) 1070-1073.
 - 17) Y. Ishii: "Wavelength-tunable laser-diode interferometer," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 273-283.
 - 18) 山口一郎, 角田義人: 半導体レーザーと光計測 (学会出版センター, 1992).
 - 19) R. Onodera and Y. Ishii: "Frame-rate phase-shifting interferometer with a frequency-modulated laser diode," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 2045-2049.
 - 20) R. Onodera and Y. Ishii: "Phase-extraction analysis of laser-diode phase-shifting interferometry that is insensitive to changes in laser power," *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 139-146.
 - 21) R. Onodera and Y. Ishii: "Effect of beat frequency on the measured phase of laser-diode heterodyne interferometry," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 4355-4360.
 - 22) R. Onodera, Y. Ishii, N. Ohde, Y. Takahashi and T. Yoshino: "Effect of laser-diode power change on optical heterodyne interferometry," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **13** (1995) 675-681.
 - 23) R. Onodera and Y. Ishii: "Two-wavelength laser-diode interferometer with fractional fringe techniques," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 4740-4746.
 - 24) R. Onodera and Y. Ishii: "Time-multiplex two-wavelength heterodyne interferometer with frequency-ramped laser diodes," *Opt. Commun.*, **167** (1999) 47-51.
 - 25) R. Onodera and Y. Ishii: "Selective imaging with a frequency-modulated laser-diode interferometer," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 761-763.
 - 26) R. Onodera and Y. Ishii: "Multiplex imaging by a frequency-ramped laser-diode interferometer," *Opt. Commun.*, **149** (1998) 143-151.
 - 27) Y. Ishii and R. Onodera: "Two-wavelength laser-diode interferometry that uses phase-shifting techniques," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1523-1525.
 - 28) R. Onodera and Y. Ishii: "Two-wavelength phase-shifting interferometry insensitive to the intensity modulation of dual laser diodes," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5052-5061.
 - 29) R. Onodera and Y. Ishii: "Fourier description of phase-measuring process in two-wavelength phase-shifting interferometry," *Opt. Commun.*, **137** (1997) 27-30.
 - 30) R. Onodera and Y. Ishii: "Two-wavelength laser-diode heterodyne interferometry with one phase meter," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2502-2504.
 - 31) R. Onodera and Y. Ishii: "Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 7988-7994.

(2000年6月12日受理)