

## 解説

## 半導体レーザーの周波数変調特性を用いた干渉法

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1月23日受理)

Phase-Measuring Interferometry with a  
Frequency-Modulated Laser Diode

Yukihiro ISHII

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

## 1. ま え が き

位相測定干渉法に関する研究は、長い歴史を有し、内外の干渉計メーカーにより製作、市販され実用に供されている。この干渉計測法の原理は、ヘテロダイン干渉法<sup>1)</sup>とコンピュータによる数値計算に基づいており、参照光の位相を変化させるため、ピエゾ素子や音響光学素子などの位相シフター<sup>2)</sup>を使用している。近年、半導体レーザー (LD) は、信頼度が向上し、光エレクトロニクスの広範な分野で使用されている。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。すなわち、LD は ~10 GHz までの光波領域での簡単な VCO (電圧制御発振器) 素子とみなすことができる。この直接周波数変調特性は、早くから、ファイバ干渉計における位相補償<sup>3,4)</sup>による感度の最適化に用いられていた。さらに、LD の直接周波数変調を行い機械的な反射鏡の移動なしに、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、波面や変位を精度良く計測する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。

この LD のチューニング特性を利用した光計測法は種々提案されており、距離測定に重きをおいた詳細な解説<sup>5,6)</sup>がある。本稿では、LD の操作技術と干渉縞解析を含めた位相測定干渉法の原理と結果を報告する。LD の周波数変調の制御は、電子回路との整合性に優れフィー

ドバックの制御が行いやすく、外乱の影響を抑え位相測定を行うフィードバック干渉計の発展についても展望する。

## 2. 半導体レーザーの操作

長い可干渉距離を有し単一縦モード発振の屈折率導波型 LD は、干渉計の光源として都合が良く、多くの電気メーカーで製造されている。LD の発振波長は、注入電流の増加に伴って、長波長側にしだいに偏移していく。これは電流の増加に伴ってレーザーの活性層の温度が上昇し、熱効果により屈折率が大きくなることと、禁制帯幅が狭くなるために起こる現象である<sup>7)</sup>。また、活性領域の温度は、直接雰囲気温度により影響を受け変化する。したがって、電流により直接発振周波数を変調したい場合には、ペルチェ (Peltier) 素子を用いた温度制御 (ATC) 回路により雰囲気温度を一定に保つことが必要である。使用したレーザーは、AlGaAs (HL 7801) の電流 41 mA、放熱板の温度 20°C で波長  $\lambda_0=789$  nm である。レーザーは、厚い銅版に装着し、この銅版の裏面に放熱板と一体化したペルチェ素子を付ける。レーザーの雰囲気温度は、温度トランスデューサにより検出され、設定電圧 (設定温度に相当) との差信号電圧はペルチェ素子にかかるパルス信号から成る平均電圧に変換され、温度の比例制御を行う。この操作により LD の加熱冷却が、円滑に行える<sup>8)</sup>。図 1 は、電流を一定 (41 mA) に保ち 1 時間あたりの LD の波長変動を調べた結果である。

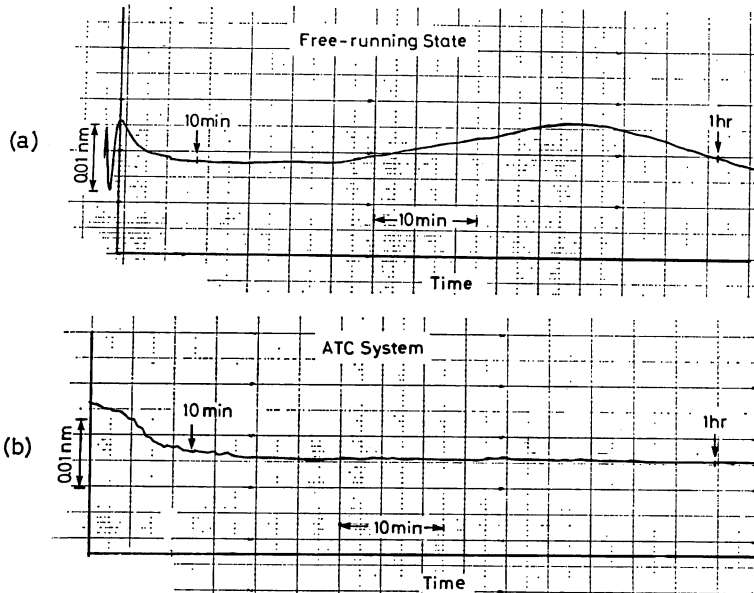


図1 一定電流のもとで1時間あたりのレーザーの波長変動。(a)はATC装置を動作しない場合、(b)は動作したときの結果。

雰囲気温度による波長変動は、平行平板(厚さ 15 mm, 屈折率 1.51) シェアリング干渉計を使用して、干渉縞の移動として測定する。この干渉計は、共通光路型となり空気の擾乱に影響されない。図の縦軸は、干渉縞の 1/2 縞の変動に相当する波長変化を示す。(a)は、ATC 装置を動作しない場合、(b)は動作したときの結果であり、約 0.002 nm 以内の安定性を示している。このように、長い時間にわたりたくさんの干渉計測を行う場合、ATC 装置の使用が必要となる。

### 3. LD 干渉計の測定原理

図2のLD干渉法の測定手順に従って、測定原理を説明する。図3に示すトワイマン・グリーン干渉計の不等光路差  $l_0$  は、一定の光路差  $l$  と被検物体の未知の光路長  $2w(x, y)$  の和である。干渉計は、LDの戻り光の影響を避けるため偏光ビームスプリッター(PBS)と1/4波長板の組み合わせを用いる。LDの電流が時間  $t$  に対して  $i_0$  から  $i_0 + \Delta i$  まで線形に変化したとすると、それによる波長偏移  $\Delta \lambda$  は、 $\Delta \lambda = \alpha \Delta i = \alpha \beta t$  と書ける。ここで  $\alpha$  は電流変調効率であり、 $\beta$  は定数である。不等光路差  $l_0$  より与えられる変調された位相は、

$$\Phi_0 + \Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(2w + l) - \left( \frac{2\pi l \alpha \beta t}{\lambda_0^2} + \frac{2\pi 2w \alpha \beta t}{\lambda_0^2} \right) \quad (1)$$

となる。光電検出面における干渉縞の強度分布は、

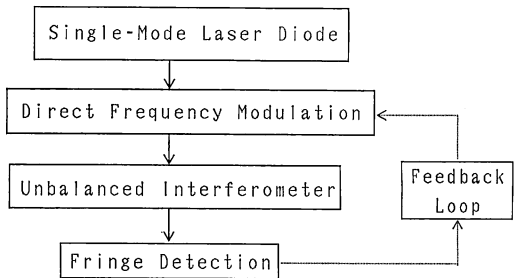


図2 LD干渉計の測定手順フローチャート

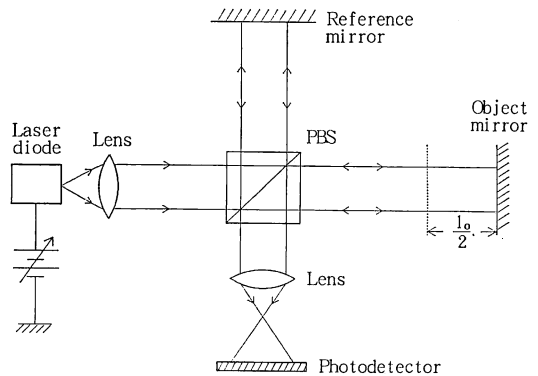


図3 周波数変調半導体レーザーを用いるトワイマン・グリーン干渉計の構成

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi_0(x, y) + \Delta \Phi(t)] \quad (2)$$

となる。ここで、(1)式の最後の項は、光路差  $l$  が被検

光路  $w$  より十分大きい条件のもとで無視されている。また、従来の干渉計の位相変調は、参照光路の位相を変化させているが、ここでの位相シフト量は、干渉計の両腕の光路差により与えられ、位相変調を受ける光路が異なる。よって直接周波数変調された LD 干渉法の最終目標は、電流により位相変調  $\Delta\phi$  を変化させ未知の被検位相  $\phi_0$  を導出することである。

3.1 正弦波位相変調干渉法<sup>9)</sup>

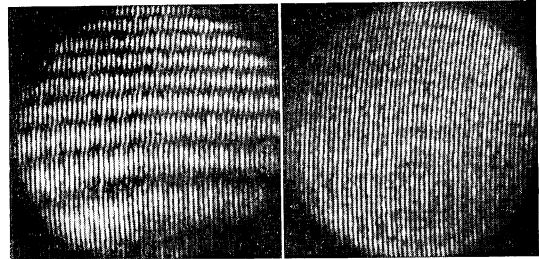
(2)式の位相  $\Delta\phi$  を周波数  $f$  の正弦波で変調を行い、 $f$  と  $2f$  のフーリエスペクトルの比の逆正接を計算することにより、被検位相  $\phi_0$  が測定される。この干渉計測法は、正弦波状に注入電流を変調するだけでよく、簡単な信号処理回路で  $\phi_0$  を復調できる。さらに、外乱による位相変動信号をフィードバック信号として用い、LD の電流に帰還させ外乱の影響を除去することができる<sup>10)</sup>。また二つの LD を使用して  $100 \mu\text{m}$  の合成波長を発生し、測定領域 (数  $\mu\text{m}$  ~ 数  $10 \mu\text{m}$ ) が拡張される<sup>11)</sup>。

3.2 距離測定干渉法

もし波長  $\lambda_0$  と LD の波長偏移  $\Delta\lambda$  があらかじめ測定されているならば、変調位相変化  $\Delta\phi$  が何らかの方法、たとえば音響光学素子を用いたヘテロダイン復調技術<sup>12)</sup>により、またフリンジカウンタ<sup>13)</sup>により検出することで、 $w=0$  とした(1)式の第 2 項から絶対距離  $l$  が導出できる。これらの測定法は、参考文献 5), 6) に詳しく説明されているので、触れないでおく。

3.3 フィードバック干渉法

フィードバック干渉計は、図 2 の点線で示すように、外乱による干渉縞の変化を検出し帰還制御回路の参照電圧と比較し LD の注入電流にフィードバックし干渉計の安定化を図ることに基づいている<sup>14)</sup>。図 4 は、干渉計



(a) Feedback (on) (b) Feedback (off)

図 4 フィードバック干渉計による干渉縞の安定化。フィードバック回路動作時(a)と非動作時(b)。

に機械的外乱 (加震周波数 20 Hz) を与えたときの干渉縞を示したものである。測定物体は、ダイヤモンドで切削された Al ディスクである。フィードバック機構 (a) により干渉縞が安定化され図 3 の参照鏡を傾けたチルト縞が明らかになっているのに対して、フィードバック非動作時 (b) は、干渉縞が変動し、被検切削面の形状による反射強度分布のみが可視化されている。このフィードバック系を用いると、(2)式の位相  $\phi_0$  は、変調位相  $\Delta\phi$  を一定の位相  $2\pi l/\lambda_0$  にロックするように電流を変化させることにより測定される。すなわち、 $2\pi l/\lambda_0 = 2\pi(2w+l)/(\lambda_0+\Delta\lambda)$  となり、物体形状  $2w$  は、 $2w \approx l\Delta\lambda/\lambda_0 = l\alpha\Delta i/\lambda_0$  より前もって電流変調効率  $\alpha$  を測定しておき電流変化  $\Delta i$  を計測することにより求まる<sup>15)</sup>。測定には  $\lambda_0=789 \text{ nm}$  の LD を用い、 $l=100 \text{ mm}$ 、 $\alpha=6 \times 10^{-3} \text{ nm/mA}$  であり、測定時間は 200 ms (サンプル数 50 個) であり温度変化による LD の波長ドリフトの影響はなく、繰返し測定精度は約  $\lambda_0/79$  以下となっている。この技術は、早くからファイバ干渉センサーの位相補償を行う際に使用されている<sup>4, 16)</sup>。

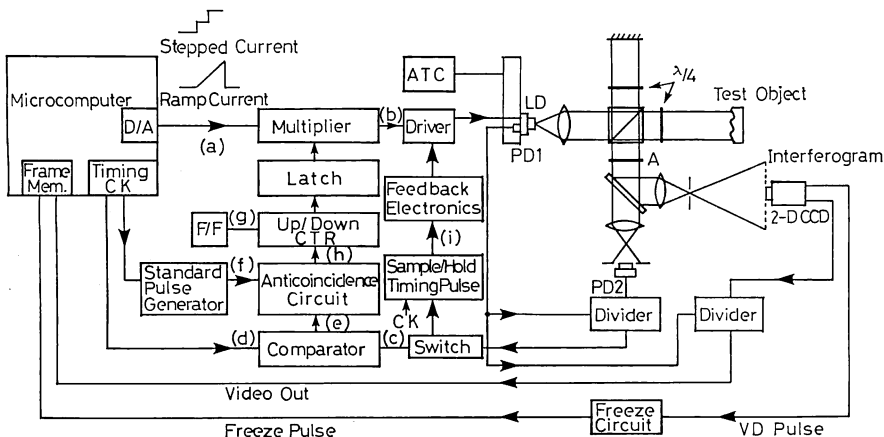


図 5 位相シフト量を安定化するための位相シフトフィードバック干渉計

LD の特徴を利用した2重共振器を有する簡単な構成のフィードバック干渉計がある<sup>14,17)</sup>。これは、LD の端面と外部反射面の距離変化を原因とする外部共振器のQ 値の変化による LD の戻り光の出力変動を検出し、距離か変位を測定するものである。

### 3.4 位相シフト干渉法

(1)式の波長偏移が、図5のコンピュータから制御される電流変化<sup>18)</sup>のように、1縞内を段階的にまたは連続的に走査することを考えると  $j$  番目の位相シフト量  $\delta_j$  は<sup>19)</sup>、

$$\delta_j = j \frac{2\pi l \alpha \Delta i}{\lambda_0^2} \quad (j=1, \dots, N) \quad (3)$$

となる。ここで  $N$  は1縞内の走査点の数であり、電流変調効率  $\alpha$  は、 $\Delta i$  を一つの位相シフトを与える最小の注入電流の変化量とすると、 $\alpha = \Delta \lambda / (j \Delta i)$  で与えられる。 $j$  番目の位相シフトを与えた干渉縞の強度分布は、(2)式で  $\Delta \phi$  の代りに  $\delta_j$  としたものである。また、LD の光強度が電流とともに増加するので、出力変動が無視できなくなる。この場合には光出力を光電素子によりモニターし<sup>19)</sup>、また干渉縞の計算により<sup>20)</sup>縞強度の正規化手順を実行する。また、位相変調を受ける  $l_0$  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することもできる。実際に見積もった例として<sup>21)</sup>、1縞内の中間の点まで走査に要する電流を  $\Delta i = 1.46 \text{ mA}$  (LD: HL7802) とすると、強度分布の変動は5% となる。それを原因とする測定位相  $\phi_0$  の誤差は、 $\pm 1.4^\circ$  となっており、大抵の干渉測定において許容できる値である。

被検位相  $\phi_0$  を求めるため、(3)式の位相シフトを与えた干渉縞の測定値  $I_j^*$  を(2)式の理論値  $I_j$  に最小2乗法、 $\sum_{j=1}^N (I_j^* - I_j)^2 \rightarrow \text{最小}$  を用いてフィッティングを行う<sup>1)</sup>。1縞内の移動を考えると、波長を  $\lambda_0$  から  $\lambda_0 + \lambda_0^2/l$  まで段階的に、または連続的に変化して縞の操作を行い、1縞の  $N$  分割点に相当するおのおのの干渉縞強度が図5で示す CCD カメラで受光され、フレームメモリを介してコンピュータに取り込まれる。波長走査を連続に行う bucket 法により測定<sup>22)</sup>を行うに際して、CCD カメラのフィールドパルスで D/A 変換器を作動し、コンピュータから発生した線形に変化する電流で LD を駆動し、干渉縞を CCD カメラの電荷蓄積時間で積分できるようにしてある。慣用的に使用される位相導出アルゴリズムは、1縞内を等間隔に4分割した場合で、位相は  $\phi_0 = \arctan \{ (I_1^* - I_3^*) / (I_4^* - I_2^*) \}$  となる。産業界の動向について、階段走査型<sup>23)</sup>と連続走査型<sup>23,24)</sup>に関する

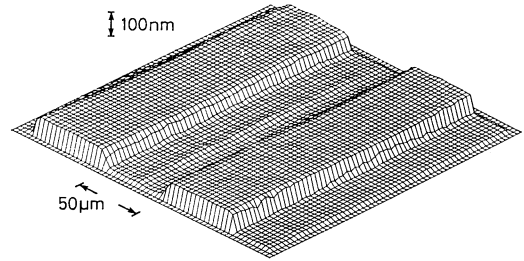


図6 基準回折格子の測定結果

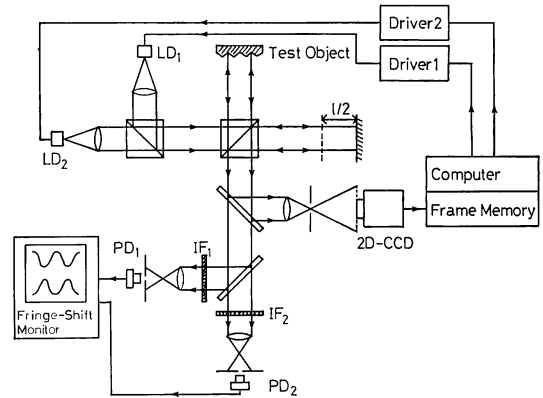


図7 2種類のLDを用いる2波長位相シフト干渉計の構成

特許がそれぞれ出願された。

電流を4段階に変え位相シフトを与える方法により、フィゾー干渉計を用いた回折格子の基準試料を測定した3次元表示結果が図6である<sup>25)</sup>。光源には、InGaAlPの可視LD ( $\lambda_0 = 670 \text{ nm}$ , TOLD9211)を使用した。測定値と基準値の残差が、 $\lambda_0/80$  以下となっている。このようなフィゾー干渉計では、参照面と被検面との間に多重反射があり(2)式の  $\cos$  縞からの誤差を生ずるが、干渉光路に吸収膜を挿入し被検面の反射を緩和すればその影響を軽減できる。また、測定回数と測定面上のサンプル数の両方について前述の最小2乗法規範を適用することにより、(3)式の位相シフト量  $\delta_j$  が未知の量でも(2)式の  $\phi_0$  が決定できる<sup>26)</sup>。この方法によると、平行平面板の屈折率と表面形状の同時測定が可能である<sup>27)</sup>。数値計算において、たくさんの干渉縞データを必要とすることから、広い範囲にわたってモードホップなしに波長を変化できるDFB型LD ( $\lambda_0 = 880 \text{ nm}$ ) が使用されている。さらに、フーリエ変換位相測定法によりLDの注入電流を変えて時間的なキャリア干渉縞を導入し、電流変調効率  $\alpha$  の非線形性の測定を行うことができる<sup>28)</sup>。

一般に干渉計による段差試料の測定限界は、 $\lambda_0/2$  であ

り測定範囲の拡大が望まれる。そこで、波長の異なる2種類の LD の光源から成る合成波長を用いてヘテロダイン復調を行う干渉法<sup>29)</sup>がある。この光源を位相シフト干渉計に応用した2波長干渉計<sup>30)</sup>の光学配置が図7に示される。 $\lambda_{01}=672\text{ nm}$  と  $\lambda_{02}=788\text{ nm}$  の2種類の LD を使用した合成波長  $4.6\text{ }\mu\text{m}$  での被検段差試料全面の計測が実行できる。

#### 4. 位相シフトフィードバック干渉計による実験

位相シフト干渉法は、(2)式のヘテロダイン検出でのビート信号たる位相シフト量が既知であることを前提としており、その不正確さにより測定精度が低下する。そこで、図5で示す干渉縞の一部分をフォトダイオード (PD2) で受光し、位相シフト量の校正信号に用い、またフィードバック信号に利用して干渉縞測定中 (1/60 秒) の干渉縞強度をロックし外乱の影響を抑えることができる<sup>19)</sup>。位相シフト量の校正は、LD をランプ波形(a)で変調し、正弦波縞信号の  $\pi/2$  の整数倍の零交差点を基準パルス(f)に一致させるようにランプ電流に制御変調電流を設定し行える。その後、1縞の4分割に相当する電圧での縞信号が保持され、測定中の縞信号との誤差信号が LD へフィードバックされ図4(a)の干渉縞のように安定化される。このシステムを用い、 $N=4$  の段階走査による Al ディスクの表面形状の測定結果が図8に示される。切削深度は、約  $0.26\text{ }\mu\text{m}$  で、この計測による繰返し測定精度は、 $\lambda_0=788\text{ nm}$  で約  $0.12\text{ rad} (\lambda_0/105)$  である。

一方、簡便な干渉縞安定化位相シフト干渉計の配置を図9<sup>31)</sup>に示す。LD の電流を変化させると LD 光出力も変化するため、フォトダイオード (PD2) で光出力をモニターし干渉縞信号である PD1 の出力とが等しくなるような制御を行い縞の安定化を行っている。フィードバック干渉計の動作点は、光出力を濃度可変フィルタで変化させ最適な場所に移動することができる。このフィー

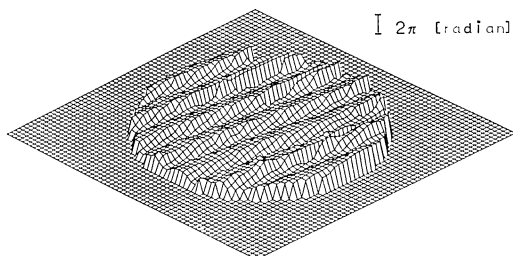


図8 切削された Al ディスクの形状測定結果

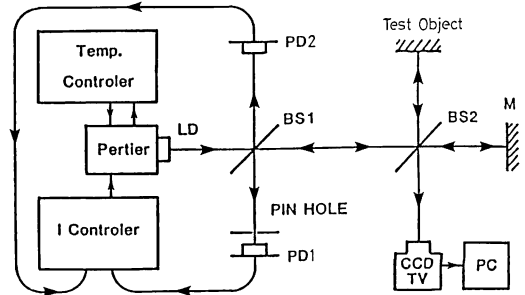


図9 簡便な縞安定化トワイマン・グリーン干渉計

ドバック系により、空間的な干渉縞の安定度は  $10^{-2}\text{ rad}$  以下にすることができる。また、干渉縞測定用の LD の波長の安定化の別の方法は、発振波長を外部共振器の共振周波数にロックすることである<sup>32)</sup>。この際に、LD の正弦波位相変調を行う必要があり、わずかな波長変動が生ずるが、測定精度への影響が無視できる程度であり有利な方法である。

#### 5. あとがき

以上述べたように、ここで紹介した LD 位相測定干渉法は、従来の干渉計においてピエゾ素子や音響光学素子などを用いる位相シフターの代りに半導体レーザーの注入電流を直接変調し、位相を変化させ干渉縞の走査を利用して位相を計測する方法である。よって、ピエゾ鏡のような可動部分を必要としないコンパクトな干渉計が構成できる。また、LD をランプ波形で変調することよりも、高速直接変調が可能な正弦波位相変調干渉法を紹介した。

この干渉計測法に使用される位相導出アルゴリズムは、位相シフト量が既知であることを前提としており、本稿では位相シフト量の不正確さを避ける数値解析的な工夫を行い、またフィードバック信号処理によりシフト量の校正を行い、測定精度の改善が図られている。LD 干渉計により、より高精度な測定を望むときは、戻り光等による LD の発振波長と波長偏移の変動に対する安定化の問題を解決する必要があり、光計測用 LD の開発が必要となる。

He-Ne レーザーの波長とほぼ互換性のある InGaAlP 系の屈折率導波型 LD が商用に供されており、視認性の良さから LD 周波数変調干渉法の研究開発の進展が期待される。

#### 文 献

1) 中島俊典：“ヘテロダイン干渉法”，光学，9 (1980) 266-

- 274.
- 2) K. Creath: "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics XXVI*, ed. E. Wolf (Elsevier Science Publishers, London, 1988) pp. 349-393.
  - 3) A. Dandridge and A. B. Tveten: "Phase compensation in interferometric fiber-optic sensors," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 279-281.
  - 4) K. Hotate, I. Sagehashi and N. Niwa: "Phase-nulling optical-fiber sensor by direct frequency modulation of laser diode," *Digest of the 4th Conference on Integrated Opt. and Opt. Fiber Commun.* (IOOC '83, Tokyo, 1983) pp. 280-281.
  - 5) 菊田久雄: "ヘテロダイン干渉法による光周波数変化と距離の測定", *光学*, **16** (1987) 432-437.
  - 6) 小林喬朗: "半導体レーザーによる干渉測長技術", *光学*, **17** (1988) 279-284.
  - 7) S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito and T. Kimura: "Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor laser," *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE-18** (1982) 582-595.
  - 8) Y. Ishii: "Automated phase-measuring interferometry with a frequency-modulated laser diode," *Proc. SPIE*, **1121** (1990) 114-118.
  - 9) O. Sasaki and H. Okazaki: "Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3137-3140.
  - 10) O. Sasaki, K. Takahashi and T. Suzuki: "Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with feedback control system to eliminate external disturbance," *Proc. SPIE*, **1163** (1990) 14-21.
  - 11) 佐々木修己, 笹崎裕之, 鈴木孝昌: "外乱除去機能を持つ2波長正弦波位相変調半導体レーザー干渉計による変位計測", 第5回光波センシング技術研究会論文集, LST 5-11 (1990) 53-58.
  - 12) H. Kikuta, K. Iwata and R. Nagata: "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2976-2980.
  - 13) T. Kubota, M. Nara and T. Yoshino: "Interferometer for measuring displacement and distance," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 320-322.
  - 14) T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian, B. S. Lee and T. C. Strand: "Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurement," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 892-897.
  - 15) T. Suzuki, O. Sasaki and T. Murayama: "Phase locked laser diode interferometry for surface profile measurement," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4407-4410.
  - 16) K. Hotate and D. T. Jong: "Quasiheterodyne optical fiber sensor with automated adjustment of the driving wave parameter," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2956-2961.
  - 17) 加藤純一, 山口一郎, 菊池信彦, 大園成夫: "半導体レーザー帰還型干渉計による変位・距離計測", 第6回光波センシング技術研究会論文集, LST 6-18 (1990) 69-76.
  - 18) Y. Ishii: "Recent developments in laser-diode interferometry," *Opt. Lasers Eng.*, **14** (1991) 293-309.
  - 19) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 37-40.
  - 20) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: "Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 233-235.
  - 21) P. Hariharan: "Phase-stepping interferometry with laser diodes: Effect of changes in laser power with output wavelength," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 27-28.
  - 22) J. Chen, Y. Ishii and K. Murata: "Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 124-128.
  - 23) 立野公男, ほか: 特開昭 60-119428, 特開昭 61-202128.
  - 24) G. E. Sommargren: U. S. Patent No. 4594003 (1986).
  - 25) 陳 軍, ほか: 第38回応用物理学関係連合講演会予稿集, 第3分冊 (1991) p. 799.
  - 26) 岡田勝行, 昨田博伸, 佐藤 敦, 辻内順平: "半導体レーザーを用いた新しい干渉計測", 第5回光波センシング技術研究会論文集, LST 5-10 (1990) 161-167.
  - 27) K. Okada, H. Sakuta, T. Ose and J. Tsujiuchi: "Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3280-3285.
  - 28) M. Takeda and H. Iijima: "Spatio-temporal heterodyne interferometry," *Proc. SPIE*, **1319** (1990) 210-211.
  - 29) R. Dändliker, R. Thalmann and D. Prongué: "Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 339-341.
  - 30) Y. Ishii and R. Onodera: "Two-wavelength laser-diode interferometry using phase-shifting techniques," *Opt. Lett.*, **16** (1991) in press.
  - 31) 志村 努, 伊藤雅英, 黒田和男, 小倉磐夫: "LDの波長制御による縞安定化位相シフト干渉計", 第5回光波センシング技術研究会論文集, LST 5-9 (1990) 153-160.
  - 32) P. Hariharan: "Phase-stepping interferometry with laser diodes. 2: Effects of laser wavelength modulation," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1749-1750.