

解説

半導体レーザーによる干渉測長技術

小林 喬 郎

福井大学工学部電気工学科 〒 910 福井市文京 3-9-1

(1988年2月25日受理)

Interferometry for Measuring Distance and Displacement
Using Semiconductor Lasers

Takao KOBAYASHI

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University,
3-9-1, Bunkyo, Fukui 910

1. はじめに

光波干渉法は物体の長さ(距離)や変位, 形状, 速度, 表面粗さ, 屈折率などの物理量の計測技術として古い歴史があるが, 近年に至りレーザー技術の進歩により, その測定精度の向上が達成され, また種々の新しい干渉法の研究が進められている。たとえば, ヘテロダイン干渉法や位相シフト(縞走査)干渉法では, $\lambda/100 \sim \lambda/1000$ の高感度の光路差測定が実現されている¹⁻⁴⁾。これらの干渉計の光源として He-Ne, Ar, CO₂ 等のガスレーザーが一般に使われているが, 波長の高安定化や2周波発振などの複雑な制御技術が用いられ, また位相変調のためのピエゾ素子(電歪素子)には非線形性や不安定性などがあるため, さらに測定精度を向上し, 新しい広範囲の応用分野を開拓するには限界となっている。

最近に至り, 小型堅牢を特徴とする半導体レーザーを光源とした干渉計の開発研究が進められており, 注入電流により発振周波数を直接変調(FM)して光波の波長を掃引し, これに伴う二つの干渉光相互間の位相のずれを利用して波面や変位を高精度計測する新しい干渉法として, FM干渉法, または波長掃引干渉法と呼ばれる技術が実現されている^{5,6)}。さらに, 反射鏡を移動させて干渉縞を計数して求める従来の長さ(距離)の干渉計測法に対し, 周波数変調された半導体レーザーを用いて波長を変化させた場合の干渉縞の位相シフト量を計測し, 機械的移動なしに絶対距離を測定する方法も開発されている^{7,8)}。これらの干渉技術では, 装置の小型化, 簡易化に

加えて, 高速で広帯域かつ高精度計測も可能である。このため, 半導体レーザーが従来のコヒーレント光源であるガスレーザーに代る光源として使用できる可能性が見えてきた。

本文では, これらの半導体レーザーを利用した干渉計測法の原理や特性を概説し, 今後の問題点などについても展望してみたい。

2. FM干渉法による変位と形状の計測

2.1 測定原理

半導体レーザー(LD)は注入電流を変化させることにより, 発振周波数(波長)の変調が容易にかけられることが特徴である。すなわち, 周波数を ν , 波長を λ , それらの微小変化量を $\Delta\nu$, $\Delta\lambda$, 電流変化量を Δi とすると, 一般に

$$\Delta\nu = -c \Delta\lambda / \lambda^2 = k \Delta i \quad (1)$$

と表わされる。ここで, k は周波数変調係数, c は光速である。これらのFM変調の機構や特性は詳細に調べられており⁹⁾, たとえば通常の AlGaAs 系の波長 780~850 nm 帯の LD に対して変調周波数が約 1 MHz 以下の低周波域では, 注入電流による LD 内部の温度変調効果により FM が生じ, $k = -(1 \sim 7)$ GHz/mA の範囲にある。しかし, 通常の LD では“モードの跳び”が生じるため, 連続的な周波数シフトは $\Delta\nu = 50 \sim 70$ GHz に制限される。

つぎに, LD を用いる FM 干渉計の原理を示す。図 1 に, 一般的な干渉計の例としてマイケルソン型干渉計の

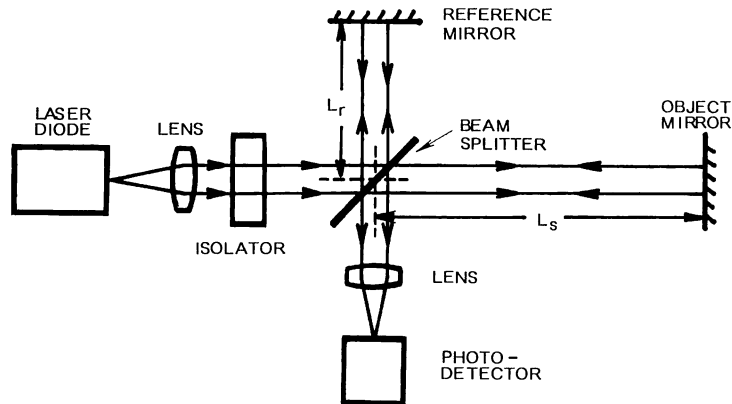


図1 マイケルソン型のFM干渉型の基本構成

構成を示す。周波数 ν_0 、波長 λ_0 で単一モード発振動作のLD光をレンズでコリメートし、戻り光防止のアイソレーターを通し干渉計に導入する。参照光と物体からの反射光の重ね合わせにより、検出面には干渉縞が生じる。いま、参照光路の長さを L_r 、測定光路長(距離)を L_s 、光路差を L とすると、二つの光波の位相差 Φ_0 は

$$\begin{aligned}\Phi_0 &= 2\pi L/\lambda_0 = 2\pi n\nu_0 L/c \\ &= 2m\pi + \phi\end{aligned}\quad (2)$$

となる。ここで、 $L=2(L_s-L_r)$ 、 n は大気屈折率、 m は整数、 ϕ は位相角である。

一般に変位や形状の計測では、半波長以下の微小な長さの時間的、空間的な変化が測定対象となる。光路差を一部分 L_0 と変化部分 ΔL に分離して

$$L = L_0 + \Delta L \quad (3)$$

とおくと、 $L=L_0$ から $(L_0+\Delta L)$ へ ΔL だけ変位させたときの干渉縞の位相角 ϕ の変化を $\Delta\phi$ とすると

$$\Delta\phi = 2\pi n\nu_0 \Delta L/c \quad (4)$$

となる。従来の位相変調干渉法では、参照光の光路長 L_r を変動させて位相角 ϕ を高精度で検出するサブフリンジ計測¹⁰⁾が用いられており、その変化量 $\Delta\phi$ より変位 ΔL が求められる。

これに対してFM干渉法では、LDの温度を一定にして注入電流を Δi だけ変化させたときに発生する周波数シフト $\Delta\nu$ を利用する。二つの光波の位相差のシフト量は $\Delta\nu$ に比例しており、次式で与えられる。

$$\phi_s(t) = 2\pi n \Delta\nu L/c \quad (5)$$

干渉縞強度による光検出器上の光電流は

$$\begin{aligned}I &= I_0 + I_m(t) \\ &= I_0[1 + \gamma \cos\{\phi + \phi_s(t)\}]\end{aligned}\quad (6)$$

と表わされる。ここで、 I_0 は電流の直流成分、 $I_m(t)$ は交流成分、 γ は干渉縞の可視度 (visibility) である。す

なわち、FM干渉法ではレーザー光の周波数を変化させることによって干渉強度に位相シフト $\phi_s(t)$ を生じさせ、以下に示す方法により位相角 ϕ を求め、その変化量 $\Delta\phi$ より(4)式を用いて光路差の変化、すなわち変位 ΔL を導出するものである。

次に、(6)式の光電流から位相角 ϕ を導出する復調法として、以下に示す方法が考案されている。

(a) 2周波波切換方式の干渉法¹¹⁾では、位相シフト量 $\phi_s(t)$ が 0 と $\pi/2$ となるようにLDの注入電流値を交互に切り換える。このとき、(6)式により $\cos\phi$ と $\sin\phi$ に比例した出力電流値 I_{mc} と I_{ms} が得られるので、両者の比をとることによって

$$\phi = \tan^{-1}(I_{ms}/I_{mc}) \quad (7)$$

の演算により位相角が導出される。

(b) 正弦波FM法¹²⁾はFM通信技術で一般に用いられる方法で、

$$\phi_s(t) = A \sin(2\pi f_m t) \quad (8)$$

の形状になるように変調周波数 f_m 、振幅 A のFMを加える。(6)式の交流成分 $I_m(t)$ をフーリエスペクトル分解して考えると、その $2f_m$ および $3f_m$ の高調波振幅が $\cos\phi$ および $\sin\phi$ に比例している。この性質を用いて、(7)式と同様に両者の比をとり位相角 ϕ を導出するものである。

(c) 時間 t に対し直線的にFMを加える方式では

$$\phi_s(t) = \alpha t \quad (\alpha: \text{定数}) \quad (9)$$

とすると、(6)式の出力電流は正弦波状に変化するが、 ϕ_s が $0 \sim \pi/2$ 、 $\pi/2 \sim \pi$ 、 $\pi \sim 3\pi/2$ 、 $3\pi/2 \sim 2\pi$ の4区間での検出器出力積分値を求め、それらの比より ϕ を導出することができる。これは4バケット(4-bucket)法¹³⁾と呼ばれる方式である。

次に、これらのFM干渉法の一般的な特徴を、従来の

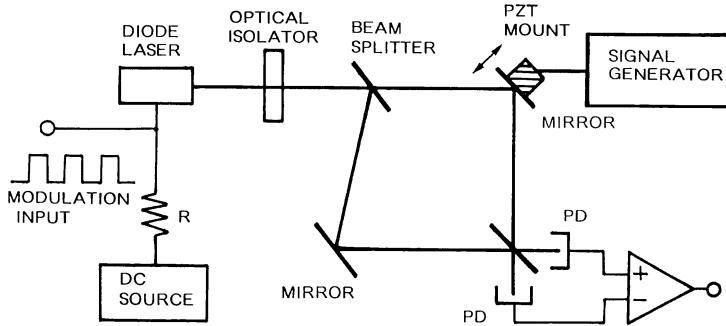


図2 マッハ・ツェンダー型のFM干渉計の構成

サブフリンジ計測を行なう位相変調干渉法やヘテロダイン干渉法と対比するとつぎのようになる。(1) LDの注入電流により直接FMが可能であるため、従来のピエゾ振動素子の不安定な非線形性を排除ことができ、機械的振動が全くなく、高精度で大きなサイズの物体の計測ができる。(2)高周波変調も容易であるため、変位や形状の高速測定ができる。(3)ヘテロダイン干渉法でのAOM(音響光学変調器)や二周波発振レーザー等の複雑で大型な素子の利用が不要となり、装置の小型・簡易化が可能となる。次に、これらの干渉計の具体例について示す。

2.2 FM干渉法の動作例

まず、前項(a)の2周波切換方式のFM干渉法はKerseyら¹¹⁾により試みられた。図2にMach-Zehnder干渉計構成の装置例を示す。波長857nmのAlGaAs LDの注入電流を方形波状に変調してFMを加えている。光検出器電流を二個のアナログゲートによりサンプリングしてcosφとsinφ成分を取り出し、位相比較器により位相角φを求めている。実験例ではPZTに取り付けたミラーの約1kHzの振動の位相検出感度として5×10⁻⁵ rad/√Hzが得られている。検出系の帯域幅1Hzのとき(4)式により変位に換算すると、7pmの検出感度が得られることになる。このFM干渉法は光ファイバー型の干渉計に利用されている。

次に、(b)の正弦波FM法としては筆者らの実験例があり¹²⁾、図3に装置の構成を示す。波長830nm、出力約5mWのAlGaAs LDにf_m=2MHzの正弦波電流によるFM変調を加え、出力光を変形Mach-Zehnder型の干渉計に導入する。偏光ビームスプリッタ(PBS)を通過したP偏光波を1/4波長板を通し、円偏光とし、物体からの反射光は再び波長板を通るとS偏光となる。これによってS偏光の参照光と干渉するが、LDへの戻り光強度を3×10⁻⁵以下に抑えている。このため、光アイ

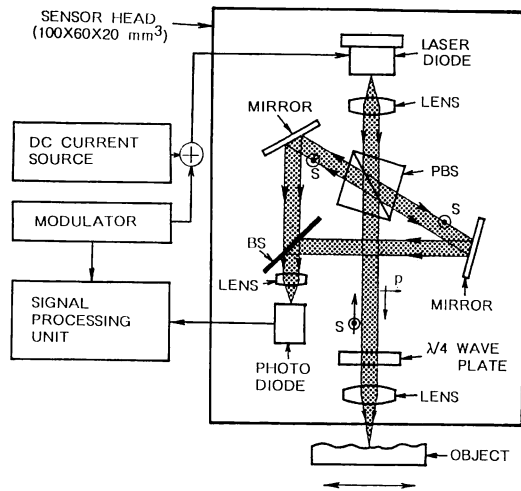


図3 微小変位と平面形状計測のための小型FM干渉型センサー

ソレーターを用いなくてもLDのFMの直線性や低雑音動作を可能にしている。信号電流中の2f_mと3f_mの高調波成分を2個のDBM(ダブルバランスミキサ)で抽出し、2チャンネルデジタルメモリに入れて波形を記録し、マイクロコンピュータにより位相角を演算させている。

被測定体として鏡面および反射率1%以上のほとんどの粗面物体に対して変位の計測が可能であり、位相の検出精度1.8×10⁻⁵ rad/√Hz、変位検出感度10pm(B=0.25Hz)と高感度である。またセンサーヘッド部は10×6×2cm³と小型で高安定である。

図4に光軸と直角方向に回転テーブルで移動させて測定した高精度研磨の誘電体多層膜反射鏡(面精度λ/20以上)の表面形状の測定結果を示す。この場合の測定精度として変位(レベル)1nm、位置分解能(レーザースポット径)1.5μmであり、検出帯域幅340kHz、応答時間2μsの高速測定も可能である。これらの結果より、

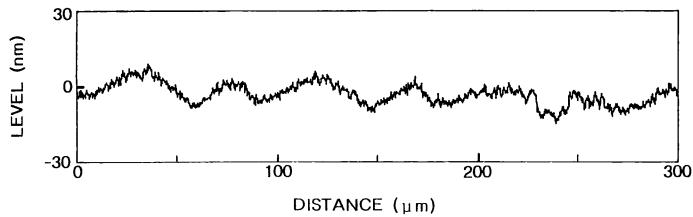


図4 誘電体多層膜ミラーの表面形状の測定結果

従来の大型の He-Ne レーザーと AOM を用いたテールサイズのヘテロダイン干渉装置¹⁴⁾が片手に入るサイズとなり、同程度以上の特性が実現している。

また、(c)の線形 FM による縞走査法では検出器に CCD センサーなどを用いて波面の位相分布を求めることができる。このため、物体の三次元形状の計測に適した FM 干渉イメージング法となっている^{5,6)}。

その動作例として、図5に Tatsuno らによる Twyman-Green 干渉計型の装置構成を、さらに図6には、光ディスクヘッドからの LD 平行光の波面位相分布をこの干渉計で測定した三次元表示結果を示す⁵⁾。波長 780 nm, 出

力 5 mW の単一モード LD と 100×100 素子の二次元 CCD を用いて、4 バケット法により 50 ms の測定時間で精度 $\lambda/50$ が得られている。短時間計測のため温度ドリフトや振動等の影響を受けにくいのが本計測法の利点である。

しかしながら、以上の FM 干渉法では段差 (変位) が $\lambda/2$ 以上のステップ形状の物体は測定できないことが大きな制限となっている。

3. FM ヘテロダイン測長法

光計測分野の基本技術として、物体までの距離や長さの高精度計測法があり、従来から干渉縞計数法やヘテロダイン干渉法などの干渉技術が利用されている。しかしながら、これらの干渉法では反射鏡を移動して測定するため、高精度の移動台と大掛りなベッドが必要とされる。この欠点を補うものとして波長合成干渉法¹⁵⁾が試みられているが、大型の CO₂ レーザーが用いられている。また、LD を利用したパルスレーダー法¹⁶⁾や強度変調位相差法¹⁷⁾等の距離測定法があるが、いずれも測定精度は 0.2~1 mm 程度であり、実用上重要な数 m 程度の距離や長さの高精度測定は不可能である。

そこで、LD による FM 干渉法を測長技術へ拡張することが試みられている。この方法は、(5)式に基づき LD の周波数シフト $\Delta\nu$ による干渉光強度の位相シフト量 $\phi_s(t)$ を測定し、光路差 L の絶対値を導出するものである。この点が前述の変位 ΔL を求める FM 干渉法とは明確に区別される。

まず、Kikuta ら⁸⁾は、LD による FM 干渉法に AOM を用いてヘテロダイン干渉技術を併用して、高精度で位相シフト量 $\phi_s(t)$ を検出している。その結果、数 mm の距離の反射鏡を約 1 μ m の精度で測定している。

さらに長光路での測長法として、筆者らが試みている FM ヘテロダイン法と仮称される広義の FM 干渉法を次に示したい^{7,18,19)}。図7に実験に用いた装置の構成を示す。単一モード発振の LD の光周波数を、注入電流により三角波状 (または鋸歯状) にできるだけ大きな FM シ

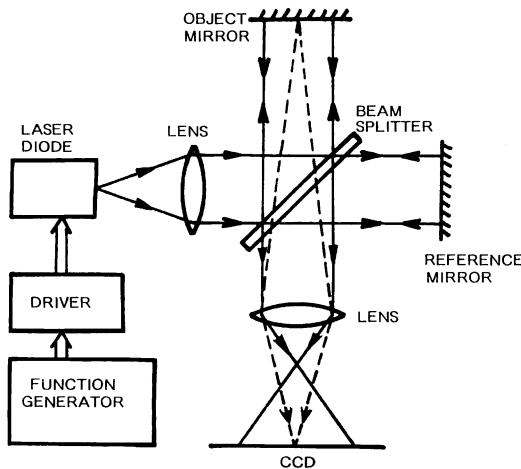


図5 二次元波面分布計測のためのトワイマン・グリーン型の FM 干渉計 (Tatsuno ら⁵⁾)

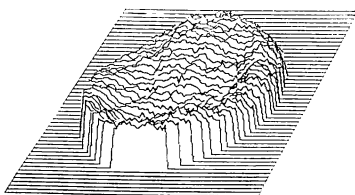


図6 光ディスクヘッド出力光の波面位相の三次元表示の例 (Tatsuno ら⁵⁾)

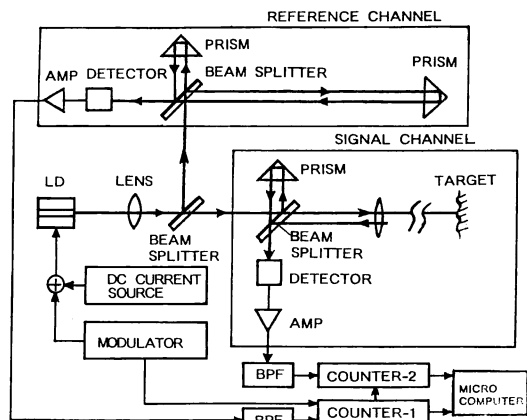


図 7 FM ヘテロダイン測長法の装置構成

フト $\Delta\nu$ を加え、この出力をマイケルソン干渉計に類似の光学系 (信号系) に導き、ターゲットに照射する。その後方散乱光は信号光として再びビームスプリッタにより参照光と重畳されて干渉が生じ、光検出器出力には準連続的に一定周波数の正弦波ビート信号が発生する。このビート波の位相シフト量 $\phi_s(t)$ をカウンタで測定する。また、LD 光はビームスプリッタにより分割されて安定な光路差 L_{ref} をもつマイケルソン干渉計構成の参照系に入り、同時にビート信号の位相シフト量 $\phi_r(t)$ も測定される。これより FM シフト $\Delta\nu$ が次式より求められる。

$$\Delta\nu = c\phi_r(t) / (2\pi n L_{ref}) \quad (10)$$

この値を (5) 式に代入することにより

$$L = \{ \phi_s(t) / \phi_r(t) \} L_{ref} \quad (11)$$

となる。すなわち、二つの位相シフト量を同時測定し、光路差 L 、またはターゲットの距離 L_s を導出するのがこの計測法の原理である。

本計測法の特徴として (1) 位相シフト量を数百 π rad 以上の多くのビート波数にわたり測定するため、FM 干渉法と比べて相対精度が高くできる、(2) $\phi_s(t)$ と $\phi_r(t)$ を同時に測定するため、LD の FM の非直線性や不安定性があっても高精度測定が可能となる、ことである。実験では 2 台の位相シフト測定カウンタを試作し ($2\pi / 2000$) rad の精度で測定を行ない、マイクロコンピュータで (11) 式の演算を行ない、データ表示した。

まず、距離測定の結果を図 8 に示す。ターゲットとしてプリズムを用いて、その距離に対する測定値の直線性および変動分 (精度) を示した。測定には GaAlAs の単一モード型 LD (シャープ: LT-021 MD, 中心波長 780 nm, 最大出力 15 mW) を用い、変調電流 $\Delta i = 16$ mA, 変調周波数 90 Hz, 周波数偏移は $\Delta\nu = 39$ GHz, 測定時間は 100 ms である。図の結果より、距離 0.2~1.7

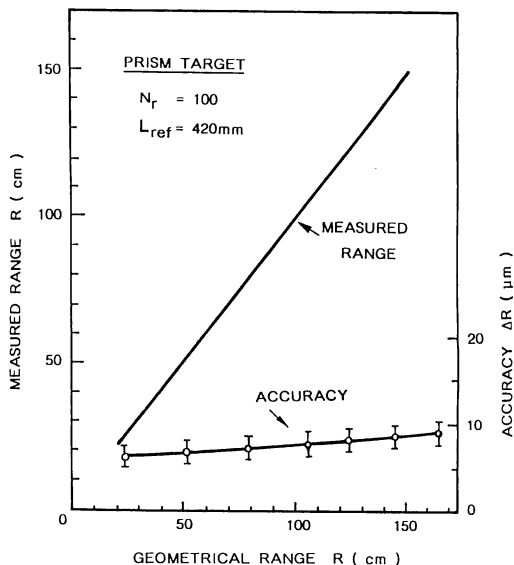


図 8 FM ヘテロダイン法による反射鏡の距離測定結果の例

m の範囲で相対精度約 9×10^{-6} , 偏差 $7 \sim 9 \mu\text{m}$ となり、高精度で距離の絶対値測定ができることが判明した。この値は、従来の距離測定法に比べて 1 桁以上の精度の改善となっている。

次に、ターゲットとしてアルミ板粗面散乱体を用いた場合にも約 500mm の距離で精度 $50 \mu\text{m}$ で高感度検出が可能であり、ステップ形状の物体の寸法測定にも利用できている。

さらに、本計測法では 2.1 項 (c) の FM 干渉法と同様にビート信号の位相角 ϕ とその変化量 $\Delta\phi$ を測定することができ、(4) 式より変位 ΔL も同時に計測可能となることが特徴である。距離 200 mm で変位分解能は 1 nm ($\lambda/800$) であり、従来の位相シフト干渉法とほぼ同じ感度が得られている。

本計測法の誤差の原因としては、用いた光学系の振動が主なものであり、また鮮明度の低下等によるショット雑音、温度の変動による大気屈折率のゆらぎ、LD のスペクトル純度の不足 (多モード性)、位相カウンタの分解能などが挙げられる。今後 LD の FM シフト量の増大や、信号系の高 S/N 化、高周波変調により測定時間を短縮し、振動などの誤差を低減することなどにより、さらに距離測定精度の改善も見込まれる。

4. 今後の進展の可能性

本文では、半導体レーザーの小型、高効率特性に加えて FM 特性を活用した光計測の新しい応用技術を概観し

てきた。これらの光計測分野の進展により、現状の LD に対して改善を要する条件がしだいに明らかになってきた。すなわち、1) 単一モード化(隣接モード出力雑音の抑圧)、2) スペクトルの狭帯域化(100 kHz 以下)、3) 連続 FM シフト量の増大(数百 GHz 以上)、4) 高出力化(100 mW 以上)、5) 戻り光に対する周波数安定度の改善、6) 温度安定度の改善、等が挙げられる。

これらは光通信や光情報処理分野での要請とは多少異なっており、今後の“光計測用半導体レーザー”の活発な研究開発が望まれる。それらの進展によって、新しい応用分野として、たとえば光ファイバー利用の変位や速度、形状などの超小型センサーや、数mの距離や物体形状のサブミクロン精度での瞬時計測等の実現も夢ではなくなり、生産現場でのインプロセス計測や制御等の分野でも広い利用が期待される。

文 献

- 1) N. A. Massie: "Real-time digital heterodyne interferometry: a system," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 154-160.
- 2) 光応用計測技術調査委員会編: 光計測のニーズとシーズ(コロナ社, 東京, 1987).
- 3) 田中 充: "最近のナノメートル計測技術, 光波干渉計について", *応用物理*, **56** (1987) 734-740.
- 4) 佐々木修己, 柳内敏男: "正弦波位相変調干渉法", *光学*, **15** (1986) 25-30.
- 5) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 87-40.
- 6) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: "Digital phase measuring interferometry with a tunable laser diode," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 233-235.
- 7) 加藤 覚, 大高真人, 小林喬郎: "半導体レーザーによる距離・速度のFMヘテロダイン計測法", 電子通信学会技術報告, **NW 84-25** (1984) 73-80.
- 8) H. Kikuta, K. Iwata and R. Nagata: "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2976-2980.
- 9) 末松安晴(編著): 半導体レーザーと光集積回路(オーム社, 東京, 1984).
- 10) 武田光夫: "サブフリンジ干渉計測基礎論", *光学*, **13** (1984) 55-65.
- 11) A. D. Kersey, D. A. Jackson and M. Corke: "Demodulation scheme fibre interferometric sensors employing laser frequency switching," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 102-103.
- 12) 小林喬郎, 金 権: "半導体レーザーによる変位・形状のFM干渉計測法", 電子通信学会技術研究資料, **OQE 87-154** (1988) 73-78.
- 13) J. C. Wyant: "Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction system," *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2622-2628.
- 14) R. W. Peterson, *et al.*: "Interferometric measurements of the surface profile of moving samples," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 1464-1466.
- 15) H. Matsumoto: "Synthetic interferometric distance-measuring system using a CO₂ laser," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 493-498.
- 16) I. Kaisto, J. Kostamovaara, M. Manninen and R. Myzila: "Optical range finder 1.5~10 m distance," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3258-3263.
- 17) 須田教明: 電磁波測距儀, 第4章(森北出版, 東京, 1980).
- 18) 小林喬郎, 田中賢司, 伊藤美夏, 大高真人: "半導体レーザーによる距離の高分解能FMヘテロダイン計測法", 応用物理学会・光ファイバセンサ研究会講演資料集, **WOFS 4-8** (1987) 53-54.
- 19) 小林喬郎, 蔭 曙東: "半導体レーザーによるFMヘテロダイン測長法", 電子通信学会技術研究資料, **OQE 87-154** (1988) 65-71.