



ヘテロダイン干渉法による光周波数変化と距離の測定*

菊田 久雄

大阪府立大学工学部機械工学科 〒591 堺市百舌鳥梅町4丁 804

(1987年6月11日受理)

Measurements of Light-frequency Variation and Distance by Optical Heterodyne Interferometry

Hisao KIKUTA

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Osaka Prefecture,
4-804, Mozu-Umemachi, Sakai 591

1. はじめに

干渉計の位相差変化を光ビート信号の位相変化として検出するヘテロダイン干渉法は、サブフリンジオーダーの位相差変化の測定に非常に有用であり¹⁾、光波干渉測長器をはじめ、光学鏡面の表面粗さ、微小変動、微小振動などの測定において、すでに多くの利用方法が提案され実用化に至っている²⁻⁵⁾。しかし、その利用の基本的立場は、いずれも一定で既知の光周波数(波長)をもとに位相差の変化から光路差の変化量を測定するものである。それに対し、一定の光路差のもとで光源の波長が変化した場合に生ずる位相差変化を利用する方法が考えられる。本稿では、そのようなヘテロダイン干渉法の二つの利用法について説明する。第一は半導体レーザーの光周波数(波長)変化の測定法であり、第二は半導体レーザーの波長変化を利用した波長シフト干渉法にヘテロダイン干渉計を用いる絶対距離測定法である。

半導体レーザーは注入電流や温度を制御することで発振周波数(波長)を容易に変えることができ、この性質を利用した光 FM 通信や新しい干渉計測法の研究が進んでいる。このため、その光周波数(波長)特性やその変化特性を詳しく調べることが重要となっている。これには回折格子型分光器やファブリ・ペロー干渉計などを用いる分光学的測定法が用いられているが、それぞれ

の分解能や測定範囲が異なり、有用範囲に限られる。たとえば、回折格子を用いると波長の絶対量やスペクトル分布がわかるが、数 MHz 程度の周波数(波長)変化を検出することは困難である。ファブリ・ペロー干渉計は高感度であり、わずかな周波数変化を検出することができるが、周波数変化の量が大きいと、一定の測定感度を保てない。

これに対し、光周波数変化を干渉計で測定する方法の一つとしてヘテロダイン干渉法を用いる測定方法が考えられる⁶⁾。この光周波数変化の測定法は、変動のない既知の光路差をもった干渉計において、光周波数の変化を電気信号の位相変化としてとらえるもので、この方法によればレーザーの波長変化を高分解能かつ大きい波長変化に対しても一定感度で測定が行なえる。本稿ではまず始めにこの測定法について述べる。

本稿の後半では半導体レーザーの波長変化を利用した絶対距離の測定法について述べる。半導体レーザーの波長変化の性質を利用した計測方法は種々提案されているが、これらは大きく三つに分類できる。第一は多波長干渉計の光源として利用する方法⁷⁻¹⁰⁾、第二は位相シフトまたは位相変調干渉法の位相シフト機構の代用として用いる方法^{11,12)}、第三はレーザーの光強度や波長変化と戻り光の関係を利用した距離およびその変動量の測定法である^{13,14)}。

第一の利用法のひとつに、本稿で述べる波長シフト干渉計にヘテロダイン干渉法を用いる距離測定法がある⁴⁾。この方法は、半導体レーザーの発振波長が注入電

* 本稿は昭和 61 年度光学論文賞受賞記念講演(1987年3月29日, 早稲田大学本部)を骨子として、まとめたものである。

流により変化する性質を利用した一種の多波長干渉法で、光路差の変化量でなく光路差そのものを測定する方法である。測定原理は前述の周波数変化の測定法と原理的に逆の関係にある。すなわち、ここでの方法は周波数変化が既知の状態において干渉計の光路差を求めるのに対し、前述の方法は光路差が既知の状態で周波数変化を測定している。両者とも干渉光の位相差の検出にヘテロダイン干渉法を用いている。この方法によれば数十 cm 以下の絶対距離を高精度で測定できる可能性がある。

2. 周波数変化の測定

2.1 測定原理

ヘテロダイン干渉法を使った光周波数(波長)変化の測定原理図を図1に示す。レーザー光をハーフミラー HM1 で二つに分け、これらの光を光路差 L を持たせて、ハーフミラー HM2 で再び重ね合わせる。このとき音響光学変調素子などの周波数シフター FS を用いて、これらに間に周波数差 $\Delta\nu$ を与える。重ね合わされた光は干渉の結果、周波数 $\Delta\nu$ の光ビート信号になり、これを光電変換すると、その電気信号の交流成分 I は

$$I = A \cdot \cos[2\pi(\Delta\nu t + \Delta FL/c + F_0 L/c)] \quad (1)$$

となる。 ΔF が求めたい光周波数の変化量、 F_0 は基準周波数、 L は光路差、 A はビート信号の振幅、 t は時間、 c は光速を示している。ただし ΔF は、 F_0 に比べて十分に小さく、その変化率は時間 L/c で一定であると仮定している。(1)式を波長で表示し直すと、

$$I = A \cdot \cos[2\pi(\Delta\nu t + L\Delta\lambda/\lambda_0^2 + L/\lambda_0)] \quad (1')$$

になる。 λ_0 は基準の波長、 $\Delta\lambda$ は波長の変化分を示しており、 $\Delta\lambda$ は λ_0 より十分小さいと考えている。

(1)式、(1')式における位相成分の第二項 $\Delta FL/c$ 、 $L\Delta\lambda/\lambda_0^2$ が周波数変化および波長変化に比例しているので、この位相変化量を検出すれば ΔF 、 $\Delta\lambda$ を知ることができる。ちなみに第一項はビート成分を示し、第三項は基準周波数(基準波長)における位相差を示している。

光電変換された信号 I の位相検出は電気的に行なうので、その出力値を位相に比例したかたちで得ることができる。また、位相成分だけを検出するのでレーザー光の強度変化(電気信号の振幅変化)が測定に影響しにくいという利点もある。電気的位相検出では分解能が $2\pi/10,000$ 程度と高く、たとえば光路差 L を数十 cm にとれば 100 kHz 程度の周波数変化が検出できる。この測定法の特長をわかりやすくするために、その出力特性を他の干渉計測の特性とともに図2に示しておく。

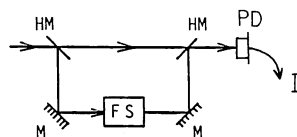


図1 周波数変化の測定原理

HM: ハーフミラー, M: ミラー, FS: 周波数シフター, PD: 光電変換器

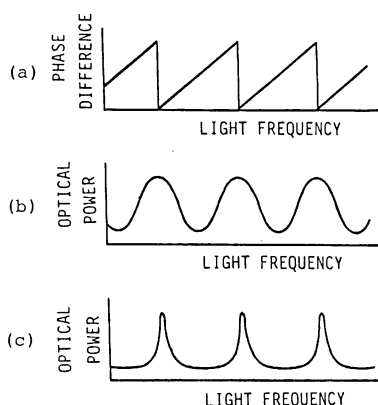


図2 各干渉計における周波数変化測定法の出力特性
(a)光路差を持ったヘテロダイン干渉計, (b)二光束干渉計, (c)ファブリ・ペロー干渉計

2.2 半導体レーザーの周波数変化の測定

半導体レーザーの光周波数変化の測定システムを図3に示す。音響光学変調素子 AOM を二つ用いて周波数 455 kHz の光ビート信号をつくり、これをフォトダイオード PD で電気信号に変換する。この信号の位相変化を検出するわけであるが、位相検出のための参照信号は AOM 駆動用の信号を利用している。位相検出器ではこれらの位相差を比例した電圧として出力する。レーザー光の発振周波数(波長)が変わると、位相比較器の出力電圧もそれに比例して変化する。したがって、この出力電圧の変動を測定することによって、光周波数(波長)の変化を検出できる。

図4, 5に測定例を示す。レーザーは GaAlAs, 791 nm (MEL 7475) を使用している。図4はレーザーの入力電流を一定(40 mA)に保ち、光周波数の変動を調べた結果である。(a)は光路差が 300 nm の場合、(b)は光路差 0 ± 0.1 mm である。後者は光学系の安定度を示している。(a), (b)を比較すると、長時間での出力の変動は同程度であり、周波数の長時間での安定度はわからない。しかし、短い時間での周波数変動は検出できており、(a)の結果では周波数の変動幅が約 10 MHz 程度になっている。光学系の安定化を行えば、より長い時

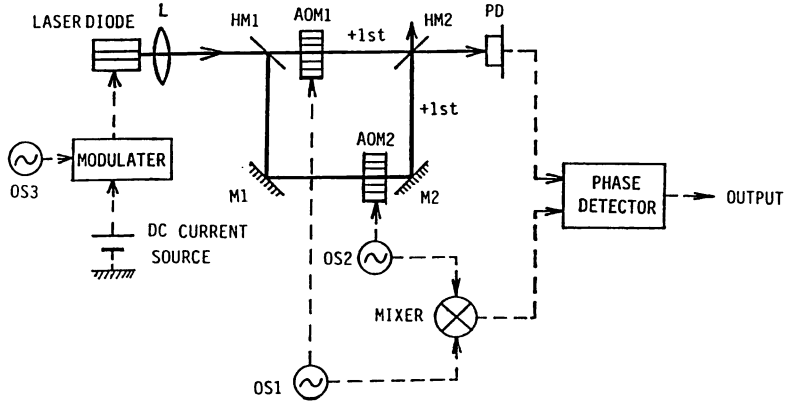


図3 半導体レーザーの周波数変化の測定光学系および電気系

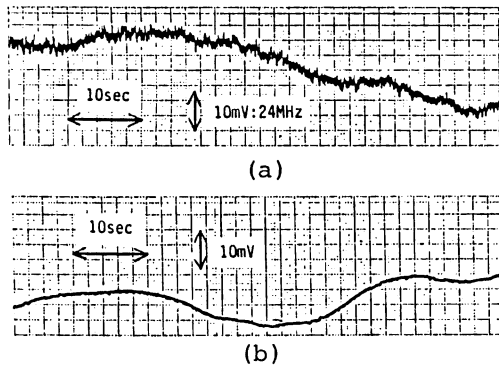


図4 一定電流のもとでのレーザー周波数の変動
(a)光路差 300 mm での時間的出力変動,
(b)光路差 0 ± 0.01 mm での変動. レーザー電流: 40 mA

間での周波数の変動もわかる。

次に、レーザー入力電流を 36 mA を中心に正弦的にわずかの電流変調を加えて、それによる光周波数変化の大きさをしらべた。図5 (a)に電流の変調周波数を一定にし変調度を変化させた結果を、(b)に電流変調度一定で変調周波数を変化させた結果を示す。レーザー入力電流の変化に対して出力電圧も正弦的に変動するので、その電圧変化の振幅を求めた。各縦軸の値は出力電圧の振幅値を光周波数の変化量に換算したものである。ファブリ・ペロー干渉計でこのような測定を行なうのには、電流による光強度の変化を考慮しなければならないが、本方法ではそれを必要としない。

この節では、既知の光路差を持った二光束干渉計にヘテロダイン干渉法を用いることで、高分解能かつ一定感度で光周波数(波長)変化を検出する方法について述べた。

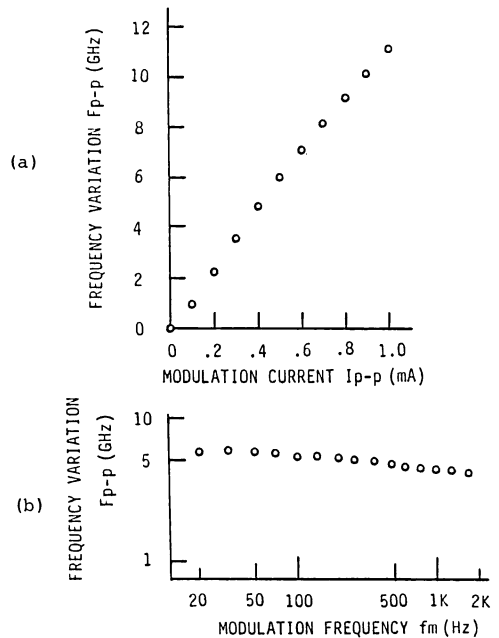


図5 電流変化に対する周波数変化
(a)変調度に対する波長変化, 変調周波数: 1 kHz, (b)変調周波数に対する波長変化, 変調度: 0.4 mA. バイアス電流はいずれも 36 mA

3. 距離の測定

光を使って測定対象物までの距離を測る方法には、三角測量法や、光速や波長を利用する方法がある。後者の測定方法は測ろうとする距離の程度によりさまざまである。非常に長い距離では、光パルスが発生させ、その往復時間を測る¹⁵⁾。数十 km から数十 m 程度の距離では高周波強度変調された光を使い、コーナーキューブから戻ってきた光の強度変調信号の位相を測る¹⁶⁾。また光の

波長オーダーの極端に短い距離は、各種の干渉計を用いて測定が行なわれる。

その中間域の距離 (数十 cm~数十 μm) は工業的にもっとも重要な測定領域であるが、これには多波長干渉法が用いられる。この方法は、複数波長の光を使って干渉計を構成し、測定距離に適した「合成波長」を考慮することで距離を決定する¹⁷⁾。このための専用光源として松本が CO_2 二波長レーザーなどを開発している¹⁸⁻²⁰⁾。一方、最近になって半導体レーザーの波長変化を利用した測定方法がいくつか提案されている。ここでは、その一つであるヘテロダイン干渉法を組み合わせた高分解能な測定法について説明を行なう。

3.1 測定方法

通常、半導体レーザーは注入電流や温度に比例して波長が長くなる。ただし、変化の程度が大きくなると発振モードが別のモードに跳び移る。このような波長変化を利用して距離の測定を行なうのであるが、ここでは同一発振モード内における波長の連続変化を利用している。

いま、干渉計の光路差を L とし、波長が λ から $\lambda + \Delta\lambda$ に変化する場合を考える。このとき、干渉光の位相差変化 $\Delta\phi$ は(1')式の位相成分の第二項より、

$$\Delta\phi = 2\pi L \left[1/\lambda_0 - 1/(\lambda_0 + \Delta\lambda) \right] = 2\pi L (\Delta\lambda/\lambda_0^2) \quad (2)$$

になる。 λ_0 と $\Delta\lambda$ が既知の場合、この位相変化の量 $\Delta\phi$ を測定することで L が求まる。波長は連続的に変化させるので、 $\Delta\phi$ が 2π を越えても、その値を決定できる。

光路差 L の測定の精度は、位相の検出精度および波長シフトの大きさ $\Delta\lambda$ で決まる。現在市販の GaAlAs レーザーにおいて、同一モード内での波長シフトは最大 0.05 nm 程度が限度であり、合成波長 $\lambda_0^2/\Delta\lambda$ にすると数 cm である。したがって、 μm オーダーの測定精度を得るには非常に高分解能の位相測定が必要になり、ヘテロダイン干渉法を用いる。(2)式で表わされている位相変化 $\Delta\phi$ は、ヘテロダイン干渉法では(1')式における位相成分の第二項に相当する。また、この干渉法を用いるとレーザーの波長変化にともなう明るさの変化が位相検出に影響を与えない点においても利点がある。

具体的な測定の光学系および電気系を図6に示す。このシステムは前節のものと同基本的と同じである。レーザーには Sharp LT 024 MD (20 mW, 789 nm) を使用した。レーザーから出た光は AOM1 で二つに分けられ、一方は鏡 M_0 にあたり、その反射光は偏光ビームスプリッターで反射されてフォトダイオードに導かれる。AOM1 で分けられたもう一方の光は、AOM2 でもう一度周波

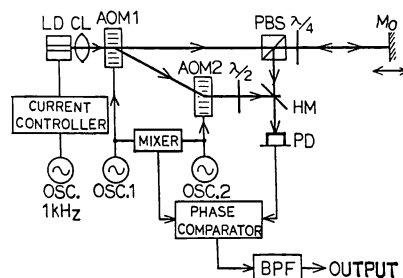


図6 距離測定の光学系および電気系

数シフトを受け、フォトダイオードに導かれる。これらの光は、偏光板を適当に配置することで、ビート周波数 455 kHz で干渉する。測定する距離はこの干渉計の光路差の半分である。このシステムでは鏡 M_0 はマイクロメータのついたスライドテーブルに置かれており、これを前後に動かすことで、いろいろな距離を設定できる。

レーザーの波長変化は電流を変調することで行なう。具体的には、一定のバイアス電流に周波数 1 kHz の正弦的な電流変調を与える。その結果、位相検出器の出力も正弦的に変化し、その振幅は測定距離 (光路差) と電流の変調度に比例する。光学系のゆらぎや振動による位相変化の影響を除くために、バンドパスフィルタ (中心周波数 1 kHz) を通す。測定は鏡 M_0 の各位置に対する出力の振幅を測定している。

3.2 測定例

図7に測定例を示す。(a)は電流の変調度を 0.5, 1.0, 2.0 mA で測定を行なった結果である。縦座標は、BPF の出力信号の振幅を位相変化に換算したもので表わしている。位相変化の最も小さいところが干渉計の光路差がないところにあたる。位相変化の小さいところを除いて、測定された位相変化は距離によく比例している。また、測定感度 (グラフの傾き) も変調度に比例して大きくなっている。出力の交流信号は、光路差ゼロの位置の前後で位相が π だけ変わっている。このことは光路差 L の正負の符号が変わったことを意味している。なお、光路差ゼロの付近で測定値が完全にゼロにならないのは測定電気系の不備のためである。(b)は鏡 M_0 を 10 μm 間隔で移動させての測定結果である。この図において、直線近似を行なうと、それからのずれ量の標準偏差は約 3 μm になる。これより数 μm の精度で距離測定が行なえる可能性があることがわかる。

しかしながら、測定時の環境温度が変わると、図6に示す測定感度 (傾き) が少し変化する。これはコリメー

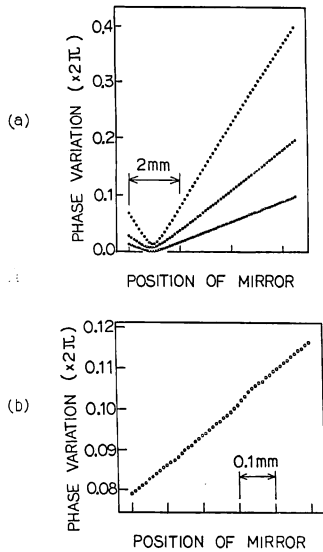


図7 距離測定の結果

(a) $50\mu\text{m}$ 間隔での測定結果. ただしグラフでは $100\mu\text{m}$ 間隔での測定値を表示. レーザーのバイアス電流: 70mA , 電流変調度: $0.5, 1.0, 2.0\text{mA}$, 変調周波数: 1kHz
 (b) $10\mu\text{m}$ 間隔での測定結果. 電流変調度: 20mA , その他の条件は(a)と同じ. 測定距離は $1.1\sim 1.6\text{mm}$ の範囲

トレンズ CL からのレーザー内への戻り光のためである. これについては次節で述べる.

上記の測定例は測定対象物に鏡を用いていた. これをアルミニウムと真ちゅうの粗面板に換えて同様な測定を行なった結果を図8に示す. ただし, 粗面からの散乱光を集めるために $\lambda/4$ 板と粗面板の間にレンズを置いている. aはアルミニウム, bは真ちゅうの場合で, cは比較のために鏡における結果である. 集光レンズの焦点は光路差ゼロ付近の位置に設定してある. あまり光路差のない付近では鏡と同様に測定が行なえるが, 距離が長くなると測定値がばらつく. これは粗面板がレンズの焦点位置から離れて, 反射光が弱くなっているためである.

3.3 レーザーの問題点⁹⁾

半導体レーザーの波長シフトを利用して干渉計測を行なう場合, レーザーの戻り光およびレーザー光の主発振モード以外のサブモードについて注意する必要がある. 戻り光やモード分布の問題は, それら自身としては一般によく知られているが, 波長シフト干渉法におけるこれらの影響の解析がなされていない. これに対し, 筆者らは距離計測の場合についてその解析および実験を行なっている.

戻り光のある場合の半導体レーザーの波長変化特性に

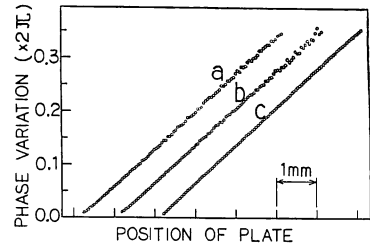


図8 粗面での距離測定結果

(a) アルミニウム板 ($Ra=0.15\mu\text{m}$), (b) 真ちゅう板 ($Ra=0.14\mu\text{m}$), (c) 鏡. 各直線は互いに 1mm ずつずらせて表示している. バイアス電流: 70mA , 電流変調度: 2mA , 測定間隔: $50\mu\text{m}$

については Lang らが解析を行なっている²¹⁾. 解析では, 注入電流や温度の微小変化に対する波長の変化率が, 注入電流や温度の値に対して周期的に変わること示している. これをここでの距離測定法にあてはめると, 戻り光が存在する場合, 注入電流の変調度を一定に保つだけでは波長変化量は一定にならず, 温度などの変動とともに測定感度変動することになる. このことは実験においても確かめられている. したがって, 戻り光の少ない光学系および出力端面反射率の高い半導体レーザーを使用する必要がある.

一方, 半導体レーザーはほぼ単一モードで発振しているが, 実際には多くの弱いサブモードを伴っている. サブモードの存在は, 一つの干渉計において数種類の波長の異なる光があることであり, 当然, 測定結果に影響を及ぼす. とくに, レーザー発振がモードの跳びの状態に近づくと, サブモードの一部が非常に大きくなり, 影響が顕著にあらわれる. その影響は, 本測定法においては測定値が測定距離に対して周期的に誤差を生じることであらわれ, その周期はレーザースペクトルのモード間隔で決まる. したがって, 発振モード分布がどの程度単一であるかどうかということもレーザー選定の重要な条件である.

4. む す び

以上, ヘテロダイン干渉法を用いた半導体レーザーの周波数(波長)変化の測定法, および半導体レーザーの波長シフト干渉計にヘテロダイン干渉法を用いた距離測定法について紹介した.

ヘテロダイン干渉による光周波数変化の測定法は, 一定感度, 高分解能で測定が行なえ, レーザーの光強度の変動にも影響されにくいなどの特長がある. ここでは半

導体レーザーの周波数変動の測定結果から、その有用性を示した。

半導体レーザーの波長シフト干渉計にヘテロダイナミクス法を用いた距離測定法では、数 cm の距離を数 μm オーダーの分解能で測定できる可能性を実験で示した。また、戻り光やサブモードの影響のあらわれ方についても簡単にふれた。

現在市販されている半導体レーザーでできる波長シフトの量はまだまだ小さく、高精度の光路差測定には精密な位相変化の測定が要求される。このような場合、ヘテロダイナミクス法のようなサブフリンジをよむ位相検出法が必要になる。

文 献

- 1) 中島俊典: “ヘテロダイナミクス法”, 光学, **9** (1980) 266-274.
- 2) A. Sona: *Laser Handbook*, Vol. 2, ed. F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Duobios (North-Holland, Amsterdam, 1971) p. 1466.
- 3) G. E. Sommargren: “Optical heterodyne profilometry,” *Appl. Opt.*, **20** (1981) 610-618.
- 4) 大塚喜弘, 伊東一良: “レーザー干渉を利用した微小変動の測定”, レーザー研究, **7** (1979) 228-240.
- 5) T. Watanabe, K. Iwata and R. Nagata: “Optical-heterodyne method for measuring a deflection angle,” *Opt. Commun.*, **48** (1984) 375-378.
- 6) 菊田久雄, 岩田耕一, 永田 良: “光路差をもつ光ヘテロダイナミクス法による光周波数変化の測定法”, 光学, **14** (1985) 456-461.
- 7) M. Yonemura: “Wavelength-change characteristics of semiconductor laser and their application to holographic contouring,” *Opt. Lett.*, **10** (1985) 1-3.
- 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) H. Kikuta, K. Iwata and R. Nagata: “Absolute distance measurement by wavelength shift interferometry with a laser diode: Some systematic error sources,” *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1654-1660.
- 10) T. Kubota, M. Nara and T. Yoshino: “Interferometer for measuring displacement and distance,” *Opt. Lett.*, **12** (1987) 310-312.
- 11) G. Beheim: “Fiber-optic interferometer using frequency-modulated laser diodes,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3469-3472.
- 12) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: “Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode,” *Opt. Lett.*, **12** (1987) 233-235.
- 13) G. Beheim and K. Frish: “Range finding using frequency-modulated laser diode,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1439.
- 14) 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.
- 15) A. Sona: *Laser Handbook*, Vol. 2, ed. F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Duobios (North-Holland, Amsterdam, 1971) p. 1476.
- 16) A. Sona: *ibid.*, p. 1469.
- 17) C. Cadler: *Modern Interferometer* (Hilger and Watts, 1951) p. 117.
- 18) H. Matsumoto: “Synthetic interferometric distance-measuring system using a CO₂ laser,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 493-498.
- 19) H. Matsumoto: “Infrared He-Xe laser interferometry for measuring length,” *Appl. Opt.*, **20** (1981) 231-234.
- 20) H. Matsumoto: “Synthetic millimeter-wave signal generation for length measurement,” *Appl. Opt.*, **23** (1984) 973.
- 21) R. Lang and K. Kobayashi: “External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 347-355.