

光路差をもつ光ヘテロダイン干渉計による 光周波数変化の測定法

菊田 久雄・岩田 耕一・永田 良

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

(1985年6月19日受理)

Measurement of Light Frequency Variation by Optical Heterodyne Interferometer with Known Path Difference

Hisao KIKUTA, Koichi IWATA and Ryo NAGATA

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

This paper proposes a new measuring method of variation of light frequency. It makes use of an optical heterodyne interferometer with known path difference. In this method the frequency variation is obtained by detecting the phase variation of the optical beat signal. It is possible to measure the variation at a constant sensitivity in a wider range of frequency variation than that of Fabry-Perot interferometer. For the verification of this method we have done two experiments. One is the measurement of the Doppler frequency of the laser light reflected at a vibrating mirror, and the other is the measurement of the frequency variation and fluctuation of the light emitted from a GaAlAs laser diode. Output phase variation in proportion to the frequency variation has been obtained. The minimum frequency variation detected was a few MHz. The practical possibility of this measuring method has been discussed.

1. ま え が き

一般に干渉計を用いて半導体レーザー光などの周波数の時間的変化を測定するには故意に光路差を与えた二光束干渉計やファブリ・ペロー干渉計が用いられている。これらは光路の長さ、すなわち光路差や共振器長を基準とし、光の周波数(波長)が変化すれば干渉光の相対的位相が変化することを利用して、光路差のある二光束干渉計では比較的大きな周波数変化(数百~数十 GHz)によって干渉光の干渉次数が変化することを利用して、光の強度変化の回数を検出し周波数変化を求める¹⁾。

ファブリ・ペロー干渉計はそれより小さい周波数変化(数十 GHz~数 MHz 以下)を光強度の変化として検出する²⁾。前者の方法では小さい周波数変化の測定は困難であり、一方、後者の方法では周波数の変化が大きくなると光の強度と光周波数の関係が直線的でなくなる。また、光源の強度変化も測定に影響を与える。

本論文では光周波数変化の新しい測定方法として故意

に光路差を与えた二光束干渉計に光ヘテロダイン法³⁾を組み合わせる方法を提案する。この干渉計をここでは光ヘテロダイン型遅延干渉計と呼ぶ。この方法は光ビート信号の位相変化から光周波数の変化を測定するため、測定結果が光源または検出光の強度変化の影響を受けにくい。また、広い範囲にわたる周波数変化に対し一定感度で高精度の検出が行なえる。

同様の方法を用いて光路差を可干渉距離より十分大きくとり光ビート信号のスペクトル解析を行なう方法で半導体レーザーのスペクトル分布を調べた例はあるが⁴⁾、ここでは光路差が光の可干渉距離より短い範囲において光ビート信号の位相検出を行なう点が異なる。

本方法はドップラ効果によって生じた光波の周波数偏移やその時間的変化を測定するのに用いる可能性がある。通常のレーザードップラ速度計では光波の周波数偏移を測定するのに、偏移を受けていない参照波と干渉させたり、周波数偏移の異なる散乱光と干渉させる方法をとる。この方法は光ヘテロダイン法の一種であるが、

検出された電気信号の周波数が光周波数の偏移に対応する。これに対し、本方法は電気信号の位相変化分が光周波数の偏移に対応する点が異なっている。

この報告ではこの光ヘテロダイン型遅延干渉計による光の周波数変化の測定原理について述べ、次に振動する鏡に当てた光のドップラ信号を検出する実験と半導体レーザー (GaAlAs) の発振周波数の変化を測る実験およびそれらの結果を示し、この方法の適用範囲などについて考察する。

2. 測定原理

周波数が時間的に変化する光の複素振幅は一般に次式で表わされる。

$$E_1 = E_{10} \exp \left[j2\pi \left\{ \nu_0 t + \int F(t) dt \right\} \right] \quad (1)$$

ここで E_{10} は光の振幅, ν_0 は初期の光周波数, $F(t)$ は光の周波数変化分である。このような光を **Fig. 1** に示すように二つに分け、一方に一定の周波数シフト $\Delta\nu$ を与えて再び重ね合わせる。

このとき、この二つの光の光路差を L 、それによる時間遅れを τ とすると、遅れた光の複素振幅は

$$E_2 = E_{20} \exp \left[j2\pi \left\{ \nu_0 (t - \tau) + \Delta\nu\tau + \int F(t - \tau) dt \right\} \right] \quad (2)$$

と表わされる。重ね合わされる光を E_1, E_2 とすると、合わされた光強度は次式で示す光ビート信号になる。

$$\begin{aligned} I &\propto |E_1 + E_2|^2 \\ &= E_{10}^2 + E_{20}^2 \\ &\quad + 2E_{10}E_{20} \cos \left[2\pi \left\{ \int (F(t) - F(t - \tau)) dt + \Delta\nu\tau + \nu_0\tau \right\} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$F(t)$ が時間 τ の間にはあまり変化しない場合、すなわち

$$F(t) - F(t - \tau) \approx \tau \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

と近似できる場合、(3)式は次式のように書ける。

$$\begin{aligned} I &\propto E_{10}^2 + E_{20}^2 \\ &\quad + 2E_{10}E_{20} \cos [2\pi \{ \tau F(t) + \Delta\nu\tau + \nu_0\tau \}] \end{aligned} \quad (5)$$

したがって(4)式の近似が成立する範囲では(5)式の光

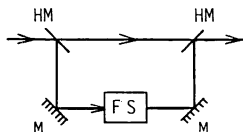


Fig. 1 Principle of measurement. HM: Half Mirror, M: Mirror, FS: Frequency shifter.

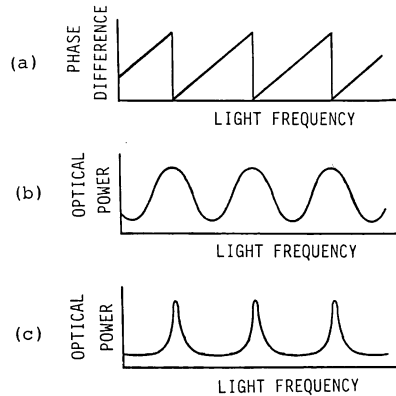


Fig. 2 Output characteristics of three types of light frequency measurement. (a) Path-difference interferometer with heterodyne detection, (b) path-difference interferometer without heterodyne detection, and (c) Fabry-Perot interferometer.

ビート信号の位相は $2\pi\tau\{\nu_0 + F(t)\}$ である。このとき遅延時間 τ が一定である場合、 ν_0 は初期の周波数で一定なので、光ビート信号の位相変化は光の周波数変化 $F(t)$ のみに依存する。このような条件のもとで τ が既知の場合、光ビート信号を光電変換し、その位相変化を電気的に検出することによって光の周波数変化がわかる。

電気信号の位相変化の検出は、光電変換後の電気信号を中心周波数 $\Delta\nu$ の帯域フィルタに通し、信号が零位置をよぎる時間の変化を測定する。このような電気的処理を行なうと、測定結果がもとの光強度に影響されにくくなる。普通、電気的位相検出器の出力電圧は 2π の位相変化内でリニアに変化する。このため、光周波数変化に対する最終的な出力電圧の間の関係をリニアにできる (**Fig. 2** 参照)。

3. 実験と結果

光ヘテロダイン型遅延干渉計を用いて二つの実験を行なった。第一の実験では振動する鏡からの反射光のドップラ周波数を検出した。また第二の実験では半導体レーザーの入力電流のわずかな変化に対する光周波数の変化を調べた。以下、これらの実験方法とその結果について述べる。

3.1 ドップラ周波数の検出

スピーカ (口径 16 cm) の中央に 5 mm 角の小さな鏡をつけ、これに He-Ne レーザー光 (波長 633 nm) を当てる。スピーカが振動するとき、この反射光のドップラ周波数を検出する。

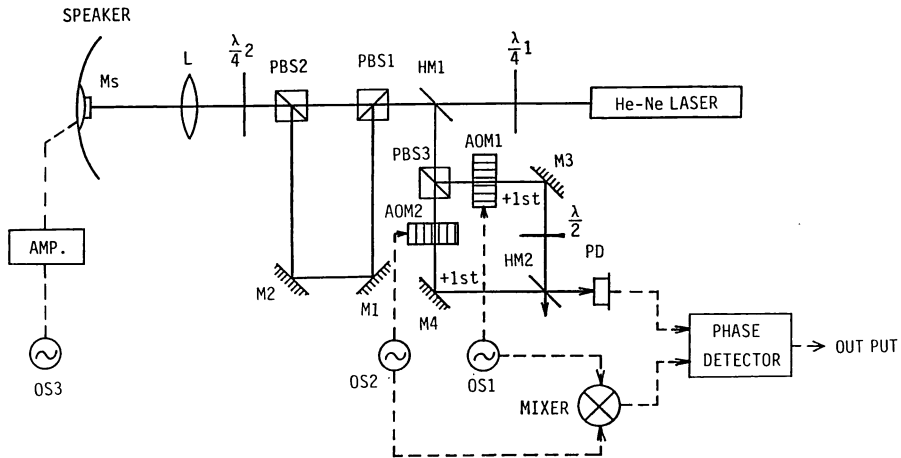


Fig. 3 Optical and electrical system for the measurement of optical Doppler frequency.

測定原理で述べたところによると、反射光を二つに分け、遅延時間 τ (光路差 L) を与えて重ね合わせることで、周波数変化が測定できるのであるが、本実験では実際に周波数変化を検出するために大きな遅延時間 (光路差にして数 m 以上) が必要になる。したがって、単純に光を分けて重ね合わせても干渉しない。

そこで鏡に入射する光をあらかじめ二つに分け、一方に τ と等しく時間差を与えてから鏡に入射する。光は鏡の振動によって周波数変化を与えられ、この反射光を再び二つに分け、一方を同じ時間差 τ だけ遅らせることによって光の可干渉距離にかかわらず干渉させることができる。このとき干渉光の位相変化は鏡での反射による周波数変化のみを示すことになる。

このようにすると鏡が静止している場合、干渉計全体としての光路差はなくなるが、鏡が動いている場合には二つの光は時間差 τ の別の時刻に反射されるため干渉する光の光路差はわずかに異なる。この差は鏡の速度に比例するため、結局、二つの光の位相差が鏡の速度に比例することになる。

本実験の光学系・電気系を Fig. 3 に示す。光学系は光路差を与える部分と光ヘテロダイン部に分けており、二つの遅延光路に同一光学系を用いている。このようにすると、先に述べたように遅延時間を変化させてもつねに二つの光が干渉するという利点があるだけでなく、遅延光路の光学系の光路長変化がゆっくりしたわずかなものであれば、二つの光両方に同じだけ影響し、干渉した結果には影響しなくなるという大きな利点がある。

レーザーから出た光は $1/4$ 波長板 ($\lambda/4$ 板 1) により円偏光になり、偏光ビームスプリッタ (PBS1) により互いに垂直な偏光成分に分けられる。一つの偏光方向の

光 A は PBS1, PBS2 を透過して直接スピーカの鏡面 M_s にあたる。もう一方の偏光方向の光 B は PBS1, PBS2 でともに反射され、遅延光路を通って M_s にあたる。 $1/4$ 波長板 ($\lambda/4$ 板 2) を各光が往復することにより偏光の方向が入れ替わるように配置しておく、反射された光 A は PBS2 で反射され遅延光路を通ってもどっていき、光 B は PBS2, PBS1 を透過してもどっていく。そしてこれらの光はハーフミラー (HM1) によって光ヘテロダイン干渉計に導かれる。光は PBS3 で再び光 A, B に分けられ、それぞれ音響光学変調素子 (AOM1, AOM2) による周波数シフト 40.000 MHz, 40.455 MHz を与えられ、ハーフミラー (HM2) で再び重ね合わされる。 $1/2$ 波長板 ($\lambda/2$ 板) は光 A と B の偏光方向を合わせるように配置する。

レンズ L はその焦点がほぼ M_s の位置にくるように配置する。これにより鏡 M_s の面の振動が平行移動から多少ずれていても入射光と反射光の平行が保たれる (Fig. 4 参照)。

スピーカの振動振幅が数 mm と大きいため、レンズ L は焦点深度を深くとるように焦点距離 500 mm のものを使用した。

光ビート信号はフォトダイオード (PD) で電気信号に変換され、位相比較器によってミキサからの電気信号との位相差を電圧として出力する。この出力電圧はスピー

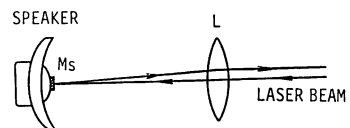


Fig. 4 Effect of lens L.

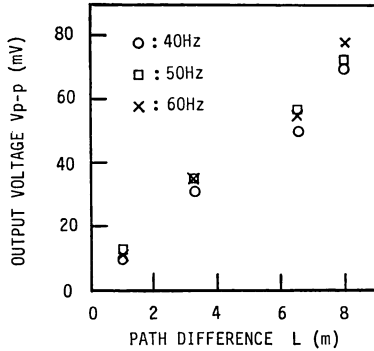


Fig. 5 Dependence of the output voltage (peak to peak) of the phase detector upon the path difference of the interferometer.

かの振動に合わせて変動するので、電圧の振幅値を読みとる。位相比較器は PLL IC MC 4044 を使用した回路で -2π から 2π の位相差を直線的に $0.974 V/2\pi$ rad の割合で出力する。位相差の最小読取りは約 $2\pi/500$ であり、応答周波数は 500 Hz 以下である。

実験はスピーカへの入力電圧の振幅を一定にし、数種の光路差において振動周波数 40, 50, 60 Hz の場合の位相比較器の出力電圧振幅を調べた。Fig. 5 にその結果を示す。

各振動周波数において光路差 L と出力電圧振幅 V_{p-p} がほぼ比例している。このことは検出できる位相変化は光路差 L に比例していることを示している。(5)式に示すように位相変化は $F(t)$ が一定であれば τ に比例する。 τ は L/C であらわされるので、この結果は測定原理の考えが妥当なことを表わしている。

それぞれの周波数において L と V_{p-p} の関係が完全な直線にならないのは光学系とくに光ヘテロダイン干渉計部の振動による。また、どの振動周波数においてもグラ

フの傾きがほぼ同じであることから、この程度の振動周波数では鏡の最大速度が変わらないことがわかる。これらの値からドップラ周波数を計算すると約 ± 1.5 MHz の正弦的な周波数偏移が起こっていることになる。この値を鏡 M_s の振動速度に直すと約 ± 4.9 cm/s になり、フォトニックセンサー⁵⁾によって測った値約 ± 5.0 cm/s とほぼ等しい結果を得た。

3.2 半導体レーザー光の周波数変化の測定

半導体レーザーの発振周波数は入力電流や温度に微妙に影響される。そこで光ヘテロダイン型遅延干渉計を利用してこの周波数変動を調べる簡単な実験を行なった。

実験の光学系・電気系を Fig. 6 に示す。半導体レーザーは松下 MEL 7475 (GaAlAs, 波長 791 nm, 入力電流 40 mA 時の光出力 2 mW) を使用した。レーザーから出た光をハーフミラー (HM1) で二つに分け、光路差をつけてハーフミラー (HM2) で再び重ね合わせる。

3.1 節の実験と同様、AOM 1, 2 によってそれぞれの光に周波数シフトを与え、455 kHz の光ビート信号をフォトダイオード (PD) で受ける。電気系については(1)の実験と同じものを使用した。

半導体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る実験を行なった。結果を Fig. 7 に示す。(a)は光路差が 300 mm の場合の結果、(b)は光路差 0 ± 0.1 mm の場合すなわち光学系の安定度を示している。(a)、(b)を比較すると長い時間での出力変動が同程度なのでレーザー光の長時間での安定度はわからなかったが、短い時間での周波数変動は検出できた。(a)のグラフでは約 10 MHz 程度になっている。

次に同じ光学系でレーザー入力電流を 36 mA を中心として正弦的なわずかの交調を加えてやり、これによる

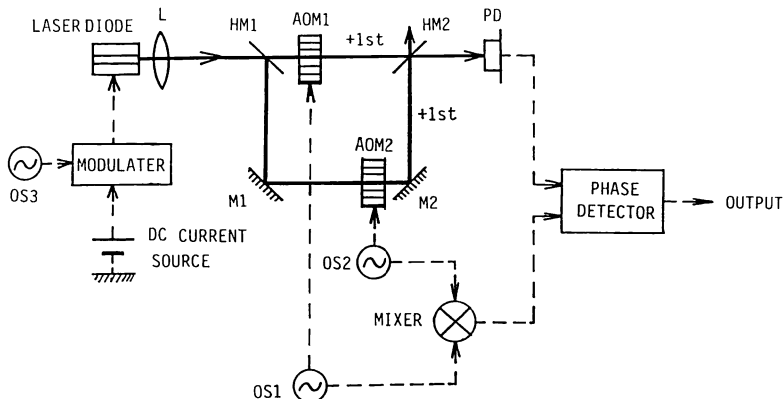


Fig. 6 Optical and electrical system for the measurement of light frequency variation of a laser diode.

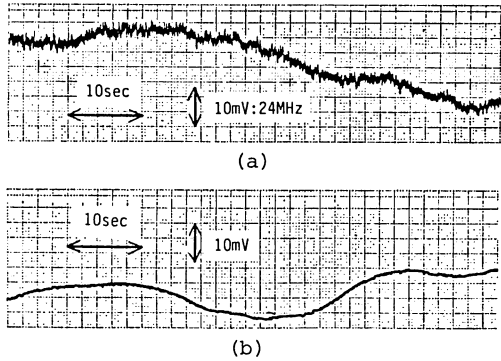


Fig. 7 Temporal variation of output voltage at constant injection current of a laser diode. (a) The path difference 300 mm. (b) The path difference smaller than 0.1 mm.

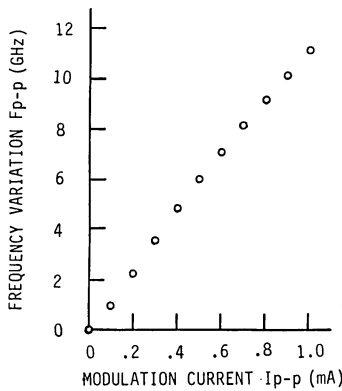


Fig. 8 Dependence of light frequency variation of a laser diode upon modulation current at constant bias current (36 mA) and constant modulation frequency (1 kHz).

光周波数の変化を調べた。入力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 **Fig. 8** に、変調度を一定にして変調周波数を変化させた結果を **Fig. 9** に示す。両方のグラフとも検出電圧値に電気回路の周波数特性を考慮して補正を行なった値を示してある。

4. 考 察

検出可能な光周波数変化は遅延距離によって異なる。位相変化の最小検出限界を $2\pi/1,000$ 、最大を 2π と設定すると **Fig. 10** の斜線部に示すような遅延光路差と検出可能な光周波数変化の範囲が得られる。

一方、(4)式の近似は光周波数変化の時間的変化率が小さいという条件で求められている。いま、光周波数変化 $F(t)$ を

$$F(t) = F_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (6)$$

とすると

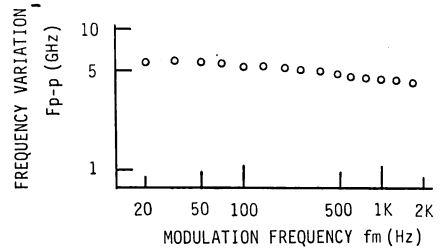


Fig. 9 Dependence of light frequency variation of a laser diode upon modulation frequency at constant bias current (36 mA) and constant modulation current (peak to peak 0.4 mA).

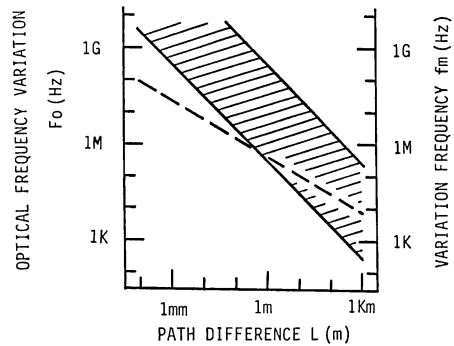


Fig. 10 Detectable frequency variation range and optical path difference.

$$\int \{F(t) - F(t-\tau)\} dt \\ = \tau F_0 \frac{\sin(\pi f_m \tau)}{\pi f_m \tau} \cdot \sin\left\{2\pi f_m \left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right\} \quad (7)$$

となる。したがって位相検出の感度は $\sin(\pi f_m \tau)/\pi f_m \tau$ に比例し、位相ずれは $\pi f_m \tau$ になる。(4)式の近似は $\sin(\pi f_m \tau)/\pi f_m \tau$ が1、 $\pi f_m \tau$ が0とみなせる範囲を考えている。 $\sin(\pi f_m \tau)/\pi f_m \tau \approx 0.999$ となるような $\pi f_m \tau (\approx 4.4^\circ)$ を(5)式が成立する限界と考えると **Fig. 10** の破線が得られる。光周波数の変化の周波数 f_m はこれよりも小さくなければならない。**Fig. 10** より遅延距離を与える場合の測定しうる光周波数変化の大きさ F_0 と変化の速さ f_m を見積もることができる。

3.1節の実験方法によって一般の振動物体の速度測定を行なう場合を考える。検出する位相信号 $2\pi\tau F(t)$ は遅延距離とドップラ周波数に比例しており、位相検出を精度をもって行なうためには相当長い遅延距離が必要になる。たとえば振幅 0.1 mm 周波数 1 kHz の振動を設定すると、検出する位相変化が $2\pi/10$ 程度になるためには 15 m の遅延距離が必要になる。これを実現するためには偏波面保存型光ファイバを利用することが考えられる。

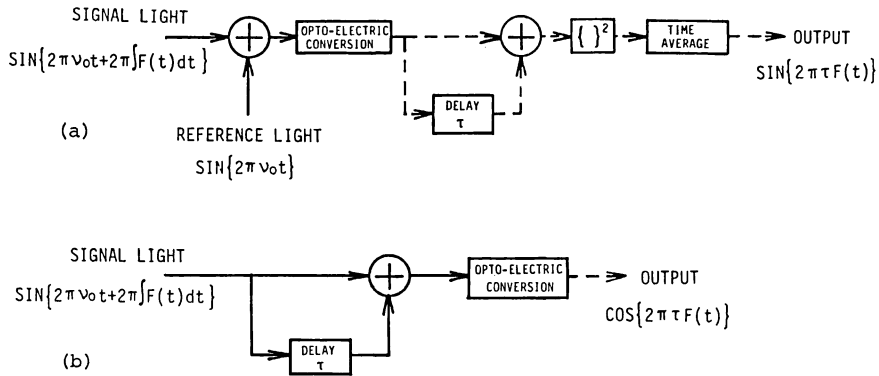


Fig. 11 Two methods of light frequency measurement. (a) Laser Doppler velocimeter (reference beam type). (b) Path-difference interferometer.

3.2 節の半導体レーザーでの実験は光学系の安定化を行えばレーザー発振周波数の特性試験に有用であると考える。ただし、レーザー光の縦モードにとびのある場合はこれに対する配慮が必要となる。

本論文では光周波数の変化について考えてきたが、これを光の位相の変化と考えると(1)式は次のように書くことができる。

$$E_1 = E_{10} \exp [j\{2\pi\nu_0 t + \phi(t)\}] \quad (8)$$

$$\text{ただし、} \phi(t) = \int F(t) dt$$

ここで位相変化 $\phi(t)$ を

$$\phi(t) = \phi_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (9)$$

とおくと、測定される位相は次式になる。

$$\begin{aligned} \int \{F(t) - F(t-\tau)\} dt &= \phi(t) - \phi(t-\tau) \\ &= 2\phi_0 \sin(\pi f_m \tau) \cos(2\pi f_m t) \end{aligned} \quad (10)$$

したがって $|\sin(\pi f_m \tau)| \approx 1$ の領域では光の位相変化が検出できる。ただし ϕ_0 は π より小さくなければならない。検出信号は $\pi/2$ の位相ずれが生じる。この領域を利用して Bowers らは光ホモダイン法で LiNbO_3 の表面波の振幅を測定している⁶⁾。

最後に、このような干渉計により光周波数の変化を測る方法と、一般の参照光形 LDV のように光ビート信号の周波数により光周波数の変化を測る方法との原理的な違いについて考える。参照光形の LDV は信号光と参照光による光ビート信号の単位時間当りの位相ずれを測っている。すなわち光ビート信号を光電変換し、この電気信号の位相を時間微分している。位相微分を行なうアナログ的操作に Fig. 11(a) に示す方法がある。微分を行なうために電気的な遅延素子を用いている。

一方、光路差をもった干渉計による方法では光信号の状態に遅延光路(光路差)を設けることによって位相微

分を行なっている。この場合の信号処理の概略を Fig. 11(b) に示す。したがって二つの方法は周波数変化検出のための位相微分の操作を電氣的に行なうか光学的に行なうかの点が異なる。本方法は基本的に(b)の方法であり、 $2\pi\tau F(t)$ の検出のために光ヘテロダイン法を用いたものである。

また、電気的な方法では信号光を光電変換した後に遅延をとっているので、光の位相情報をなくさないために参照光を用いて干渉させる必要がある。これに対し、光学的な方法では信号光を光電変換する前に遅延をとっているため、特別な参照光は不必要である。

5. 結 言

光の周波数変化を測る方法として光ヘテロダイン型遅延干渉計を提案し、その適応範囲を示した。また、二つの実験を行ない、数 MHz の周波数変化を測ることができた。この際、光学系の安定性が問題になったが、十分な安定化を行えば数百 kHz 以下の測定も行なえるであろう。実際への応用は半導体レーザー光の発振周波数の特性試験に有効であると考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたって半導体レーザーを提供していただいた松下電子工業㈱に感謝いたします。

文 献

- 1) M. Suyama, N. Ogasawara and R. Ito: Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L 395.
- 2) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako: Trans. IECE Jpn., **E 65** (1982) 65.
- 3) 岩田耕一: O plus E, 2月号 (1982) 90.
- 4) T. Okoshi, K. Kikuchi and A. Nakayama: Electron. Lett., **16** (1980) 630.
- 5) 高田容治: オプトロニクス, **27** (1984) 51.
- 6) J.E. Bowers: Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 231.