

8. 干渉法によるレーザー光の周波数偏移測定とその応用

藤 田 忠 重

1 序論

マイケルソン干渉計で得られる干渉縞の移動を検出し、位相差変化を測定することによってレーザー光の周波数偏移や光路差の微小変化を求める手法を考案した。

従来までの位相差変化の測定にはヘテロダイン干渉法が用いられており、干渉計にA Oセル等の光周波数シフターを挿入して光ビート信号の位相変化を検出していた。¹⁾ それに対し、本法は光周波数の偏移を干渉縞の空間的な位相変化すなわち移動として捉え、レーザー光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えるというヘテロダイン法と同様の特徴を残しながら、構成を簡単にすることができた。このようなサブフリンジオーダーの位相差変化の測定は、光波干渉測長器をはじめ、光学鏡面の表面粗さ、微小変動、微小振動等の測定において、すでに多くの利用方法が提案され実用化に至っており、現在では欠かせないものとなっている。²⁾

本研究では、半導体レーザーの注入電流一周波数偏移特性を調べた。干渉縞の移動検出には1次元イメージ・センサーと空間フィルター検出器の2種類の検出器を使い、それぞれの分解能と検出速度を検討した。また、変調度や変調周波数に対する光周波数変化の測定も行った。さらにこの結果を用いて、空間フィルター検出器の出力信号を半導体レーザーの注入電流にフィードバックして干渉縞を安定させ、その効果が理論と一致することを確認した。

2 原理

干渉計の2つのミラーの間の傾きによりPhoto. 1のような干渉縞ができる。この干渉縞は干渉する2点の光路差が $\lambda/2$ (λ : 光の波長) の n 倍 (n : 整数) では明るく、 $(n+1/2)$ 倍では暗くなることで構成される。従って、光周波数や光路差に変化が生じると干渉縞が移動する。そこで、逆にこの干渉縞の移動を検出することで光周波数や光路差の変化が測定できる。

干渉計で得られる干渉縞強度 $I(x)$ は、光路差を L 、双方のミラーで反射された波面の傾きを α とすると、

$$I(x) = A + B \cos \frac{2\pi}{\lambda} (L + x \sin \alpha) \quad \dots (1)$$

という振幅 B の正弦波で与えられる。また位相 ϕ は、 $c = \lambda \nu$ を用いて

$$\phi = \frac{2\pi L \nu}{c} \quad \dots (2)$$

と表される。レーザー光の周波数偏移による位相の変化 $\Delta \phi$ は、

$$\Delta \phi = \frac{2\pi L \Delta \nu}{c} \quad \dots (3)$$

と表せる。従って、 $\Delta \phi$ を測定することで、周波数偏移を測定できる。

3 測定方法と装置

3. 1 干渉縞の移動の検出

3. 1. 1 高速フーリエ変換法 (FFT法)

検出器には1次元イメージ・センサーを使い、その出力信号をA/D変換し、コン

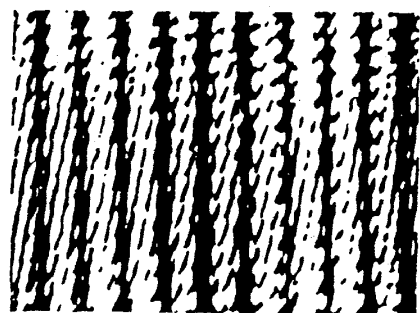


Photo. 1 干渉計で得られる干渉縞の例

ピューターに取り込む。その1024素子分の波形信号に、フーリエ変換を施す。位相 ϕ は、スペクトルのピーク位置での実数部 X_{Rmax} 、と虚数部 X_{Imax} により求まる。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_{Imax}}{X_{Rmax}} \right) \quad \dots (4)$$

この値は、干渉縞の変化に対して一定感度で変化するので、位相変化によりレーザー光の周波数偏移を測定できる。また、このFFT法では1 Hz以上の高速変動は捉えることができないが、分解能は $\lambda/100$ 程度と優れている。

3. 1. 2 空間フィルター法

楕状に並んだ光電素子の接続を循環的に変えることにより、実質的な検出器の動きを作る。すると、静止した干渉縞では検出器上の各素子の出力が周期的に変化する。干渉縞が移動すると、この正弦波の位相が変化するので、検出器上の干渉縞の移動が分かる。³⁾ この空間フィルター法では分解能が $\lambda/32$ とFFT法より劣るが、数kHz程度の高速変動を検出感度160mV/fringeで捉えることができる。

3. 2 測定装置

(1) 半導体レーザー $\lambda = 789 \text{ nm}$ 、最大出力 30mW

(2) 検出器

a) 一次元イメージ・センサー 1728素子 (ピッチ15 μm 、幅14 μm)

b) 空間フィルター検出器 128素子 (ピッチ40 μm 、幅20 μm 、長さ5.12mm) を各8素子おきに結線したものを電氣的に62.5kHzで切り換える電子走査型

4 周波数偏移の測定

4. 1 FFT法による半導体レーザーの周波数偏移の測定

半導体レーザーは、その注入電流を変化させることで、発振周波数に偏移を起こすことは前に述べた。ここではレーザーの注入電流を連続的に変えて、レーザーの発振周波数の偏移量を測定する。

(3) 式より、位相変化量 $\Delta\phi$ は、光路差 L に比例しているため、光路差を変えると、注入電流に対する位相の変化率に違いができる。そこで、実際の実験では光路差を-40 $\sim$ +40mmの範囲で10mmごとに变化させて測定した。また、注入電流は65 $\sim$ 70mAまで5mAの変調幅とした。この測定の実験系をFig. 1に、位相変化率をミラーの位置 (光路差) に対してプロットした結果をFig. 2に示す。

注入電流に対する平均周波数感度は、 $\Delta\nu = 4.97 \pm 0.47 \text{ GHz/mA}$ (但し、 $|L| > 10 \text{ mm}$) であり、他の文献の数値とほぼ一致している。⁴⁾

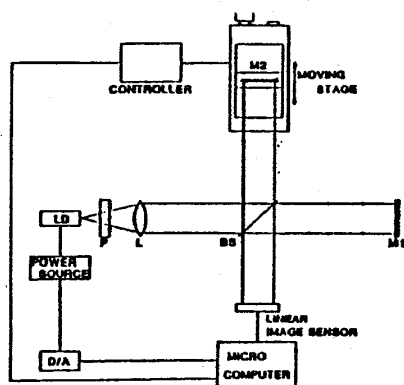


Fig. 1 半導体レーザー周波数偏移測定用光学系

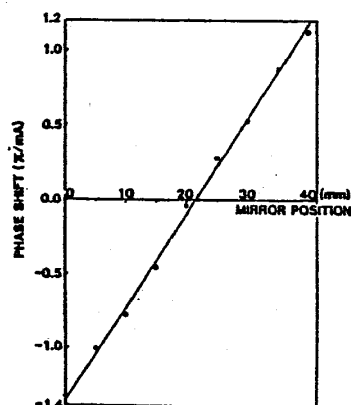


Fig. 2 光路差に対する注入電流変化による位相変化率

4. 2 空間フィルター法

4. 2. 1 半導体レーザーの周波数偏移の測定

FFT法による測定では、FFT解析のために計算時間がかかるので、高速で変動

する周波数偏移を捉えることができない。それに対し、空間フィルタ検出器を用いた干渉縞の変動の検出では、最大5 kHzの変動を追従できた。さらに、変調度を小さくするか光路差を小さくすれば、より高速な変動を検出できる。

空間フィルタ法による干渉縞変動の測定結果をFig. 3に示す。これから偏移の振幅を求めると、p-p値で約420mVであり、これは約2.6 fringeの縞移動に相当する。この値はFFT法の測定結果に一致している。

4.2.2 半導体レーザーの変調特性の測定
ここでは、レーザー注入電流を60mAを中心に三角波で電流変調を加えて、それによる周波数偏移の応答を測定した。

(1) 変調度に対する光周波数変化

まず、注入電流の変調周波数を100Hzで一定、変調度を6.0mAまで0.5mAごとに变化させ測定した結果をFig. 4に示す。レーザー注入電流の変化に対して空間フィルタ出力電圧も三角波状に変動するので、その出力電圧の振幅を求め、光周波数の偏移量に換算した。

(2) 変調周波数に対する光周波数変化

次に、電流の変調度を一定にして変調周波数を変化させ測定することにした。実験では検出特性の制限により、1kHzまでは変調度を2mAとして、それ以上の周波数に対しては変調度を1mAとした。測定した変調周波数は、10Hz～5kHzまでの間で適当にとり、Fig. 5にまとめた。2kHz付近から光周波数の偏移量が落ちている。

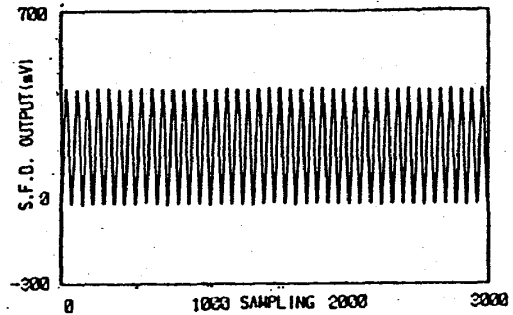


Fig. 3 sin波による半導体レーザーの注入電流変調 (変調周波数200Hz, 60.0→65.0mA, 光路差40mm)

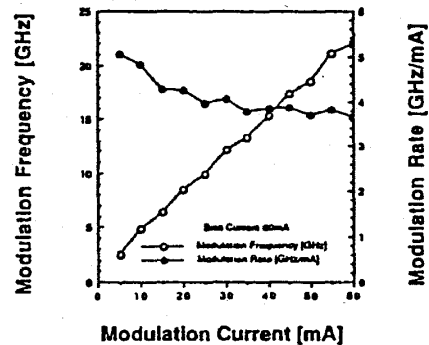


Fig. 4 変調度に対する光周波数変化

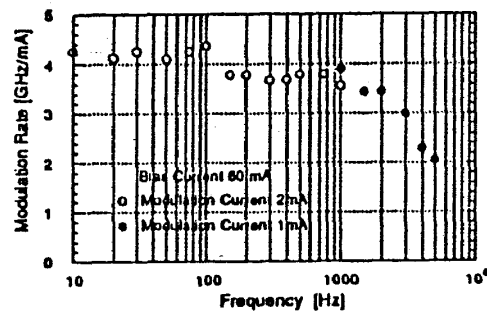


Fig. 5 変調周波数に対する光周波数変化

5 フィードバック効果の確認

5.1 フィードバックの原理

フィードバック系の原理図をFig. 6に示す。干渉縞に変動が無いとすれば、検出器の出力電圧は一定である。この時出力電圧のOFFSETを0Vにする。検出器の出力をゲインGのアンプを通した後、半導体レーザーの電源に戻す。これによって半導体レーザーの発振周波数は固定され、安定する。外乱により干渉縞にa [fringe]という変動が発生すると次のような変動が起こる。

$$B = \frac{G_B a}{1 - G_A G_B G_C f} = 86.6 a \text{ [mV/fringe]}$$

B [mV]	: 空間フィルタ出力電圧
$G_A = 0.1 \text{ [mA/mV]}$	: 半導体レーザー電源ゲイン
$G_B = 160 \text{ [mV/fringe]}$	: 空間フィルタアンプゲイン
$G_C = -0.1$	: 反転増幅器のゲイン
$f = 0.52 \text{ [fringe/mA]}$	: 干渉縞移動-注入電流特性

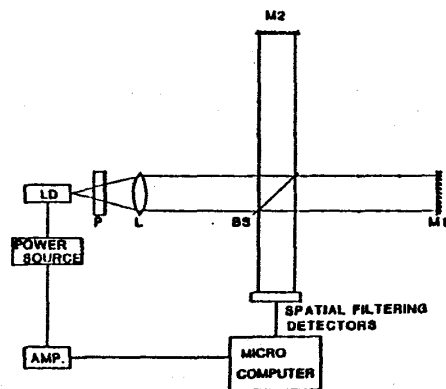


Fig. 6 フィードバック系の原理図

(ただし、 $f = 0.013 [\text{fringe}/\text{mA} \cdot \text{mm}] \times L [\text{mm}]$)
 このことから、フィードバックON時の干渉縞の移動感度は、約半分の86.6mV/fringeになっている。また、逆に外乱の影響も半分になる。

5.2 フィードバック効果の測定

以上に述べた半導体レーザーの周波数偏移特性はフィードバック干渉計に用いられている。⁵⁾この特長を光路差変化の測定に利用する可能性を検討した。

Fig. 7のようにガラス板を干渉計の片方の腕の光路の途中に挿入して、そのガラス板に傾きを与えることによって光路差を変化させ、干渉縞変動を検出した。

フィードバックOFFの状態でのガラス板の傾きによる干渉縞移動量を光路差変化に換算すると、Fig. 8上の□のグラフになる。次に、フィードバックをかけ測定した。この時の干渉縞移動感度は、先に計算したように、86.6mV/fringeとなっている。この値を用いて光路差変化を計算すると●印のグラフになる。

5.3 光路差変化量の算出

ガラスへの入射角を θ_1 、ガラス内での屈折角を θ_2 、ガラスの厚さを d 、空気屈折率を n 、ガラスの屈折率を n' とすれば、光路差の変化量は、次式で与えられる。

$$\Delta L = \frac{d}{\sin \theta_2} \{n' - n \cos (\theta_1 - \theta_2)\}, \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n}{n'}, \sin \theta_1 \right)$$

ガラス板の厚さを1.1mmとし、屈折率を1.5と仮定すれば、理論値はFig. 8の○印のグラフになり、測定値に良く一致している。

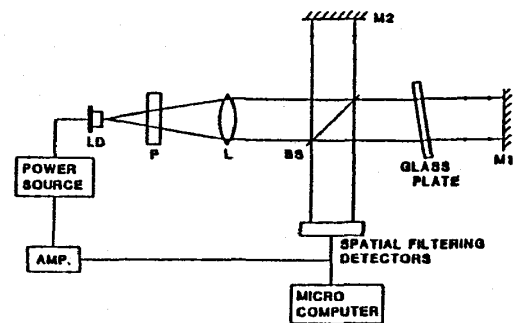


Fig. 7 ガラス板による光路差変化の測定用光学系

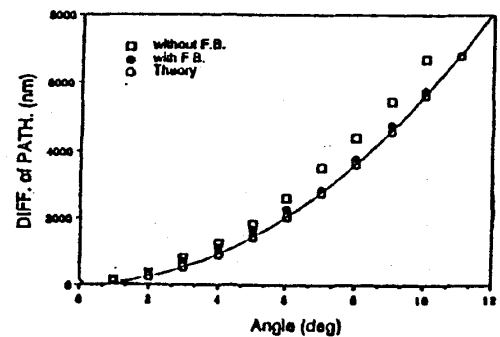


Fig. 8 ガラス板による光路差変化の測定値

および理論値のグラフ

6 結論

レーザーの周波数偏移を干渉計の干渉縞移動により求める手法を考案した。この方法では、簡単な光学系で従来はヘテロダイン法でしかできなかった一定感度での測定が可能である。また、検出部に空間フィルター検出器を用い、ほぼ実時間で0.1GHzの光周波数変動や $\lambda/32$ の光路差変化を測定できた。さらに、検出した出力信号をレーザーの電源にフィードバックすることにより、その効果を確認した。このことにより、フィードバックの効果を利用して、外乱を取り除き光路差の変化量を測定する可能性を見いだした。

7 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 村上 卓也・山口 一郎, "空間フィルター検出器を用いた光ファイバー干渉温度センサー," 光学 17 (1988) 239-244.
- 4) K. Tatsuno and Y. Tsunoda, "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," Appl. Opt. 26 (1987) 37-40.
- 5) 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.