



## 戻り光の誘導変調による複合干渉計型ファイバーセンサー

江口 正・梅田 倫弘\*・山口十六夫

静岡大学電子工学部研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1987年1月10日受理)

### Compound Interferometric Optical Fiber Sensor Using Induced Modulation of Laser Cavity Field

Tadashi EGUCHI, Norihiro UMEDA\* and Tomuo YAMAGUCHI

Research Institute of Electronics, Shizuoka University,

3-5-1, Jouhoku, Hamamatsu 432

We have developed a compound interferometric optical fiber sensor which consists of a fiber Fabry-Perot interferometer and mode-mode interferometer in polarization maintaining fiber. The interference fringe of the Fabry-Perot interferometer is recovered from a modulation of laser cavity field induced by the feedback light from fiber. The optical fiber sensor constructed by the two interferometers leads to a high resolution and a large dynamic range. We show the principle and demonstration as a temperature sensor.

#### 1. はじめに

光ファイバーの研究が進展し高性能な光ファイバーが得られるにつれて、光を用いてさまざまな物理量を計測する光ファイバーセンサーが注目を集め、現在では各種の手法が提案されている<sup>1-14)</sup>。光ファイバーセンサーは、ファイバーを単に伝送媒体として用いる導波路型とファイバー自身をセンシングエレメントとして用いる機能型に分けられる。これらのうち、後者はファイバーの曲り損失を検出する方法やファイバーを伝播する光の位相変化を、干渉効果を用いて検出する方法などがある。干渉型ファイバーセンサーには、その光学系に応じてマイケルソン型<sup>12)</sup>、マッハ・ツェンダー型<sup>6-9)</sup>、ファブリー・ペロー型ファイバーセンサー<sup>9-11)</sup>などがある。なかでも、ファブリー・ペロー型は、高感度、光分岐素子が不要、光学系の調節が容易、構造が簡単などの特徴をもっている。しかし、実際に光ファイバーにレーザー光を入射させると、入射光学系やファイバー端面からの反射光

がレーザー光源に戻る、いわゆるバックトークによってレーザー強度が非常に不安定になる。とくに、周波数安定化レーザーを用いた場合、0.1%程度の戻り光でも周波数制御できないことがある。これを防ぐには、光軸をずらしたり光アイソレータを使う必要があり、光学調節や光学系が複雑になる。

しかし、逆に、レーザー強度は戻り光の強度や位相状態によって変化するので、レーザー強度をモニターすることによって戻り光の状態を知ることができる<sup>16)</sup>。そこで、ファブリー・ペロー型ファイバーの両端面の反射光による干渉光を戻り光としてレーザー光源においてその干渉縞を検出することが考えられる。また、干渉位相の変化方向を検出するには、二周波直交偏光光源である周波数安定化横ゼーマンレーザー (STZL)<sup>15)</sup>による光ヘテロダイン検波方式を用いればよい。

一方、上述の干渉型ファイバーセンサーは高感度であるが、広帯域な測定が困難である。そこで、偏波面保存ファイバー (PMF) の直交主軸のリターデーション差の温度特性を利用した偏波モード間干渉型ファイバーセンサーが提案されている<sup>13,14)</sup>。STZLの二成分を主軸方向に入射させれば偏波モード間の干渉位相がヘテロダイン検出によって精度よく測定できる。

\* 現在：東京農工大学工学部 〒184 小金井市中町2-24-16  
Present address: Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Naka-machi, Koganei 184

そこで、われわれはファイバーからの戻り光をレーザーで検出する光ファイバーファブリ・ペロー干渉計 (FFPI) と PMF の直交主軸を伝播する光波の位相遅れをヘテロダイン検出する偏波モード干渉計 (PI) を組み合わせた光ファイバーセンサーを考案した。本論文では、試作した光ファイバーセンサーの原理と温度センシングに対する実験結果について報告する。

## 2. 原 理

STZL の光はレーザー管に加えられた横磁場に対し、水平と垂直のわずかに周波数の異なる直線偏光からなる。STZL は、この二つの偏光の発振周波数差が一定になるように制御されている。Fig. 1 において、STZL の二周波直交偏光の電界はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} E_{r,x} &= A_{r,x} \exp i\omega_x t \\ E_{r,y} &= A_{r,y} \exp i\omega_y t \end{aligned} \quad (1)$$

これらを PMF の直交固有軸に合わせて入射させると、二成分はそれぞれ位相遅れを起し、PMF からの出射光は、

$$\begin{aligned} E_{s,x} &= A_{s,x} \exp i(\omega_x t + \phi_x) \\ E_{s,y} &= A_{s,y} \exp i(\omega_y t + \phi_y) \end{aligned} \quad (2)$$

と表わすことができる。このとき、PMF での位相遅れは、次のようになる<sup>12,13)</sup>。

$$\phi_i = n_i k L \quad (i = x, y) \quad (3)$$

ここで、 $n_i$  はそれぞれの方向の屈折率、 $k$  はレーザー光の波数、 $L$  は PMF の長さである。光源に STZL を用いたので、 $x$  と  $y$  方向の直線偏光には数百 kHz の周波数差がある。しかし、この差は光の周波数に比べ非常に小さいので、二つの偏光の波数は等しいとみなした。出射光を  $45^\circ$  の直線偏光子を通して光電変換すると光電流  $I_s$  は、次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} 2I_s &= 2|E_{s,x} \cos 45^\circ + E_{s,y} \sin 45^\circ|^2 \\ &= A_{s,x}^2 + A_{s,y}^2 + 2A_{s,x}A_{s,y} \cos \{(\omega_x - \omega_y)t \\ &\quad + \phi_x - \phi_y\} \end{aligned} \quad (4)$$

位相遅れの差  $\Delta\phi$  は、

$$\Delta\phi = \phi_x - \phi_y = \Delta n k L \quad (\Delta n = n_x - n_y) \quad (5)$$

と表わされる。PMF 近傍の温度変化によって PMF の長さや屈折率に変化が生じると位相遅れの差  $\Delta\phi$  は、

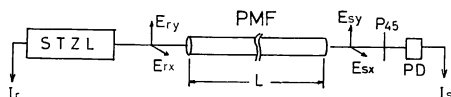


Fig. 1 Principle of mode-mode interferometer using stabilized transverse Zeeman laser.

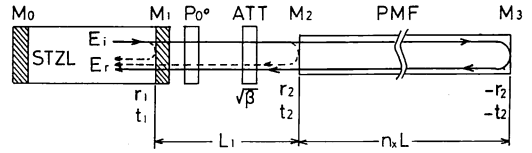


Fig. 2 Principle of optical fiber Fabry-Perot interferometer using the frequency and amplitude fluctuations of laser induced by the feedback light from the fiber.

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dT} = \frac{\delta(\Delta n)}{\delta T} kL + \Delta n k \frac{\delta L}{\delta T} \quad (6)$$

だけ位相シフトする。STZL の高反射率鏡からの光を  $45^\circ$  の直線偏光子を通して得られた信号

$$I_r = A_{r,x}^2 + A_{r,y}^2 + 2A_{r,x}A_{r,y} \cos(\omega_x - \omega_y)t \quad (7)$$

を位相基準に用い、(4)式の位相シフトを検出すれば、PMF 近傍の温度変化を計測できる。

ところで、レーザー光を PMF に入射させると PMF の両端面での反射光が STZL に戻る。このとき、STZL が戻り光によってどのような影響を受けるか Fig. 2 を用いて考える。戻り光によって STZL の二つの偏光成分が全く等しい周波数変化をすれば、二成分の差周波数は変化しないので周波数安定化には影響を与えない。しかし、少しでも差があると周波数安定性は低下する。ここで簡単にするため、一方の偏光 ( $x$  成分) のみ PMF 端面から光が戻るとする。Fig. 2 において減衰器 ATT は、戻り光が強過ぎて STZL の制御がはずれないように入れてある。M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> は PMF の端面で、劈開面になっている。PMF 両端面の反射係数は小さいことと、PMF からの戻り光の減衰率は大きいことを考慮して M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> では一回反射のみを考える。ここで M<sub>1</sub> で反射する光と、M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> で反射して M<sub>1</sub> を透過する光の電界  $E_r$  は、次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} E_r &= -E_i r_1 - E_i \beta t_1^2 r_2 \exp(-i2kL_1) \\ &\quad \times \{1 + t_2^2 \exp(-i2kn_x L)\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $E_i$  は戻り光がないとき M<sub>1</sub> へ入射する光の電界、 $r_1, t_1$  はそれぞれ M<sub>1</sub> の反射、透過係数、 $r_2, t_2$  は PMF の入射端面 M<sub>2</sub> の反射係数と透過係数、 $L_1$  は M<sub>1</sub> から PMF の入射端面 M<sub>2</sub> までの距離、 $L$  は PMF の長さである。これを、戻り光がないときの電界  $-E_i$  で割った値は M<sub>1</sub> の複素反射係数で、

$$\begin{aligned} r_1' &= r_1 + \beta t_1^2 r_2 \exp(-i2kL_1) \\ &\quad \times \{1 + t_2^2 \exp(-i2kn_x L)\} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。 $r_1'$  をベクトル図にすると Fig. 3 になる。PMF の光の入射端を固定しておけば、PMF 内の光路

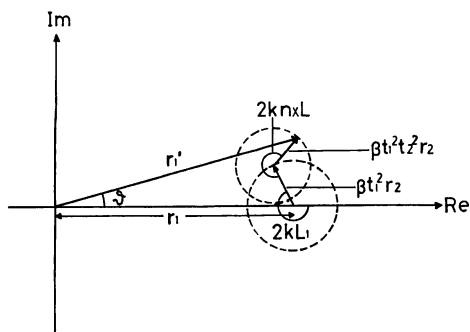


Fig. 3 Locus of the complex reflection coefficient of mirror M1 on the complex plane.

長  $(2n_x L)$  が一波长分変化すると、 $\beta t_1^2 t_2^2 r_2$  の大きさのベクトルが一周する。  $r_1'$  ベクトルの絶対値はレーザー光の強度変化を、位相角  $\theta$  の変化は周波数変化を表している。つまり、PMF の伸縮によってレーザー光は AM, FM 変調されることになる。STZL の制御に用いられている信号  $f_b$  は、AM, FM 変調された偏光成分 ( $x$  成分) と、ファイバーを伝播しないもう一方の偏光成分 ( $y$  成分) とのビート信号であるから、 $f_b$  信号を復調すれば PMF の伸縮を検出できる。また、 $\beta t_1^2 t_2^2 r_2$  は  $r_1$  に比べて十分に小さいので AM, FM 復調波は約  $90^\circ$  位相がずれる。よって二つの復調波の変化の順序より PMF の伸縮方向が判断できる。すなわち、ファイバー入、出射端を反射面とするファブリー・ペロー干渉計の干渉縞を、レーザーへの戻り光を利用して検出できることがわかる。

光ファイバーファブリー・ペロー干渉計：FFPI の信号は PMF の  $x$  方向の固有軸内での位相遅れ ( $2\phi_x = 2kn_x L$ ) が変化することによって生じるので、温度によ

る  $\phi_x$  の変化は次式で与えられる。

$$\frac{d\phi_x}{dT} = \frac{\delta n_x}{\delta T} kL + n_x k \frac{\delta L}{\delta T} \tag{10}$$

(6)式の場合  $\Delta\phi$  の変化には  $\Delta n$  が関与しているのに対し、(10)式の  $\phi_x$  には  $n_x$  が直接関与するため、FFPI のほうが PI に比べ感度が非常に高くなる。よって PI と、STZL への戻り光を利用した FFPI を組み合わせれば、測定感度が高く広帯域なファイバーセンサーができる。

### 3. 実 験

実験配置を Fig. 4 に示す。実験に用いた PMF は、日立の SP 6315 楕円ジャケット (クラッド) ファイバーである。この配置において STZL と PMF の間の減衰器 ATT は二つの目的で入れてある。一つは、PMF 端面からの戻り光が強すぎて STZL が周波数安定化できなくなるのを防ぐためである。PMF の端面は劈開面で、とくに加工してない。しかし、両端面での多重反射を考えると 10% 以上の反射光が STZL に戻ることになる。戻り光が強すぎると PMF 端面のわずかな反射率の差や対物レンズの傾きなどによって二つの偏光成分の戻り光量に差ができたとき、周波数制御は簡単にはずれてしまう。二成分の戻り光量に差があっても周波数が乱れないように、戻り光は十分に小さくしなければならない。減衰器を入れるもう一つの目的は、減衰器を傾けることによって STZL の垂直直線偏光を水平直線偏光よりも多く反射させるためである。二成分とも STZL に戻る場合、どちらの偏光成分も強度変調、周波数変調される。 Fig. 3 において、二つの円の大きさは戻り光量に依存する。よって、二成分の戻り光量に差をつけ

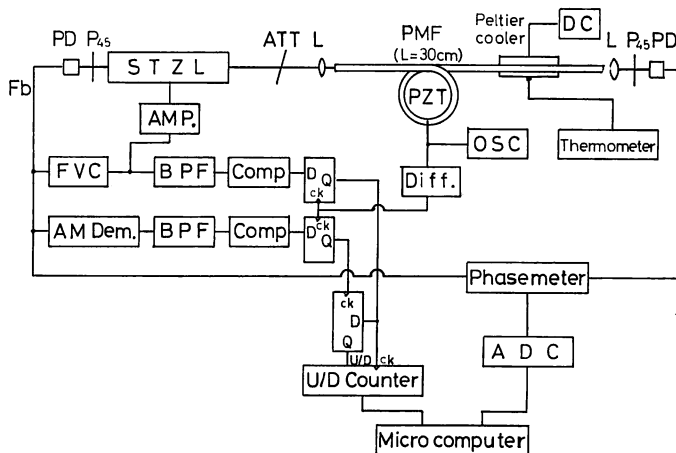


Fig. 4 Block diagram of the experimental arrangement for temperature sensing.

ば、二成分の変調の“深さ”に差ができる。この変調の“深さ”の差が FFPI の信号として得られる。

また、PZT (圧電素子) には三角波を加えて、PMF を伸縮させている。これによって、温度変化に応じて低い周波数で変化をする FFPI の信号強度の周波数帯域を 1~2 kHz の帯域に変換し、信号処理を容易にしている。

FFPI の信号は、STZL の制御用信号  $f_b$  を AM, FM 復調して得られる。両復調波をコンパレータで波形整形した後、一方の復調波のフリンジをカウンタで数える。このとき、両復調波を D フリップフロップを用いた順序判定回路に入れ、その出力をカウンタのアップ・ダウン信号とする。

一方、PI の信号は PMF からの出射光を 45° の直線偏光子を通して干渉させ、フォトディテクタで光電変換して得られる。PI の位相変化は  $f_b$  を参照信号として位相計で計測される。

FFPI の信号はカウンタを通して、また、PI の信号は位相計の出力を A/D コンバータに通してマイクロコンピュータにとり込まれる。

#### 4. 結果および考察

PMF の一部 (約 7 cm) をペルチェ素子にはさみ、素

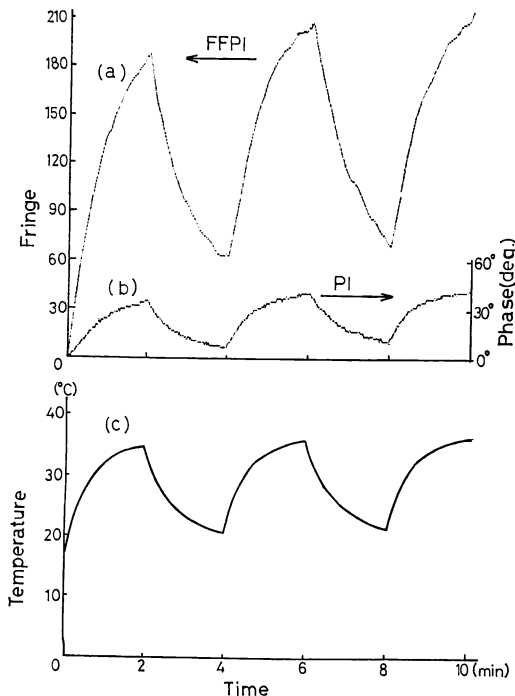


Fig. 5 (a) The number of interference fringes for FFPI and (b) optical phase of PI vs. temperature variations (c).

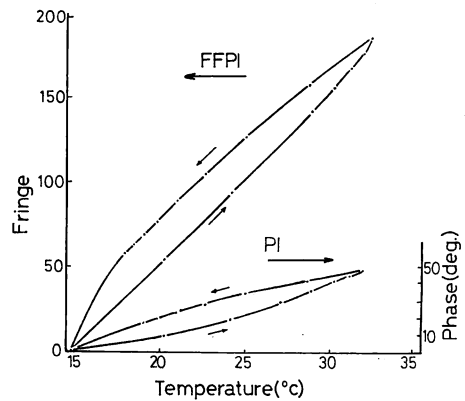


Fig. 6 Hysteresis loops of FFPI and PI as a function of temperature.

子に 4 分間周期で 2 分間ずつ電流を流した結果を Fig. 5 に示す。図において FFPI はフリンジ数、PI は位相変化を縦軸にとっている。この結果を見ると、いずれの干渉計の信号とも、ほぼ温度の変化に合った変化をしていることがわかる。次に、温度変化に対する FFPI のフリンジ計数、および PI の位相変化を Fig. 6 に示す。このグラフから二つの信号ともヒステリシスをもっていることがわかる。これは PMF の被覆の熱容量のため、被覆を取れば直線的なグラフになると考えられる。Fig. 6 より PI の感度は  $74.3 \text{ deg}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$ 、FFPI は  $292 \text{ フリンジ}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$  であるから、測定感度は 4 倍程度しか広域化できたとはいえない。しかし、FFPI の位相変化は PI の位相変化の約 1,500 倍であることから、今後 FFPI の位相まで測定範囲をひろげることができれば<sup>17)</sup>、3 桁以上の測定感度の広域化が期待できる。

#### 5. まとめ

光ファイバー干渉計のうち、マイケルソン型、マッシュ・ツェンダー型、ファブリー・ペロー型は高感度であるが一般に狭帯域で広い測定範囲の計測にはむかない。一方、偏波モード間干渉計は広範囲の計測に適しているが、感度は高くない。そこで、この偏光計測干渉計にレーザーへの戻り光を利用した光ファイバーファブリー・ペロー干渉計を組み合わせ、高い感度で広い測定範囲をもつ温度センサーの可能性が確かめられた。この干渉計の特徴として、次の点が考えられる。

(1) STZL を光源として用いたので偏光計測干渉計の信号が二周波直交偏光の位相変化としてヘテロダイク検出できる。

(2) 偏波面保存単一モードファイバーにレーザー光

を入射するだけでよいので光学系はきわめて簡単である。

(3) FFPI の位相まで計測できれば、測定ダイナミックレンジを3桁以上拡大できる。

### 文 献

- 1) D. Chardon and S. J. Huard: "A new interferometric & polarimetric temperature optical fiber sensor," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 720-725.
- 2) P. Akhavan Leilabady, J. D. C. Jones, M. Corke and D. A. Jackson: "A dual interferometer implemented in parallel on a single birefringent monomode optical fibre," *J Phys. E*, **19** (1986) 143-146.
- 3) 武藤勝俊: "光ファイバセンサ", *信学誌* **69** (1986) 59-66.
- 4) 保立和夫: "センシング技術への光ファイバの応用", *光学*, **12** (1983) 340-350.
- 5) 今井正明, 大塚喜弘: "光ファイバ干渉計測", *光学* **13** (1984) 153-162.
- 6) A. Dandridge and A. B. Tveten: "Phase compensation in interferometric fiber-optic sensor," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 408-409.
- 7) A. Dandridge, A. B. Tveten, G. H. Sigel, Jr. and T. G. Giallarenzi: "Optical fiber magnetic field sensors," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 408-409.
- 8) M. M. Salour, G. Schoner, M. Kull and J. H. Bechtel: "Semiconductor-platelet fibre-optic temperature sensor," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 135-136.
- 9) 芳野俊彦: "ファイバ・ファブリ・ペロー干渉計の基本特性", *光学*, **11** (1982) 589-595.
- 10) T. Ito: "Precise measurement of the change in the optical length of a fibre-optic Fabry-Perot interferometer," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1072-1075.
- 11) A. D. Kersey, D. A. Jackson and M. Corke: "A simple Fabry-Perot sensor," *Opt. Commun.*, **45** (1983) 71-74.
- 12) M. Corke, A. D. Kersey, D. A. Jackson and J. D. C. Jones: "All fibre 'Michelson' thermometer," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 471-473.
- 13) W. Eickhoff: "Temperature sensing by mode-mode interference in birefringent optical fibers," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 204-206.
- 14) 神野正彦, 林 健一, 新井一男, 井田良雄: "複屈折光ファイバを用いた温度センシングシステム", *信学技報*, **OQE 85-93** (1985) 67-74.
- 15) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: "Stabilized  $^3\text{He}$ - $^{20}\text{Ne}$  transverse Zeeman laser," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 442-450.
- 16) S. Donati: "Laser interferometry by induced modulation of cavity field," *J. Appl. Phys.*, **49** (1978) 495-497.
- 17) 関 洋介, 野田健一: "安定化擬似ヘテロダイン法による光ファイバ・ファブリ・ペロー干渉型温度計測法", *信学技報*, **OQE 86-141** (1986) 67-73.