単一モード光ファイバを用いた温度センサ†

鳥羽 栄治*・中 義弘*・沢路 雅夫*

Sensing of Temperature Using Single-Mode Optical Fibers

Eiji TOBA*, Yoshihiro NAKA* and Masao SAWAJI*

1. はじめに

光ファイバに関する技術の進歩は目ざましいものがあり、光ファイバは主に光通信、光エネルギーおよび画像伝送などの広い分野にわたって利用されている。一方最近では光ファイバの特徴を利用した応用計測法^{1),2)}が検討されている。光ファイバをセンサとして使用した場合、計測対象の状態を光信号として取り出す光学的なセンサであるので、従来の電氣的なセンサでは使用が困難な計測対象（たとえば、電磁環境下、引火爆発性環境下など）においても利用できる。本研究は光ファイバの特徴を生かして単一モード光ファイバを温度センサとしての適用³⁾を試みた。光ファイバ温度センサとしては光ファイバそのものをセンサとして機能させるセンサ素子形と光ファイバの端面のほかの温度センサを取り付けるセンサ伝送路⁴⁾の二つの方式が考えられている。本研究はセンサ素子形の光ファイバについて温度センサとしての可能性を明確にすることを主要目的とし、温度センサとしての感度を光ファイバ中を伝播する光波の位相変化量としてとらえる光位相信号自動検出装置を製作し、裸ファイバ、被覆ファイバなどについて諸特性を測定し検討⁵⁾⁻⁶⁾を加えた。

2. 測定理論

長さ L の均一コアの単一モード光ファイバ内を伝播する光波の位相を φ 、波長を λ 、コアの屈折率を n とすると光波の位相 φ は

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad (1)$$

で表わせる。(1)式で $\frac{2\pi}{\lambda}$ を一定とし、ファイバに ΔT の温度変化を与えると、ファイバ長と屈折率とが変化し $\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ は次式で表わせる。

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} = \varepsilon_z + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \cdot \Delta T + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_T \quad (2)$$

ここで、 ε_z は長さの変化による軸方向の歪、 ρ はコアの密度を示す。(2)式より位相変化による温度感度 $\frac{\Delta\varphi}{\varphi \Delta T}$ は次式¹⁾で表わせる。

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi \Delta T} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho + \frac{1}{\Delta T} \left\{ \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12}) \varepsilon_\theta + P_{12} \varepsilon_z] \right\} \quad (3)$$

ここで、 P_{11} , P_{12} は光弾性係数、 ε_r は断面方向の歪を示す。単一モード光ファイバに ΔT の温度変化を与えると、光ファイバのファイバ長、屈折率およびコア径などの変化により伝搬光の位相が変化する。位相変化を受けた光の位相変化量を干渉縞の移動本数(Fringe

Fig. 1 Schematic representation of the experimental setup

† 第21回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭57・7)

* 信州大学繊維学部 上田市常田 3-15-1

* Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Ueda

(Received February 19, 1983)

(Revised May 7, 1983)

Keyword: temperature sensor, single-mode optical fiber, coherent light, Mach-Zehnder interferometer, interference fringe pattern

Fig. 2 Configuration for detecting of interference fringe displacement

displacement, 以後これを $F. D.$ とする) で表わした温度感度は次式で示される.

$$\frac{F. D.}{\Delta T L} = \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_p + \frac{n}{\Delta T} \left\{ \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12}) \varepsilon_r + P_{12} \varepsilon_z] \right\} \right] / \lambda \quad (4)$$

ここで, 前もってファイバの諸定数を求めておくこと (4) 式よりファイバの温度感度が求められる.

3. 実験装置と実験方法

Fig. 1 に 2 本の単一モード光ファイバで Mach-Zehnder 干渉計の構成と光位相自動測定装置の概略を示す. 光源として波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ の He-Ne レーザー光を使用し, レーザー光を半透鏡で 2 分割する. 一方を参照光, 他方を被測定光としてこれらのレーザー光を顕微鏡対物レンズを用いてビーム径を絞り光ファイバに入射させるとファイバ射出端の遠視野に Young の干渉縞が形成される. 測定用ファイバに温度変化を与えると, ファイバ中を伝搬する光波の相対的位相が変化し, 干渉縞が移動する. 干渉縞の移動本数をシリコンフォトダイオードで検出する. Fig. 2 に干渉縞の移動本数を検出する光検出部分の概略図を示す. Young の干渉縞を縞状の空間フィルタ (全スリット長 29 mm, スリット幅 0.25 mm, ピッチ 0.5 mm の 50 周期のパターンをスクリーントーンで作成したもの) 面上に投影し, この透過光 (Moiré 模様) の原理より Young の干渉縞を拡大した干渉縞パターンを特性の揃った 4 個のシリコンフォトダイオードで測定する. 4 個のフォトダイオードは 2 個 (S_1 と $\bar{S}_1$, S_2 と $\bar{S}_2$) で 1 対となすようにし, 一方は空間フィルタ面上に拡大した干渉縞パターンに対して平行となるように密着固定し, 他方は垂直となるように密着固定してある. このようにフォトダイオードの出力電圧を差動的に動作させることにより, 周囲からの迷光の影響を除くように工夫した. また, フォトダイオード S_1

A: Core B: Clad
C: First coating (Hard)
D: Second coating (Soft)

Fig. 3 Fiber geometry

Table 1 Physical constant of fiber components

	Core	Clad	First coating (Hard)	Second coating (Soft)
Composition	100% SiO ₂	95% SiO ₂ 5% B ₂ O ₃	Silicone	Nylon-12
Diameter (μm)	5	102.5	415	970
Young's modulus (10^{10} dyn/cm^2)	73.45	65.14	0.0035	0.35
Poisson's ratio	0.17	0.149	0.499	0.489
Thermal expansion coefficient ($10^{-7}/^\circ\text{C}$)	5.5	10.2	265	1200
P_{11}	0.126			
P_{12}	0.27			
n	1.456			
$\frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_p$ ($10^{-5}/^\circ\text{C}$)	0.68			

Table 2 Temperature sensitivity of fibers

	Fringe displacement (number/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$)	
	Experimental Value	Calculated Value
Bare fiber	17.05	16.42
First coating (Soft)	21.25	16.62
Second coating (Hard)	98.20	74.43

と S_2 は干渉縞の周期に対して位相が互いに 90 度ずれた位置に固定してある. フォトダイオードの出力信号を増幅し 2 値の電気信号に変換する. この 2 値化信号および 2 信号 ($\hat{S}_1, \hat{S}_2$) の排他的論理和から干渉縞の移動本数と移動方向を検出し, マイクロコンピュータに入力する. 測定用ファイバは均一面熱源⁷⁾により温度変化を与え, この温度を CA 熱電対で測定する. CA 熱電対で測定した温度信号を AD 変換し, マイクロコンピュータに入力し, 温度変化に対する干渉縞移動本数の関係を評価した. Fig. 3 に本実験で使用した単一モード光ファイバの幾何学的形状を示し, Table 1 にこの物理的諸定数を示す. 実験で使用した

Fig. 4 Relations between temperature and fringe displacement

2本の単一モード光ファイバの長さは約1mで、このうち一方のファイバの長さ約11cmの部分に温度変化(約20°C~50°C, 1°C/min.)を、均一加熱面与えた。また、測定用ファイバは均一加熱面と完全に密着するように工夫した。

4. 実験結果と考察

Table 2 におおののファイバについて、ファイバの長さを1mとし、1°Cの温度変化を与えたときの干渉縞の移動本数(F.D.)を理論式(4)より求めた計算値と実験値との比較を示す。なお、ここで示した計算値は(4)式において n 層の被覆を施したファイバでは ΔT の温度変化に対して断面方向の歪 ϵ_r は軸方向の歪 ϵ_z に比べて非常に小さい¹⁾とされているので、本実験ではすべての計算値を等価的に $\epsilon_r \approx 0$ とおいて求めた。Fig. 4に測定用ファイバの加熱部分の長さを約11cmとした場合、温度とF.D.との関係を示す。(a)は1次被覆のみ施したファイバを示し、(b)は2次被覆ファイバを示す。Fig. 4はファイバを温度上昇させた場合を示しているが、温度下降の場合でも両者の有意な差は認められなかった。裸ファイバ、被覆ファイバの両者ともF.D.値が計算値と実験値との間に若干の差はあるがほとんど一致している。また、F.D.値は全般的に実験値のほうが計算値よりも大き目であ

る。これは光ファイバを均一加熱面と加熱する際、ファイバの熱伝導により見かけ上ファイバの加熱部分の長さが増加したためと考えられる。おおののファイバの温度とF.D.との関係は再現性の優れた直線的比例関係が成立しており、干渉縞の移動本数を測定することにより温度測定が可能である。また、ファイバに被覆を施すことにより温度感度を高めることができる。本実験では、ファイバ被覆材の熱的特性を考慮して、測温範囲を約20°C~50°Cとしているが、これよりさらに高い温度の測定もファイバ被覆材を選択することにより可能と考えられる。

5. ま と め

単一モード光ファイバを能動的な温度センサとして温度測定に利用することが可能であり、このセンサの温度感度はファイバの被覆を含めた構造と材質に依存する。光ファイバ温度センサの特徴はセンサ素子部にまったく電気的要素を含まないので、従来のセンサでは使用が不可能と思われるような計測対象にも利用できる。

今後、さらに光源を含めた光学系および干渉縞計数部分などをモジュール化し、実用的な温度検出器の試作を進めたい。

参 考 文 献

- 1) N. Lagakos et al.: Temperature-induced Optical Phase Shifts in Fibers, Appl., Opt., **20**-13, 2305/2308 (1981)
- 2) G. B. Hocker: Fiber-Optic Sensing of Pressure and Temperature, Appl., Opt., **18**-9, 1445/1448 (1979)
- 3) 鳥羽, 伊藤, 大塚: 単一モード光ファイバを用いた温度センサ, 第21回 SICE 学術講演会予稿集, 213/214 (1982)
- 4) たとえば, 吉田, 清水: 光ファイバによる遠隔温度計測, 電気学会光量子デバイス研究会資料, 11/19 (1981)
- 5) 鳥羽, 中, 沢路: 単一モード光ファイバを用いた光位相センサ, 繊維学会秋季研究発表会講演要旨集, 61 (1982)
- 6) 鳥羽: 単一モード光ファイバを用いた温度測定, Sensor Technology, **3**-7, 32/37 (1983)
- 7) 鳥羽, 成田, 沢路: 繊維集合体の表面温度と熱放射率の測定, 第20回自動制御連合講演会前刷, 491/492 (1977)