# 特集 オプトエレクトロニクス技術

U.D.C. 681.7.068.2:535.513.1

# 偏波面保存光ファイバとその応用 Single Polarization Optical Fiber and Its Applications

伝搬光の強弱だけでなく位相, 偏光情報をも積極的に利用する高精度光計測やコ ヒーレント光通信用伝送路として, 安定な偏波面保存特性と低損失特性を兼ね備え た偏波面保存光ファイバを実用化した。この光ファイバを応用した各種高精度光計 測器を試作しその特性を検討した。実用化された光ファイバは, 波長1.3µmで伝送 損失が0.8~1.0dB/kmと低損失で, 結合長10mm以下と高い偏波面保存特性をもって いる。この光ファイバを用いて, 伝送距離 1~2kmで消光比-30dB以下を得た。ま た, この偏波面保存光ファイバを用いて光干渉計を開発し, 10<sup>-7</sup>以下のひずみ計測, 4×10<sup>-4</sup>rad/s以下の回転角速度計測が可能であることを明らかにした。 梶岡 博<sup>\*</sup> Hiroshi Kajioka 松村宏善<sup>\*\*</sup> Hiroyoshi Matsumura

# 1 緒 言

ただ一つのモードが伝搬可能な広帯域な単一モード光ファ イバは、伝送損失が1.5µm帯で0.2dB/kmとなり<sup>1)</sup>、光通信用 はもとより計測用の光伝送路として注目されている。しかし、 従来の単一モード光ファイバでは、取り扱い上避けられない 外乱(曲げ、振動、温度変化など)によって出射光の偏光特性 が時間的に複雑に変動する。このため、偏光状態に敏感な受 光器を用いるコヒーレント光通信や光計測システムでは受光 レベルの変動が生じ、システムの性能や信頼性が低下する。 この対策として伝搬光の偏光状態が長距離にわたり一定な偏 波面保存単一モード光ファイバが開発された。本論文では、 偏波面保存光ファイバの伝送特性と、その偏光、位相特性を 利用した光計測器として、光ファイバひずみ計と光ファイバ ジャイロスコープへの応用が有力な回転角速度計を取り上げ、 それらの検討結果について述べる。 ここに、B:モード複屈折(コアのX方向とY方向の屈折率 の差)

で与えられる3),4)。

従来の光ファイバは結合長が1m程度と大きいため、出射 光の偏光特性の変動が大きい。Lを小さくするには光ファイ バのコア部に異方性のひずみを印加し、光弾性効果によりX,

# 2 偏波面保存光ファイバの原理

光ファイバは一般に光が伝搬するコア(屈折率n1, 半径 a), それを囲むクラッド(屈折率n2:n1>n2, 半径 b),及び光フ ァイバを補強するサポート部(一般に石英ガラス)から成る。 そのうちで,位相,偏光の情報が伝搬可能な単一モード光フ ァイバは,次式の規格化周波数Vの条件を満足する。

 $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.41 \cdots (1)$ 

ここに、 $\lambda$ は光の波長( $\mu$ m)、aはコア半径( $\mu$ m)を示す。 単一モード光ファイバには、直角座標(X,Y,Z)のもと で電界がX方向にだけ振動する(この面を偏波面と呼ぶ。)伝 搬定数 $\beta$ xの $HE_{11}^{X}$ モードと、Y方向だけに振動する伝搬定数 $\beta$ y の $HE_{11}^{Y}$ モードの互いに直交する二つの直線偏光波が伝搬する。 通常、光ファイバに曲げや振動などの外乱を加えると、これ らのモードは互いに結合し、たとえ入射端に $HE_{11}^{X}$ モードを入 射しても出射端には $HE_{11}^{Y}$ モード成分も現われ、出射光の偏光 特性が変動する。モード変換理論でこの偏光特性の変動は両 モードの伝搬定数の差 $\Delta\beta = |\beta_X - \beta_Y|$ に大きく関係し、変 動量を少なくするには結合長 $L = 2\pi/\Delta\beta$ を数ミリメートルと Y方向の屈折率に大きな差をつけ, Bを大きくすることが必要である。

# 3 伝送特性

以上述べた基本原理に沿って, 偏波面保存性と低損失性を 同時に満足するSPF(Single Polarization Fiber: 偏波面保 存光ファイバ)を実用化した。本光ファイバの断面構造を図1 に示す。この光ファイバは4層構造をもっており, 同心円の コアとクラッドで単一モード光ファイバを低損失化している。 また, コアに異方性のひずみを印加するため, ジャケット部に はサポート部(SiO<sub>2</sub>)と熱膨脹係数が大きく異なる材料(SiO<sub>2</sub>+ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を使用している。



図 | 偏波面保存光ファイバの断面構造 結合長2.5mm(測定波長 0.63μm)で,外乱に対し良好な偏波特性をもつ光ファイバである(外径125μm)。

71

\* 日立電線株式会社電線研究所 \*\* 日立製作所中央研究所 理学博士

740 日立評論 VOL. 65 No. 10(1983-10)

# 3.1 結合長

図2はB2O3濃度をパラメータとした波長0.63µmでの結合 長とだ円率の関係について、実験結果を示したものである。 B2O3濃度が高いほど、まただ円率が大きいほど、コアに及ぼ す異方性ひずみが大きくなる。その結果、モード複屈折は大 きくなり結合長が短くなる。現在、波長0.63µmで0.7mmの最 小結合長が得られている。

# 3.2 消光比

光ファイバに曲げや振動などの外乱が加わると、たとえ入 射端に $HE_{11}^{X}$ モードの直線偏光を入射しても、出射端では $HE_{11}^{Y}$ モード成分が現われ偏光特性が劣化する。この劣化度を消光 比 $\eta$ として次式で定義する。

 $\eta = 10 \log P_Y / P_X (dB) \dots (3)$ ここに、 $P_X$ 、 $P_Y は それぞれ HE_{11}^X$ 、 $HE_{11}^Y モードの出射パワ$ ーである。

図3はSPFを曲げたときの,波長1.3µmでの消光比の長さ 特性を示す実験結果である。実験パラメータとして結合長と 曲げ半径を用いた。この結果から,曲げ半径と結合長は偏波 面保存性に強く関係し,結合長の小さいものほど光ファイバ を曲げても長尺にわたり安定な消光比が得られることが分か る。結合長が3.7mmと小さい場合には,半径40mmのボビンに 100m以上巻き付けても偏波面は保存される。

### 3.3 伝送損失

72



図3 消光比の曲げ及び長さ特性 種々の結合長をもつ偏波面保存光 ファイバを、半径Rのボビンに巻き付けたときの消光比の変化を示す。短結合 長ほど長尺にわたり安定な消光比が得られる。

10 r 光ファイバ長:1.3km 結合長: 10mm(測定波長1.3µm)

SPFは通常の単一モード光ファイバと同等の伝送損失が原 理的に期待できる。 $1.3\mu$ m帯での伝送損失の劣化は,主とし て伝搬光がだ円ジャケット部にしみ出したときのOH基とB<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の吸収による。このため、コアとジャケット層の間に同心円 のクラッド層を設け、しみ出し光を防ぎ伝送損失の低減化を 図った。図4に $1.3\mu$ mでの結合長が10mmのSPFの伝送損失の 波長特性を示す。現在,波長 $1.3\mu$ m,  $1.55\mu$ mで最小損失0.8dB/kmが得られている。

# 4 SPF(偏波面保存光ファイバ)の光計測への応用

以上述べた高性能SPFの使用により、出射光の偏光状態を 一定に保てる。その結果、光計測分野では、SPFを用いると 測定の安定化が図れ、精度の向上が可能となる。





図4 偏波面保存光ファイバの伝送損失の波長特性 1.1~1.5µm 帯でOH基吸収波長域を除き低損失である。光ファイバジャイロスコープへ適用 すれば,感度の向上が期待できる。

# 4.1 マッハツェンダ干渉計(光ひずみ計5),6))

図5に、光ひずみ計の外観と構成を示す。本光ひずみ計は 光源部、光分岐部、ひずみ印加部(キャンティレバー:片持 ばり)及び干渉じま検出部から構成される。光源からSPF1に 入射された直線偏光は、光分岐部でSPF2とSPF3に入射され る。SPF2とSPF3はキャンティレバー内に上下に固定されて いる。キャンティレバーの一端に変位dを加えると2本の光フ アイバの長さと屈折率が変化する。そのため、ファイバ出射 光に位相の変化が生じ、干渉じまが変化する。この変化量を 測定することによって、キャンティレバーのひずみを測定す るものである。キャンティレバーの平均的ひずみを測定す まの移動数Nの間には次式が成立する。

ここに、 $L_0$ :はりの長さ(500mm)、 $2a_0$ :はりの厚さ(35mm)、

l:ひずみ印加部光ファイバ長,β:伝搬定数

 $(\beta_X 又は\beta_Y)$ 

図2 結合長のだ円ジャケットだ円率依存性 だ円ジャケット層に 含まれるB2O3濃度をパラメータにしたとき、結合長とだ円ジャケットだ円率は、 双曲線の関係にある。実線は、 $L=13\lambda/m \cdot \epsilon$ とした計算値である<sup>4)</sup>。 本実験ではキャンティレバーの上下面に各4ターンのSPF を沿わせているため $l = 8 L_0$ である。図6は印加した変位 $d_0$ とそれに対応するひずみ $\epsilon$ と干渉じまの移動数Nの関係の実験 結果を示したものである。〇印は実験値,実線は(4)式に基づ く計算値であり,両者はよく一致している。ひずみの測定感 度は $0.13 \times 10^{-6}/(1$ しま移動)であり,通常のひずみ計に比べて



図5 光ひずみ計の外観(a)と構成(b) キャンティレバーの片端に変位が加えられると、それに対応したひずみがキャンティレバー内の2本の偏波面保存 光ファイバに加わる。その結果、2本の光ファイバに光路長の差が生じ、干渉じまが移動する。しまの移動量からキャンティレバーの平均ひずみを求めることができる。

高感度であると同時に電磁誘導を受けないことが特長である。

本ひずみ計は地盤や建造物などの微小なひずみセンサとし て期待される。図5のSPF3を基準ファイバとし、SPF2に温 度変化,振動,圧力などを印加すれば、同様の原理で温度, 振動,圧力などが測定可能である。

# **4.2 リング干渉計(回転角速度計)**<sup>7)</sup>

図7に光ファイバ回転角速度計の外観と構成を示す。本装置は、光源部、BS(光分岐部)、PBS(偏光ビームスプリッタ部)、SPF部及び位相検出部から構成される。光源からBSを



介しPBSに対し45度の方位の直線偏光を入射する。空間的に 直交した直線偏光波はPBSで分離されSPFの両端から同一 の偏波モードとして入射され、それぞれ反対方向に伝搬した 後、PBSで合成、BSで反射されて位相検出部に到達する。 図7の系が角速度 Qで回転すると、サグナック効果により、

で与えられる位相差が、両方向に伝搬する光の間に生じる。 ここに、C:光速、l:ファイバ長、R:ループ半径である。 光ファイバリング干渉計は光ファイバジャイロスコープと も呼ばれ、航空機、船舶、自動車など移動体の慣性航法装置 の中核として期待されている。(5)式から検出感度は光ファイ バ長に比例する。低損失で偏波保存性の良いSPFを用いると、 偏波面のゆらぎが小さくなり位相検出の精度が向上できる。 図7のリング干渉計では、光ファイバ内を同一偏波モードで 両方向に伝搬した二つの光が、*L*の位相差をもって直交偏波 の状態で検出できるように、光ファイバの両端末のだ円の方 位を空間的に90度ねじってある点が大きな特徴である。この ため、 士波長板と検光子を通して受光器で干渉光強度の変化 *P*を測定すると、

 $P \propto \sin \Delta \theta \cdots (6)$ 

73

となり、微小な Δθに対し良好な直線性が得られる。本リング



図6 干渉じまの移動数とキャンティレバーの変位,ひずみの関係 ひとつの干渉じまの変化は0.13×10<sup>-6</sup>のひずみに対応している。本ひずみ計に よってサブミクロン以下のひずみ計測が可能である。 干渉計は、従来法に比べ、受動部品で感度の最適化が図れる ため、構成が簡単で小形化が可能である。図8に回転角速度 と干渉計光出力の関係の実験結果を示す。〇印は測定値であ る。2×10<sup>-2</sup> rad/sの回転角速度まで良好な直線性が得られて いる。また、現在角速度の最小分解能として、4×10<sup>-4</sup> rad/s が得られている。 742 日立評論 VOL. 65 No. 10(1983-10)



偏波面保存光ファイ バ形(SPF直交偏波方式)

#### 5 結 言

74

光ファイバ内を伝搬する光の偏光特性が、長距離にわたっ て一定に制御された新機能をもつ光ファイバを実用化した。



この光ファイバは、コア部に異方性ひずみを加えるだ円ジャ ケットの内部に同心円の導波部を備えた偏波面保存光ファイ バである。実用化した光ファイバは、曲げなどの外乱に対し 優れた偏波保存性をもち,波長1.3µm, 1.55µmの長波長帯で 1dB/km以下と低損失である。この光ファイバを用いて伝搬 光の位相や偏光状態を積極的に利用した高精度光計測として ひずみ計と回転角速度計を取り上げ検討した。その結果, 偏 波面保存光ファイバの特長を利用して新しい高精度, 高安定 な光干渉計が実現可能であることが明らかにできた。今後, 本光ファイバは光計測分野はもとより, コヒーレント光通信 伝送路に広く適用することができる。

# 参考文献

- T. Miya, et al. : An Ultimate Low Loss Single Mode Fiber 1) at 1.55 µm, Electron Lett., 15, 4~6(1979)
- D. Marcuse : Theory of Dielectric Optical Waveguides, 2) Academic Press, N.Y. 1974
- H. Matsumura, et al. : Fundamental Studies of Single 3) Polarization Fibers, 6th European Conference on Optical Communication (York) 49~52(1980)
- H. Kajioka, et al. : Propagation Characteristics of Single 4) Polarization Fiber, 8th European Conference on Optical

Communication (Cannes) 143~148 (1982) 5) C. D. Butter, et al. : Fiber Optic Strain Gauge, Appl. Opt. 17, No. 18, 2867~2869(1978) 6) 肥後,外:偏波面保存光ファイバを用いた歪計の検討,電気 学会講演予稿(岡山)1357(1983) 7) 保立,外:レーザジャイロ,計測と制御,20, No.10,937~ 946(1981)