

偏波面保存光ファイバの開発

Development of Single Polarization Optical Fibers

光ファイバに加わる外乱(曲げ, 振動)によって, 光ファイバからの出射光の偏光特性は時間的に複雑に変動する。このため, 伝搬光の偏光状態を積極的に利用する計測や, 光集積回路を導入する将来の光通信用伝送路には, 伝搬光の偏光状態の制御された光ファイバが必要である。

偏光特性が長距離にわたり一定な偏波面保存光ファイバは, 光ファイバのコア部に異方性のひずみを印加し, 直交モード間の伝搬定数を大きくすることによって得られる。以上の基礎検討を基に, 異方性のひずみを与えるだ円ジャケットの内部に同心円の導波部を備えただ円ジャケット形偏波面保存光ファイバの作製プロセスを開発し, 伝送損失0.8dB/kmと低損失で, 消光比-32dB(500m)と高安定な偏波面保存光ファイバを実現した。

松村宏善* *Hiroyoshi Matsumura*

勝山俊夫** *Toshio Katsuyama*

菅沼庸雄*** *Tsuneo Suganuma*

1 緒言

光通信伝送用光ファイバは, 伝送損失が1.55 μ m帯で0.2dB/km以下となり^{1),2)}, 中継間隔の長い光通信システムを可能にした。光信号の伝送容量は, 光ファイバの伝送帯域, 光源のスペクトル幅, 変調周波数帯域幅などで決定されるが, 中継間隔の長距離化に伴って光ファイバの広帯域化が望まれている。このため, 光信号の伝搬するコア部の直径を数ミクロンにして, ただ一つのモードを伝搬させる広帯域な単一モード光ファイバが注目されている。この単一モード光ファイバは, 光通信伝送路として使用できる以外に, 光の偏光特性(光の振動面の变化)を利用して計測の分野にも適用でき, 他の光ファイバにない特長を備えている。

特に, 偏光特性を変化させることなく長距離にわたり伝搬できる偏波面保存光ファイバは, 近い将来の光通信システムの主要部品である光集積回路と組み合わせた伝送路として, また偏光, 位相特性を利用する計測器, 例えば光ジャイロスコープ(光による位置制御器)の伝送路として各方面から要求されている。しかし, 従来の単一モード光ファイバからの出力光の偏光特性は, 光ファイバケーブル布設に避けられない外乱(曲げ, 振動, 温度変化など)によって時間的に複雑に変化する。これは光信号の受信レベルの変動を生じ, システムの信頼性を低下する。このため, 出力光の偏光特性が変化しない光ファイバの開発が必要である。本論文では, 新しく開発に成功した偏波面保存光ファイバの伝送特性について述べる。

2 単一モード光ファイバ中の伝搬モード

光ファイバは, 一般に屈折率 n_1 のコア, それを取り囲む屈折率 n_2 ($n_1 > n_2$)のクラッド, 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)から成り, 光はコア内を全反射を繰り返しながら伝搬する。単一モード伝送になる条件は規格化周波数 V が次式を満足することにある。

$$V = ka_1(2\Delta)^{\frac{1}{2}} < 2.41 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで k は波数, a はコアの半径, Δ はコアとクラッド間の比屈折率差 ($n_1 - n_2$)/ n_1 を示す。この単一モード光ファイバ内では, 電界が一方向にだけ振動し, 直角座標(x, y, z)

のもとで互いに直交する二つの直線偏光波 E_x, E_y モードが伝搬する。これらの電界は一般に次の(2)式で表わされる。

$$\begin{aligned} E_x \text{モード: } e_x &= A_x \exp\{-j(\beta_x z - \omega t)\} \\ E_y \text{モード: } e_y &= A_y \exp\{-j(\beta_y z - \omega t)\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに $A_{x,y}$: $E_{x,y}$ モードの断面方向成分

$\beta_{x,y}$: $E_{x,y}$ モードの軸方向伝搬定数

ωt : (角周波数) $\times$ (時間)

コアが真円で, 光ファイバ内に異方性ひずみのない軸対称な光ファイバでは, $\beta_x = \beta_y$ であり, $E_{x,y}$ モードは完全に縮退している。しかし通常, コアは完全な真円でなく, またコアとクラッドを構成する材質が異なっているため, 熱膨張差による異方性ひずみが存在する。このため $\beta_x \neq \beta_y$ で, 二つのモードは異なった速度で伝搬する。これら二つのモードが同時に光ファイバ内を伝搬するとき, 出力波は一般にだ円偏光になる。このだ円の基本軸は x, y 軸に一致せず, 光ファイバの長手方向で変動する。このように両モードが光ファイバに存在すると偏波面が回転するので, 偏波面を変化させないためには, ただ一つのモードを伝搬させる条件を作ることが必須事項である。

3 偏波面保存条件

光ファイバからの出力光の偏波面が変動するのは, 図1に示すように, 光ファイバに沿った曲げ, 振動といった外乱による E_x, E_y モード間のモード変換による。光ファイバの入射端で E_y モードだけを励起すると, 光ファイバ軸が空間周波数 ϕ の外乱を受けたとき, モード変換による E_y モードから E_x モードへのパワー変換率 η は次式で与えられる³⁾。

$$\eta = P_x / P_y = \tanh\{B(\sin X / X)^2\} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに $P_{x,y}$: 出力端での $E_{x,y}$ モードのパワー

$$X = (\phi - \Delta\beta)z/2$$

$$\Delta\beta: E_{x,y} \text{ モードの伝搬定数差} = |\beta_x - \beta_y|$$

関数 $\sin X / X$ の性質から $X \approx 0$ 以外では(3)式の η は非常に小さくなる。このため, 外乱の空間周波数 ϕ が $\Delta\beta$ に等しいようなときだけ E_x モードと E_y モード間に大きなモード変換が生じ, 偏波面が回転する。光ファイバはフレキシブルであるた

* 日立製作所中央研究所 理学博士 ** 日立製作所中央研究所 *** 日立製作所中央研究所 工学博士

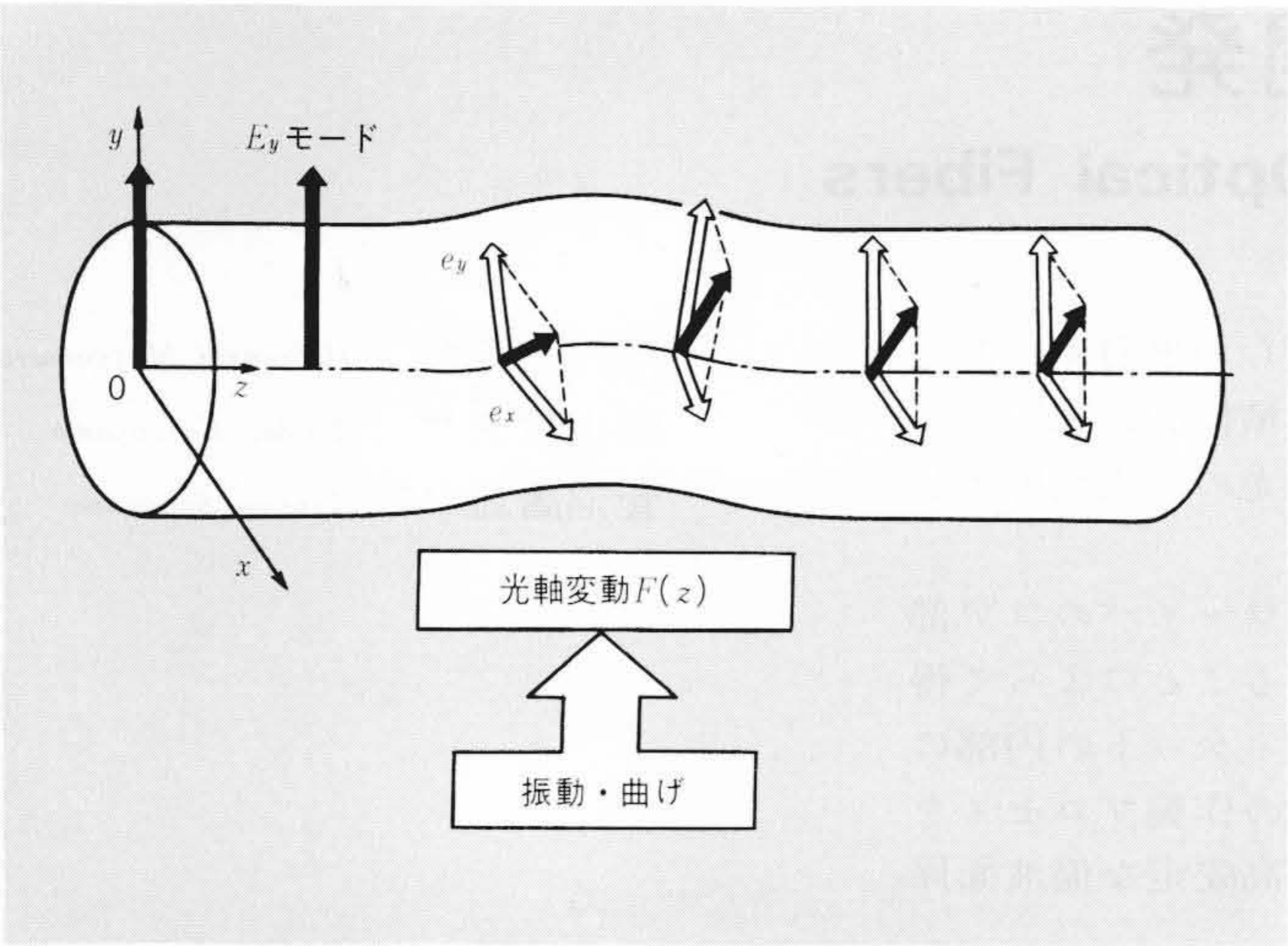


図1 外乱による偏波面の変動図 直線偏光波である E_y モードを入射したとき、光ファイバに加わる振動、曲げなどの外乱でモード変換が生じ、 E_x モードの電界 e_x が発生して、 E_y モードの電界 e_y との相互作用で偏波面が回転する。

め、外乱を受けると光軸は種々の周期で変動する。この最大の空間周波数を ϕ_c とすると、 E_x 、 E_y モード間にモード変換を与えない、すなわち偏波面保存特性をもつには、

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| > \phi_c \dots\dots\dots(4)$$

を満足する必要がある。実際光ファイバ軸の変動周波数は、3,000rad/m以下であるため、偏波面を長距離にわたって保存するには、伝搬定数差 $\Delta\beta$ が3,000rad/mよりも大きいことが必須である。

従来の単一モード光ファイバは、 $\Delta\beta \approx 6\text{rad/m}$ であり、変動の周波数よりも小さいため偏波面保存性能が非常に悪い。

通常、偏波面保存性能を表わす指標として、次式で定義する消光比を用いる。

$$\text{消光比} = 10\log_{10} \eta \text{ (dB)} \dots\dots\dots(5)$$

4 偏波面保存光ファイバの基本構造

光ファイバの導波論から、伝搬定数差 $\Delta\beta$ は

$$\Delta\beta \approx k \cdot \Delta n \cdot \Delta\theta \dots\dots\dots(6)$$

ここに Δn : コアの x 軸方向と y 軸方向の屈折率の差
 $\Delta\theta$: E_x 、 E_y モードの z 軸となす伝搬角の差

となる。

このため、 $\Delta\beta$ を大きくするには、(1) $\Delta\theta$ を大きくする→コアをだ円形にして $E_{x,y}$ モードの伝搬距離を変える。(2) Δn を大きくする→円形のコアになんらかの手段により異方性ひずみを加え、 x 、 y 方向の屈折率を変える(この異方性ひずみの発生にはクラッドのだ円化が最も有効)という二つの方法が考えられる^{4)~6)}。

以上の二つの方法に対応するだ円コア形、及びだ円クラッド形偏波面保存光ファイバの断面写真を、従来の単一モード光ファイバと比較して図2に示す。

4.1 だ円コア形偏波面保存光ファイバ

だ円コア形光ファイバでは、 $\Delta\beta > 3,000\text{rad/m}$ を達成するには、コアのだ円率 > 0.5 、比屈折率差 $> 3\%$ 、短軸の規格化周波数 ≈ 1.2 を満足することが必要である。ここでだ円率とはだ円の長軸と短軸径の差と和の比である。以上の条件で作製した光ファイバの特性をまとめて図2に示した。得られた消光比は -28dB と従来の光ファイバに比べ小さいが、比屈折率差を大きくするために用いたドーブ材の吸収、散乱損失が大きく、伝送損失が 44dB/km と本質的に非常に高い。

4.2 だ円クラッド形偏波面保存光ファイバ

直径約 $125\mu\text{m}$ の光ファイバは、直径約 10mm のプレフォーム

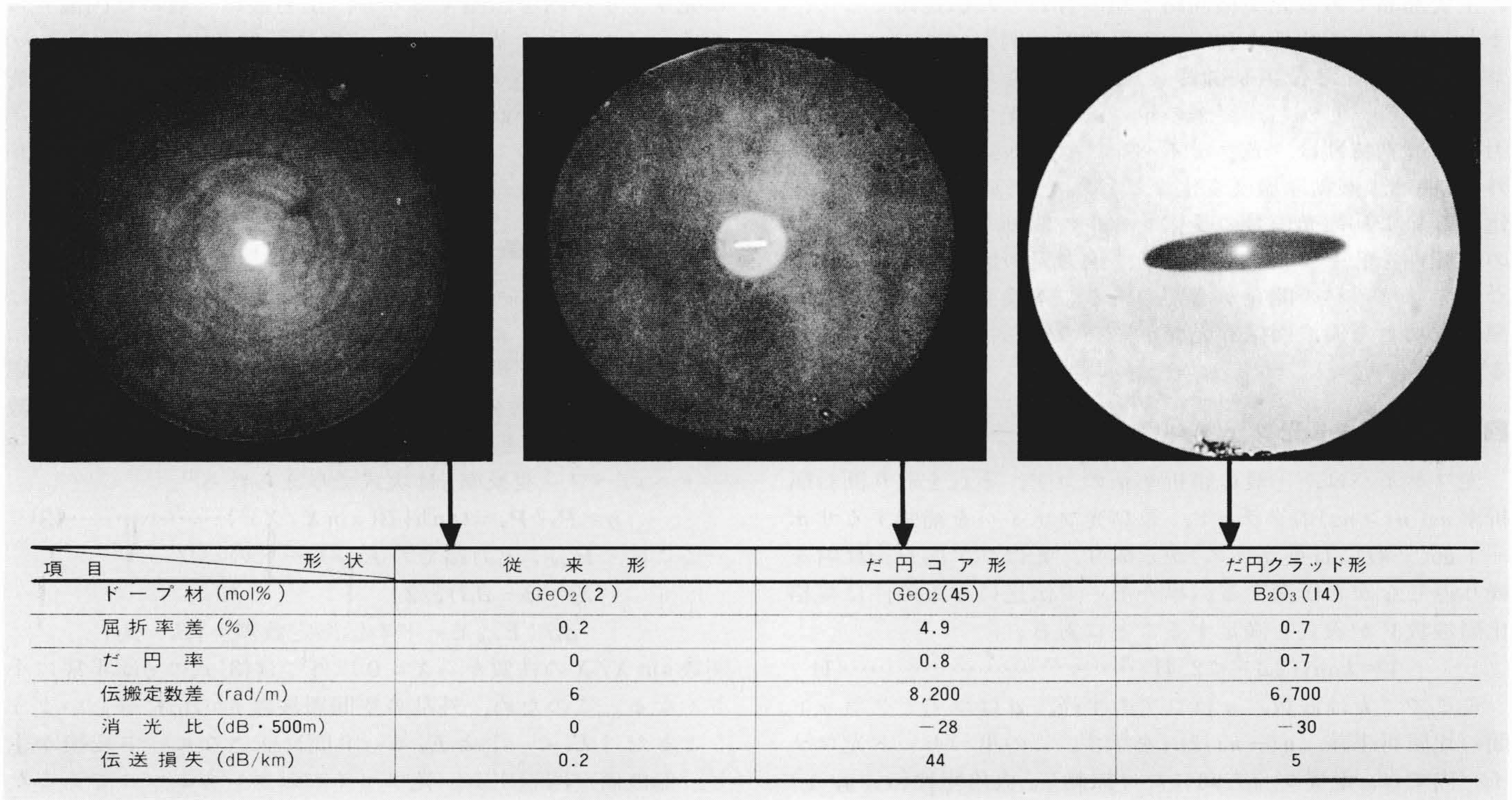
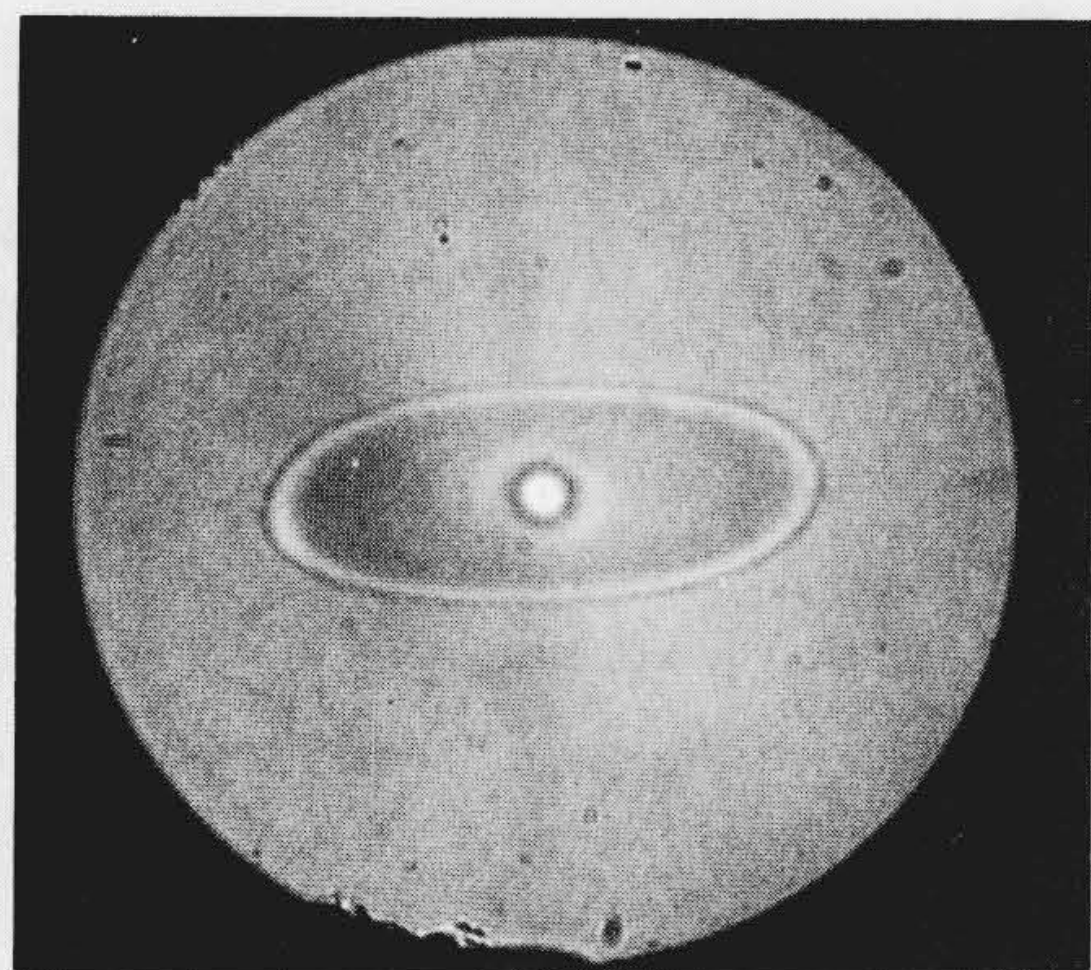


図2 従来の単一モード光ファイバと基本的な偏波面保存光ファイバの比較 直交するモード間の伝搬定数差 $\Delta\beta$ を大きくすると、偏波面保存効果は増大する。だ円コア形は、コアの形状をだ円にして長軸と短軸の長さを変え、だ円クラッド形では、クラッドをだ円にし円形のコアに異方性ひずみを与えて、長軸と短軸方向の屈折率を変えて $\Delta\beta$ を大きくしている。各種光ファイバの外径は、約 $150\mu\text{m}$ である。



だ円ジャケット形

ドープ材	B ₂ O ₃ , GeO ₂
屈折率差(%)	0.4
だ円率	0.5
伝搬定数差(rad/m)	3,200
消光比(dB・500m)	-32
伝送損失波長(dB/km at 1.55μm)	0.8

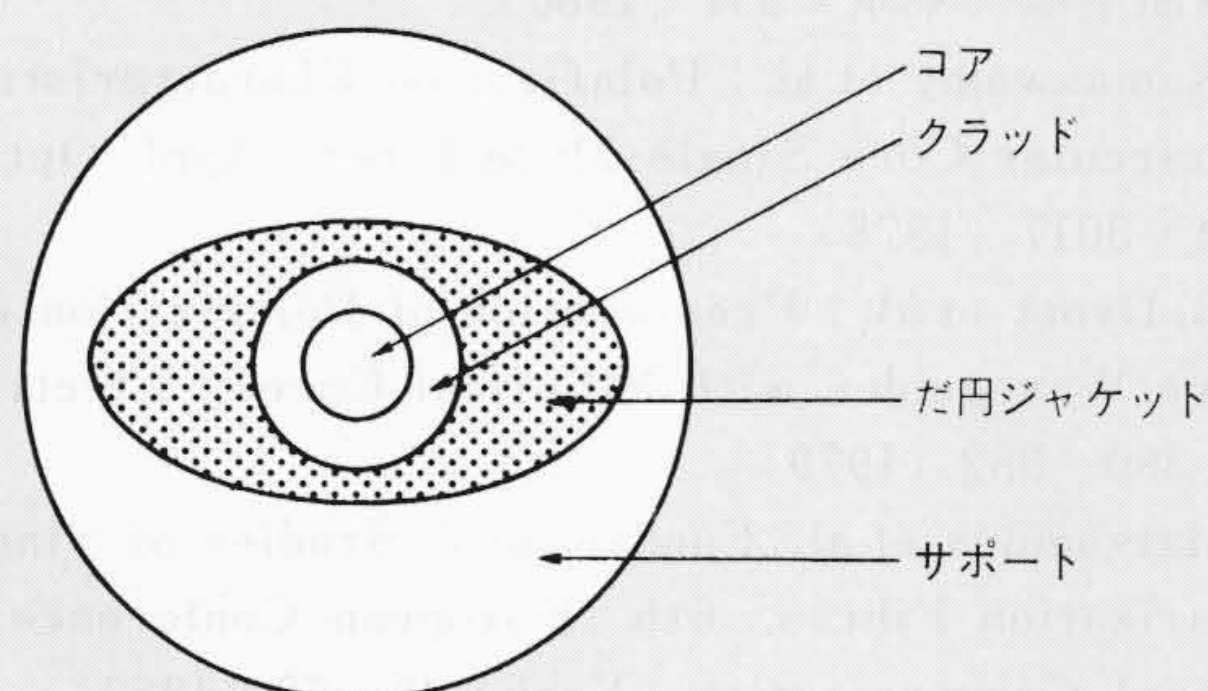


図3 低損失なだ円ジャケット形偏波面保存光ファイバの諸特性
低損失伝送を可能とする同心円のコア、クラッドから成る導波部と、偏波面保存機能を与えるだ円ジャケット、サポートから成るひずみ印加部を独立して組み合わせた構造のため、低損失で高安定な偏波面保存光ファイバである。光ファイバの外径は約150μmである。

ロッドを約2,000°Cの高温で加熱線引して作製される。コアとクラッド、あるいはサポートの材質間に熱膨張係数の違いがあると、高温から室温までの線引工程でそれぞれの材質の収縮量が異なる。このため、各層は変形しようとし光ファイバ内にひずみが発生する。だ円クラッド形光ファイバでは、コアの屈折率よりも低くできるB₂O₃ドープシリカガラスをクラッドに用いることが必要である。更に、 $\Delta\beta > 3,000 \text{ rad/m}$ を達成するには、B₂O₃ドープ量 $> 14 \text{ mol\%}$ 、クラッドだ円率 > 0.5 、規格化周波数 ≈ 2.4 を満足させなければならない。この条件で作製した光ファイバの伝送特性は、図2に示すように、消光比が500mで-30dBと小さく十分な偏波面保存特性を示すが、伝送損失はなお5dB/kmと大きい。これは、コアの電界のクラッドへのしみ出しによる吸収、散乱損失によるものである。

5 低損失な偏波面保存光ファイバ

以上説明しただ円コア、クラッド形偏波面保存光ファイバでは、伝送損失が大きく長距離用光ファイバとして実用化することは難しいという欠点がある。本章では、偏波面保存性能を劣化することなく、伝送損失を低減できる新たに開発した光ファイバの構造、及び伝送特性について述べる。

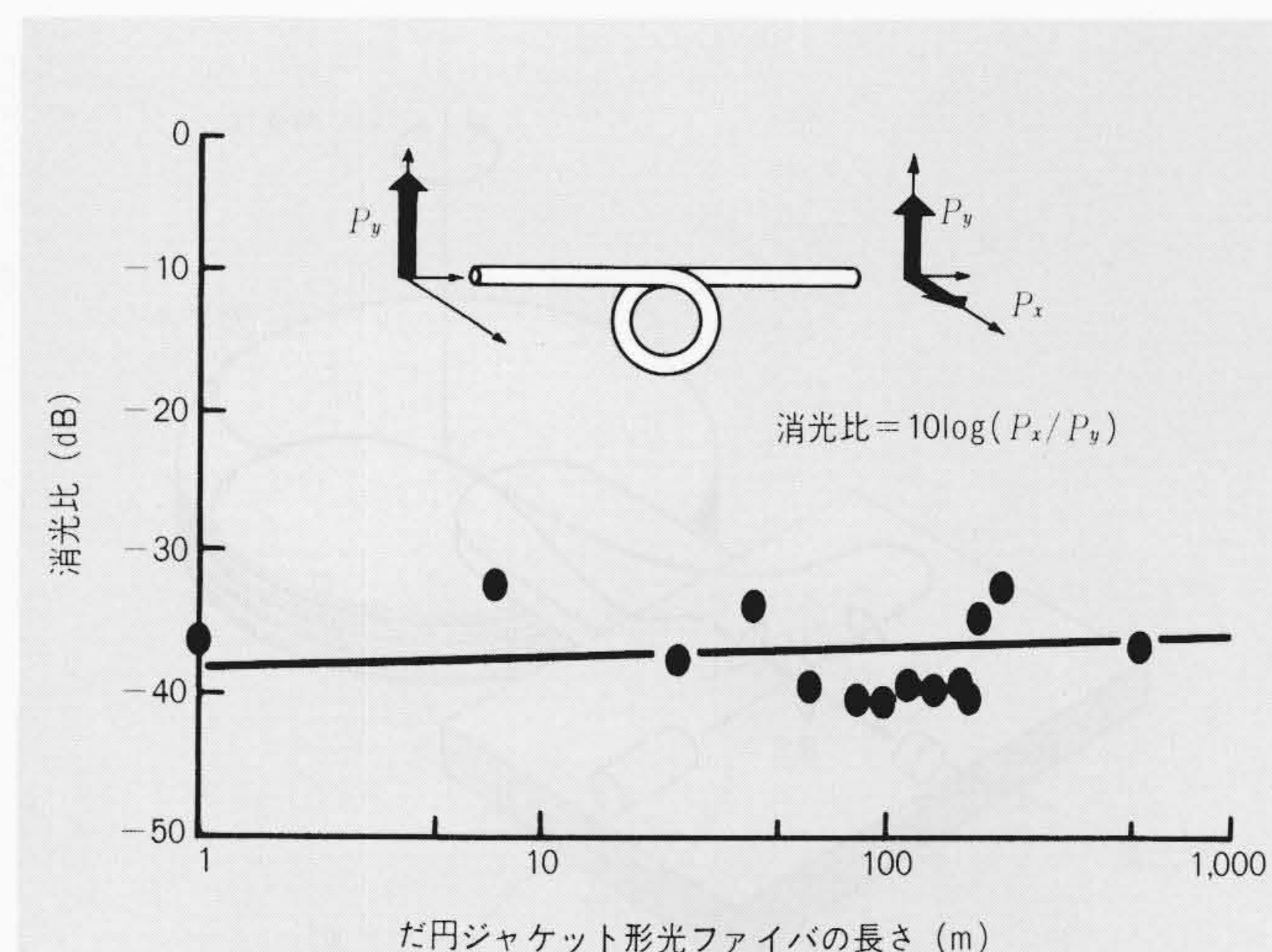


図4 だ円ジャケット形偏波面保存光ファイバの消光比の長さ依存性
直線偏光波 E_y モード(パワー P_y)を入射したとき、モード変換でどれだけ直交するモード E_x のパワー P_x が増大するかを、図3の光ファイバを用いて測定した。

単一モード光ファイバでの伝送損失を下げるには、コアを真円にしGeO₂をドープしたシリカガラスで構成し、クラッドにSiO₂ガラスを用いるのが最適である^{1),2)}。このときGeO₂ドープ量は、2~4mol%と制御しなくてはならない。この構成を崩すことなく偏波面保存機能を光ファイバに与えるには、図3に示すようにクラッドとサポート層の間に新たにだ円ジャケット層を付加し、ジャケットとサポート材料間の熱膨張率の差によって発生する異方性ひずみをコアに印加すればよい。

だ円ジャケットのだ円率=0.5、B₂O₃濃度=14mol%、規格化周波数=2.4、(コア径)/(クラッド径)=0.5のだ円ジャケット形偏波面保存光ファイバの消光比を光ファイバの長さを変えて測定した。その結果を図4に示す。これより、光ファイバの長さ500mの消光比は-32dBで入射時に比べて約2dBしか劣化せず、受信信号レベル変動が1kmで0.1%という高い偏波面保存性能をもっていることが分かる。この光ファイバの伝送損失は、光の波長1.20μmで1.1dB/km、1.55μmで0.8dB/kmと低損失である。更に、製造プロセスの最適化により従来の単一モード光ファイバの損失である0.2dB/kmに近づくとと思われる。

6 偏波面保存光ファイバの応用

偏波面保存光ファイバの使用により、出射光の偏光状態を一定に保てるため、結晶平板上に光導波路をもつ光集積回路との結合が容易になり、光集積回路を用いる光通信伝送路として応用可能である。また特に、伝搬光の偏光状態を利用する計測、例えばファラデー効果を用いた磁界測定、サグナック効果を用いた角速度測定、ドップラー効果を用いた流速、振動測定に偏波面保存光ファイバを用いると測定の安定化が図れ、精度が向上する。

一例として、光ジャイロスコープへの適用について簡単に説明する。光ファイバを用いたジャイロスコープの基本構成を図5に示す。レーザからの直線偏光波は半透明板で二つのビームに分離され、光ファイバの両端に同時に入射される。これらの光はCW(時計方向)とCCW(逆方向)に伝搬し、再び半透明板で合成されて受光面上に干渉縞を作る。光ファイバが角速度 $W(\text{rad/s})$ で回転するとCW光とCCW光の光路長が

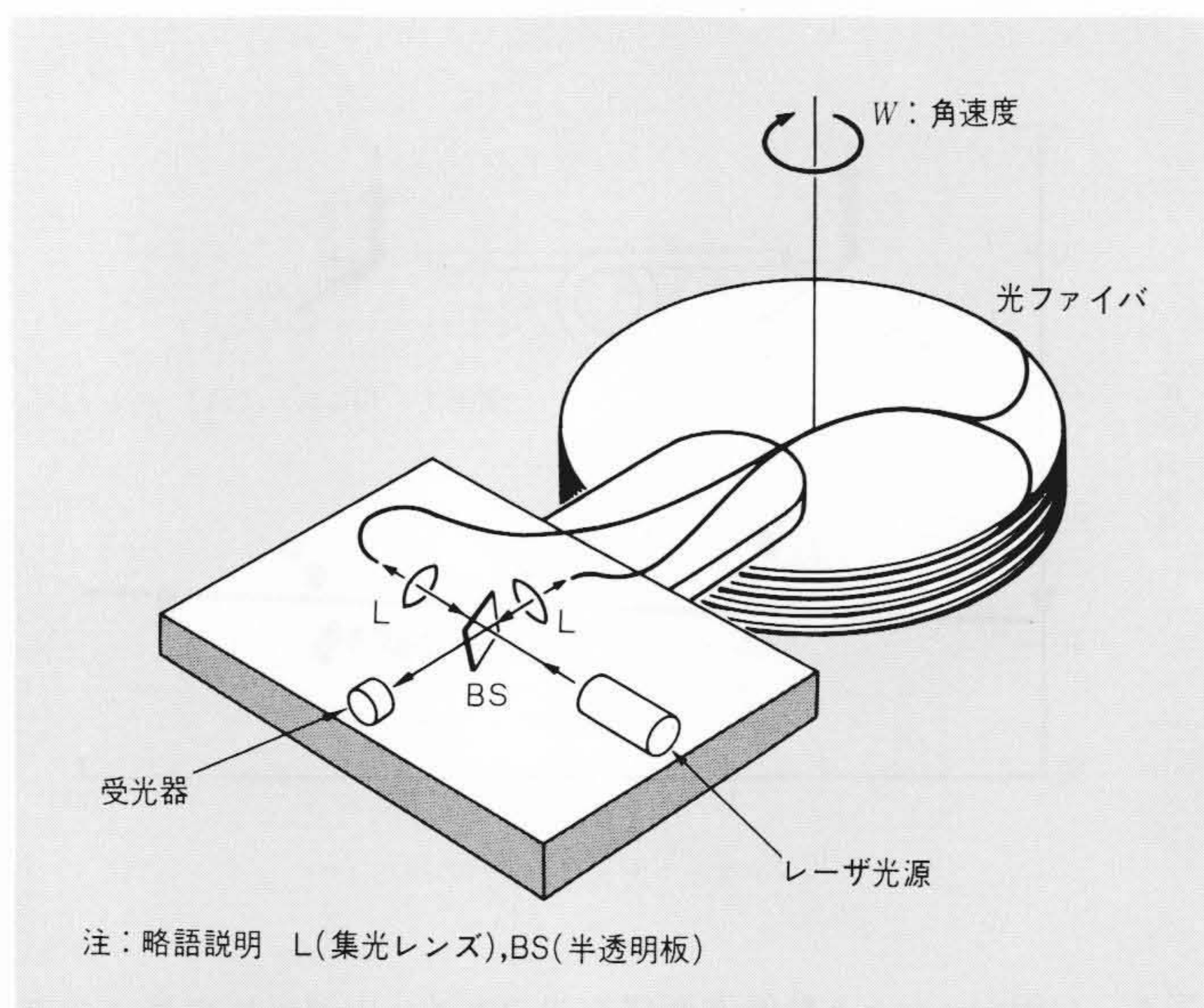


図5 光ジャイロスコップの概念図(偏波面保存光ファイバの一応用例) 光ファイバをコイル状にして回転テーブル上に配置し、角速度 W で回転する。レーザからの光は半透明板BSで二つのビームに分離され、集光レンズLを介して光ファイバの両端から入射する。光ファイバを伝搬した光は、再びBSで合成され受光器面上に干渉縞を作る。干渉縞は W で変化するため、干渉縞の移動量を測定すればよい。

異なり干渉縞が移動する。この移動量を測定すれば角速度を知ることができる。以上述べたように、光の干渉現象を利用しているため出射光の偏波面は一定でなければならず、偏波面保存光ファイバが必要となる。この光ファイバを用いれば測定限界である 10^{-8} rad/s も測定可能になると思われる。

7 結 言

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な偏波面保存光ファイバについて、理論、実験の両面から検討した。その結果、直交モード間の伝搬定数差 $\Delta\beta$ を大きくすると偏波面保存効果が得られること、また $\Delta\beta$ を大きくするには光ファイバのコア部に異方性ひずみを印加するのが最も有効なことを見いだした。以上の基礎検討を基に、だ円ジャケットの内部に同心円の導波部を備えただ円ジャケット形偏波面保存光ファイバを開発し、伝送損失 0.8dB/km という低損失で、消光比 -32dB (500m) と高安定な偏波面保存光ファイバを実現した。この光ファイバは、光通信伝送路はもとより、高精度計測分野に適用することができる。

参考文献

- 1) T. Miya et al.: An Ultimate Low Loss Single Mode Fibre at $1.55\mu\text{m}$, Electron. Lett. 15, 4~6(1979)
- 2) 勝山, 外: 単一モード光ファイバの低損失化に関する一考察, 電子通信学会講演予稿(福岡) 917 (1980)
- 3) 松村, 外: 偏波面保存ファイバの基礎検討(I), 電子通信学会講演予稿(東京) 331 (1980)
- 4) V. Ramaswamy et al.: Polarization Characteristics of Noncircular Core Single-Mode Fiber, Appl. Opt. 17 3014~3017 (1978)
- 5) R. B. Dyott et al.: Preservation of Polarization in Optical Fibre Waveguides with Elliptical Cores, Electron. Lett. 15, 380~382 (1979)
- 6) H. Matsumura et al.: Fundamental Studies of Single Polarization Fibres, 6th European Conference on Optical Communication (York) 49~52 (1980)

論文抄録

超LSI用シリコン単結晶の微小欠陥

日立製作所 岸野正剛

電子通信学会誌 63-8, 852 (昭55-8)

大規模集積回路(以下, LSIと略す。)及び超LSIの基本材料として使われるシリコン単結晶ウェーハの問題点について概観した。超LSI開発の目標は、機能の高度化(高集積化)と高収益化(ウェーハ当たりの多数枚素子取得)に集約できる。この目標を達成するためには、素子の微細化とウェーハの大口径化が当然の帰結であるとともに、素子製造の高歩どまり化の達成が必須の条件である。各単一素子の組合せで構成されているLSI素子(チップ)の歩どまりを採算ベースに乗せるためには、各単一素子(例えば、トランジスタ)に天文学的な値(99.999%以上)の歩どまりが要求される。シリコン結晶は人類が開発した最良の完全に近い単結晶でありながら、いまだに研究課題があるのはLSI技術が要請する高歩どまりのためである。

シリコン結晶には、浮遊帯域(FZ)法で育成したものと引上げ(以下, CZと略す。)法で育成した結晶とがあるが、経験的に高製造歩どまりが得られるために、LSIプロ

セスでは後者が使われている。CZシリコン・ウェーハは完全に近い単結晶であり、as-grown状態で見ると限り有害な欠陥はほとんど見当たらない。しかし、LSIプロセスで必須な高温熱プロセスを通すと、この結晶に微量に含まれる過飽和酸素のために、これが熱処理を受けて析出を起こし、種々の格子欠陥(転位、積層欠陥など)を発生する。そして、これらの欠陥はウェーハの表面近傍に存在すると各素子に有害な影響を与える。その数が少数でも単一素子の歩どまりを上記の天文学的数値に抑えることは不可能になる。ところが、この酸素は結晶を強靱にする作用があり、その結果として熱プロセスでのウェーハの反りを抑制する働きをし、LSI製造の微細加工の工程でその高歩どまり化に寄与している。したがって、欠陥の低減化対策として酸素濃度を下げること、LSI材料としては最良の対策ではないと考えられる。

そこで、酸素濃度を低下させないで欠陥を制御する方法を考察した。すなわち、酸

素及びそれに基づく欠陥の熱プロセスによる挙動を詳しく検討し、欠陥の発生原因を解明した。その結果、熱プロセスによる酸素の析出及びそれに基づく欠陥の発生は、熱プロセスで必然的に起こるものではなく、結晶に含まれるもう一つの不純物である炭素などの存在と、結晶育成条件の不備(育成中に結晶が受ける熱履歴)及びその相互作用によって、はじめてウェーハ化後の熱プロセスで酸素の析出(不均一核発生)が起こることが明らかになった。

また、この検討の課程で有害とされている欠陥を、LSIの歩どまり向上に逆に利用できることも明らかになった。すなわち、ウェーハの内部だけに高密度の欠陥を発生させると、これに表面の欠陥や不純物を吸収できることが分かった。この技術はイントリンシック・ゲッタリング技術と呼ばれ、現在国内外からその発展が注目されている。