

光ファイバジャイロ用光ファイバ部品

藤倉電線(株)光エレクトロニクス研究所 鈴木 文生

Optical fiber components for fiber gyroscope

Fumio Suzuki

Optoelectronics Laboratory, FUJIKURA Ltd.

1. はじめに

軽量、小型、低価格、高精度と多くの利点を有し理想的な回転センサと期待されている光ファイバジャイロの研究、開発は世界的に活発に行われており^{(1),(2)}、いよいよ実用化の段階を迎えようとしている。

光ファイバジャイロは、光を使用することによって従来の機械式ジャイロに存在する可動部分を排除し、更に、ファイバ化することによってバルク形光部品で問題となっていた損失増加と機械的安定性を向上させた点に特徴がある。また、光ファイバジャイロ自体の構成は非常に単純であり構成部品も少なく、製作は比較的簡単である。

ここでは、光ファイバジャイロを構成する上で必要とされる基本的ファイバ形部品について述べ、それらの接続技術についても簡単に紹介する。

2. 光ファイバジャイロの構成

光ファイバジャイロは、干渉形ジャイロと受動共振形ジャイロ^{(3),(4)}とに大別される。両者の構成は異なるが、使用されるファイバ形部品はほぼ等しい。従って、ここでは干渉形ジャイロについて

のみ考える。

Fig. 1 に干渉形光ファイバジャイロの構成を示す。基本的なファイバ形部品は、ファイバコイル、2つのファイバカップラ、ファイバ偏光子と位相変調器である^{(5),(6),(7)}。光源からの光はカップラによって等分に分岐され、光ファイバコイル内を時計回りと反時計回りに回る光となる。この時ファイバコイル軸を中心として回転が与えられると、コイル内を伝搬してもとのカップラに到達した2つの光波間に位相差が発生し、その結果2つの光波による干渉光の強度が変化する。この強度変化を検出することによって回転検出ができる。以上の効果はサニャック効果と呼ばれ光ファイバジャイロの原理である。

安定した干渉を得るためには光波の偏波面が一定に保持されている必要がある。そこで、光ファイバジャイロに使用する光ファイバは偏波保持光ファイバが広く使用されている。また、各種部品も偏波保持光ファイバから製作され、厳しい偏波保持性能に対する要求に対処している。なお、一般の光ファイバは、ファラデー素子として動作し外部磁界によって光の偏波面が回転してしまうの

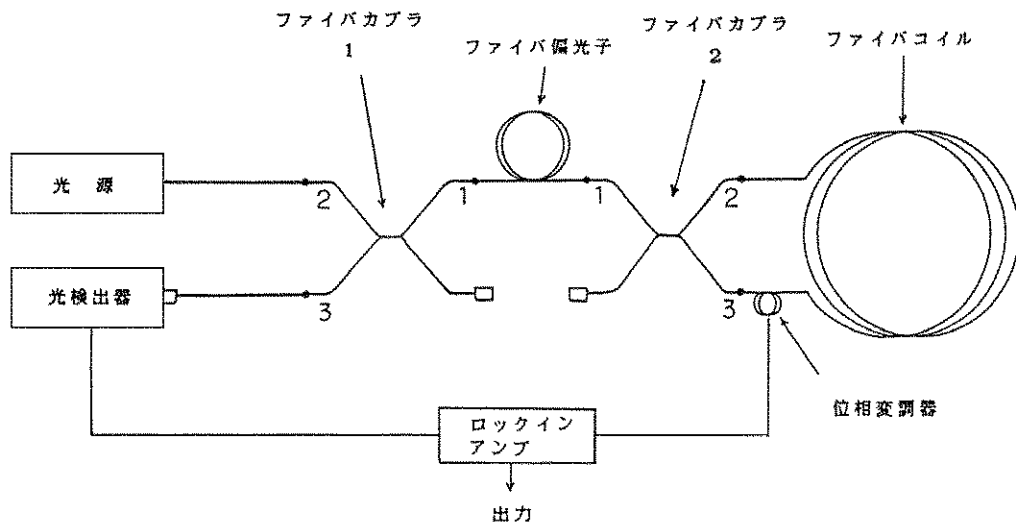


Fig. 1 光ファイバジャイロの構成

で⁽⁸⁾光ファイバジャイロ用に使用することが難しい。

光ファイバ偏光子は、高純度な直線偏光を得る目的で使用する。位相変調器は、ファイバコイルの片端に取り付けられ、2つの伝搬光との間に位相差を生じさせ、回転による出力信号を正弦関数的に変化させている。位相変調周波数 f は、ファイバコイル内の光の伝搬時間 T が1周期の半分となるように選ぶ ($f=1/2T$) のが理想的である。

3. 偏波保持光ファイバ

光ファイバジャイロ用としては、低精度用のジャイロにはシングルモード光ファイバを使用する場合もあるが、一般的には偏波保持光ファイバを使用する。Fig. 2に代表的な応力付与形偏波保持光ファイバの断面構造を示す。このタイプの偏波保持光ファイバは、中心に位置するコアの両側のクラッド部分に2つの応力付与部を有し、PANDA形偏波保持光ファイバ⁽⁹⁾ (以下PANDAファイバ)とも呼ばれている。

PANDAファイバのプリフォームを製作する方法を説明する。まず、シングルモードファイバと同様な直径50mm程度のプリフォームを用意し、コアの両側に超音波ドリルによって精密に穴をあける。次に、別に製作した2本の応力付与部

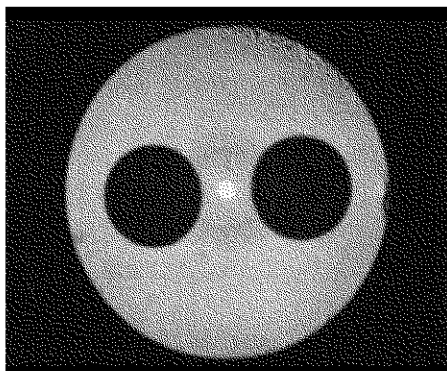


Fig. 2 PANDA形偏波保持光ファイバ

用ロッドを挿入すれば偏波保持光ファイバ用プリフォームとなる。その後の線引き工程以降は、一般の光ファイバと同様である。応力付与部用ロッドは、シリカにボロンが添加されている。従って、応力付与部はシリカのみで製作されているクラッド部とは異なった熱膨張係数と軟化温度を有し、線引き後の応力付与部には収縮応力が残留する。この応力がコアに作用することによってコア部に複屈折が生じ、偏波保持機能が生まれる。応力の大きさは、 10 kg/mm^2 程度と計算されている⁽¹⁰⁾。複屈折により、2つの偏波モードが発生する。一般に、応力付与部方向を HE_{11}^x モード (X偏波)、

それと直交するものを H_{11}^y モード (Y 偏波) と呼ぶ。

シングルモード光ファイバの光学特性である損失、カットオフ波長、モードフィールド径、分散等は、偏波保持光ファイバにも同様に適用される。偏波保持光ファイバにのみ適用される光学特性には、偏波保持性能を表すクロストークとモード複屈折率とがある。クロストークの定義を Fig. 3 に示す。クロストークは、偏波保持光ファイバの一方の偏波軸に直線偏光を入射したときに、出射端における主励振モードの電力量と他の偏波への結合量との比である。Fig. 3 では X 偏波のクロスト

ークを表している。PANDA 形偏波保持光ファイバのクロストークは、ファイバ長 100 m に対して -30 dB 程度である。なお、クロストークは、ファイバ長に比例して劣化する。モード複屈折率 B は、コアの X 軸方向と Y 軸方向の等価屈折率 n_x 、 n_y との差 ($B=n_x-n_y$) であり、この値が大きいほど偏波保持性能が優れている。

PANDA ファイバの断面構造の年代別変化を Fig. 4 に示す。PANDA ファイバが開発された初期の頃の被覆は、ナイロンが使用されてその直径は 0.9 mm であった。用途は、主に、海底光ファイバケーブルの中継器内に使用された⁽¹⁾。その

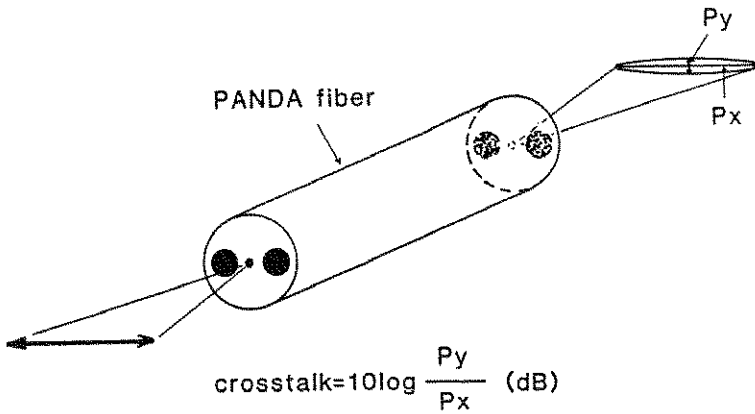


Fig. 3 PANDA ファイバのクロストーク

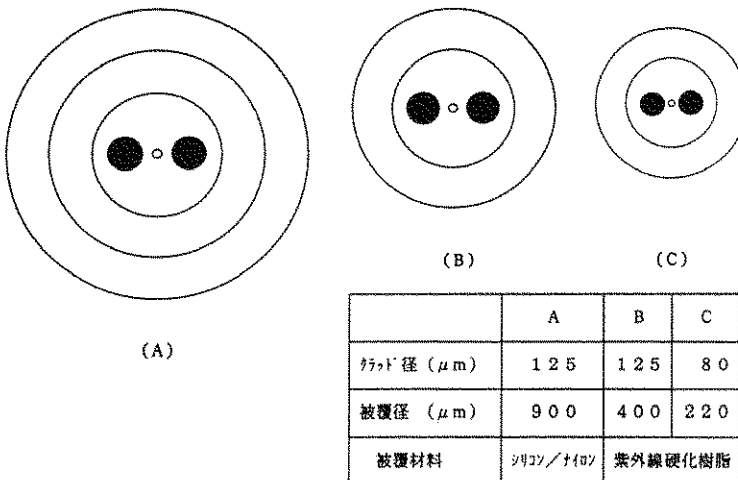


Fig. 4 PANDA ファイバの構造

後、PANDA ファイバは干渉形光ファイバセンサ用として注目され、センサの小型化の目的から細径化の経過を辿る。最近では、クラッド径/被覆径が $80\ \mu\text{m}/220\ \mu\text{m}$ の極細径 PANDA ファイバが特に小型化を要求される光ファイバセンサ用に製作されている。このようなセンサ用 PANDA ファイバは、直径 $10\ \text{mm}$ に巻き付けてもクロストーク特性の劣化はほとんどない⁽¹²⁾。

4. 偏波保持光ファイバカプラ

一般の光ファイバカプラの製作方法は融着延伸法と研磨法とに大別されており、偏波保持光ファイバカプラについても同様である。

4.1 融着延伸形偏波保持光ファイバカプラ

融着延伸法では、2本の偏波保持光ファイバのそれぞれの偏波軸をそろえた状態で接触させ、その後加熱することによって融着し、更に、延伸することによって2本の光ファイバ間に光結合を起こさせている⁽¹³⁾。融着延伸法によって製作された PANDA ファイバカプラを Fig.5 に示す。融着延伸法で容易に PANDA ファイバカプラを製作するためには、特殊なファイバを使用することが提案されている⁽¹⁴⁾。これは、応力付与部の屈折率がクラッドに近づくように補償を行ったファイバである。通常の応力付与部の屈折率はクラッドに対して -0.8% 程度であり、このようなファイバでカプラを製作した場合には融着延伸部において漏洩光が発生し損失の増加を招く。屈折率を補償した PANDA ファイバから製作した損失 $0.1\ \text{dB}$ 、クロストーク $-30\ \text{dB}$ のカプラが報告されている。

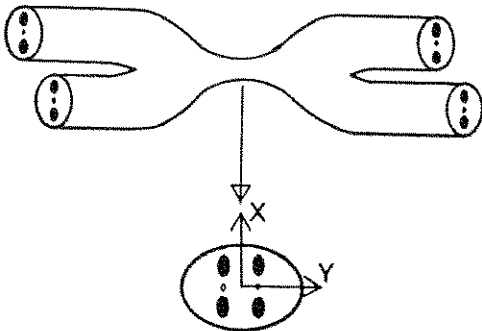


Fig. 5 融着延伸形 PANDA ファイバカプラ

4.2 研磨形偏波保持光ファイバカプラ

研磨法は、融着延伸工程を必要としないため、通常の偏波保持光ファイバから容易に製作することが可能である。PANDA ファイバカプラの製作工程を Fig.6 に示す⁽¹⁵⁾。光ファイバが1本入るだけの溝を有する石英ブロックを用意する。この溝の深さは中央部が浅い凸状となっている。次に、この溝に PANDA ファイバをその X 偏波軸がブロックの厚さ方向に平行となるように慎重に挿入して接着剤にて固定する。その後、固定されたファイバの側面をブロック表面方向からコア近傍まで研磨する。このようにして製作した2個の研磨光ファイバを研磨面が重なり合うように固定して PANDA 光ファイバカプラが完成する。外観を

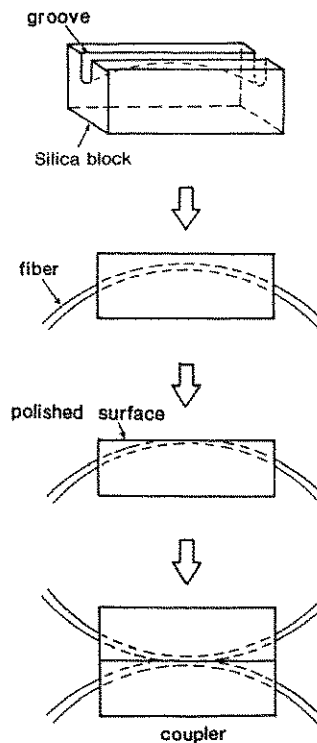


Fig. 6 研磨法によるカプラ製作プロセス

Fig. 7に示す。製作工程において偏波保持性能を左右する重要な点は、光結合部において2本の偏波保持光ファイバの偏波軸が一定していることである。偏波軸合わせ誤差を $\Delta\theta$ とすると結合光のクロストーク C_T は、 $C_T=10\log\{\tan^2(\Delta\theta)\}$ (dB)で計算される。 $\Delta\theta$ とクロストークとの関係を計算値と実測値でFig. 8に示す。結果から、-30 dBのクロストークを得るためには、誤差を1.8度以内にする必要があることがわかる。

4.3 融着延伸形と研磨形との相違

融着延伸法と研磨法とを比較してみると次のようになる。融着延伸法による偏波保持光ファイバカプラは、低価格化の可能性があり温度安定性にも優れている等の利点がある。しかし、カプラ用に適したファイバを必要とすることと融着延伸部での形状変化による特性劣化を克服することが今

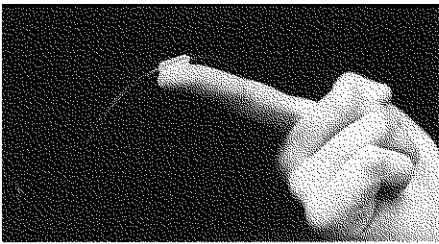


Fig. 7 研磨形 PANDA ファイバカプラ

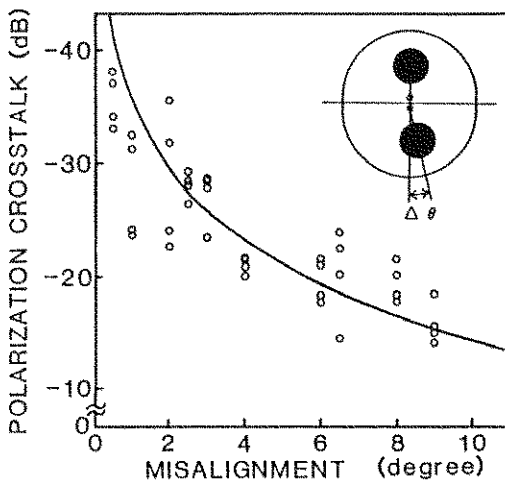


Fig. 8 軸合わせ誤差とクロストークの関係

後の課題である。これとは逆に、研磨形偏波保持光ファイバカプラは低価格化が困難であり接着剤使用により温度安定性に劣る面がある。しかし、通常の光ファイバが使用できることと、低損失、低クロストークといった光学特性が優れており、また小型化が可能なために研磨形カプラはよく使用されている。

5. ファイバ偏光子

これまでに開発されたファイバ偏光子として、①ファイバ巻き付け形⁽¹⁶⁾、②研磨形⁽¹⁷⁾、③積層偏光子透過形⁽¹⁸⁾などが発表されている。ここでは、最も使用されていると思われる①と最近開発されて高性能が期待されている③について述べる。

5.1 ファイバ巻き付け形偏光子

偏波保持光ファイバを巻き付けたときに生ずる曲げ損失は、X 偏波と Y 偏波について異なった挙動を呈する。Fig. 9に、直径 50 mm に 20 回ほど巻き付けた PANDA ファイバにおいて、X、Y 偏波に対応する曲げ損失の波長に対する変化を示

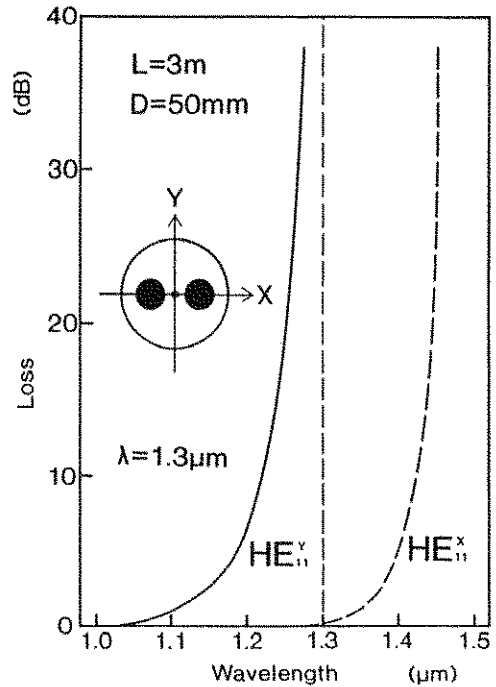


Fig. 9 ファイバ巻き付け形偏光子の波長に対する損失変化

す。X、Y 偏波に対する損失は、双方とも、波長が長波長となるに従って増大している。この傾向は、通常のシングルモードファイバと同様である。しかし、X および Y 偏波のそれぞれの損失変化は異なり、Y 偏波の損失が増加を開始する波長は X 偏波のそれよりもより短波長側で起こり、結果として 2 モード間で曲げ損失差が発生する。ファイバ巻き付け形偏光子はこの損失差を利用したものであり、Fig. 9 の特性を有する偏光子は波長 $1.3 \mu\text{m}$ 付近において偏光子として動作する。すなわち、この波長では X 偏波の損失が小さいのに対して Y 偏波の損失が大きい為、無偏光や回転偏光状態の光を入射させた場合でも出射側では直線偏光の光を得ることができる。Fig. 10 に偏光子の外観を示す。光学特性として消光比 40 dB、損失 0.5 dB 以下のものが一般に得られている。

5.2 積層偏光子透過形ファイバ偏光子

PANDA ファイバを使用した製作法を Fig. 11 に示す。まず、ファイバの偏波軸を回転調整した後に石英基板の溝に挿入して接着剤にて固定する。次に、固定したファイバの中央部を切断する。その切断部に厚さ数 nm の金属層と厚さ数百 nm の誘電体層を交互に積層して製作した積層型偏光子⁽¹⁹⁾ (LAMIPOL®) を、その偏光方向をファイバの偏波軸に合わせて挿入して接着剤にて固定する。製作した偏光子を Fig. 12 に示す。大きさは厚さ 1.5、幅 2、長さ 5 mm と非常に小型である。消光比 55 dB、損失 0.3 dB の積層型偏光子から製作したファイバ偏光子の特性は、波長 1.2 から $1.6 \mu\text{m}$ にわたって消光比 40 dB、損失 0.5 dB で

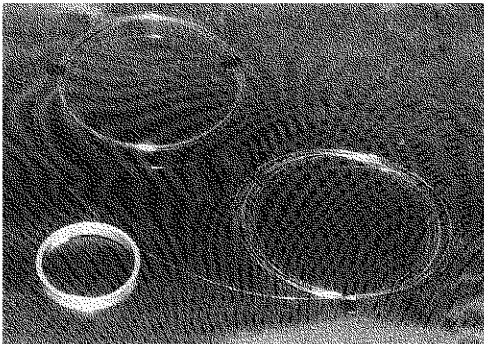


Fig. 10 ファイバ巻き付け形偏光子

あった。ファイバ巻き付け形偏光子と比較したこの偏光子の特徴は、小型であることと使用可能波長帯域が非常に広いことである。

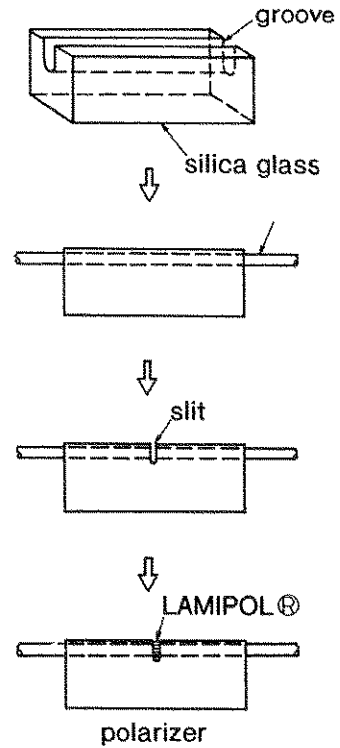


Fig. 11 積層偏光子透過形ファイバ偏光子の製作プロセス

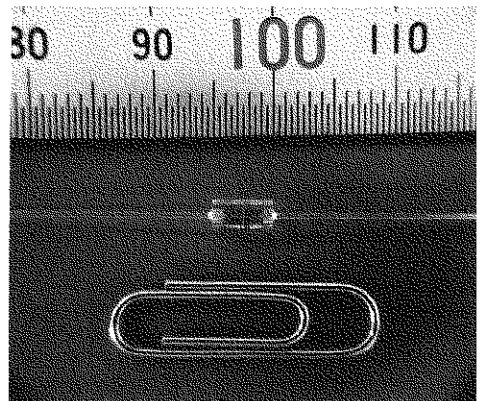


Fig. 12 積層偏光子透過形ファイバ偏光子

6. 位相変調器及び光源

6.1 ファイバ位相変調器

ファイバ位相変調器は、Fig. 13 に示すように電歪振動子にファイバを巻き付けることによって簡単に製作することができる。2章に示した変調周波数の最適値は一般に数百 kHz 程度となり、電歪振動子にファイバを巻き付けた形状の位相変調器の外径は 10 mm 以下となるために特性上このような高周波数帯での使用は困難である。そのため導波路型の光集積回路も開発されている。

6.2 光源

光源としては、ファイバコイル内にて発生する干渉雑音の低減のためにコヒーレンシーの低いスーパーluminescentダイオード (SLD) がよく使用される。しかし、SLD は寿命が短く温度安定性が悪いので、これに変わる光源として最近スーパーluminescentファイバ (SLF) が開発された⁽²⁰⁾。構成を Fig. 14 に示す。これは通常のシングルモ

ードファイバのコアに希土類のエルビウムを添加して、ポンプ光を入射した際の自然放出現象を利用している。Fig. 14 ではポンプ光として $1.48 \mu\text{m}$ のレーザダイオードを使用し半値幅 15 nm で波長 $1.55 \mu\text{m}$ の出力光を得ている。

また、通常のレーザダイオードに偏波保持光ファイバを取り付けた安定化光源も開発されている。この外観を Fig. 15 に示す。ただし、ジャイロ用としては出力光のコヒーレンシーをさげるためにレーザダイオードを高周波変調する必要がある⁽²¹⁾。

7. 接続技術

偏波保持光ファイバは、Fig. 16 に示す融着接続システム (FSM-20PM) によって簡単に融着接続することができる⁽²²⁾。PANDA ファイバのように応力付与部を有する光ファイバに対しては、Fig. 17 に示すようにファイバの側面から光を照射し、本体に内蔵させた小型カメラを使用した画像解析

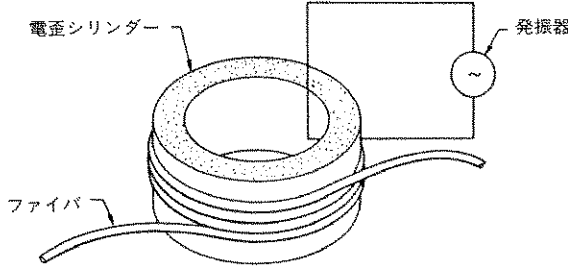


Fig. 13 光ファイバ位相変調器

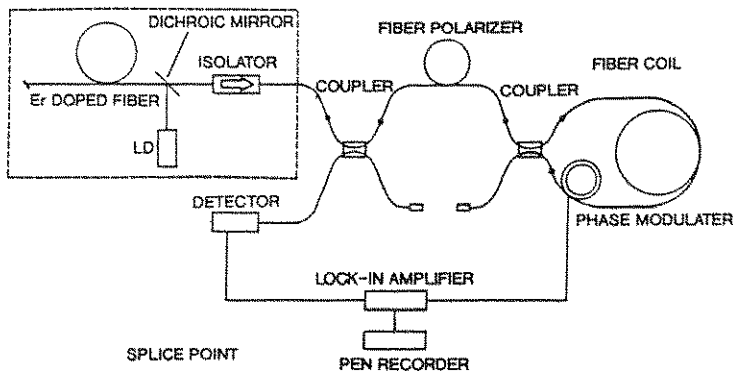
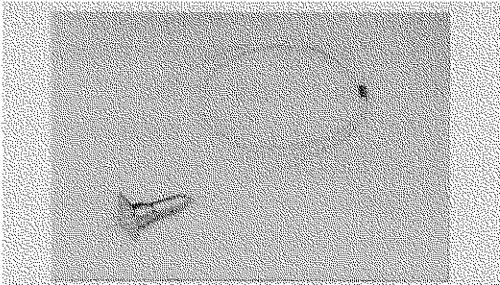
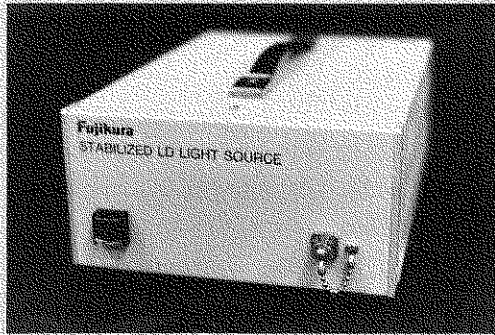


Fig. 14 SLF 光源を使用した光ファイバジャイロ



(a) PANDAファイバ付LDモジュール



(b) 外観

Fig. 15 安定化偏光レーザダイオード光源

によって光ファイバ双方の偏波軸を一致させることができる。接続損失は、0.1 dB 以下である。

8. おわりに

光ファイバジャイロの性能は、光ファイバ部品によって決定されるといっても過言ではない。現在要求されている技術事項は、①高性能、②温度安定性、③小型化等である。また、これらの部品を組み上げる技術も今後重要になるものと考えられる。これらの諸技術が融和しつつ発展することによって数多くの利点を有する光ファイバジャイロは、産業界のみでなくあらゆる分野に使用されることは確実である。

参考文献

- 1) 大越他, 光ファイバセンサ, pp207-252, オーム社(1986)
- 2) B. Culshaw et al., Optical fiber sensors,

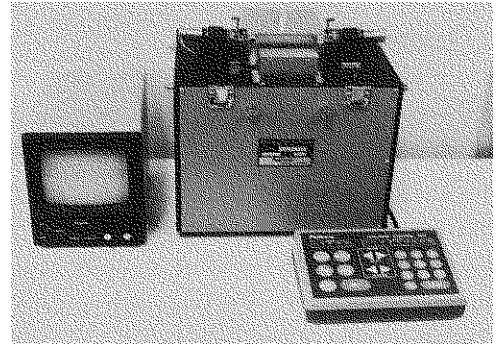


Fig. 16 偏波保持光ファイバ融着接続機

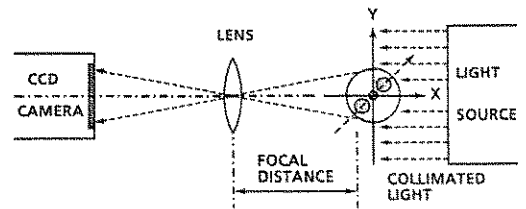


Fig. 17 融着接続機の光学系

pp381-429, Artechhouse (1989)

- 3) 保立, 電子情報通信学会誌, Vol. 73, No. 2, pp149-160 (1990-2)
- 4) 田井他, センサ技術, Vol. 7, No. 8, pp31-35 (1989-7)
- 5) J. Noda et al., J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8, pp1071-1089 (Aug. 1986)
- 6) 保立, 光学, 第 19 巻, 第 6 号, pp386-396 (1990-6)
- 7) 保立, 光学, 第 19 巻, 第 7 号, pp472-480 (1990-7)
- 8) K. Hotate et al., J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 7 (July 1987)
- 9) Y. Sasaki et al., J. Lightwave Technol., Vol. LT-4, No. 8 (Aug. 1986)
- 10) T. Abe et al., Electron. Lett., Vol. 21, No. 1, pp4-5 (Jan. 1985)
- 11) Y. Sasaki et al., J. Lightwave Technol., Vol. LT-2, No. 6, pp816-823 (Dec. 1984)
- 12) 姫野他, 信学光電波全大, 313(1986)
- 13) M. Kawachi et al., Electron. Lett., Vol. 18,

No. 22 (Oct. 1982)

- 14) I. Yokohama et al., Electron. Lett., Vol. 22, No. 18, pp929-930 (Aug. 1986)
- 15) T. Arikawa et al., OFS, FEE4-1, pp480-483 (Jan. 1988)
- 16) M. P. Varnham et al., Electron. Lett., Vol. 19, No. 19, pp679-680 (Aug. 1983)
- 17) W. Eickhoff, Electron. Lett., Vol. 16, No. 20, (Sep. 1980)
- 18) T. Arikawa et al., OEC, 13 D 2-1 (July 1990)
- 19) 馬場他, 信学技報, OQE 88-12 (1988-5)
- 20) 山崎他, 信学秋季全大, C-296 (1990-10)
- 21) 堀江, レーザ学会研究会報告, RTM-88-34 (1989-2)
- 22) H. Taya, OFC, THJ2, pp164 (Feb. 1989)

[筆者紹介]



鈴木 文生 (すずき ふみお)
昭和 54 年 埼玉大学大学院工学
研究科修士課程終了
同 年 藤倉電線㈱入社
現 在 同社光エレクトロニク
ス研究所光通信研究室
主任研究員

[連絡先]

〒 285 千葉県佐倉市六崎 1440
藤倉電線株式会社光エレクトロニクス研究所
光通信研究室
TEL 0434-84-3941

Abstract

Significant progress are being performed toward the realization of a practical fiber optic gyroscope (FOG). In this paper, many key fiber components used in the interferometric FOG are discussed. These are concentrated on a polarization-maintaining optical fiber and the related components which are specially useful for FOG. A splicing technique is shortly introduced.