

センサ用ファイバ及び部品

藤倉電線株式会社 光エレクトロニクス研究所 稲田 浩一

1. まえがき

光ファイバセンサはその応用範囲が著しく広く、物の有り無しを単に判断するような物から航空機用のジャイロに至るまで幅広く使用される。したがって、それに使用されるファイバや部品も種々雑多であり、安価なプラスチックファイバから、比較的高価な偏波面保存ファイバやそれを使用した各種の部品がある。ここでは、通信用に使用されている一般的なファイバの説明は省略し、主にセンサーに使用されている偏波面保存ファイバや特殊ファイバの現状とそれを使用した部品の現状について述べる。

2. 偏波面保存ファイバ

偏波保持ファイバは、偏波面の保持能力、すなわち、X偏波はXのまま保持し、Y偏波はYのまま保持する能力がある。この能力はX方向とY方向の屈折率を異ならしめることにより強めることが出

来る。通常、その大きさをモード複屈折率で表したり結合長で表したりする。なお結合長とビート長は同じものである。

この偏波保持光ファイバは、主に光の干渉を利用する光ファイバセンサの検出部やその伝送部、および偏光子やカップラーなど各種の部品に、また光集積回路との結合部などに利用されている。偏波保持ファイバに要求される主な事柄はこの偏波保持特性の他、伝送損失、機械的曲げ特性などがある。これらの特性を満足すべく現在までに提案されている主なものを図1に示す。(1)のパンダ型⁽²⁾、(2)のボウタイ型⁽³⁾、(3)の楕円ジャケット型⁽⁴⁾の3種類は最も一般的に使用されているものである。(4)のサイドトンネル型⁽⁵⁾は完全単一偏波特性を有するが損失が大きいなどまだ実用上問題点が多いようである。(5) - (6)のクラッドを偏平にしたファイバは偏波面の方向を容易に定めることが出来ることと、ファイバをコイル状に巻いた時、偏波面の曲がり方向を一様に保つ

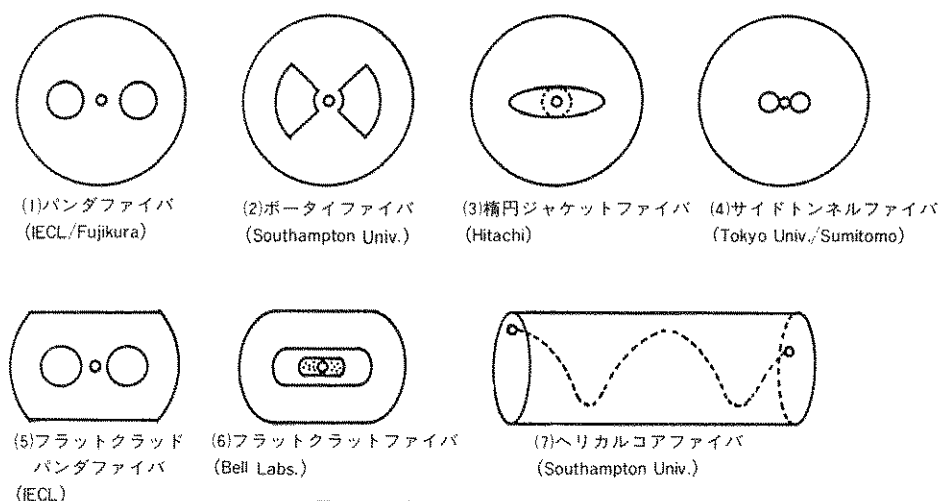


図1. 偏波面保存ファイバ

ことが出来るなどの利点を有しており、光IC基板との接続や偏光子として使用されている。その他、コアを楕円にした楕円コアファイバがだいぶ以前提案されたが、コアを楕円にした程度では複屈折率を大きく取ることが出来ず、その結果、良好なクロストーク特性を得るのが難しく現在はあまり検討されていない。

以上の各種の偏波保持ファイバの中でもパンダ型ファイバはもっともよく知られている一つである。このパンダファイバは偏波面を保持する目的で2個の応力付与部材がコアの両側に配置され、ファイバ線引き時のストレスにより、X方向とY方向に屈折率の差をもたせている。光が通るコアの太さは $3\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ 程度であり、クラッドの外径は標準ファイバと同じ $125\mu\text{m}$ が多い。この偏波保持ファイバは一般の石英系光ファイバと比較的同じ方法で製造可能であり、安価で入手もし易い。今後、ジャイロ用、各種センサ用、コヒーレント通信などその応用範囲は急速に拡大されると思われる。

図2はパンダ型ファイバの伝送損失の年代別低減化を図示したものであるが、毎年損失をへらし1986年にはほぼ理論的最低損失である 0.2dB/km 近くに達し、通常の単一モード光ファイバとはほぼ同等の特性を有するまでに下がっている。なお、この時のクロストークは 1km で約 -30dB 程度であり、通常の用途には十分な値である。

図3はパンダ型ファイバのモード複屈折率とクロストークの関係を実測により求めたものである

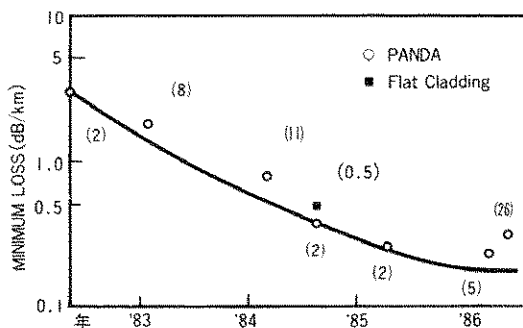


図2. 偏波保持光ファイバの長尺、低損失化の推移
()内はファイバの単長(km)を表す。

が⁽⁶⁾、 1km 当たりのクロストークを -30dB 以下にするためにはモード複屈折率を 3.5×10^{-4} 以上にする必要がある。このモード複屈折率は、パンダ型ファイバの場合、応力付与部の間隔を変えることによって比較的容易に制御することが出来る。図4は応力付与部間隔とモード複屈折率の関係を調べたもので⁽⁷⁾この図から応力付与部の間隔はほぼ $20\mu\text{m}$ 以下にする必要があることがわかる。この間隔を狭くすればするほど応力の影響が大きくなりモード複屈折率を大きくすることが出来る。しかし、この間隔を狭くすると伝搬光の一部がこの応力付与部に進入し伝送損失を大きくしてしまう。したがって、良好なクロストーク特性を保ちながら非常に低損失なファイバを作ることは難しい。図5は比較的低損失化を目標に作ったパンダファイバのクロストークの一例であるが⁽⁸⁾、クロストークは 12km で -12dB である。なおこの値はケーブル化によってマイクロベンドを減らすことによりかなり改善することが出来る。

図6は異なるモード複屈折率を有する3本のファイバの距離依存特性である⁽⁷⁾、いずれも距離が長

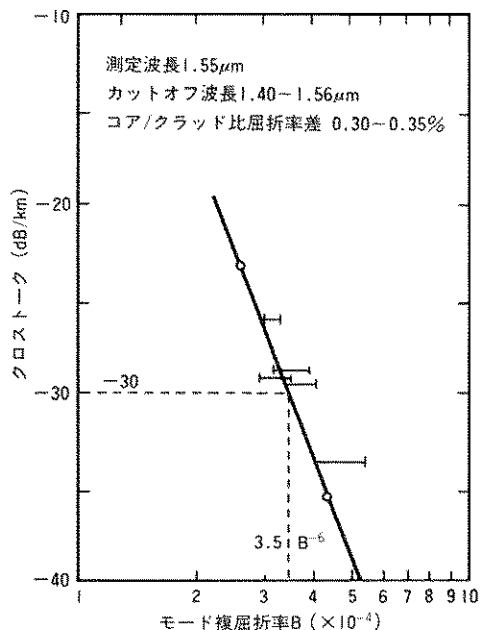


図3. モード複屈折率Bとクロストークの関係

くなればそれに比例しクロストークが悪化するが、短尺では全く逆転し複屈折率が高いほどクロストークが悪くなってしまう。これはファイバの長さが数m程度になると入射部分で伝搬モードに変換されなかった光が、一部クラッド部分や被覆部分を伝

わり伝播しクロストークを悪化させるものである。

3. 希土類ドープファイバ

ネオジウム(Nd)、ホルミウム (Eu)、エルビウム (Er) 等の希土類元素をドーパントとする石英

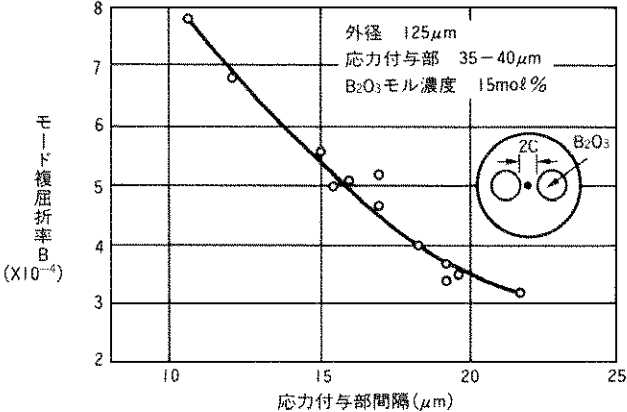


図4. 応力付与部間隔とBの関係

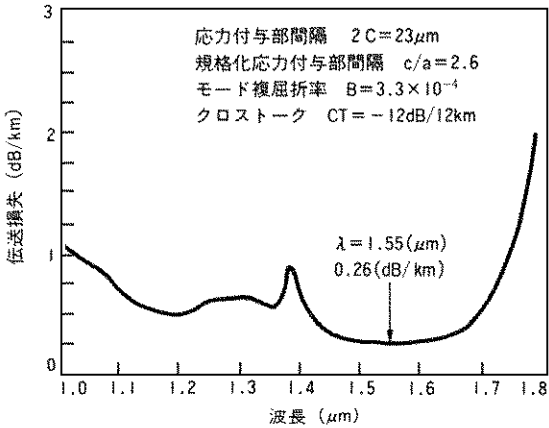


図5. 12kmの長尺ファイバの損失波長特性

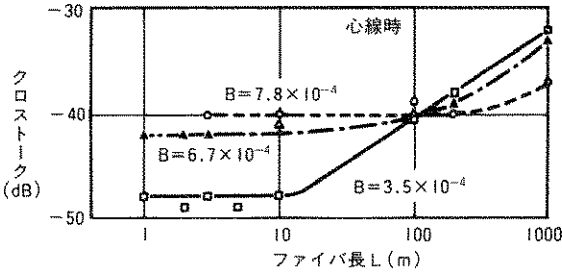


図6. Bとクロストークの関係

系ファイバが光増幅用ファイバあるいはファイバレーザとして研究、開発されている。これらが従来のYAG等の結晶材料あるいは多成分系ガラスを母材とするものとは異なる点は、シングルモード及びマルチモードファイバが容易に作製可能なこととその損失が著しく低いことである。このファイバはまた希土類元素の吸収あるいは蛍光寿命の温度変化を利用した温度センサとして利用可能である。またドープ量を少なくして低損失で長尺可能なファイバを用いれば、温度の分布計測も可能と考えられる。

希土類ドープファイバはCVD法、VAD法いずれによっても製造可能であるが、ここでは図7にMCVD法による作製方法を紹介する⁽⁹⁾。これは通常のMCVD法に加えて高融点の希土類塩化物原料を蒸発させるキャンパを有している。低損失のファイバを作製するためには脱水プロセスが重要である。例えば、ネオジウムの場合、 $\text{NdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を原料として用いるため、これを無水 NdCl_3 に脱水する工程、また SiO_2 、 GeO_2 、 Nd_2O_3 を溶融されていないガラスとして合成し、これを Cl_2 を用いて脱水する工程等の工夫がなされている。

これまで、 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Yb^{3+} 等をドープしたファイバの作製が報告されている。例えばNdについては、0.3から300ppmの範囲でドープ量を変化させることにより、590nmの吸収ピークを40dB/kmから30,000dB/kmまで変化することができる。図8にNdを30ppm含むファイバの損失波長特性を示す。可視及び近赤外域では3,000dB/kmと高損失であるが、長波長域では2dB/km以下と低損失である。このファイバは、940nm、1080nm、1370nmに蛍光発光帯を持っている。これらの希土類ドープファイバを用いて種々のファイバレーザを構成することかできる⁽¹⁰⁾。ファイバの両端面にミラーを成形したファブリペロ共振タイプ、カプラを用いてリング共振器構造としたもの等である。図9にLD励起ファブリペロ共振型ファイバレーザの構成とその出力特性を示す。しきい値は600mWと非常に低い値である。

4. ファイバラマン温度センサ

ファイバ内のレイリー後方散乱光が温度に依存することを利用し、それから温度を測定する方法が提案されているが、石英ファイバのレイリー散

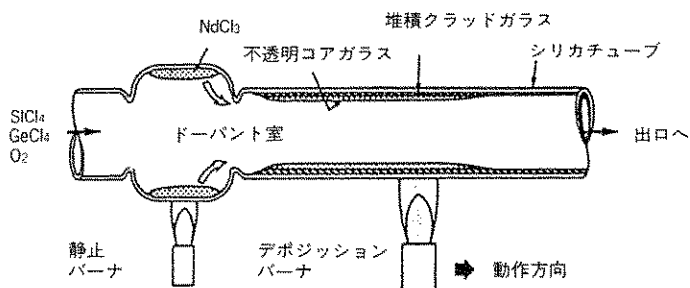


図7. MCVD法による希土類ドープファイバの作製法

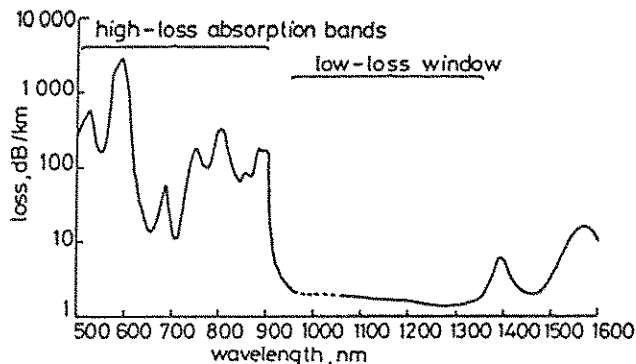
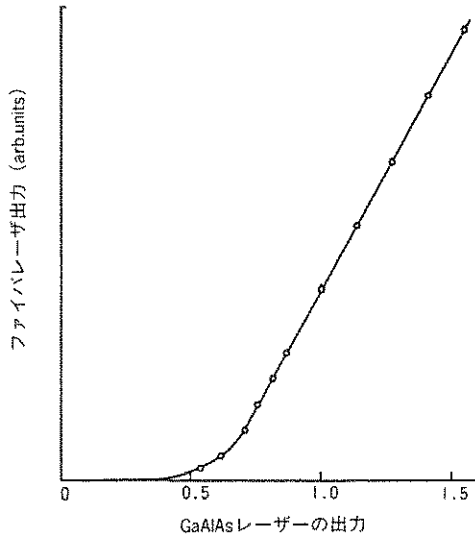
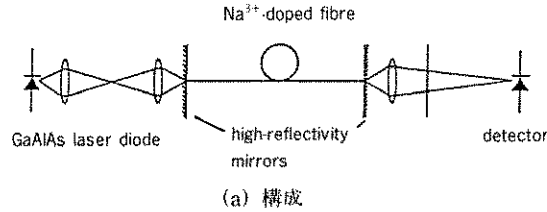


図8. Ndドープファイバの伝送損失



乱の温度依存性は小さく、室温程度の温度を正確に測定する目的には適していない。一方、ラマン散乱はこれに比べかなり大きな温度依存性を示す。このためラマン散乱光の後方散乱を計測することにより温度分布の測定が可能となる⁽¹¹⁾。ラマン散乱にはストークスとアンチストークスの2があるがそれらの強度比 $R(T)$ をとることにより温度の絶対測定が可能となる。この $R(T)$ は

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)^4 \exp - \frac{hcV}{kT}$$

で与えられる。ここで λ_a , λ_s はアンチストークスとストークスの波長, V は励起光との波数差, h はプランク定数, c は光速, k はボルツマン定数, T は温度である。この関係により、レーザの出力変動、ファイバの組成、損失等の特性を補償することができる。

図10にファイバの一部を室温より43K高くした部分と、205K低くした部分から生じる後方散乱光の

変化を示す。励起光には5 Wのアルゴンレーザを用いている。アンチストークス光はストークス光に比べ1/4の強度であるが、温度変化は大きい。

図11に半導体レーザを用いた装置の構成を示す。3 Wピークパワー、14nsのパルス幅のレーザを10 kHzの繰り返しで用いる。1 W程度のパワーがファイバに入射される。後方散乱光は解析格子によりストークス、アンチストークス、励起光に分離されAPDにより光電交換される。図12に半導体レーザを用いたシステムにより検知されたアンチストークス光の形成を示す。

このようにファイバラマンを用いた温度センサは分布計測が可能、温度精度も高い等の優れた特徴を持っている。

5. 光ファイバ形部品

光ファイバ形部品は、低損失・小型・機械的安定性・ファイバとの結合の容易さ等の点から光ファイバ通信並びに光ファイバセンサシステム用光

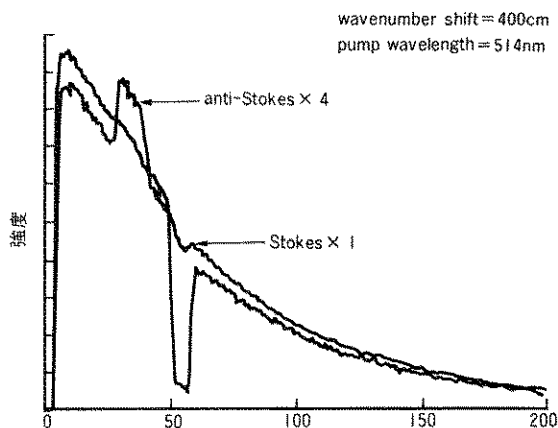


図10. アルゴンイオンポンプレーザを使用したストークス光とアンチストークス光の後方散乱光

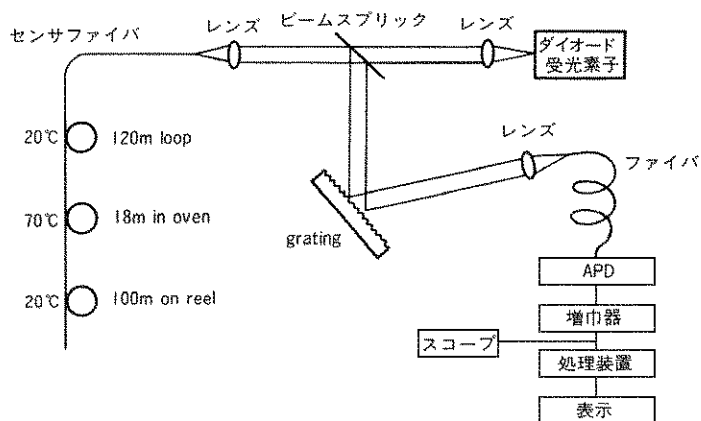


図11. 半導体レーザを用いた装置

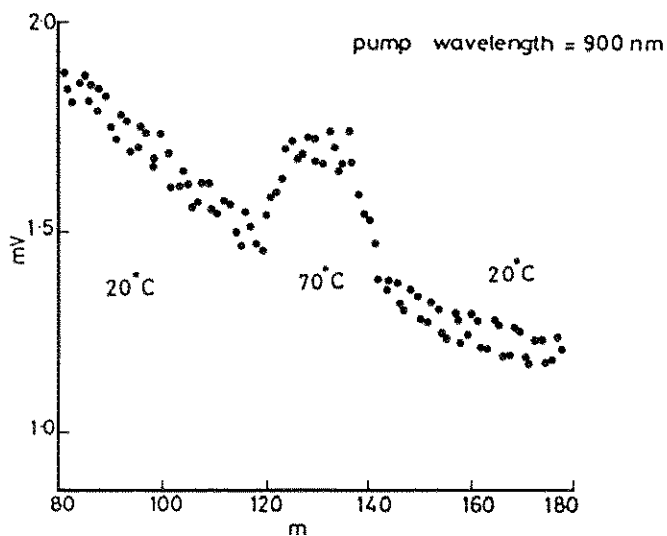


図12. アンチストーク後方散乱光

学部品として非常に重要である。ここでは、まず、ファイバ形カプラについて述べ、更に、光ファイバ形偏光子、最後に、その他重要と思われる光部品について述べる。

5-1 光ファイバ形カプラ⁽¹²⁾

ファイバ形カプラは、ファイバ内を伝搬する光を分岐あるいは結合する機能を有する。製法としては、複数本のファイバの一部を融着し延伸する融着延伸法と、側面をコア近傍まで研磨したファイバ同士を対向させて構成する研磨法とがある。現在、単一波長用シングルモードファイバカプラでは、入射光ファイバから被結合光ファイバへの光電力の結合の度合を表す結合度は任意に選べ、過剰損失は0.1dB以下である。また、結合度は強い波長依存性を示す。この性質を利用して複数の波長を任意ポートに分波可能な合波・分波カプラも製作されている。融着延伸法によって製作したカプラの寸法は、外径2～3mm、長さ20～40mm程度である。合波・分波カプラの外観を図13に示す。

コヒーレント光ファイバ通信及び干渉形光ファイバセンサにおいては偏波面を保持した状態で従来のカプラの機能を有する偏波保持カプラを必要とする。偏波保持ファイバカプラは、一般に研磨法によって製作されている。偏波特性の良好なカプラを得るためには、研磨面をファイバの偏波軸

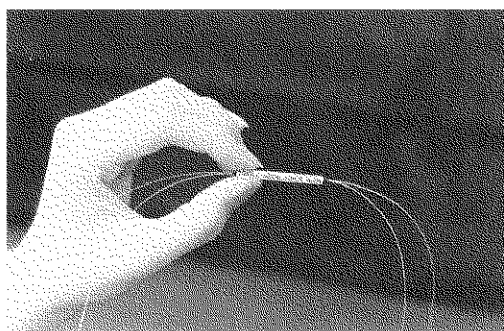


図13 合波・分波光ファイバカプラ

に正確に一致させることが重要である。PANDAファイバによって製作したカプラの偏波軸の軸合わせ誤差とクロストークの劣化の度合を図14に示す⁽¹³⁾。同図より、-30dB以下のクロストークを得るためには軸合わせ誤差は1.8度以下にする必要のあるこ

とがわかる。

5-2 光ファイバ偏光子

ファイバ形偏光子としては、ファイバ巻き付け形と研磨形とがある。偏波保持ファイバ内を伝播する HE_{11}^x モードと HE_{11}^y モードの曲げ損失は異なることが知られている。この曲げ損失差はファイ

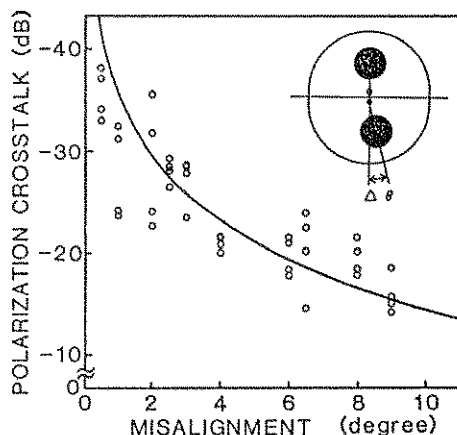


図14. クロストークと軸ずれとの関係

バの遮断波長を低く選び複屈折率を高く選ぶことによって拡大できる。図15に平形PANDAファイバを使用した巻き付け形偏光子における各モードの損失の波長依存性を示す。波長1.1 μ m以上の長波長領域において、モード間の損失差が急激に増加していることがわかる。この偏光子を1.3 μ mにて使用した場合の消光比は42dBであった⁽¹⁴⁾。研磨形偏光子としては、図16に示すような研磨面に金属膜を装荷しこの金属面に垂直な偏波光のみを透過させる金属装荷形⁽¹⁵⁾が一般的である。

5-3 その他

その他の光部品としては、図17に示すような非相反素子であるYIGを使用したアイソレータ⁽¹⁶⁾、及び、サーキュレータ⁽¹⁷⁾がある。また、偏波保持ファイバの2つの伝搬モード間の群遅延差を利用したデポラライザ⁽¹⁸⁾、デュアルコアファイバ⁽¹⁹⁾を使用した波長フィルタ等がある。光ファイバ形部

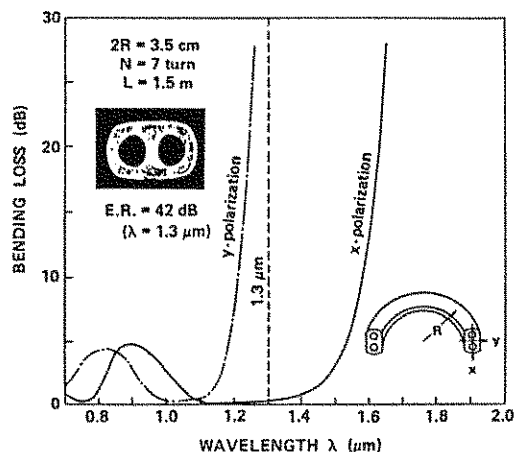


図15. ファイバ巻き付け形偏光子

品は、多品種、高性能化される傾向にあり将来の発展が期待されている。

参考文献

- 1 K.Inada, OFS'86 Tokyo, 1986, pp.101-104
- 2 Y.Sasaki et al., J. of Lightwave Technology, Vol.Lt-4, No.8 August 1986s
- 3 S.C.Rashleigh, J.Lightwave Tech., LT-1, p.312, 1983
- 4 T.Katsuyama et al., Appl. Opt., Vol.22 No.11, pp.1741-1747, 1983
- 5 T.Ohkoshi et al., Electron Lett., Vol.18, No.19, pp.824-826, 1982
- 6 J.R.Simpson et al., J.Lightwave Tech. Vol.LT-1, No.2, pp.370-373, 1983
- 7 R.H.Stolen et al., J.Lithtwave Tech. Vol.LT-2, No.5, pp.639-641, 1984
- 8 菊地, 他 昭和60年秋信学全大 pp.433
- 9 S.B.Poole et al, Electron. Letters. Vol.21, No.17, pp.737-738, 1985
- 10 R.J.Mears et al, Electron. Letters. Vol.21, No.17, pp738-790, Aur., 1985
- 11 J.P.Dakin et al, Electron. Letters. Vol.21, No.13, pp.569-570, June, 1985
- 12 鈴木他: 信学技報, OQE88-22, pp.71-78, 1988
- 13 T.ARIKAWA, et al.:ofs88, pp480-483, 1988
- 14 岡本他: 信学技報, OQE85-13, pp.7-12, 1985
- 15 D.GRUCHMAN, et al. ECOC83, pp305-308, 1983
- 16 K.OKAMOTO, et al.: Electron. Lett., Vol.21, pp.36-38, 1985
- 17 横浜他: 昭61信学全大, 849, 1986
- 18 K.BOHM, : Journal of Lightwave Technol. Vol.LT-1, pp.71-74, 1983

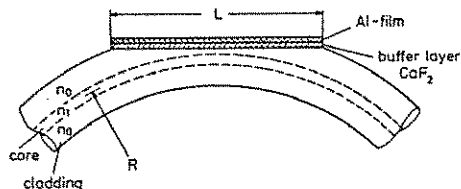


図16. 研摩形ファイバ偏光子

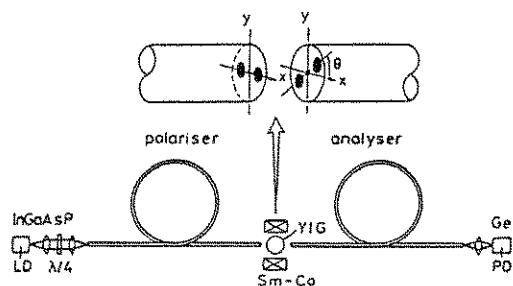


図17. 光ファイバアイソレータ

- 19 岡本他: 信学技報, OQE85-155, pp.37-42, 1985

〔筆者紹介〕



稲田 浩一 (いなだ こういち)

昭和38年横浜国立大学電気卒、同年藤倉電線に入社。以来、ミリ波導波管、超電導同軸線路、電波漏洩同軸ケーブルなどの高周波伝送線路の研究開発に従事。昭和46年頃より光ファイバの研究開発に着手し現在に至る。現在、光エレクトロニクス研究所長、IEEE、OSA、電子情報通信学会、応用物理学会会員。工学博士。