

偏波保持光ファイバ

Polarization Maintaining Fiber

荒井 慎一*

Shin-ichi Arai

齋藤 裕文*

Hirofumi Saitou

小山 直人*

Naoto Oyama

中村 肇宏*

Toshihiro Nakamura

横溝 健二*2

Kenji Yokomizo

相曽 景一*3

Keiichi Aiso

概要 偏波保持光ファイバがWDM伝送用の光学部品の一部として注目を再び集めている。特にPANDA型の偏波保持ファイバは低損失で偏波クロストーク特性に優れており温度変化や機械的な外乱にも良好な偏波保持特性を示すので、光学部品の端末として多く利用されている。当社では、難燃化へ対応するための難燃被覆化や、980 nm用の偏波保持光ファイバを開発した。また、複屈折と伝送損失がトレードオフの関係にあるPANDAファイバであるが製法の改良により高複屈折かつOH基口スを低減したファイバを実現した。更に、波長分散を制御した光ファイバを偏波保持化することにより新たな機能を実現し、今後の適用領域の拡大が期待される。

1. はじめに

偏波保持光ファイバはコヒーレント光通信用線路あるいはファイバジャイロ等の各種光センサ用として期待されその検討が盛んに行われてきた¹⁾。そうした中で近年のWDM伝送技術の発展に伴いファイバ型部品としての偏波保持光ファイバが注目を集めている。今回、偏波保持ファイバの一般的な特性と当社の取り組みを紹介する。

2. ファイバの構造と製法

一般的に広く使われているシングルモード光ファイバ(SMF)には、直交する2つの偏波面をもつモードが存在する。偏波保持光ファイバはこれら2つの偏波モード間に伝搬定数差を生じさせそれぞれの偏波モードからもう一方への偏波モードへの結合を抑制し偏波保持能力を高めたファイバである。伝搬定数差を発生させたファイバとして、コアに非軸対称な応力を与える構造の応力付与型偏波保持光ファイバがあり、PANDAファイバ(Polarization-maintaining AND Absorption-reducing)、楕円ジャケットファイバ²⁾やbow-tieファイバ^{3), 4)}があげられる。一方、応力付与型偏波保持光ファイバはコアがほぼ円形であるのに対し、コアの形状を非軸対称にした楕円コア光ファイバ⁵⁾等も偏波保持能力を有している。様々な構造の偏波保持光ファイバが提案されてきたが、NTTの茨城通信研究所で開発されたPANDAファイバ^{6), 7)}は、耐偏波クロストーク特性に優れていることに加え比較的低損失という特徴を有しており偏波保持光ファイバの主流となっている。また、この技術を応用した新

たな機能を実現したファイバも報告されている。

PANDAファイバは図1に示すような断面構造になっておりコアの両側に円形の応力付与部が配置されている。製法は通常のシングルモード母材のコアの両側に応力付与部材用の穴を開け内面を研削研磨すると同時に、線膨張率を大きくするためにB₂O₃がドーブされた石英ガラスロッドの表面を研削研磨し、SMF母材の穴に挿入し線引き母材としている。線引き工程におけるファイバ化後の冷却過程で純石英ガラスのクラッド部に比べ大きな線膨張率を有する応力付与部分に引っ張り歪みが生じることによりコアに応力を印加している(図2)。

3. ファイバの特性

PANDAファイバは基本的にはシングルモードファイバ(SMF)であるので通常のSMFと同様に伝送損失、カットオフ波長、モードフィールド径に比べて偏波保持光ファイバ特有の複屈折率と偏波クロストーク特性が重要な特性となる。また、光学部品として使用されるので融着特性が重要な特性である。それぞれについて以下に述べる。

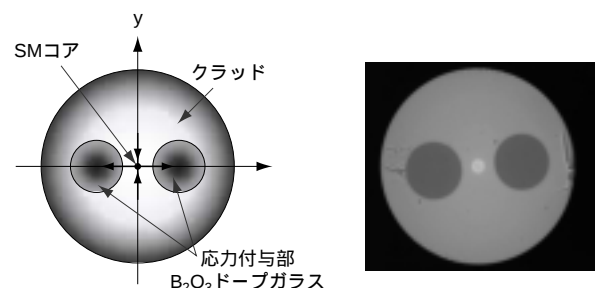


図1 PANDAファイバの構造
Cross-section of PANDA fiber

* 光ファイバ事業部 千葉ファイバ製造部

*2 オプトコム事業部 千葉通信製造部

*3 研究開発本部 ファイタルフォトニクス研究所

3.1 複屈折率

PANDAファイバは応力付与部に発生する応力により、図1のようにコア部はX方向では引っ張り応力、Y方向では圧縮応力を受けており光弾性効果により複屈折が誘起されX偏波モードとY偏波モードで異なる屈折率構造を有することになる。このことからX、Y各偏波モードで伝搬定数(β_x, β_y)が異なることになり、その伝搬定数の差($\Delta\beta$)により偏波モード間の結合が生じ難くなっている。誘起された複屈折の度合いを表す量として、複屈折率Bを式(1)で表す。

$$B = \frac{\beta_x - \beta_y}{k} = \frac{\Delta\beta}{k} \quad (1)$$

また、PANDAファイバのX軸に45度の角度で直線偏光を入射した場合に図3に示すようにファイバ長手で偏光状態が変化する。X、Y各偏波の位相差が 2π になりファイバ内で入射した状態の直線偏光になるまでの距離をビート長と呼び式(2)で表される。

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{B} \quad (2)$$

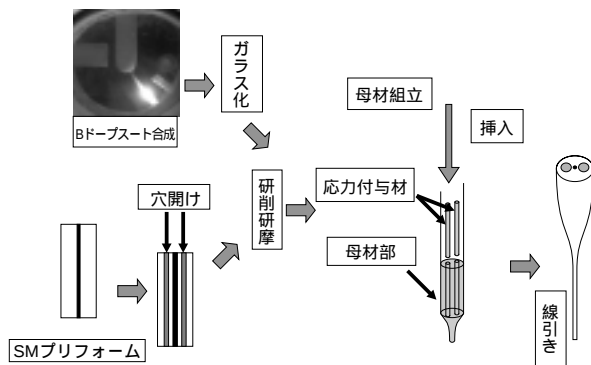


図2 PANDAファイバの製法
Fabrication process of PANDA fiber

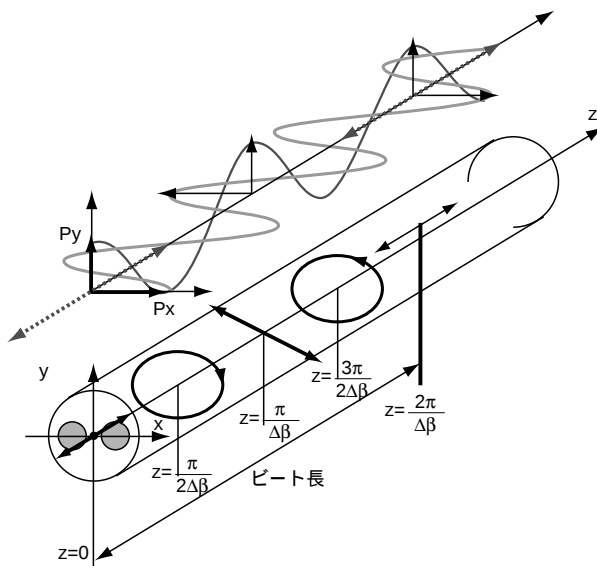


図3 PANDAファイバへ45°入射時の偏波の様子
State of polarization in PANDA fiber with a linearly polarized light inputted 45° azimuth

3.2 偏波クロストーク

偏波クロストークはPANDAファイバの偏波保持能力を表す量である。ファイバの片端からX若しくはYの一方の偏波モードに直線偏光を入射し、一定距離伝搬後の出射側で入射方向の偏波モードとそれと直交する漏洩した偏波モードの強度の比を使って表し、通常は以下の式(3)を使ってdB単位で表す(図4)。

$$\eta = 10 \log \frac{P_y}{P_x} \quad (3)$$

X若しくはY偏波モードに入射された光は、ファイバ内を伝搬するにつれ偏波モード間での結合が生じるので偏波クロストークは伝搬する距離に依存する量である。ファイバ長と偏波クロストークの関係を図5に記載する。ファイバ長が100 m以上の場合には一定の傾きを持っておりこの領域ではモード結合理論通りの傾向を示しているが、ファイバ長が100 mを下回ると偏波クロストークは一定の値となってしまう。

ここで、PANDAファイバの重要な特性である偏波クロストークの温度特性、耐機械的環境変化について以下に示す。

まず、PANDAファイバの偏波クロストークの温度依存性を図6に示す。応力付与部とクラッドガラスの線膨張率の差を利用してしているので、-40 ~ +80 の温度変化により約15%程度複屈折率が変化していると推測されるが、偏波保持特性は温度によりほとんど変化しておらず⁸⁾、複屈折率の変化が直ちに偏波クロストークに影響を与えてはいない。ファイバを300 mまで加熱してもほとんど偏波クロストークは変化しないとの報告もあり⁹⁾、この温度範囲(-40 ~ 80)では、複屈折率の変化やファイバ-被覆間での温度による歪みの変化が生じても偏波保持特性に影響を与えるほどの外乱となっていない。

定偏波光ファイバへの機械的な外乱を加えたときの挙動は、

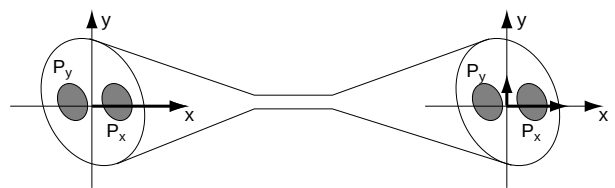


図4 偏波クロストークの模式図
Schematic of polarization cross talk

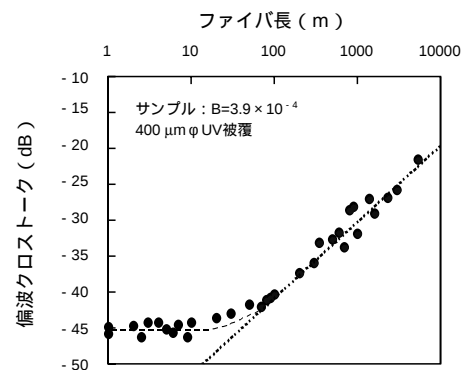


図5 ファイバ長と偏波クロストークの関係
Fiber length dependence of polarization cross talk

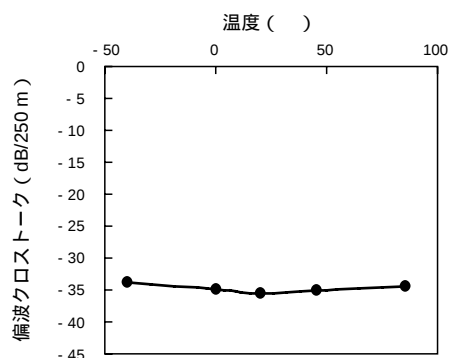


図6 偏波クロストークの温度依存性
Temperature dependence of polarization cross talk

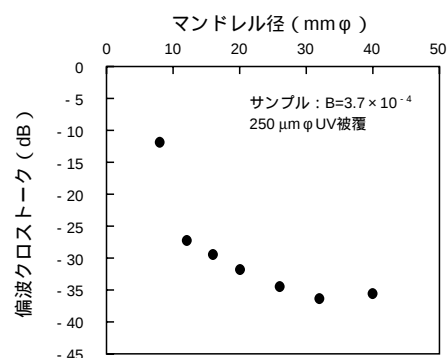


図8 曲げ径と消光比の関係
Relation between bending diameter and polarization cross talk

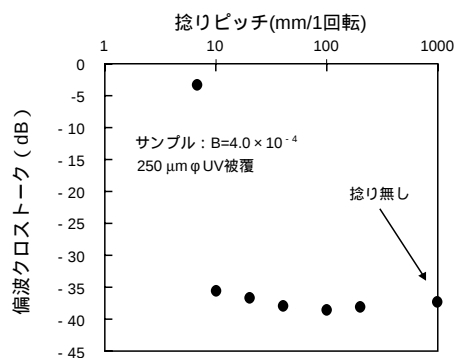


図7 PANDAファイバへの捻りと偏波クロストークの関係
Relation between twisting pitch and polarization cross talk

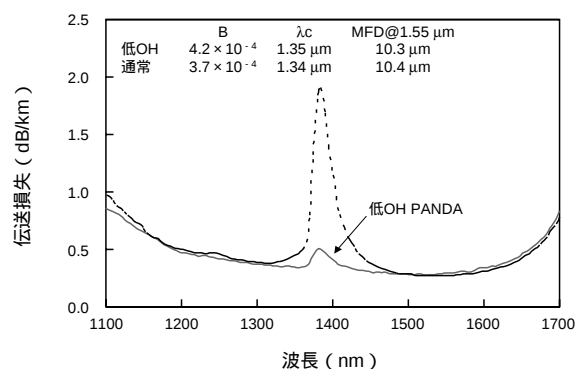


図9 PANDAファイバの波長損失特性
Spectral transmission loss of PANDA fibers

幾つか報告されているが^{9)~14)} PANDAファイバへ曲げ、捻りを加えたときの偏波保持特性の変化を以下に述べる。

外乱の一つとしてファイバに捻りを加えたときの偏波保持特性の様子が図7となっている。捻りを加えても偏波クロストークに大きな変化は無くピッチが10 mm程度になって大きな劣化が認められるようになってくるが、通常加わると予想される捻量では偏波保持特性への影響は認められないと言える。

また、ファイバ曲げによる偏波クロストークの変化を図8に示す。曲げによる偏波クロストーク影響はほとんどないとの報告^{9), 10)}通りの結果であり、通常想定されうる使用環境の径では偏波保持特性の劣化は認められない。

以上のようにPANDAファイバの寿命等を考慮した使用環境ではほとんどファイバの偏波保持特性は劣化しないといえる。

3.3 実効遮断波長

PANDAファイバはX偏波、Y偏波それぞれに異なる屈折率構造を有するので2つのカットオフ波長を有することになるが、通常は長波長側にあるX偏波モード(SLOW側)のカットオフをカットオフ波長としている。

3.4 モードフィールド径

X偏波、Y偏波それぞれに異なる屈折率構造を有するのでモードフィールド径もX、Y各偏波により極くわずかな差を有している。

3.5 伝送損失

一般にPANDAファイバの応力付与部に添加される B_2O_3 は赤外領域に大きな吸収ピークを持ち、わずかに光の伝搬する領

域に応力付与部が配置されることになるので長波長側ほど伝送損失が大きくなる。また、応力付与部を母材の穴に入れる特徴的な製法から水分が穴周辺に残留し易く、線引き時の拡散により1.38 μm 近傍のOH基による吸収ピークが通常のSMFに比べて大きくなっている。一般的に複屈折率を高めるために応力付与部をコアに近づけるあるいは B_2O_3 を高ドーピングして応力付与部の線膨張係数を高めた場合には、 B_2O_3 やOH基による吸収の影響が大きくなるので、伝送損失と複屈折率はトレードオフの関係にある。通常、こうした関係の中で良好な偏波保持特性と伝送損失を両立するようにファイバ構造を調整している。ところが、WDM伝送として使用される波長域が拡大しており、更にラマン増幅等によりOH基による影響のある波長域でもPANDAファイバが使用されるようになってきている。そこで、PANDAファイバの製法を一部見直すことにより高い複屈折率を維持しながらOH基の吸収を大きく低減したPANDAファイバを開発した(図9)。部品用として比較的短尺で使用されるPANDAファイバであるが、高複屈折と損失の波長特性が問われるような用途では今後このタイプの使用が期待される。

3.6 接続特性

PANDAファイバが光学部品の一部として使用される場合にはその大半が融着接続されることになる。PANDAファイバの融着接続は通常の接続損失にくわえて融着後の偏波保持特性が重要となり、融着接続の際には通常のファイバと同様の調心にくわえて偏光軸を合わせるためにファイバを回転させ角度を合わせる必要がある。融着損失はファイバ同士のモードフィール

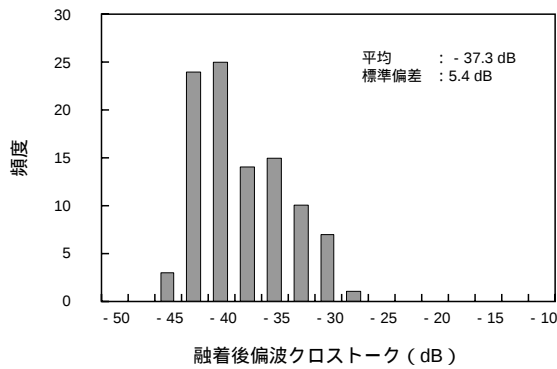


図10 PANDAファイバの融着接続後の偏波クロストーク
Polarization cross talk at fusion spliced point of PANDA fiber

ド径差とコア偏心に依存するが、PANDAファイバは通常のSMFと同等であり同レベルの損失での融着が可能である。偏光軸の調整は、ファイバを側面から観察し画像で角度を合わせ込む作業を行っており、微小な角度のズレが偏波クロストークを増大させることになるが、融着接続後の偏波クロストークは図10に示すように平均 - 37dB となっており良好な接続結果となっている。

4. 種々のPANDAファイバと応用

4.1 難燃偏波保持光ファイバ

光機器内での配線あるいは光機器間での配線に偏波保持光ファイバが広く使われており、要求される信頼性や安全性のレベルもより高度なものになっている。例えば、光機器に使用される部品にも難燃性が要求されるようになり、偏波保持光ファイバもその例外ではなくなっている。今回、当社の難燃化技術を用いてLDのピグテールや機器内配線に使われることの多いPANDAファイバに難燃被覆化（UL1581VW - 1規格）を行った。評価結果を表1に示す。難燃被覆の偏波保持光ファイバにおいても、通常のPANDAファイバと同様の特性を有しており、また難燃化材料の被覆によりPANDAファイバの偏波保持能力（偏波クロストーク）が比較的被覆に影響を受け易いことが懸念されたが、環境試験を行った結果十分な偏波保持特性を確認した（図11）。

表1 難燃心線の特性

Parameter of flame-retardant PANDA fiber

被覆	材質	難燃心線	0.4φ UV心線
	外径 (mm)	難燃被覆	UV硬化樹脂
伝送損失 @1550 nm (dB/km)		0.23	0.23
実効遮断波長 (μm)		1.29	1.30
偏波クロストーク @1550 nm (dB/4 m)		- 37.5	- 39.0
モード複屈折率		3.7×10^{-4}	3.6×10^{-4}
クロストーク変動	- 40 ~ 85	図11	
消光比温度特性			

4.2 偏波保持Erドープファイバ

Erドープ光ファイバ（EDF）を用いた光増幅器（EDFA）による増幅は、高出力、広帯域、低雑音等の優れた特性を有していることからWDM伝送のキーデバイスとして大きな役割を担っている。くわえて、外部変調器を利用した際の損失補償や偏波多重を用いたWDM伝送をする場合にはEDFAにも偏波保持特性が求められ、増幅媒体となるEDFにも偏波保持化が必要となる。作製した偏波保持EDFの特性を表2に示す。バックグラウンドロス4.0 dB/kmであり十分低損失であり、通常のEDF同等の増幅特性と十分な偏波保持特性を実現していた。また、このEDFを組み込んだEDFA全体の偏波クロストークも - 20 dB以下であり良好な偏波保持特性を有していた。

4.3 分散制御PANDAファイバ

1300 nm近傍に零分散波長を有する従来の偏波保持光ファイバに対し1.5 μm帯に零分散波長を制御した分散シフト偏波保持光ファイバが開発されてきている¹⁵⁾。PANDAファイバはコアに応力を加えていることによって複屈折を誘起しており、コア及びコア近傍の光学クラッド部分は通常の光ファイバと同様の構造になっている。こうした特徴から、屈折率分布を制御することにより所望の波長分散特性を得やすい構造となっており、近年活発に検討されている超高速伝送の用途で波長分散を制御した偏波保持光ファイバが注目されている。まず1.5 μm帯に零分散波長をシフトした偏波保持光ファイバの群速度分散特性を図12に示す。光弾性効果によりX偏波モードとY偏波モードで若干の異なった分散特性を有している。分散シフト光

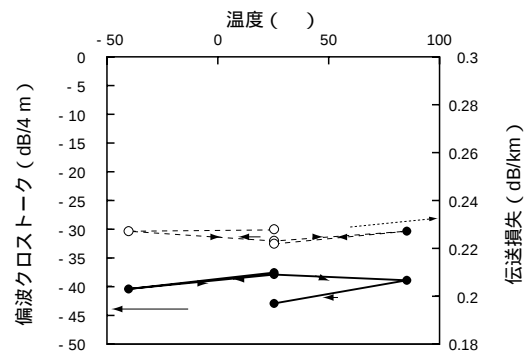


図11 難燃被覆PANDAファイバの温度特性
Temperature dependence of cross-talk and attenuation of flame-retardant PANDA fiber

表2 偏波保持EDFの諸元

Parameters and characteristics of PANDA-EDF

コア組成	$\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-SiO}_2$
クラッド組成	SiO_2
カットオフ波長 (nm)	950
MFD (μm) @1.55 μm	7.0
吸収ピーク値 (dB/m) @1.53 μm	7.7
バックグラウンドロス (dB/km) @1.2 μm	4.0
複屈折率	3.1×10^{-4}
偏波クロストーク (dB/100m) @1.3 μm	< - 20

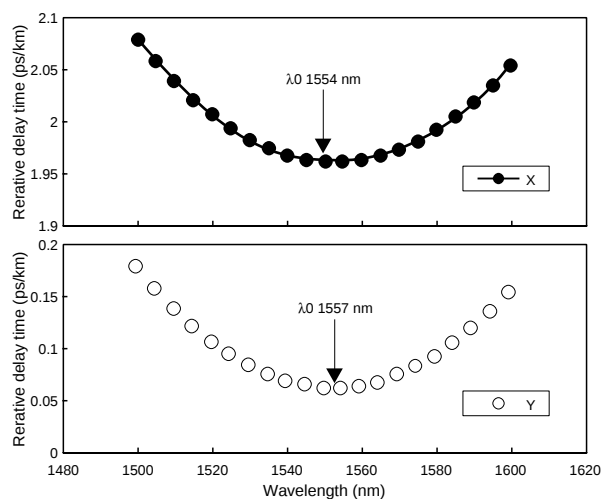


図12 分散シフトPANDAファイバの分散
Relative delay time characteristics of dispersion shifted PANDA fiber

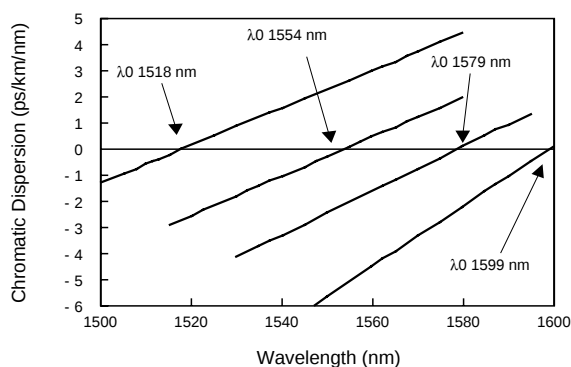


図13 分散シフトPANDAファイバ
Characteristics of dispersion shifted PANDA fibers

ファイバをPANDA化することにより図13のように零分散波長を制御したファイバが実現可能である。

また、図14に示すように、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯で零分散で平坦な波長分散特性を有する分散フラット光ファイバの長手方向に波長分散を減少させ、そこへ高出力の光パルスを入射するとパルス圧縮と連続した波長広がりを生じた白色光（スーパーコンティニウム光）が発生することは知られている。非線形現象の発生効率が偏波状態に依存することからこうしたファイバで現象を積極的に利用するためには偏波保持化が必要となってくる。図15はSC光の1例であるが、ここで発生したSC光をフィルタで切り出しWDM光源として超高速伝送に用いて大容量の3 Tb/sの大容量通信実験が実現されている^{16), 17)}。

今後こうした、波長分散を制御したPANDAファイバを利用した種々の応用が期待される。

4.4 980 nm用定偏波光ファイバ

近年、EDFAの進歩によりWDM伝送が急速に普及し、複数の励起用LDMを偏波合成や波長合成したEDFAが使われている。偏波合成のためには励起用LDの出力ピグテールファイバが偏波保持化され、更に発振波長安定化のためにピグテールファイバへ形成されたFBG（ファイバブラッググレーティング）で光を一部反射させ共振器とする発振波長ロック方式が使われ

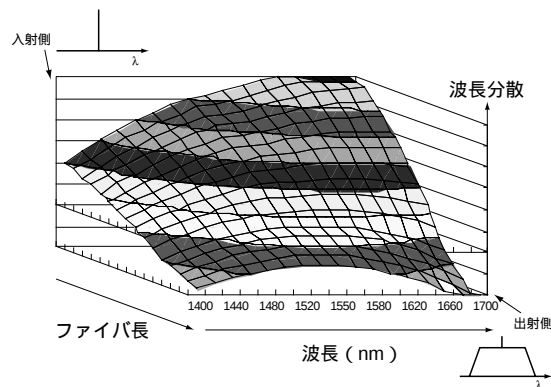


図14 分散フラット分散減少PANDAファイバ特性
Characteristics of dispersion flattened and dispersion decreased PANDA fiber

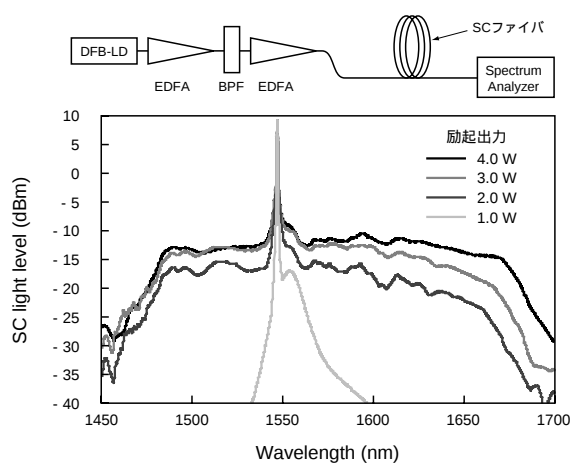


図15 発生したSC光
Spectrum of Super Continuum lightwave

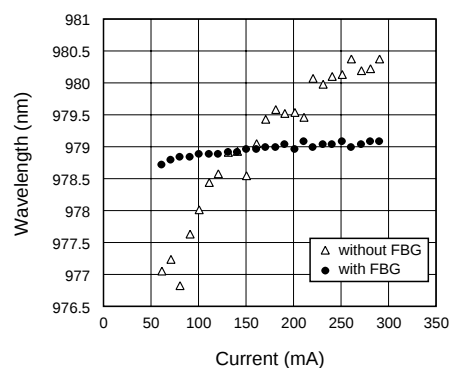


図16 FBG付き980 nm用LDの特性
Characteristics of 980 nm LD with FBG

ている。

海底システム等では低雑音化に有利な980 nm帯励起のEDFAが使われており、冗長系を設けるために励起光が偏波合成されている。また、急峻な980 nm帯のEDFの吸収波長で緻密な励起光波長の制御を行う際には、低挿入損失かつコスト面で有利な980 nm用PANDAファイバを使った発振波長ロック方式が注目されている。FBGを形成した980 nm LDの一例を図16に示す。

5. おわりに

偏波保持光ファイバ特に PANDA 型偏波保持光ファイバの一般特性について述べた。PANDA ファイバは、温度変動や捻りや曲げなどの機械的外乱に対しても十分な偏波保持特性を有しており、また難燃被覆 PANDA ファイバは広範な耐環境要求にも対応可能である。また、光学部品の端末としてだけでなく FBG 等の機能部品の一部として、更に波長分散の制御により新たな機能を実現することが可能となり様々な応用が期待できる。

謝辞

本報告をまとめるに当たり、御指導並びに御助力を頂いた千葉ファイバ製造部 神谷部長、田村課長、芝山課長、大沼課長、小相沢課長、小松主任、ファイテルフォトニクス研究所 小倉部長、八木課長、忠隈氏、光デバイス部 清水部長、加藤課長、大木氏をはじめとする関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 大越: 光ファイバ, オーム社, 1983
- 2) T.Katsuyama, H.Matsumura and T.Suganuma: J.Lightwave Technol., vol.LT-2, no.5, pp634-639, 1984
- 3) R.H.Stolen, R.E.Howard and W.Pleibel: Electron lett., vol.18, no.18, pp764-765, 1982
- 4) R.D.Birch, M.P.Varham, D.N.Payne and E.J.Tarbox: Electron Lett., vol.18, no.24, pp1036-1028, 1982
- 5) R.H.Stolen, V.Ramswamy, P.Kaiser and W.Pleibel: Appl. Phys. Lett., Vol.33, no.8, pp.699-701, 1978
- 6) T.Hosokawa K.Okamoto, T. Miya, Y.Sasaki and T.Edahiro: Electron Lett., Vol.17, No.15, pp.530-531, 1981
- 7) Y.Sasaki, K.Okamoto, T.Hosaka and N.Shibata: in Proc. 5th OFC, pp.54-56(1981)
- 8) P.L.Chu and R.A.Sammut: J.Lightwave Tech., vol. LT-2, no.5, pp.650-662, 1984
- 9) 一瀬, 西本, 小倉: 1993 信学秋季大会 C-258
- 10) S.C.Rashleigh and M.J.Marrone: J.Lightwave Tech., vol. LT-1, no.2, pp.312-331, 1983
- 11) Y.Sasaki, T.Hosaka and J.Noda: J.Lightwave Technol., vol.LT-2, no.6, pp.816-823, 1984
- 12) D.N.Payne, A.J.Barlow and J.J.Rhansen: IEEE J.Quantrum Electron., vol.QE-18, no.4, pp.477-488, 1982
- 13) Y.Sasaki etc.: J.Lightwave Tech., vol.LT-2, no.6, pp.816-823, 1984
- 14) Y.Sasaki and T.Kimura: IEEE J.Quantrum Electron., vol.QE-17, no.6, pp.1041-1051, 1981
- 15) 杉崎, 西本, 小倉: 1994 信学会春季大会 C-365
- 16) K.Mori et al.: Electron Lett., vol.33, pp.1808-1809, 1997
- 17) T.Morioka et al.: Electron Lett., vol.32, pp.906-907, 1996
- 18) 川上, 白石, 大橋: 光ファイバと光ファイバ型デバイス, 培風館, 1996