

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6218744号
(P6218744)

(45) 発行日 平成29年10月25日(2017.10.25)

(24) 登録日 平成29年10月6日(2017.10.6)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/036 (2006.01)

G O 2 B 6/036

請求項の数 10 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2014-544860 (P2014-544860)	(73) 特許権者	397068274
(86) (22) 出願日	平成24年11月29日(2012.11.29)		コーニング インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2015-503122 (P2015-503122A)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(43) 公表日	平成27年1月29日(2015.1.29)		31 コーニング リヴァーフロント プ
(86) 国際出願番号	PCT/US2012/066949		ラザ 1
(87) 国際公開番号	W02013/082217	(74) 代理人	100073184
(87) 国際公開日	平成25年6月6日(2013.6.6)		弁理士 柳田 征史
審査請求日	平成27年11月25日(2015.11.25)	(74) 代理人	100090468
(31) 優先権主張番号	61/564,902		弁理士 佐久間 剛
(32) 優先日	平成23年11月30日(2011.11.30)	(72) 発明者	バーキー, ジョージ エドワード
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
			71 パイン シティー リレイ ヒル
			ロード 11531

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 低曲げ損失光ファイバ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

シングルモード光ファイバにおいて、

外径 r_1 および相対屈折率 Δ_1 を有する中央コア領域；および

クラッド領域であって、

(i) 前記中央コア領域と直接隣接し、6 マイクロメートル超の外径 r_2 および相対屈折率 Δ_2 を有し、 $0.3 < r_1 / r_2 < 0.85$ である第1の内側クラッド領域と、(ii) 前記第1の内側クラッド領域と直接隣接し、9 マイクロメートル超の外径 r_3 および最小相対屈折率 Δ_3 を有する第2の内側クラッド領域であって、半径の増加と共に負の方向に増加する相対屈折率差分を有する少なくとも1つの領域であるトレンチを持つ第2の内側クラッド領域と、(iii) 前記内側クラッド領域を取り囲み、相対屈折率 Δ_4 を有する外側クラッド領域とを含むクラッド領域；

を備え、

 $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3$ 、 $\Delta_3 < \Delta_4$ であり、且つ、 $0.25 < |\Delta_4 - \Delta_3| < 0.7$ であり、前記第2の内側クラッド領域のトレンチは、パラメータ β が、 $1.5 > \beta > 0.5$ であり、ここで、

【数 1】

$$\beta = \frac{(R_3 - R_2)}{\Delta_{3,\min}} \left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

式中、

【数 2】

$$\left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

10

は、前記第 2 の内側クラッド領域における平均屈折率勾配であり、

前記第 2 の内側クラッド領域の絶対値 V_3 が $3.5\% \Delta \mu m^2$ V_3 $1.05\% \Delta \mu m^2$ であり、

前記第 2 の内側クラッド領域が有するトレンチのアルファパラメータ α_t が 5.0 α_t である、

光ファイバ。

【請求項 2】

Δ_3 と Δ_2 の間の絶対差が 0.03 より大きく、

前記ファイバが、 1260 nm 以下の 22 m ケーブルカットオフを示し、 1300 nm λ_0 1324 nm であるゼロ分散波長 λ_0 を有することを特徴とする、請求項 1 記載の光ファイバ。

20

【請求項 3】

(i) r_3 から少なくとも 30 マイクロメートル の半径まで延在する長さについて、 $\Delta_4 > \Delta_2$ 、および / または

(ii) 0.33 r_1 / r_2 、

である、請求項 1 または 2 記載の光ファイバ。

【請求項 4】

前記第 1 の内側クラッド領域がフッ素とゲルマニアを実質的に含まない、請求項 1 から 3 いずれか 1 項記載の光ファイバ。

【請求項 5】

30

前記第 2 の内側クラッド領域の外径と $30 \mu m$ の半径方向距離との間で計算された、前記外側クラッド領域のプロファイル体積 V_4 が、

【数 3】

$$V_4 = 2 \int_{r_3}^{r_{30}} \Delta_{(4-3)}(r) r dr$$

と等しく、 $|\Delta_4|$ が少なくとも $5\% \Delta \mu m^2$ である、請求項 1 から 4 いずれか 1 項記載の光ファイバ。

【請求項 6】

40

20 mm の半径のマンドレルに巻き付けられたときに、 0.75 dB / turn 未満の曲げ損失を示し、 6.6 と 7.5 の間の MAC 数を示す、請求項 1 記載の光ファイバ。

【請求項 7】

15 mm の半径のマンドレルに巻き付けられたときに、 1 dB / turn 未満の曲げ損失を示す、請求項 1 または 6 記載の光ファイバ。

【請求項 8】

1.5 β 0.25 である、請求項 1 から 7 いずれか 1 項記載の光ファイバ。

【請求項 9】

1.1 β 0.5 である、請求項 1 から 7 いずれか 1 項記載の光ファイバ。

【請求項 10】

50

5 $\alpha_i = 0.5$ である、請求項1から9いずれか1項記載の光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【関連出願の説明】

【0001】

本出願は、その内容が依拠され、ここに全て引用される、2011年11月30日に出願された米国仮特許出願第61/564902号の優先権の恩恵を主張するものである。

【技術分野】

【0002】

本発明は、曲げ損失の低い光ファイバに関する。

【背景技術】

10

【0003】

低曲げ損失の光ファイバ、特に、いわゆる「アクセス」および敷地にファイバを引き込んだ(FTTx)光ネットワークに利用される光ファイバが必要とされている。光ファイバは、光ファイバを通じて伝送される光信号に曲げ損失を誘発する様式で、そのようなネットワークに配設され得る。いくつかのファイバ用途では、ファイバに曲げ損失を誘発する、きつい曲げ半径、または光ファイバの圧縮などの物理的要求が課されることがある。これらの要求が課される要件の例としては、集成光引込みケーブルにおける光ファイバの配設、工場装着端末システム(Factory Installed Termination Systems)(FITS)およびスラック・ループ(slack loop)に関する配線ケーブル、給電線および配線ケーブルを接続するキャビネット内に位置する小さな曲げ半径のマルチポート、および配線ケーブルと引込みケーブルとの間のネットワーク・アクセス・ポイント内のジャンパ線が挙げられる。いくつかのシングルモード光ファイバの設計において、大きい曲げと小さい曲げの両方で同時に低曲げ損失を達成することは難しい。

20

【0004】

例えば、クラッドに低屈折率のトレンチを有するシングルモード光ファイバが、低曲げ損失性能を有するファイバを製造するために使用されている。これらのファイバは、トレンチの深さがトレンチの幅に亘り比較的一定であるトレンチを有する。これらの設計において、小さい直径(約10mmのマンドレル直径)でのファイバの性能は優れている($< 0.25 \text{ dB/turn}$)のに対し、大きい直径(約30mmのマンドレル直径)での性能は、大きい曲げ直径に最適化された他の曲げ最適化ファイバほど良好ではない。小さい曲げ半径と大きい曲げ半径の両方での曲げ性能を改善するために、多数のトレンチを含むファイバ設計が提案されてきた。

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、そのような手法では、加工中に余計な工程が生じ、ファイバの製造がよりコストのかかるものになってしまう。

【課題を解決するための手段】

【0006】

いくつかの実施の形態によれば、シングルモードファイバは、

40

外径 r_1 および相対屈折率差分 $\Delta_{1\max}$ を有する中央コア領域；および

クラッド領域であって、(i)6マイクロメートル超の外径 r_2 および相対屈折率差分 Δ_2 を有し、 $0.3 < r_1/r_2 < 0.85$ である第1の内側クラッド領域と、(ii)9マイクロメートル超の外径 r_3 および最小相対屈折率差分 $\Delta_{3\min}$ を有する第2の内側クラッド領域であって、半径の増加と共に負の方向に増加する相対屈折率差分を有する少なくとも1つの領域を持つ第2の内側クラッド領域と、(iii)内側クラッド領域を取り囲み、相対屈折率差分 Δ_4 を有する外側クラッド領域とを含み、 $\Delta_{1\max} > \Delta_2 > \Delta_{3\min}$ 、 $\Delta_{3\min} < \Delta_4$ であるクラッド領域；を備えている。

【0007】

50

いくつかの実施の形態によれば、外径 r_1 および最大相対屈折率差分 $\Delta_{1\max}$ を有する中央コア領域；およびクラッドであって、8 マイクロメートル超の外径 r_2 および相対屈折率差分 Δ_2 を有する第1の内側クラッド領域と、相対屈折率差分 Δ_3 および最小相対屈折率差分 $\Delta_{3\min}$ を有する第2の内側クラッド領域であって、 Δ_2 と $\Delta_{3\min}$ との間の差が 0.15 % より大きくなるように、 $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_{3\min}$ である第2の内側クラッド領域と、2つの内側クラッド領域を取り囲む外側クラッド領域とを含むクラッドを備えている光ファイバがここに開示されている。ここに開示されたファイバの実施の形態は、1260 nm 以下の22 m ケーブルカットオフ、8.2 マイクロメートルと9.6 マイクロメートルとの間の1310 nm でのモードフィールド直径 (MFD)、および1300 nm と1324 nm との間のゼロ分散波長を示すことが好ましい。少なくともいくつかのファイバの実施の形態において、 r_1/r_2 は、0.25 以上、より好ましくは0.3 より大きい。 $|\Delta_4 - \Delta_2| = 0.01$ であることが好ましい。

【0008】

いくつかの他の実施の形態によれば、シングルモード光ファイバは、

外径 r_1 、 $\Delta_{1\max}$ のピーク (最大) 相対屈折率差分を有するゲルマニアドープ中央コア領域であって、1と100との間の屈折率アルファプロファイル $\alpha_{\text{コア}}$ (例えば、1.8 $\alpha_{\text{コア}}$ 100; 1.8 $\alpha_{\text{コア}}$ 2.2; 2 $\alpha_{\text{コア}}$ 100; 5 $\alpha_{\text{コア}}$ 100; 2 $\alpha_{\text{コア}}$ 20、または5 $\alpha_{\text{コア}}$ 20) を有する中央コア領域；および

クラッド領域であって、(i) 6 マイクロメートル超の外径 r_2 および相対屈折率差分 Δ_2 を有し、0.3 r_1/r_2 0.85 である第1の内側クラッド領域と、(ii) 9 マイクロメートル超の外径 r_3 および最小相対屈折率差分 $\Delta_{3\min}$ を有する第2の内側クラッド領域であって、半径の増加と共に負の方向に増加する相対屈折率差分を有する少なくとも1つの領域を持つ第2の内側クラッド領域と、(iii) 内側クラッド領域を取り囲み、相対屈折率差分 Δ_4 を有する外側クラッド領域とを含み、 $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3$ 、 $\Delta_3 < \Delta_4$ であるクラッド領域；を備えている。

【0009】

外径 r_1 および最大相対屈折率差分 $\Delta_{1\max}$ を有する中央コア領域；およびクラッド領域であって、8 マイクロメートル超の外径 r_2 および相対屈折率差分 Δ_2 を有する第1の内側クラッド領域と、第1の内側クラッド領域を取り囲み、最小相対屈折率差分 $\Delta_{3\min}$ を有する第2の内側クラッド領域であって、 $\Delta_{1\max} > \Delta_2 > \Delta_{3\min}$ かつ $\Delta_2 - \Delta_{3\min}$ が 0.15 以上である第2の内側クラッド領域とを含むクラッド領域を備えている光ファイバの実施の形態がここに開示されている。ここに開示されたファイバは、1260 nm 以下の22 m ケーブルカットオフ、8.2 マイクロメートルと9.6 マイクロメートルとの間の1310 nm でのモードフィールド直径 (MFD)、および1300 nm と1324 nm との間のゼロ分散波長を示すことが好ましい。これらのファイバのいくつかの実施の形態において、 r_1/r_2 は、0.25 以上、より好ましくは0.3 より大きい。 $|\Delta_4 - \Delta_2| = 0.01$ であることが好ましい。

【0010】

出願人等は、ファイバに、一定ではない相対屈折率差分を有するトレンチを持たせることは、小さい (< 10 mm) 直径および大きい (> 20 mm) 直径の両方で良好なマクロベンド性能を達成するのに役立つことを発見した。以下のシングルモードファイバの実施の形態は、その少なくとも1つの領域において半径の増加と共に減少する、一定ではない相対屈折率差分を有するオフセットトレンチを有し、それによって、マクロベンド損失が低くなり、ITU - G.652 基準に準拠したオプティカル (光学性能パラメータ) がもたらされる。少なくともいくつかの実施の形態において、第2の内側クラッド領域の屈折率は、半径が増加するにつれて、減少する。

【0011】

少なくともいくつかの実施の形態において、トレンチの形状は、パラメータ

【0012】

【数 1】

$$\beta = \frac{(R_3 - R_2)}{\Delta_{3,\min}} \left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

【0 0 1 3】

により定義され、式中、

【0 0 1 4】

【数 2】

$$\left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

10

【0 0 1 5】

は、 R_2 と R_3 との間の異なる半径位置で屈折率勾配を平均化することによって決定される第2の内側クラッド領域における平均屈折率勾配である。いくつかの実施の形態において、パラメータ β は、0.25より大きく、より好ましくは0.5より大きく、さらにより好ましくは0.75より大きい。 $\beta < 1.5$ が好ましい。三角形のトレンチを有するファイバの実施の形態について、パラメータ β の値は1である。

【0 0 1 6】

少なくともいくつかの実施の形態において、トレンチのアルファパラメータ α_t は50以下である。いくつかの実施の形態について、0.5 α_t 5。

20

【0 0 1 7】

モート体積比 $V_{3a3ratio}$ は、以下のように定義される：

【0 0 1 8】

【数 3】

$$V_{3a3ratio} = V_{3a3} / [\Delta_{3\min}(r_3^2 - r_2^2)]$$

【0 0 1 9】

ここでの光ファイバは、0.3 $V_{3a3ratio}$ 0.8のモート体積比を有することが好ましい。

30

【0 0 2 0】

ここで、その実施例が添付図面に図解されている、現在好ましい実施の形態を詳しく参照する。

【図面の簡単な説明】

【0 0 2 1】

【図 1 A】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 1 B】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

40

【図 1 C】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 1 D】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 1 E】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 1 F】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 1 G】ここに開示された光ファイバの実施の形態に対応する相対屈折率プロファイルを示す図

50

【図 2】ここに開示された光ファイバの 3 つの実施の形態と比較のファイバに対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 3】図 2 に示された相対屈折率プロファイルに対応する光ファイバの曲げ直径の関数としての曲げ損失を示すグラフ

【図 4】ここに開示された光ファイバの 3 つの実施の形態と別の比較のファイバに対応する相対屈折率プロファイルを示す図

【図 5】図 4 に示された相対屈折率プロファイルに対応する光ファイバの曲げ直径の関数としての曲げ損失を示すグラフ

【図 6】モデル化されたファイバの実施の形態の相対屈折率プロファイルを示す図

【発明を実施するための形態】

10

【0022】

追加の特徴および利点は、以下の詳細な説明に述べられており、その説明から当業者に明白となるか、または特許請求の範囲および添付図面と共に以下の説明に記載されたように実施することによって、認識されるであろう。

【0023】

「屈折率プロファイル」は、屈折率または相対屈折率と光ファイバの半径との間の関係である。相対屈折率プロファイルの各セグメントの半径は、略記 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 などによって与えられ、小文字と大文字は、ここでは交換可能に使用される（例えば、 r_1 は R_1 と同等である）。

【0024】

20

「相対屈折率パーセント」は、 $\Delta\% = 100 \times (n_i^2 - n_c^2) / 2n_i^2$ と定義され、ここに用いたように、 n_c は、外側クラッド領域の平均屈折率であり、別記しない限り、純粋なシリカの屈折率である。ここに用いたように、相対屈折率は Δ により表され、その値は、別記しない限り、「%」の単位で与えられる。用語：相対屈折率差分、差分、 Δ 、 $\Delta\%$ 、 $\% \Delta$ 、差分%、% 差分およびパーセント差分は、ここにおいては交換可能に使用してよい。ある領域の屈折率が外側クラッドの平均屈折率より小さい場合、その相対屈折率パーセントは、負であり、低下領域または低下屈折率を有すると称される。ある領域の屈折率が外側クラッドの平均屈折率より大きい場合、その屈折率パーセントは正である。「アップドープ」は、ここでは、純粋な未ドープの SiO_2 に対して屈折率を上昇させる傾向にあるドープと考えられる。「ダウンドープ」は、ここでは、純粋な未ドープの SiO_2 に対して屈折率を低下させる傾向にあるドープと考えられる。アップドープの例としては、 GeO_2 （ゲルマニア）、 Al_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 Cl 、 Br が挙げられる。ダウンドープの例としては、フッ素およびホウ素が挙げられる。当業者にとって、ここに開示された相対屈折率プロファイルは、屈折率プロファイル全体が、純粋なシリカの屈折率に対して線形に上または下にシフトされ、結果として得られた光ファイバに類似の光学的性質をもたらすように変えられることが明白であろう。

30

【0025】

光ファイバの、特に断りのない限り、ここで「分散」と称される「色分散」は、材料分散、導波路分散、および多モード分散の合計である。シングルモード光ファイバの場合、多モード分散はゼロである。ゼロ分散波長は、分散がゼロの値を有する波長である。分散勾配は、波長に対する分散の変化率である。

40

【0026】

「有効面積」は：

【0027】

【数 4】

$$A_{\text{eff}} = 2\pi (\int f^2 r dr)^2 / (\int f^4 r dr),$$

【0028】

と定義され、式中、積分範囲は 0 から ∞ であり、 f は、光ファイバ中を伝搬する光に関連する電場の横成分である。ここに用いたように、「有効面積」または「 A_{eff} 」は、特に

50

断りのない限り、1550nmの波長での光学有効面積を称する。

【0029】

「 α -プロファイル」という用語は、「%」の単位の $\Delta(r)$ で表された領域（例えば、コア領域）の相対屈折率プロファイルを称し、式中、 r は半径である。コアの α -プロファイル（ここでは、コアアルファ、またはアルファ_{コア}により定義される）は、以下の式にしたがい：

【0030】

【数5】

$$\Delta(r) = \Delta(r_0)(1 - [r - r_0] / (r_1 - r_0))^{\alpha}),$$

10

【0031】

式中、 r_0 は、 $\Delta(r)$ が最大である地点であり、半径 r は、中心線から半径方向外側に動き、 r_1 は、 $\Delta(r)$ %が最初に0.03%の値に到達する半径位置であり、 r_i は、 r_0 と r_1 の範囲にあり、 Δ は先のように定義され、 r_i は、 α -プロファイルの最初の地点であり、 r_f は、 α -プロファイルの最後の地点であり、 α は、実数である指数である。

【0032】

モードフィールド直径(MFD)は、ピーターマンII法(Peterman II method)を用いて測定され、ここで、 $2w = MFD$ 、および $w^2 = (2 \int f^2 r dr / \int [df/dr]^2 r dr)$ 、積分範囲は0から ∞ である。

20

【0033】

光ファイバの曲げ抵抗は、例えば、所定の直径のマンドレルの周りにファイバを配設するかまたは巻き付け、例えば、6mm、10mm、20mm、30mmまたは類似の直径のマンドレルの周りに1回転巻き付け（例えば、「1×10mm直径のマクロベンド損失」または「1×30mm直径のマクロベンド損失」）、巻き付け当たりの減衰の増加を測定することによって、所定の試験条件下で誘起された減衰により計ることができる。

【0034】

曲げ試験の1つのタイプは、横荷重マイクロベンド試験である。このいわゆる「横荷重」試験(LLWM)において、所定の長さの光ファイバが2枚の平らな板の間に配置される。一方の板に#70ワイヤメッシュが取り付けられている。公知の長さの光ファイバが板の間に挟まれ、30ニュートンの力で板が互いに加圧されている間に基準減衰が測定される。次いで、70ニュートンの力が板に印加され、dB/mで表された減衰の増加が測定される。この減衰の増加は、特定の波長（典型的に、1200~1700nmの範囲内、例えば、1310nmまたは1550nmまたは1625nm）でのdB/mで表された光ファイバの横荷重減衰である。

30

【0035】

曲げ試験の別のタイプは、ワイヤメッシュ被覆ドラムマイクロベンド試験(wire mesh covered drum microbend test)WMCD)である。この試験において、直径400mmのアルミニウムドラムにワイヤメッシュが巻き付けられる。このメッシュは、引き伸ばされずにきつく巻かれ、孔、窪み、または損傷を有さないべきである。ワイヤメッシュの材料仕様：McMaster-Carr Supply Company（オハイオ州、クリーブランド所在）、部品番号85385T106、耐腐食性304ステンレス鋼金網、インチ（約2.54cm）当たりのメッシュ：165×165、ワイヤの直径：0.0019インチ（約0.475mm）、開口幅：0.041インチ（約1.025mm）、開放面積（%）：44%。所定の長さ（750メートル）の光ファイバを、80（±1）グラムの張力を印加しながら、0.050センチメートルの巻き取りピッチでワイヤメッシュドラム上に1m/sで巻き付ける。所定の長さのファイバの端部は、張力を維持するためにテープで貼り付けられ、ファイバの重なりはない。光ファイバの減衰は、特定の波長（典型的に、1200~1700nmの範囲内、例えば、1310nmまたは1550nm

40

50

mまたは1625 nm)で測定され、基準減衰は、滑らかなドラム上に巻き付けられた光ファイバについて測定される。減衰の増加は、特定の波長(典型的に、1200~1700 nmの範囲内、例えば、1310 nmまたは1550 nmまたは1625 nm)でdB/kmで表された光ファイバのワイヤメッシュ被覆ドラム減衰である。

【0036】

「ピンアレイ」曲げ試験は、光ファイバの曲げに対する相対抵抗を比較するために使用される。この試験を行うために、曲げ損失が実質的に誘発していない光ファイバについて、曲げ損失が測定される。次いで、光ファイバをピンアレイの周りに編み込み、減衰を再び測定する。曲げにより誘発された損失は、2つの測定された減衰の間の差である。ピンアレイは、一列に配置された10本一組の円柱ピンであり、平らな表面上に固定された垂直位置に保持される。ピンの間隔は中心間で5 mmである。ピンの直径は0.67 mmである。試験中、光ファイバをピンの表面の一部に従わせるために、十分な張力が印加される。減衰の増加は、特定の波長(典型的に、1200~1700 nmの範囲内、例えば、1310 nmまたは1550 nmまたは1625 nm)での光ファイバのdBで表されたピンアレイ減衰である。

【0037】

理論的ファイバカットオフ波長、または「理論的ファイバカットオフ」、または「理論的カットオフ」は、所定のモードについて、導光がそれより長いとそのモードで伝搬できなくなる波長である。その数学的定義が、Single Mode Fiber Optics, Jeunhomme, pp. 39-44, Marcel Dekker, New York, 1990に見つかり、そこでは、理論的ファイバカットオフは、モード伝搬定数が外側クラッドにおける平面波伝搬定数と等しくなる波長と記載されている。この理論的波長は、直径の変動がない、無限に長い完全に真っ直ぐなファイバに適している。

【0038】

ファイバのカットオフは、「2 mファイバカットオフ」または「測定カットオフ」としても知られている。「ファイバカットオフ波長」を得るために、標準2 mファイバカットオフ試験、FOTP-80(EIA-TIA-455-80)によって測定される。このFOTP-80標準試験は、制御された曲げ量を使用してより高次モードを除去するか、またはマルチモードファイバのスペクトル応答に対してそのファイバのスペクトル応答を標準化させるために行われる。

【0039】

ケーブル化された場合のカットオフ波長、またはここに用いた「ケーブル化カットオフ」により、EIA-TIA光ファイバ基準、すなわち、米国電子工業会-米国電気通信工業会の光ファイバ基準の一部であるEIA-445光ファイバ試験手法に記載された22 mケーブル化カットオフを意味する。

【0040】

ここに特に断りのない限り、光学的性質(分散、分散勾配など)はLP01モードについて報告されている。

【0041】

出願人等は、シングルモードファイバのプロファイルに深さが一定ではないオフセットレンチを配置することにより、小さい(5 mm)曲げ半径と大きい(10 mm)曲げ半径の両方で曲げ性能を同時に改善できることを発見した。以下のファイバの実施の形態により、小さい曲げ直径と大きい曲げ直径で低い曲げ性能がもたらされ、G.652基準準拠の他のオプティカル(1310 nmでの8.2および9.6マイクロメートルの間のMFD、1300 nmおよび1324 nmの間のゼロ分散波長、1260 nm以下のケーブルカットオフ波長)を有する。ここに開示された光ファイバは、 $52\ \mu\text{m}^2$ と $72\ \mu\text{m}^2$ の間の、1310 nmでの有効面積を示すことができる。ここに開示された光ファイバは、 $75\ \mu\text{m}^2$ と $90\ \mu\text{m}^2$ の間の、1550 nmでの有効面積を示すことができる。

【0042】

光ファイバ10のMFD(1310 nmの波長での)が8.2 μm と9.6 μm の間で

10

20

30

40

50

あることが好ましい。例えば、 $8.2 \mu\text{m}$ MFD $9.6 \mu\text{m}$ 、または $8.5 \mu\text{m}$ MFD $9.4 \mu\text{m}$ （例えば、 8.6 、 8.8 、 9 、 9.2 、 9.4 、 $9.6 \mu\text{m}$ 、またはそれらの間）。

【0043】

例示のファイバ10のいくつかの相対屈折率プロファイルが、図1A～1Gに示されている。図1A～1Gの光ファイバ10は、最大相対屈折率差分パーセント $\Delta_{1\text{max}}$ を有する中央ガラスコア領域1（またはコア）を含む。このコアは、ステップ型プロファイルまたはグレーデッド・インデックス・プロファイル（ここでは、屈折率分布型プロファイルとも称される）を有してもよい。第1の内側クラッド領域2は中央コア領域1を取り囲み、この第1の内側クラッド領域2は相対屈折率差分パーセント Δ_2 を有する。第2の内側クラッド領域3（ここではトレンチとも称される）は第1の内側クラッド領域2を取り囲み、この第2の内側クラッド領域3は最小相対屈折率差分パーセント $\Delta_{3\text{min}}$ を有する。この第2の内側クラッド領域3は一定の $\Delta_3(r)$ を有さない。 $\Delta_3(r)$ は、半径の増加と共に減少することが好ましく、三角形の断面を有してよい。それゆえ、いくつかの実施の形態において、この領域の最小相対屈折率 Δ_3 は $r = r_3$ で生じる（すなわち、 $\Delta_3(r = r_3) = \Delta_{3\text{min}}$ ）。外側クラッド領域4は、第2の内側クラッド領域3を取り囲み、相対屈折率差分パーセント Δ_4 を有する。図1A～1Gに示されるように、第2の内側クラッド領域3はコア領域1からずれており、よって、第1の内側クラッド領域2は中央ガラスコア領域1と第2の内側クラッド領域3との間に挟まれている。外側クラッド領域4は、第2の内側クラッド領域3（トレンチ）を取り囲み、 Δ_4 を有する。図1Aは、三角形のトレンチプロファイルを有するファイバ10の実施の形態の相対屈折率プロファイル $\Delta_3(r)$ を示している。この図は、第2の内側クラッド領域3の相対屈折率が、半径の増加と共に単調減少し、 $\Delta_3(r_2) > \Delta_3(r_3)$ であることを示している。図1Aの実施の形態において、 $\Delta_2 = \Delta_4$ である。しかしながら、 Δ_2 は、 Δ_4 と同じである必要はない（例えば、 Δ_2 は、 Δ_4 より大きくても小さくてもよい）。 $\Delta_4 = \Delta_2$ であることが好ましい。例えば、図1Dは、三角形のトレンチプロファイルを有し、かつ図1Aのプロファイルに似ている、ファイバ10の実施の形態の相対屈折率プロファイルを示しているが、図1Dにおいて、 $\Delta_4 > \Delta_2$ である。いくつかの実施の形態において、 $\Delta_4 - \Delta_2$ は 0.01% と 0.1% の間であり、他の実施の形態において、 0.02% と 0.05% の間である。図1Bは、台形のトレンチプロファイルを有するファイバ10の実施の形態の相対屈折率プロファイルを示している。この実施の形態において、第2の内側クラッド領域3の屈折率も、半径の増加と共に減少し、 $\Delta_3(r_2) > \Delta_3(r_3)$ である。図1Bの実施の形態において、 $\Delta_2 = \Delta_4$ であるが、いくつかの実施の形態において、 Δ_2 および Δ_4 は異なる値を有する（例えば、 $\Delta_2 > \Delta_4$ 、または $\Delta_2 < \Delta_4$ ）。図1Cは、ファイバ10の別の実施の形態の相対屈折率プロファイルを示している。この実施の形態において、第2の内側クラッド領域3の屈折率は、値 $r = r_{3a}$ に到達するまで、半径の増加と共に単調減少し、次いで、半径 r_{3a} と r_3 の間で一定である。この実施の形態において、 $\Delta_3(r_2) > \Delta_3(r_3)$ である。図1Cの実施の形態において、 $\Delta_2 = \Delta_4$ であるが、いくつかの実施の形態において、 Δ_2 および Δ_4 は異なる値を有する（例えば、 $\Delta_2 > \Delta_4$ 、または $\Delta_2 < \Delta_4$ ）。いくつかの実施の形態において、 $0.05\% \leq |\Delta_2 - \Delta_4| \leq 0.01\%$ である。図1Eは、三角形のトレンチプロファイルを有し、かつ図1Aのプロファイルに似た、ファイバ10の別の実施の形態の相対屈折率プロファイルを示しているが、図1Eにおいて、中央コア領域は、最大屈折率差分パーセント $\Delta_{1\text{max}}$ および屈折率アルファプロファイル $\alpha_{\text{コア}}$ を有している。光ファイバ10は、アルファ値が $1 \leq \alpha_{\text{コア}} \leq 100$ に及ぶコアを有してもよい。いくつかの好ましい実施の形態において、 $5 \leq \alpha_{\text{コア}} \leq 100$ 、他の好ましい実施の形態において、 $2 \leq \alpha_{\text{コア}} \leq 20$ 、または $5 \leq \alpha_{\text{コア}} \leq 20$ である。

【0044】

少なくともいくつかの実施の形態において、 $\alpha_t \leq 50$ であり、式中、 α_t はトレンチアルファプロファイルである。いくつかの実施の形態について、 $0.5 \leq \alpha_t \leq 5$ である。図1Fは、図1Aのプロファイルに似たトレンチプロファイルを有するファイバ10の

実施の形態の相対屈折率プロファイルを示しているが、図 1 F において、第 2 の内側クラッド領域 3 の相対屈折率プロファイルは、凸状の形状を有する。図 1 G は、トレンチプロファイルを有し、図 1 A のプロファイルに似た、ファイバ 10 の実施の形態の相対屈折率プロファイルを示しているが、図 1 G において、第 2 の内側クラッド領域 3 の相対屈折率プロファイルは、凹状の形状を有する。

【 0 0 4 5 】

例示の実施の形態において、 $\Delta_{1\max} > \Delta_2 > \Delta_{3\min}$ および $\Delta_{3\min} < \Delta_4$ である。好ましくは、 $\Delta_2 - \Delta_{3\min} = 0.1\%$ 、より好ましくは $\Delta_2 - \Delta_{3\min} = 0.15\%$ 、さらにより好ましくは $\Delta_2 - \Delta_{3\min} = 0.2\%$ である。図 1 A から 1 G に示された実施の形態において、領域 1, 2, 3 は、互いに直接隣接している。しかしながら、このことは必要なく、代わ

10

【 0 0 4 6 】

第 2 の内側クラッド領域 3 (トレンチ) の屈折率 (およびそれゆえ相対屈折率差分) は、半径の増加と共に減少することが好ましい。第 2 の内側クラッド領域 3 の形状は、パラメータ:

【 0 0 4 7 】

【数 6】

20

$$\beta = \frac{(R_3 - R_2)}{\Delta_{3,\min}} \left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

【 0 0 4 8 】

により定義され、式中、

【 0 0 4 9 】

【数 7】

$$\left(\frac{d\Delta}{dr} \right)_{\text{average}}$$

30

【 0 0 5 0 】

は、 r_2 と r_3 の間の異なる半径位置で屈折率勾配を平均することによって決定される第 2 の内側クラッド領域における平均屈折率勾配である。三角形のトレンチについて、パラメータ β の値は 1 である。矩形のトレンチについて、パラメータ β の値は 0 である。光ファイバ 10 の他の実施の形態において、パラメータ β は、0.25 より大きく、より好ましくは 0.5 より大きく、さらにより好ましくは 0.75 より大きい。 β が 1.5 未満であることが好ましく、1.1 未満がより好ましい。

【 0 0 5 1 】

第 2 の内側クラッド領域 3 におけるトレンチ形状を定義するのに使用できる別のパラメータはパラメータ α_t であり、これは、 r が半径であり、「%」の単位で $\Delta(r)$ により表される、第 2 の内側クラッド領域 3 における相対屈折率プロファイルを称し、式:

40

【 0 0 5 2 】

【数 8】

$$\Delta(r) = \Delta_{3,\min} (1 - [|r_3 - r| / (r_3 - r_2)]^{\alpha_t}),$$

【 0 0 5 3 】

にしたがい、式中、 α_t はトレンチアルファパラメータである。矩形のトレンチについて、パラメータ α_t の値は 1.00 より大きいものに対し、三角形のトレンチについて、パラメータ α_t の値は 1 である。 $\alpha_t = 5.0$ であることが好ましい。光ファイバ 10 のいくつかの実施の形態において、パラメータ α_t は、0.5 α_t 5 であり、いくつかの実施の形態

50

において、 $0.5 \leq \alpha_t \leq 3$ であり、いくつかの実施の形態において、 $0.75 \leq \alpha_t \leq 2$ である。

【0054】

ここに開示された例示の実施の形態によれば、光ファイバは、 $0.3 \leq V_{3a3ratio} \leq 0.8$ のモート体積比を有することが好ましく、 $V_{3a3ratio}$ は、

【0055】

【数9】

$$V_{3a3ratio} = V_{3a3} / [\Delta_{3min}(r_3^2 - r_2^2)]$$

10

【0056】

である。

【0057】

中央コア領域1は外径 r_1 を有し、 r_1 は、中心線から半径方向外側に移動する半径 r が、 $\Delta(r)\%$ が最初に 0.03% に到達する値に相当する地点である。コア領域1（ここではコアとも称される）は、約 0.3 から 0.5 、より好ましくは約 0.31 から 0.48 、例えば、約 0.31 から 0.45 の最大相対屈折率差分パーセント Δ_{1max} を有することが好ましい。いくつかの実施の形態において、 Δ_{1max} は 0.31 と 0.43 の間である。いくつかの実施の形態において、 Δ_{1max} は 0.42 未満である。コアの半径 r_1 は、好ましくは 3 と 10 マイクロメートルの間、より好ましくは約 3.5 と 8.0 マイクロメートルの間、例えば、 $3.5 \leq r_1 \leq 7.0$ マイクロメートル、または $3.5 \leq r_1 \leq 5.0$ マイクロメートルである。中央コア領域1は、単一セグメントのステップ型プロファイル

を有してもよい。いくつかの実施の形態において、中央コア領域1は、アルファ（ $\alpha_{コア}$ ）値が 0.5 より大きく 10 未満である、いくつかの実施の形態において、 7.5 未満、 5 未満、また 3 未満である（例えば、 1.85 、 1.95 、 1.98 、 2 、 2.05 、 2.1 、またはそれらの間などの 1.8 と 2.2 の間）、アルファプロファイルを示す。しかしながら、他の実施の形態において、中央コア領域1は、約 2 と約 100 の間、または 10 と 40 の間（ 15 、 20 、 30 、またはそれらの間などの）、ある場合には、 $5 \leq \alpha_{コア} \leq 20$ である $\alpha_{コア}$ を有してもよい。

20

【0058】

いくつかの好ましい実施の形態において、中央コア領域1は、 $5 \leq \alpha_{コア} \leq 20$ を示し、 0.30 から 0.48 の相対屈折率差分パーセント Δ_1 （例えば、 $0.32 \leq \Delta_1 \leq 0.4$ ）を有する。いくつかの好ましい実施の形態において、中央コア領域1は、 $5 \leq \alpha_{コア} \leq 20$ のアルファを示し、 0.3 から 0.48 の相対屈折率差分パーセント Δ_{1max} （例えば、 $0.32 \leq \Delta_1 \leq 0.4$ ）、および約 3.5 から 7 マイクロメートルのコア半径を有する。いくつかの好ましい実施の形態において、中央コア領域1は、 0.5 より大きく 10 未満の、いくつかの実施の形態において、 7.5 未満の、 5 未満、または 3 未満のアルファを示し、 0.3 から 0.48 の相対屈折率差分パーセント Δ_{1max} （例えば、 $0.32 \leq \Delta_1 \leq 0.4$ ）、および約 3.5 から 7 マイクロメートルのコア半径を有する。

30

40

【0059】

図1に示された実施の形態において、内側クラッド領域2は、中央コア領域1を取り囲み、内径 r_1 と外径 r_2 を有し、 r_1 は先に定義されており、 r_2 は、相対屈折率が 0.03 （ Δ_{3min} ）に等しい、 r_1 から半径方向外側に離れて移動する最初の半径位置として定義される。ある場合には、領域2における屈折率は実質的に平らであり、他の場合には、屈折率分布型プロファイルがあり得、いくつかの実施の形態において、領域2では、半径が増加するにつれて、屈折率が減少する。さらに他の場合において、小さいプロファイルの設計またはプロセスの変化の結果として変動があり得る（例えば、図6参照）。いくつかの実施の形態において、第1の内側クラッド領域2は 0.02 質量%未満のフッ素を含有する。いくつかの実施の形態において、内側クラッド領域2は、フッ素もゲルマニアも実

50

質的にドーブされていない、すなわち、その領域がフッ素とゲルマニアを実質的に含まないように、シリカからなる。いくつかの他の実施の形態において、領域 2 には、0.2 質量%未満のフッ素がドーブされている。内側クラッド領域 2 は、好ましくは約 1 から 13 マイクロメートル、より好ましくは 2 から 10 マイクロメートル、さらにより好ましくは約 2 から 7 マイクロメートルの幅を示す。6 マイクロメートル r_2 15 マイクロメートルが好ましく、6.5 r_2 12 マイクロメートルがより好ましい。内側クラッド領域 2 の半径 r_2 に対するコア半径 r_1 の比は、好ましくは少なくとも 0.3 かつ 1 未満、より好ましくは 0.3 より大きく、例えば、約 0.33 と 0.85 の間、または 0.33 と 0.7 の間、または 0.4 から 0.6 である。

【0060】

内側クラッド領域 2 は、

【0061】

【数 10】

$$\Delta_2 = \int_{r_1}^{r_2} \Delta(r) dr / (r_2 - r_1) \quad \text{式 1}$$

【0062】

を使用して計算される屈折率差分パーセント Δ_2 を含む。いくつかの実施の形態において、第 1 の内側クラッド領域 2 は、フッ素もゲルマニアも実質的にドーブされていない、すなわち、その領域がフッ素とゲルマニアを実質的に含まないように、シリカからなる。内側クラッド領域 3 は、領域 2 のものより低い最小相対屈折率差分を提供するようにダウンドーパント、例えば、フッ素を含むことが好ましい。図 1 A ~ 1 G に示された実施の形態において、第 2 の内側クラッド領域 3 (トレンチとも称される) は、第 1 の内側クラッド領域 2 を取り囲み、内径 r_2 および外径 r_3 を有し、 r_2 は先に定義されており、 r_3 は、相対屈折率プロファイル曲線が、半径 r_2 から半径方向外側に移動する最初の半径位置でゼロ差分線 (Δ_4) と再び交差する場所として定義される。ある場合には、領域 3 における相対屈折率は屈折率分布型プロファイルであって差し支えなく、ある場合には (好ましくは)、領域 3 における相対屈折率は、その領域の内側部分でより浅い凹部を、その領域の外側部分でより深い凹部を有する。その上、小さいプロファイル設計またはプロセスの変化の結果として、変動があり得る。いくつかの実施の形態において、第 2 の内側クラッド領域 3 はフッ素および/またはホウ素を含む。いくつかの実施の形態において、屈折率が減少した環状部分は、非周期的に配置されたか、または周期的に配置されたか、またはその両方で配置された、空隙を含む。「非周期的に配置された」または「非周期的分布」という用語は、光ファイバの断面 (縦軸に対して垂直な断面など) をとったときに、非周期的に配置された空隙は、ファイバの一部分に亘り無作為にすなわち非周期的に分布していることを意味する。ファイバの長手方向に沿って異なる地点で取られた類似の断面が、異なる断面孔パターンを表すであろう、すなわち、様々な断面が異なる孔パターンを有し、ここで、空隙の分布および空隙のサイズは一致しない。すなわち、空隙は非周期的である、すなわち、それらは、ファイバ構造内に周期的に配置されていない。これらの空隙は、光ファイバの長手方向 (すなわち、縦軸に対して平行) に沿って伸長されている (引き伸ばされている) が、伝送ファイバの典型的な長さについて、全ファイバの全長に亘り延在していない。空隙は、アルゴン、窒素、クリプトン、 CO_2 、 SO_2 、または酸素などの 1 種類以上のガスを含有しても差し支えなく、または空隙は、実質的にガスを含まない真空であって差し支えない; 任意のガスの存在または不在にかかわらず、環状部分 3 の相対屈折率は、空隙の存在により低下される。理論により拘束することを意図するものではないが、空隙は、ファイバの長手方向に沿って、数メートル未満しか、多くの場合、1 メートル未満しか延在しないと考えられる。ここに開示された光ファイバは、固結されたガラスブランク内に相当量のガスが捕捉されるようにするのに効果的なプリフォーム固結条件を使用し、それによって、固結されたガラス光ファイバプリフォームに空隙を形成する方

10

20

30

40

50

法によって、製造することができる。これらの空隙を除去するための工程をとらずに、結果として得られたプリフォームを使用して、その中に空隙を有する光ファイバを形成する。ここに用いたように、孔の直径は、光ファイバを、ファイバの縦軸を横断する垂直断面で見たときに、孔を画成するシリカ内面に端点が配置された最長の線セグメントである。内側クラッド領域 3 は、相対屈折率差分パーセント $\Delta_3(r)$ 、および最小相対屈折率差分 Δ_{3min} を有する。第 2 の内側クラッド領域における最小屈折率 Δ_{3min} は、好ましくは -0.1% より小さい（すなわち、 $\Delta_4 - \Delta_3 = 0.1\%$ ）、いくつかの実施の形態において -0.25% より小さい、いくつかの他の実施の形態において -0.35% より小さい。
【0063】

第 2 の内側クラッド領域 3（トレレンチ）の体積 V_3 は、式 2 に示されたように定義され、パーセント差分平方マイクロメートル（ $\% \Delta \mu m^2$ ）の単位で与えられている：

【0064】

【数 11】

$$V_3 = 2 \int_{r_2}^{r_3} \Delta_{(2-3)}(r) r dr \quad \text{式2}$$

【0065】

図 1 A ~ 1 D の実施の形態において、内側クラッド領域 3 の絶対体積 V_3 は、 $10 \Delta \% \mu m^2$ $V_3 = 105 \Delta \% \mu m^2$ 、いくつかの実施の形態において、 $20 \Delta \% \mu m^2$ $V_3 = 95 \Delta \% \mu m^2$ である。内側クラッド領域 3 は、好ましくは約 $5 (r_3 - r_2)$ 20 マイクロメートル、いくつかの実施の形態において、約 $5 (r_3 - r_2)$ 15 マイクロメートルの幅 W_3 、（すなわち、 $r_3 - r_2$ ）を示す。図 1 A ~ 1 D のいくつかの実施の形態において、内側クラッド領域 3 の絶対体積 V_3 は、 $35 \Delta \% \mu m^2$ $V_3 = 105 \Delta \% \mu m^2$ 、例えば、 $50 \Delta \% \mu m^2$ $V_3 = 95 \Delta \% \mu m^2$ （例えば、 $70 \Delta \mu m^2$ 超、いくつかの実施の形態において、 $85 \Delta \mu m^2$ 超）である。この内側クラッド領域 3 は、好ましくは約 5 から 20 マイクロメートル、より好ましくは 5 から 15 マイクロメートルの幅 W を示す。内側クラッド領域 2 の半径 r_2 に対する半径 r_3 の比は、好ましくは 1.3 より大きい、より好ましくは 1.5 と 4 の間である。

【0066】

外側クラッド領域 4 は、屈折率が減少した環状部分 3 を取り囲み、内側クラッド領域 3 の屈折率 Δ_{3min} より高い相対屈折率差分パーセント Δ_4 を有する。いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域 4 は、第 1 の内側クラッド領域 2 のものより大きい相対屈折率を有し、それによって、例えば、外側クラッド領域 4 の相対屈折率を増加させるのに十分な量のドーパント（ゲルマニアまたは塩素などの）を添加することによって、第 1 の内側クラッド領域 2 に対して「アップドープされた (updoped)」外側クラッド領域 4 である領域を形成する。しかしながら、屈折率増加ドーパントを領域 4 に含ませなければならないという意味で、領域 4 がアップドープされていることは重大な意味を持つことではないことに留意されたい。実際に、外側クラッド領域 4 における同じ種類の上昇した屈折率効果は、外側クラッド領域 4 に対して第 1 の内側クラッド領域 2 をダウンドープすることによって行ってもよい。外側クラッド領域 4 は、第 1 の内側クラッド領域 2 よりも高い相対屈折率を有し、第 1 の内側クラッド領域 2 における相対屈折率に対して、 0.01% より大きい、いくつかの実施の形態において、 0.02% または 0.03% より大きい相対屈折率差分パーセント Δ_4 を有してもよい。外側クラッド領域 4 の屈折率の高い部分（第 1 の内側クラッド領域 2 と比べて）が、好ましくは、光ファイバを伝送されるであろう光パワーが、伝送される光パワーの 90% 以上である地点まで、より好ましくは、光ファイバを伝送されるであろう光パワーが、伝送される光パワーの 95% 以上である地点まで、最も好ましくは、光ファイバを伝送されるであろう光パワーが、伝送される光パワーの 98% 以上である地点まで、少なくとも延在する。多くの実施の形態において、このことは、「アップドープされた」第 3 の環状領域を約 30 マイクロメートルの半径方向地点まで少なくとも延在させることによって、達成される。その結果、第 3 の環状領域 4 の体積 V_4

10

20

30

40

50

は、半径 r_3 と r_{30} (30 マイクロメートルの半径) の間で計算されるところに定義され、

【0067】

【数12】

$$V_4 = 2 \int_{r_3}^{r_{30}} \Delta_{(4-2)}(r) r dr$$

式4

【0068】

と定義される。

10

【0069】

第1の内側クラッド領域2の体積と比べた外側クラッド領域4(30 マイクロメートルの内側)の体積 V_4 は、好ましくは $5 \Delta \% \mu m^2$ 超、より好ましくは $7 \Delta \% \mu m^2$ 超であり、 $10 \Delta \% \mu m^2$ 超であってよい。外側クラッド領域(30 マイクロメートルの内側)のこの体積 V_4 は、いくつかの実施の形態において、 $50 \Delta \% \mu m^2$ 未満である。

【0070】

いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域4の相対屈折率 Δ_4 は、第1の内側クラッド領域2の相対屈折率 Δ_2 より、 0.01% 大きい、より好ましくは 0.02% 超大きい。いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域4は塩素(Cl)を含む。いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域はゲルマニア(GeO_2)を含む。

20

【0071】

コア領域1は、全てに亘り正の相対屈折率を有することが好ましい。コア1は、 $r=0$ と $r=3 \mu m$ との間で生じる最大相対屈折率 Δ_{1max} を有する。 Δ_{1max} は、好ましくは 0.30% と 0.48% の間、さらにより好ましくは 0.3% と 0.45% の間である。

【0072】

第1の内側クラッド領域2は実質的に一定の相対屈折率プロファイルを有することが好ましい、すなわち、この中間領域内の任意の2つの半径での相対屈折率間の差が 0.02% 未満、いくつかの好ましい実施の形態において、 0.01% 未満である。それゆえ、第1の内側クラッド領域2の相対屈折率プロファイルは実質的に平らな形状を有することが好ましい。いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域4は、純粋なシリカに対してアップドープされており、いくつかの実施の形態において、第1の内側クラッド領域2は純粋なシリカに対してダウンドープされている。

30

【0073】

コア領域1は、ステップ型屈折率コアであってよく、アルファ(α)型を有してよい。好ましい実施の形態において、 r_1 は 8.0 マイクロメートル未満、より好ましくは 3.5 マイクロメートルと 7.0 マイクロメートルの間である。ファイバは、 8.2 と 9.6 マイクロメートルの間の $1310 nm$ でのモードフィールド直径、 $1300 nm$ と $1324 nm$ の間のゼロ分散波長、 $1260 nm$ 以下のケーブルカットオフおよび $10 mm$ の半径のマンドレル上に巻き付けたときの、 $2 dB/turn$ 未満、好ましくは $1 dB/turn$ 未満の曲げ損失を示すことができる。

40

【0074】

ここに開示されたファイバは、従来の製造技法を使用し、例えば、ここに引用する米国特許第 7565820 号明細書に開示されたような、公知のファイバ線引き方法および装置を使用して製造された光ファイバプリフォームから線引きしてもよい。

【実施例】

【0075】

様々な例示の実施の形態は、以下の実施例によってさらに明確になるであろう。特許請求の範囲の精神または範囲から逸脱せずに、様々な改変および変更が行えることが当業者には明白であろう。

【0076】

50

ファイバの実施例 1 ~ 6

下記の表 1 A、1 B、2 A、2 B、3 ~ 5 は、モデル化された説明の実施例 1 ~ 6 と 8 ~ 27、製造されたファイバの実施例 7、および 2 つの比較例のファイバの特徴を列挙している。詳しくは、表 1 A および 1 B の各実施例について、中央コア領域 1 の相対屈折率差分 Δ_1 、アルファ、および外径 r_1 、第 1 の内側クラッド領域 2 の相対屈折率差分 Δ_2 および外径 r_2 、第 2 の内側クラッド領域 3 の相対屈折率差分 Δ_3 および体積 V_3 、外側クラッド領域 4 の相対屈折率差分 Δ_4 および、外側クラッド領域 3 の内径 r_3 と 30 マイクロメートルの半径方向距離との間で計算された体積 V_4 、およびモート体積比が下記に述べられている。

【 0 0 7 7 】

10

【表 1 A】

表 1A

パラメータ	比較例 1	実施例 1	実施例 2	実施例 3
$\Delta_{1\max} (\%)$	0.35	0.35	0.35	0.39
α	20	20	20	2
$r_1 (\mu\text{m})$	4.0	4.0	4.0	5.4
$\Delta_2 (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00
$r_2 (\mu\text{m})$	9.5	7.6	7.6	6.6
$\Delta_3 (\%)$	-0.28	-0.40	-0.40	-0.40
$r_3 (\mu\text{m})$	16.8	16.8	17.9	18.2
$V_3 (\%\Delta\mu\text{m}^2)$	53.75	50.54	59.6	66.3
トレンチ形状	矩形	三角形	三角形	三角形
$\Delta_4 (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00
$r_4 (\mu\text{m})$	62.5	62.5	62.5	62.5
r_1/r_2	0.421	0.526	0.565	0.818
r_3/r_2	1.77	2.21	2.36	2.76
パラメータ β	0	1	1	1
パラメータ α_τ	100	1	1	1
$V_4 (\%\Delta\mu\text{m}^2)$	0	0	0	0

20

30

40

【 0 0 7 8 】

【表 1 B】

表 1B

パラメータ	比較例 2	実施例 4	実施例 5	実施例 6
$\Delta_{1\max} (\%)$	0.34	0.34	0.34	0.44
α	20	20	20	2
$r_1 (\mu\text{m})$	4.0	4.0	4.0	5.4
$\Delta_2 (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00
$r_2 (\mu\text{m})$	9.5	6.6	6.6	7.5
$\Delta_3 (\%)$	-0.40	-0.40	-0.40	-0.44
$r_3 (\mu\text{m})$	16.8	20.8	22.1	19.0
$V_3 (\%\Delta\mu\text{m}^2)$	76.79	91.26	105	105.6
トレンチ形状	矩形	三角形	三角形	凸型
$\Delta_4 (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00
$r_4 (\mu\text{m})$	62.5	62.5	62.5	62.5
r_1/r_2	0.42	0.606	0.606	0.72
r_3/r_2	1.76	3.15	3.35	2.53
パラメータ β	0	1	1	1
パラメータ α_τ	>100	1	1	0.5
$V_4 (\%\Delta\mu\text{m}^2)$	18.53	14.02	13.64	21.56

【 0 0 7 9 】

また、nmで表された理論カットオフ波長、1310nmでの色分散と分散勾配、1550nmでの色分散と分散勾配、1310nmと1550nmでのモードフィールド直径、1550nmでの有効面積 A_{eff} 、1550nmでの横荷重ワイヤメッシュマイクロバンド、1550nmでのピンアレイマイクロバンド、ゼロ分散波長、22mケーブルカットオフ、1550nmでのdB/turnで表された 1×10 および 1×30 mmの直径の誘起曲げ損失、およびカッパ値（分散勾配で割った分散D）を含むモデル化データも示されている。

【 0 0 8 0 】

より詳しくは、表1A、1B、2Aおよび2Bの例示のファイバの実施の形態は、2と20の間のコアアルファ値、約4と約5.5マイクロメートルの間のコア半径、および $0.3\% < \Delta_{1\max} < 0.4\%$ を有する。これらのファイバの実施の形態のほとんどは、10mmの直径のマンドレルに巻き付けたときに0.5dB/turn未満の曲げ損失、およ

び 30 mm の直径のマンドレルに巻き付けたときに 0.01 dB / turn 未満の曲げ損失を有する。

【 0081 】

【 表 2 A 】

表 2A

パラメータ	比較例 1	実施例 1	実施例 2	実施例 3
カットオフ (nm)	1150	1150	1151	1150
1310 nm での MFD (μm)	8.7	8.7	8.7	9.0
1310 nm での Aeff (μm^2)	59.1	59.0	59.1	61.4
1310 nm での分散(ps/nm/km)	-0.49	-0.56	-0.62	-0.45
1310 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.0888	0.0880	0.0878	0.0918
1310 nm でのカップパ(nm)	-5.6	-6.3	-7.0	-4.9
1550 nm での MFD (μm)	9.9	9.9	9.9	10.2
1550 nm での Aeff (μm^2)	74.2	74.2	74.5	78.0
1550 nm での分散(ps/nm/km)	17.2	16.9	16.8	17.7
1550 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.0635	0.0632	0.0621	0.0641
1550 nm でのカップパ (nm)	271.3	271.3	270.3	275.8
1550 nm での横荷重(dB)	0.3	0.4	0.3	0.4
1550 nm でのピンアレイ(dB)	10.5	11.0	10.1	11.2
ゼロ分散波長 (nm)	1315	1316	1316	1315
ケーブルカットオフ (nm)	< 1260	< 1260	< 1260	<1260
10 mm の直径のマンドレルでの turn 当たりの曲げ損 (dB/turn)	0.47	0.67	0.50	0.49
30 mm の直径のマンドレルでの turn 当たりの曲げ損 (dB/turn)	0.0033	0.0038	0.0022	0.0037

【 0082 】

【表 2 B】

表 2B

パラメータ	比較例 2	実施例 4	実施例 5	実施例 6
カットオフ (nm)	1037	1035	1036	1023
1310 nm での MFD (μm)	8.8	8.8	8.8	8.9
1310 nm での Aeff (μm^2)	60.0	59.8	59.9	60.0
1310 nm での分散(ps/nm/km)	-0.30	-0.51	-0.58	-0.05
1310 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.0900	0.0880	0.0878	0.0930
1310 nm でのカップ(nm)	-3.4	-5.8	-6.6	-0.53
1550 nm での MFD (μm)	9.9	10.0	10.0	10.0
1550 nm での Aeff (μm^2)	75.0	75.4	75.6	75.2
1550 nm での分散(ps/nm/km)	17.7	16.9	16.8	18.3
1550 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.0649	0.0620	0.0618	0.0650
1550 nm でのカップ (nm)	273.4	272.8	271.8	282.1
1550 nm での横荷重(dB)	0.7	0.6	0.5	0.5
1550 nm でのピンアレイ(dB)	29.4	26.2	23.2	23.3
ゼロ分散波長 (nm)	1313	1315	1316	1310.5
ケーブルカットオフ (nm)	< 1260	< 1260	< 1260	<1260
10 mm の直径のマンドレルでの turn 当たりの曲げ損 (dB/turn)	0.1	0.19	0.12	0.04
30 mm の直径のマンドレルでの turn 当たりの曲げ損 (dB/turn)	0.01	0.0015	0.0004	0.0026

【 0 0 8 3 】

【表 3 - 1】

表 3

パラメータ	実施例 7
R1 (μm)	5.0
1_{max} (%)	0.46
コアアルファ	15
R2 (μm)	9.6
$\Delta 2$ (%)	0.00
R1/R2	0.52
R3a (μm)	19.4
$\Delta 3_{\text{min}}$ (%)	-0.52
モートアルファ (α_{τ})	1
R3 (μm)	19.4
$\Delta 3a$ (%)	-0.52
$(R3a-R2)/(R3-R2)$	1.00
モート体積, V_{3a3} ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	82.2
モート体積比	0.56
R4 (μm)	62.5
$\Delta 4$ (%)	0.00
V_4 ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	0
1310 nm での MFD(μm)	9.01
1550 nm での MFD(μm)	10.16
1310 nm での分散(ps/nm/km)	-0.94
1310 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.086
1550 nm での分散(ps/nm/km)	15.8
1550 nm での勾配(ps/nm ² /km)	0.059
ケーブルカットオフ (nm)	1254

【表 3 - 2】

MACCab (1310 nm での μm の MFD / μm の ケーブル カットオフ)	7.19
1550 nm での 10mm 直径曲げ損失(dB/turn)	1.23
1550 nm での 15mm 直径曲げ損失(dB/turn)	0.190
1550 nm での 20mm 直径曲げ損失(dB/turn)	0.023
λ_0 (nm)	1320

【 0 0 8 5 】

【表 4 - 1】

表 4

パラメータ	Ex-8	Ex-9	Ex-10	Ex-11	Ex-12	Ex-13	Ex-14	Ex-15
R1 (μm)	4.88	4.64	4.56	4.40	4.88	4.56	4.40	4.56
$\Delta 1_{\text{max}}$ (%)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
コアアルファ	5	5	10	10	5	10	15	10
R2 (μm)	10.3	9.79	9.62	9.28	11.03	10.31	9.94	10.31
$\Delta 2$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R1/R2	0.47	0.47	0.47	0.47	0.44	0.44	0.44	0.44
R3a (μm)	14.64	13.92	13.68	13.20	17.08	18.24	17.60	17.10
$\Delta 3_{\text{min}}$ (%)	-0.45	-0.45	-0.45	-0.43	-0.20	-0.10	-0.15	-0.20
モートアルファ (α_t)	1	1	1	1	1	1	1	2
R3 (μm)	14.64	16.29	13.68	15.44	17.08	18.24	17.6	17.1
$\Delta 3a$ (%)	-0.45	-0.45	-0.45	-0.43	-0.20	-0.10	-0.15	-0.20
$(R3a-R2)/(R3-R2)$	1.00	0.64	1.00	0.64	1.00	1.00	1.00	1.00
モート体積, V_{3a3} ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	26	59.2	23.0	49.7	18.5	12.5	17.5	26.4
モート体積比	0.54	0.78	0.54	0.73	0.54	0.55	0.55	0.71
R4 (μm)	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
$\Delta 4$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
V4 ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	0.0	0.0	0.0	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1310 nm での MFD (μm)	9.01	8.86	8.90	8.81	9.02	8.94	8.88	8.92
1550 nm での MFD (μm)	10.12	10.07	10.01	9.93	10.25	10.12	10.04	10.07
LP11 カットオフ (nm)	1256	1194	1275	1167	1268	1297	1287	1286
1310 nm での分散 (ps/nm/km)	0.04	-0.53	0.50	0.19	-0.17	0.17	0.16	0.26
1310 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.079	0.073	0.078	0.088	0.082	0.083	0.081	0.077
1550 nm での分散 (ps/nm/km)	17.5	17.1	17.9	17.6	16.9	17.0	17.0	17.3
1550 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.062	0.063	0.061	0.062	0.061	0.059	0.089	0.060
ケークルカットオフ (nm)	1218	1236	1232	1225	1196	1203	1192	1241
MACCab (1310 nm での μm の MFD / μm のケークルカットオフ)	7.40	7.17	7.22	7.19	7.54	7.43	7.45	7.19
10 mm 直径の 曲げ損失(dB/tum)	1.25	0.24	1.17	0.36	2.22	2.54	2.25	0.91

【表 4 - 2】

20 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.263	0.060	0.228	0.088	0.460	0.486	0.460	0.179
30 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.005	0.003	0.003	0.004	0.006	0.005	0.006	0.003
λ_0 (nm)	1309	1317	1304	1308	1312	1308	1318	1307
LLWM (1550 nm での dB/m)	0.182	0.169	0.147	0.145	0.195	0.158	0.224	0.158
ピンアレイ (1550 nm での dB)	6.40	7.59	4.52	10.19	7.09	4.89	9.16	4.40

【 0 0 8 7 】

【表 5 - 1】

表 5

パラメータ	Ex-16	Ex-17	Ex-18	Ex-19	Ex-20
R1 (μm)	4.56	4.56	4.33	4.46	4.25
$\Delta 1_{\text{max}}$ (%)	0.36	0.36	0.393	0.364	0.373
コアアルファ	10	10	12	12	12
R2 (μm)	10.31	13.04	6.80	7.00	7.86
$\Delta 2$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R1/R2	0.44	0.35	0.63	0.64	0.54
R3a (μm)	17.10	18.24	16.8	17.3	19.4
$\Delta 3_{\text{min}}$ (%)	-0.25	-0.20	-0.44	-0.44	-0.48
モートアルファ (α_t)	0.5	1	1	1	1
R3 (μm)	17.1	18.24	16.8	17.3	19.4
$\Delta 3a$ (%)	-0.25	-0.20	-0.44	-0.44	-0.48
(R3a-R2)/(R3-R2)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
モート体積, V_{3a3} ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	17.0	26.6	57	60	83
モート体積比	0.37	0.82	0.55	0.55	0.55
R4 (μm)	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
$\Delta 4$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V4 ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	0.0	0.0	0.0	0.0	0
1310 nm での MFD (μm)	8.93	8.93	8.57	8.88	8.59
1550 nm での MFD (μm)	10.10	10.12	9.73	10.09	9.9
LP11 カットオフ (nm)	1293	1301	1163	1151	1156
1310 nm での分散 (ps/nm/km)	0.18	0.13	-0.76	-0.49	計算せず
1310 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.081	0.081	0.088	0.089	計算せず
1550 nm での分散 (ps/nm/km)	17.1	16.9	16.8	17.2	計算せず
1550 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.059	0.058	0.062	0.063	計算せず
ケーブルカットオフ (nm)	1215	1242	1207	1205	1210
MACCab (1310 nm での μm の MFD / μm のケーブルカットオフ)	7.35	7.19	7.10	7.37	7.10
10 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	1.82	0.89	0.26	0.35	0.07

【表 5 - 2】

20 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.352	0.18	0.060	0.10	0.02
30 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.004	0.003	0.002	0.003	0.002
λ_0 (nm)	1308	1308	1319	1316	1310
LLWM (1550 nm での dB/m)	0.162	0.166	0.134	0.178	計算せず
ピンアレイ (1550 nm での dB)	4.93	5.00	7.30	11.95	計算せず

10

【 0 0 8 9 】

【表 6 - 1】

表 6

パラメータ	Ex-21	Ex-22	Ex-23	Ex-24	Ex-25	Ex-26	Ex-27	Ex-28
R1 (μm)	4.51	4.55	4.57	4.58	4.41	4.36	4.33	4.38
$\Delta 1_{\text{max}}$ (%)	0.365	0.355	0.345	0.355	0.355	0.355	0.355	0.363
コアアルファ	12	12	12	12	12	12	12	12
R2 (μm)	5.95	6.02	6.09	5.78	7.67	6.14	5.6	6.09
$\Delta 2$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R1/R2	0.76	0.76	0.75	0.79	0.57	0.71	0.77	0.72
R3a (μm)	17	17.2	17.4	16.7	17.7	17.5	17.4	16.5
$\Delta 3_{\text{min}}$ (%)	-0.435	-0.435	-0.435	-0.433	-0.481	-0.466	-0.466	-0.55
モートアルファ (α_t)	1	1	1	1	1	1	1	1
R3 (μm)	17	17.2	17.4	16.7	17.7	17.5	17.4	16.5
$\Delta 3a$ (%)	-0.435	-0.435	-0.435	-0.433	-0.481	-0.466	-0.466	-0.55
(R3a-R2)/(R3-R2)	1	1	1	1	1	1	1	1
モート体積, V_{3a3} ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	64	66	67	62	69	73	76	76
モート体積比	0.58	0.58	0.58	0.58	0.56	0.58	0.60	0.59
R4 (μm)	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
$\Delta 4$ (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V4 ($\%\Delta\mu\text{m}^2$)	0	0	0	0	0	0	0	0
1310 nm での MFD (μm)	8.72	8.83	8.95	8.81	9.08	8.95	8.82	8.6
1550 nm での MFD (μm)	9.83	9.96	10.08	9.9	10.29	10.1	9.88	9.67
LP11 カットオフ (nm)	1113	1110	1107	1155	1120	1096	1077	1077
1310 nm での分散 (ps/nm/km)	-0.712	-0.623	-0.534	-0.356	-0.801	-0.445	-0.089	-0.72
1310 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.09
1550 nm での分散 (ps/nm/km)	17.73	17.87	18	18.1	17.65	18	18.3	17.9
1550 nm での勾配 (ps/nm ² /km)	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063
ケーブルカットオフ (nm)	1213	1214	1216	1214	1219	1217	1218	1213

【表 6 - 2】

MACCab (1310 nm での μm のMFD/ μm のケーブルカットオフ)	7.19	7.27	7.36	7.26	7.45	7.35	7.24	7.09
10 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.206	0.223	0.245	0.271	0.234	0.196	0.167	0.1
20 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.057	0.065	0.074	0.077	0.072	0.062	0.054	0.03
30 mm 直径の 曲げ損失(dB/turn)	0.002	0.0027	0.003	0.0029	0.003	0.003	0.003	0.002
λ_0 (nm)	1318	1317	1316	1314	1319	1315	1311	1318
LLWM (1550 nm での dB/m)	0.138	0.152	0.17	0.143	0.209	0.17	0.138	0.121
ピンアレイ (1550 nm での dB)	14.07	16.12	18.49	15.84	19.17	20.8	22.7	16.48

【0091】

また、nmで表された理論カットオフ(LP11)波長、1310nmでの色分散と分散勾配、1550nmでの色分散と分散勾配、1310nmと1550nmでのモードフィールド直径、1550nmでの有効面積 A_{eff} 、1550nmでの横荷重ワイヤメッシュマイクロバンド、1550nmでのピンアレイマイクロバンド、ゼロ分散波長、22mケーブルカットオフ、および1550nmでのdB/turnで表された 1×10 、 1×20 および 1×30 mmの直径の誘起曲げ損失を含むモデル化データも示されている(表4、5および6)。図4、5および6の光ファイバの実施の形態(ファイバ実施例8~27)は、5と15の間のコアアルファ値、約4と約5マイクロメートルの間のコア半径、および $0.3\% < \Delta_{1\text{max}} < 0.4\%$ を有する。これらのファイバの実施の形態のほとんどは、10mmの直径のマンドレルに巻き付けたときに2dB/turn未満(1550nmで)の曲げ損失、20mmの直径のマンドレルに巻き付けたときに0.5dB/turn未満(1550nmで)の曲げ損失、および30mmの直径のマンドレルに巻き付けたときに0.01dB/turn未満の曲げ損失を有する。表4、5および6に対応する光ファイバの実施の形態は、1310nmで約8.5マイクロメートルと約9.1マイクロメートルの間、および1310nmで約9.6マイクロメートルと約10.3マイクロメートルの間のモードフィールド直径(MFD)；1190nmと1250nmの間のケーブルカットオフ、および7.1と7.6の間のMACCab値(MACCab=1310nmでのマイクロメートルで表されたMFD/マイクロメートルで表されたケーブルカットオフ)を有する。

【0092】

表1Aの比較例のファイバ(矩形のトレレンチ)および例示のファイバの実施の形態(例示のファイバの実施例1、2および3)の相対屈折率プロファイルが図2に示されている。より詳しくは、図2は、例示のファイバの実施例1および2はステップ状コアプロファイル($\alpha = 20$)を有すること、および例示のファイバの実施例3が放物型プロファイル($\alpha = 2$)を有することを示している。例示のファイバの実施例1~3は、トレレンチの内側部分に浅い凹部を、トレレンチの外側部分に深い凹部を有するトレレンチを有する(すなわち、相対屈折率差分は、トレレンチの外側部分またはそれに近いほうが負の方向に大きい)。例示の実施例1は、比較例のファイバ1の外側のトレレンチ半径と同じ半径 r_3 およびより小さいトレレンチ体積 V_3 を有する。ファイバの実施例2は、ファイバの実施例2の半径

より大きい半径 r_3 を有するが、トレんチは、比較例のファイバの体積より大きい体積 V_3 を有する。例示の実施例 3 は、例示の実施例 2 のものと同じトレんチ体積を有する。

【0093】

図 3 は、表 1 A のファイバの実施例 1、2 および 3（すなわち、例示の実施例 1～3）および比較例 1 のファイバに関する曲げ直径の関数としての曲げ損失を示している。図 3 は、正方形のトレんチプロファイルおよび三角形のトレんチプロファイルを有するファイバは、10 mm 曲げ直径（5 mm 曲げ半径）で同様の曲げ損失を有するが、非矩形または三角形のトレんチ設計を有するファイバは、30 mm 曲げ直径（15 mm 曲げ半径）で同様またはより良好な曲げ損失性能を有することを示している。

【0094】

表 1 B の別の比較例のファイバ 2（矩形のトレんチ）および 3 つのファイバの実施の形態（ファイバの実施例 4、5 および 6）の相対屈折率プロファイルが、図 4 に示されている。図 4 のファイバは、ドーブされていない外側クラッド領域 4 を有する。より詳しくは、図 4 は、ファイバの実施例 4 および 5 がステップ型コアプロファイル（ $\alpha = 20$ ）を有し、ファイバの実施例 6 が放物線プロファイル（ $\alpha = 2$ ）を有することを示している。ファイバの実施例 4～6 は、トレんチの内側部分に浅い凹部を、トレんチの外側部分に深い凹部を有する三角形トレんチを有している。ファイバの実施例 4 は、比較例のファイバの外側トレんチ半径よりも大きい半径 r_3 を有している。ファイバの実施例 5 は、ファイバの実施例 4 の半径よりも大きい半径 r_3 を有している。ファイバの実施例 6 は、ファイバの実施例 5 とは異なるトレんチ形状を有しているが、そのトレんチの体積は実施例 5 と 6 は同程度である。トレんチ領域 3 の形状および外側クラッド領域のアップドーブ状態（第 1 の内側クラッド領域 2 に対して）は、より大きいトレんチ体積 V_3 （約 105% μm^2 ）を有すると同時に 1260 nm 未満のケーブルカットオフを有するのに役立つ。

【0095】

図 5 は、表 1 B のファイバの実施例 4、5 および 6 と、第 2 の比較例のファイバに関する曲げ直径の関数としての曲げ損失を示している。出願人等は、正方形のモートおよび三角形のモートを有するファイバが、10 mm の曲げ直径（5 mm の曲げ半径）で同様の曲げ損失を有するが、三角形のトレんチのファイバ設計が、30 mm の曲げ直径（15 mm の曲げ半径）でずっと良好な曲げ損失性能を有することを発見した。トレんチ体積が増加した場合、ファイバの性能がさらに改善する。

【0096】

別のモデル化ファイバおよびこのプロファイルに対応する製造ファイバに関する相対屈折率プロファイルが図 6 に示されている。製造されたファイバの実施例 7 の測定された光学的性質が表 3 に示されており、G . 657 および G . 652 の各仕様に適合する良好な曲げ性能および他の特性を示している。

【0097】

例示の光ファイバの実施の形態 10 は、20 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 0.5 dB / turn 未満の、ある場合には、0.25 dB / turn 未満の、1550 nm での曲げ損失を示すことが好ましい。これらのファイバは、10 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 2 dB / turn 未満の、より好ましくは 1 dB / turn 未満の、より好ましくは 0.5 dB / turn 未満の、いくつかのファイバにおいて最も好ましくは 0.2 dB / turn 未満の、1550 nm での曲げ損失を示す。これらのファイバは、30 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 0.01 dB / turn 未満の、いくつかのファイバでは、0.003 dB / turn 未満の、1550 nm での曲げ損失を示す。これらの実施例のいくつかでは、外側クラッド領域に、2000 質量 ppm 超の、いくつかの場合には、3000 質量 ppm 超、またはさらには 4000 質量 ppm 超の量の塩素を使用している。いくつかの実施の形態において、外側クラッド領域は、2000 質量 ppm 超かつ 12000 質量 ppm 未満の量の塩素を含む。

【0098】

いくつかの例示の光ファイバの実施の形態 10 は、15 mm の直径のマンドレルに巻き

10

20

30

40

50

付けられたときに 0.5 dB/turn 未満の、ある場合には、 0.25 dB/turn 未満の、 1550 nm での曲げ損失を示す。これらのファイバの少なくともいくつかは、 10 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 1 dB/turn 未満の、より好ましくは 0.5 dB/turn 未満の、いくつかのファイバにおいては、最も好ましくは 0.2 dB/turn 未満の、 1550 nm での曲げ損失を示す。これらのファイバは、 15 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 0.25 dB/turn 未満の、いくつかのファイバにおいては、より好ましくは 0.15 dB/turn 未満の、 1550 nm での曲げ損失を示す。これらのファイバは、 20 mm の直径のマンドレルに巻き付けられたときに 0.1 dB/turn 未満の、いくつかのファイバにおいては、より好ましくは、 0.03 dB/turn 未満の、 1550 nm での曲げ損失を示す。

10

【0099】

1550 nm での減衰（スペクトル）は、好ましくは 0.21 dB/km 未満、より好ましくは 0.20 dB/km 未満、さらにより好ましくは 0.197 dB/km 未満である。いくつかの好ましい実施の形態において、 1550 nm での減衰（スペクトル）は、 0.191 dB/km 以下、さらにより好ましくは 0.189 dB/km 以下、さらにより好ましくは 0.182 dB/km 以下である。

【0100】

それゆえ、ここに記載された光ファイバ10の実施の形態は、極めて優れた曲げ性能を提供し、その上、約 1260 nm より長い波長でのシングルモード作動に適したカットオフ波長を提供する。

20

【0101】

いくつかの実施の形態において、コアは、1つ以上の光ファイバ製造技法の結果として生じるであろういわゆる中心線低下部(centerline dip)を有する相対屈折率プロファイルを含んでもよい。しかしながら、ここに開示された相対屈折率プロファイルのいずれにおいても、中心線低下部は随意的である。

【0102】

ここに開示された光ファイバは、コアと、そのコアを取り囲み直接隣接したクラッド層（もしくはクラッドまたは最も外側の環状クラッド領域）を備えている。コアが、ゲルマニウムがドーピングされたシリカ、すなわち、ゲルマニウムドープトシリカからなることが好ましい。単独でまたは組合せて、ゲルマニウム以外のドーパントを、ここに開示された光ファイバのコア内に、特に、中心線にまたはその近くに用いて、所望の屈折率および密度を得てもよい。好ましい実施の形態において、ここに開示された光ファイバのコアは、負ではない相対屈折率プロファイル、より好ましくは正の相対屈折率プロファイルを有し、そのコアは、クラッド層により取り囲まれ、直接隣接している。

30

【0103】

ここに開示された光ファイバがシリカ系のコアとクラッドを有することが好ましい。好ましい実施の形態において、そのクラッドは、 r_4 の2倍である、約 125 マイクロメートル の外径を有する。

【0104】

ここに開示されたファイバは、特にOVD法で製造された場合、低いPMD値を示す。その光ファイバを回転させて、ここに開示されたファイバのPMD値を低下させてもよい。

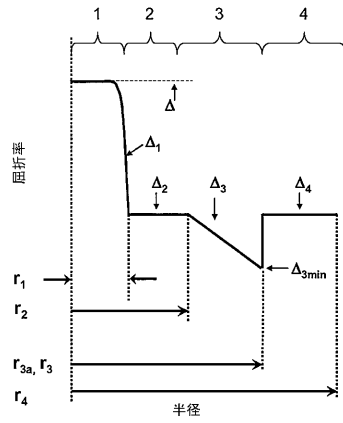
40

【0105】

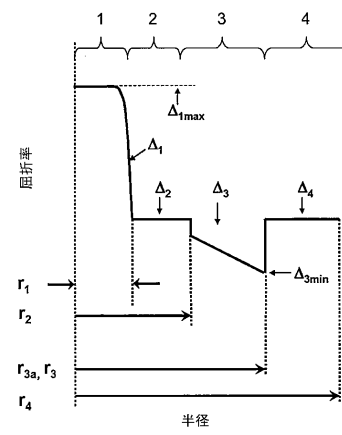
先の説明は、単なる例示であり、特許請求の範囲により定義されたファイバの性質と特徴を理解するための概要を提供することが意図されているのが理解されよう。添付図面は、好ましい実施の形態のさらなる理解を提供するために含まれ、本明細書に包含され、その一部を構成する。図面は、その説明と共に、原理と作動を説明する働きをする様々な特徴と実施の形態を図示している。付随の特許請求の範囲の精神または範囲から逸脱せずに、ここに記載された好ましい実施の形態に対して様々な改変が行えることが当業者に明白になるであろう。

50

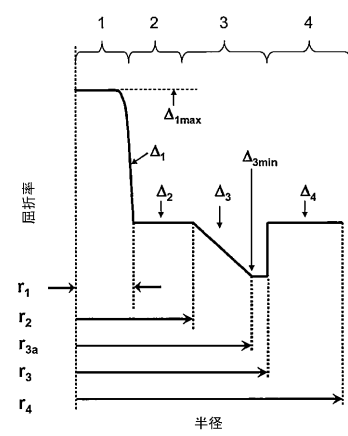
【図 1 A】



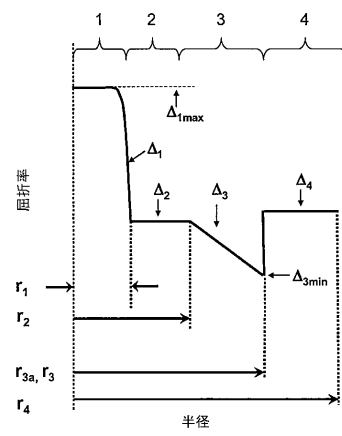
【図 1 B】



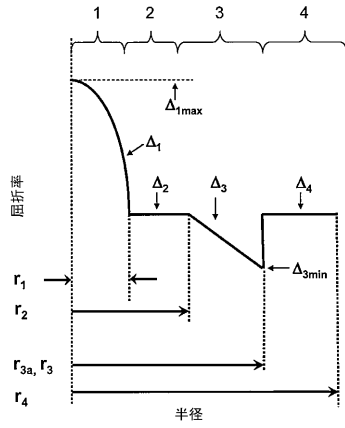
【図 1 C】



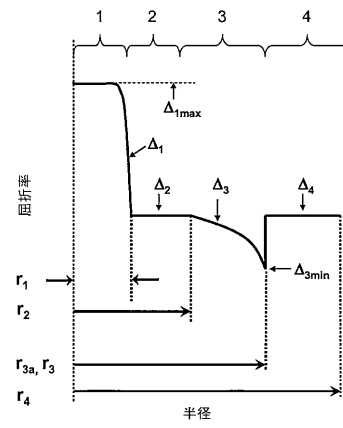
【図 1 D】



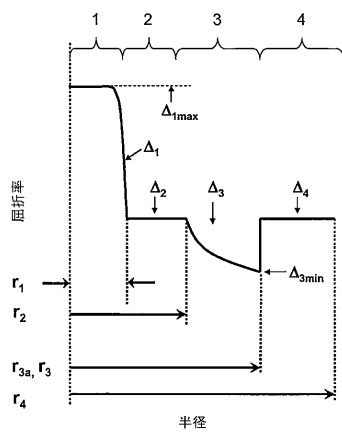
【図 1 E】



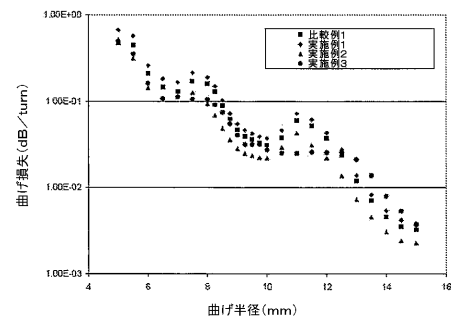
【図 1 F】



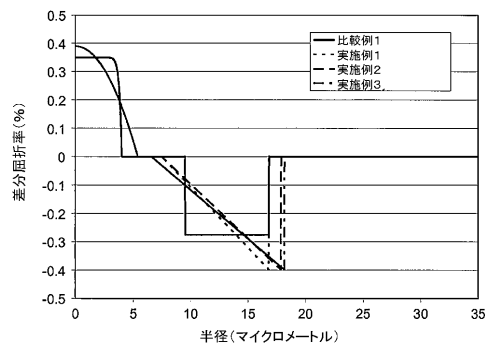
【図 1 G】



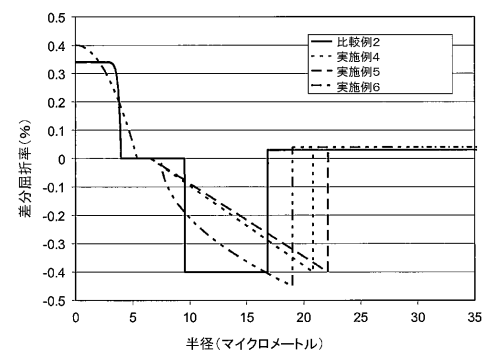
【図 3】



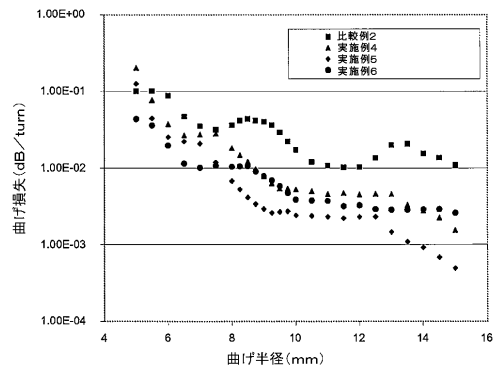
【図 2】



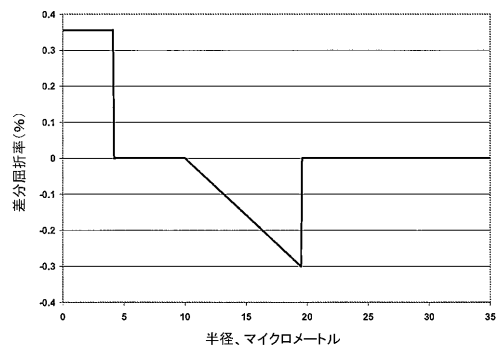
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

- (72)発明者 ブックバインダー, ダナ クレイグ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 3 0 コーニング デイヴィス ロード 2 6 7 5
- (72)発明者 ダウズ, スティーヴン ブルース
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 3 0 コーニング イースト フォース ストリート
4
- (72)発明者 リー, ミン - ジュン
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 4 5 ホースヘッズ アンブロス ドライヴ 1 0
- (72)発明者 タンドン, ブシュカー
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 7 0 ペインテッド ポスト ディアー クレスト ド
ライヴ 3 4 0 5
- (72)発明者 ワン, ジー
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 7 0 ペインテッド ポスト コンホクトン ロード
3 4 1 2

審査官 佐藤 宙子

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2 0 1 1 / 0 0 5 8 7 8 0 (U S , A 1)
特開2 0 0 8 - 0 5 8 6 6 3 (J P , A)
特開2 0 1 3 - 0 8 8 8 1 8 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B名)

G 0 2 B 6 / 0 2 - 6 / 0 3 6 , 5 0 1
G 0 2 B 6 / 1 0
G 0 2 B 6 / 4 4 - 6 / 4 4 , 3 4 6