

【公報種別】特許法第 17 条の 2 の規定による補正の掲載

【部門区分】第 3 部門第 1 区分

【発行日】平成24年3月8日(2012.3.8)

【公表番号】特表2010-526749(P2010-526749A)

【公表日】平成22年8月5日(2010.8.5)

【年通号数】公開・登録公報2010-031

【出願番号】特願2010-507393(P2010-507393)

【国際特許分類】

C 0 3 C 13/04 (2006.01)

G 0 2 B 6/036 (2006.01)

【F I】

C 0 3 C 13/04

G 0 2 B 6/22

【手続補正書】

【提出日】平成23年4月15日(2011.4.15)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【発明の名称】アルカリ金属酸化物を含む光ファイバー

【関連出願の相互参照】

【0 0 0 1】

本出願は 2 0 0 7 年 5 月 7 日付け、米国特許仮出願番号 6 0 / 9 2 8 , 0 5 2 の利益および優先権を主張するものであり、前記引用により前記出願の内容がすべてそのまま本出願に組み込まれたものとする。

【技術分野】

【0 0 0 2】

本発明はアルカリ金属酸化物をドーブした光ファイバーとその製造方法及び装置に関するものである。

【背景技術】

【0 0 0 3】

減衰というのは光ファイバーを制約する主要な特性である。例えば、光ファイバーの損失は光ファイバー増幅器間の限界距離を設定する上で重要である。このことは、光ファイバー増幅器がシステムの信頼性の主要因であるのみならずシステム・コストの大きな部分を占める海底用途等、長距離及び超長距離ネットワークにとって特に重要である。そのため、減衰を抑制した光ファイバーの開発に多大な商業的関心が寄せられている。

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 4】

本発明の広義の態様によれば、石英系コア及びクラッドを有して成る光ファイバーが開示される。前記コアは平均濃度約 1 0 ~ 1 0 0 0 0 重量 p p m の  $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $Li_2O$ 、 $Rb_2O$ 、 $Cs_2O$ 、及びこれらの組合せから成る群から選択されるアルカリ金属酸化物を含んでいる。前記コアを囲む前記クラッドは、該コアより低い屈折率デルタ%を有する少なくとも第 1 環状領域及び該第 1 環状領域より低い屈折率デルタ%を有する第 2 環状領域を有し成ることが好ましい。また、第 2 環状領域はランダムに分布した空隙、フッ素、又はその両方を含んで成ることが好ましい。本明細書においては、孔と空隙とは同

一意味で使用される。第2環状領域は前記コアから（第1環状領域により）少なくとも5  $\mu\text{m}$  離間していることが好ましく、少なくとも10  $\mu\text{m}$  離間していることがより好ましい。また、第2環状領域は、該領域より高い屈折率デルタを有する第3環状クラッドに囲まれて成ることが好ましい。第2環状領域は、前記コアより少なくとも0.1デルタ%、より好ましくは少なくとも0.2デルタ%低い屈折率デルタを有すると共に、第1及び第3環状領域より低い屈折率デルタを有して成ることが好ましい。好ましい実施の形態によっては、前記コアにおけるアルカリ金属の濃度が約50～1000 ppmである。前記第2環状領域が複数のランダムに分布した空隙を有する実施の形態においては、空隙の平均直径が約2000 nm未満であることが好ましい。

#### 【0005】

好ましい実施の形態において、前記コアは基本的にゲルマニウムを含んでいないことが好ましく、全く含んでいないことがより好ましい。この様にして、前記コアに直接隣接していることが好ましい第1環状領域にフッ素をドーブすることにより、前記コアの屈折率が周囲の領域に対し正になる。第2環状領域をランダムに分布した空隙、フッ素、又はその両方を含んで成るよう形成することが好ましい。好ましい実施の形態において、前記クラッドがフッ素ドーブ石英から成る第3環状領域を構成し、第3環状領域が第2環状領域を囲んでいる。本発明の1つの態様によれば、中心線から半径 $R_1$ に広がるガラスコア、前記コアを接触包囲するガラス・クラッドであって、(i)半径 $R_1$ から半径 $R_2$ に広がり、放射幅 $W_2 = R_2 - R_1$ を有する第1環状領域、(ii)前記半径 $R_2$ から半径 $R_3$ に広がり、放射幅 $W_3 = R_3 - R_2$ を有する第2環状領域、及び(iii)前記半径 $R_3$ から最外ガラス半径 $R_4$ に広がる第3環状領域を有して成る光ファイバーが提供される。前記コアが第3環状領域に対し最大相対屈折率、 $1_{MAX}$ 、を有し、 $0.2\% < 1_{MAX} < 0.6\%$ であることが好ましい。第1環状クラッド領域の屈折率デルタ $| \Delta_2(r) |$ が、 $| \Delta_2(r) | < 0.05\%$ であることが好ましい。第2環状領域が第3環状領域に対し最小相対屈折率、 $3_{MIN}$ 、を有し、 $3_{MIN} < -0.1\%$ であることが好ましく、 $3_{MIN} < -0.3\%$ であることがより好ましい。即ち、本実施の形態においては、 $1_{MAX} > 2_{MAX} > 3_{MIN}$ 及び $1_{MAX} > 2_{MIN} > 3_{MIN}$ である。本実施の形態のコアとクラッドとによりケーブル・カットオフが1500 nm未満、1550 nmにおける減衰が0.18 dB/km未満、並びに1550 nmにおける有効面積が72  $\mu\text{m}^2$  超、好ましくは75  $\mu\text{m}^2$  超、更に好ましくは85  $\mu\text{m}^2$  超、最も好ましくは95  $\mu\text{m}^2$  超の光ファイバーが提供される。第2環状領域はフッ素ドーブ石英ガラス、ランダムに分布した空隙を有する石英ガラス、あるいはフッ素ドーブ石英ガラスであってランダムに分布した空隙を有するものから成ることができる。

#### 【0006】

また、第2環状領域はランダムに分布した空（真空）またはガスを充填した複数の閉孔を有する石英ガラスから成ることができ、前記閉孔により光が内部に反射されコアに沿って導波される。前記孔には窒素とヘリウムの混合ガスを充填することが好ましい。このような孔により、例えば純石英と比較して有効屈折率を低くすることができる。第2環状領域20は、本明細書において以下に規定するプロファイル体積積 $V_3$ を有している。

#### 【数1】

$$2 \int_{R2}^{R3} \Delta_3(r) r dr$$

#### 【0007】

$1_{MAX} < 0.6\%$ 、 $2_{MIN} > -0.05\%$ 、 $2_{MAX} < 0.05\%$ 、 $3_{MIN} < -0.1\%$ 、より好ましくは $-0.25\%$ 未満、並びに第2環状領域の最大プロファイル体積の絶対値 $|V_3|$ が20% -  $\mu\text{m}^2$ であることが好ましい。また、 $3_{MIN} < -0.45\%$ であることがより好ましく、場合により $3_{MIN} = -0.7\%$ とすることができる。

#### 【0008】

一部の実施の形態においては、 $20\% - \mu\text{m}^2 < |V_3| < 80\% - \mu\text{m}^2$ 。別の実施の形態においては、 $30\% - \mu\text{m}^2 < |V_3| < 70\% - \mu\text{m}^2$ であり、更に別の実施の形態においては、 $40\% - \mu\text{m}^2 < |V_3| < 60\% - \mu\text{m}^2$ である。

#### 【0009】

ある場合には、 $0.2\% < {}_1M_{AX} < 0.6\%$ であることが好ましく、別の場合には、 $0.20\% < {}_1M_{AX} < 0.40\%$ であることが好ましい。

#### 【0010】

一部の実施の形態においては、 $W_3 > 1.0\mu\text{m}$ であり、別の実施の形態においては、 $1.0 < W_3 < 10.0\mu\text{m}$ であり、更に別の実施の形態においては、 $W_3 < 8.0\mu\text{m}$ であり、また $2.0 < W_3 < 4.0\mu\text{m}$ である実施の形態もある。

#### 【0011】

断面積とパーセントで示すデルタ $V_{3min}$ の絶対値との積（単位： $\% - \mu\text{m}^2$ ）である第2環状領域のプロファイル体積を適切に選択することにより曲げ損失を改善することができる。第2環状領域のプロファイル体積は実際のファイバー・カットオフ波長およびケーブル・カットオフ波長に影響を与える。ケーブル・カットオフ波長を $1500\text{nm}$ 未満とするためには、第2環状領域のプロファイル体積の絶対値である $|V_3|$ を $80\% - \mu\text{m}^2$ 未満とする必要がある。

#### 【0012】

本明細書に開示したファイバーの設計値を使用することにより、ケーブル・カットオフが $1300\text{nm}$ 未満、より好ましくは $1260\text{nm}$ 未満、 $1550\text{nm}$ における波長分散が約 $13 \sim 19\text{ps/nm/km}$ 、より好ましくは $14 \sim 18\text{ps/nm/km}$ 、零分散波長が約 $1420\text{nm}$ 未満、より好ましくは約 $1350\text{nm}$ 未満、最も好ましくは約 $1324\text{nm}$ 未満、 $1310\text{nm}$ における分散スロープが $0.092\text{ps/nm}^2/\text{km}$ 未満、より好ましくは約 $0.090\text{ps/nm}^2/\text{km}$ 以下、及び $1550\text{nm}$ における分散スロープが約 $0.07\text{ps/nm}^2/\text{km}$ 未満のファイバーが可能である。

#### 【0013】

また、本明細書に開示した光ファイバーは、 $1550\text{nm}$ における有効面積が $70\mu\text{m}^2$ 超、好ましくは $75\mu\text{m}^2$ 超、更に好ましくは $85\mu\text{m}^2$ 超、最も好ましくは $95\mu\text{m}^2$ 超、 $1550\text{nm}$ における減衰が $0.18\text{dB/km}$ 未満、好ましくは $0.175\text{dB/km}$ 未満、最も好ましくは $0.17\text{dB/km}$ 未満の特性を有することができる。また、このようなファイバーは $1550\text{nm}$ における $15\text{mm}$ 曲げ損失が $5\text{dB/巻き}$ 未満、 $20\text{mm}$ 曲げ損失が $1\text{dB/巻き}$ 未満、好ましくは $0.5\text{dB/巻き}$ 未満、より好ましくは $0.1\text{dB/巻き}$ 未満、及び $30\text{mm}$ 曲げ損失が $0.04\text{dB/巻き}$ 未満の特性を有することができる。

#### 【0014】

前記コアが平均濃度約 $50 \sim 500$ 重量ppm、より好ましくは約 $100 \sim 300$ 重量ppmのアルカリ金属酸化物を含んでいることが好ましい。前記ファイバー・コアが基本的にゲルマニウムを含んでいないことが好ましく、全く含んでいないことがより好ましい。コアはフッ素を含有することができ、一部の実施の形態において、フッ素の平均濃度がアルカリ金属酸化物の平均濃度より高いことが好ましい。前記光ファイバーのコア及びクラッドは更に塩素を含有することができ、一部の好ましい実施の形態において、前記コアにおける塩素の平均濃度がアルカリ金属酸化物の平均濃度より高いことが好ましい。本明細書において、平均濃度とはコア全体の平均濃度を意味する。従って、例えば、コアの内側半分が $300\text{ppm}$ の $\text{K}_2\text{O}$ を含有し、外側半分が $400\text{ppm}$ の $\text{K}_2\text{O}$ を含有している場合、そのコアの $\text{K}_2\text{O}$ の平均濃度は $350$ 重量ppmとなる。 $\text{K}_2\text{O}$ は本発明に従ってドーピングする好ましいアルカリ金属酸化物である。

#### 【0015】

前記ファイバーのコアは平均濃度約 $750$ 重量ppmの塩素を含んでいることが好ましい。前記クラッドは石英系クラッドであり、コアを囲み、好ましくは前記コアに直接隣接していることが好ましい。前記クラッドは $10000\text{ppm}$ を超える量の塩素を含んでい

ることが好ましい。前記コアは基本的にゲルマニウムを含んでいないことが好ましく、全く含んでいないことがより好ましい。

【0016】

好ましい実施の形態において、前記ファイバーのコアが100ppm未満の塩素を含有する中心線に沿った第1領域、及び前記第1領域を囲み、100ppmを超える塩素を含有する第2コア領域を有している。また、前記第1領域の最大塩素含有量が前記第2領域の最小塩素含有量より多いことが好ましい。

【0017】

ドーパントとしてゲルマニウムを含まない実施の形態において、コアにおける塩素の平均濃度が500ppm超であることが好ましく、750ppm超であることがより好ましく、1000ppm超であることが更に好ましい。前記コアにおけるフッ素の平均濃度が500ppm超であることが好ましく、750ppm超であることがより好ましく、1000ppm超であることが更に好ましく、約1500ppm超であることが最も好ましい。

【0018】

本明細書に開示したファイバーの設計値を使用することにより、1310nmにおける減衰が約0.30dB/km未満、1550nmにおける減衰が約0.18dB/km未満、好ましくは約0.175dB/km、より好ましくは約0.17dB/km未満の光ファイバーを製造することができる。

【0019】

前記光ファイバーのコア及びクラッドの両方がアルカリ金属酸化物ドーパントを含んでいることが好ましい。前記光ファイバーは少なくとも1つのコア・セグメントを有しているが、このことは重要でなく、多数のコア・セグメントを有することができる。

【0020】

前記光ファイバー・コアのOH含有量が20ppb未満であることが好ましい。

【0021】

本発明の更なる特徴および効果は以下の詳細な説明に記載されており、その一部は当業者にとって明らかであり、また以下の詳細な説明、特許請求の範囲、および添付図面を含む本明細書に記載の本発明を実施することにより認識できる。

【0022】

前記概要説明および以下の詳細な説明は本発明の実施の形態を説明するものであり、本発明の本質および特徴を理解するための要旨あるいは構成の説明を意図したものである。添付図面は本発明の理解を深めるためのものであり、本明細書の一部を構成するものである。本発明の各種実施の形態が図面に示されており、その説明と共に本発明の原理および動作を説明するものである。可能な限り、同一機能には同一符号が付してある。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】本発明によるステップ・インデックス・ファイバーの屈折率プロファイル。

【図2】ガラスストの堆積方法を示す図。

【図3】ガラス管にアルカリ金属酸化物をドーブする方法を示す図。

【図4】ガラスロッドの線引き方法を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0024】

本発明は低損失光ファイバー及びその製造方法に関するものである。具体的には、本発明はアルカリ金属酸化物ドーパントをドーブした光ファイバー、並びに前記光ファイバー及びその母材の製造方法に関するものである。本明細書において、以下の用語は以下の意味を有する。

【0025】

- モードフィールド径：下式で表されるシングルモード光ファイバー端面における光電力。

## 【数 2】

$$2\omega_0 = (\lambda/\pi)[2 \int I(\Phi) \sin \Phi \cos \Phi d\Phi] / \int I(\Phi) \sin^3 \Phi \cos \Phi d\Phi^{1/2} \quad (1)$$

## 【0026】

ここで、 $2\omega_0$  はモードフィールド径（従って  $\omega_0$  はモードフィールド半径）、 $\lambda$  は光の平均波長、 $\Phi$  は放射パターンの中心に対する角度であり、 $0^\circ \sim 90^\circ$  の積分が好ましい。モードフィールド径は、例えば、試験手順、ANSI/TIA/EIA-455-191-A-2001に従って測定できる。

- 有効面積：は下式で表される面積

## 【数 3】

$$A_{eff} = 2\pi \left( \int_0^\infty E^2 r dr \right)^2 / \left( \int_0^\infty E^4 r dr \right) \quad (2)$$

## 【0027】

ここで、積分限界は  $0 \sim \infty$  であり、 $E$  は伝搬光の電界である。

## 【0028】

ケーブル化カットオフ波長、又は“ケーブル化カットオフ”はケーブル環境において受ける厳しい曲げおよび機械的圧力により、実測ファイバー・カットオフより低くなる。ケーブル化カットオフは、例えば、EIA-455-170、Cable Cutoff Wavelength of Single-mode Fiber by Transmitted Power、即ち“FOTP-170”に記載されている22m試験により測定できる。本明細書において、ケーブル・カットオフとはEIA-455、Fiber Optic Test Procedureに記載の試験による値を意味する。

## 【0029】

- 相対屈折率：等式  $n_i = (n_i^2 - n_c^2) / 2n_i^2$  で定義される値。ここで、 $n_i$  は屈折率プロファイル・セグメント  $i$  の最大屈折率であり、 $n_c$  は外部クラッド層の屈折率である。一般に、相対屈折率はパーセントで表され、本明細書においては、例えば、デルタ・パーセント、あるいは%で示される。

## 【0030】

- コア：クラッドに対し一段高い屈折率を有する光ファイバー部分であり、送信光電力の大部分が伝搬する部分。コアは1つ以上のセグメントから成っていてよい。それぞれのコア・セグメントは純石英より大きい、等しい、あるいは小さい屈折率を有していてもよい。

## 【0031】

- ppm：別に定めのない限り、重量パーミリアンを意味する。

## 【0032】

図1に示すように、好ましい実施の形態において、本明細書に開示した光ファイバーはコアおよびそのコアを囲むクラッドを有していることが好ましい。クラッドはコアを接触包囲していることが好ましい。コアは基本的にゲルマニウムを含んでいないことが好ましく、全く含んでいないことがより好ましい。一部の好ましい実施の形態において、図1、及び階段形状、円形、アルファ形状、あるいは三角形状のような図1の例示プロファイルの変形例に示すように、コアが1つのコア・セグメント、即ち中央コア・セグメント14から成り、クラッド16がコアを接触包囲して成り、コアがクラッドに対し正の屈折率  $n_1(r)$  を有している。別の好ましい実施の形態において、コアが中央コア・セグメント、中央コア・セグメントを接触包囲している第1環状コア・セグメント等の多数のコア・セグメントから成り、クラッドが第1環状コア・セグメントを接触包囲して成り、中央コア・セグメントがクラッドに対し負でない、好ましくは正の相対屈折率  $n_1\%(r)$  を有し、第1環状コア・セグメントの純石英がクラッドに対し負でない、好ましくは正の相対屈折率  $n_2\%(r)$  を有している。

## 【0033】

図1の実施の形態において、コア・セグメント14が光ファイバーの中心から約2～8

$\mu\text{m}$ 、好ましくは約  $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 、最も好ましくは  $3.5 \sim 4.5 \mu\text{m}$  広がって成り、クラッド 16 が前記コアの外半径から光ファイバーの最外半径に広がっている。図 1 に示すように、好ましい実施の形態においては、少なくとも屈折率  $n_1$  を有する第 1 コア領域 14 A 及び  $n_1$  より小さい屈折率デルタを有するクラッド 16 が用いられている。コア・セグメント 14 全体の平均屈折率は約  $0.1\% \sim 0.5\%$  であることが好ましく、約  $0.3\% \sim 0.4\%$  であることがより好ましい。領域 14 A の  $n_1$  の好ましい値は約  $0.25 \sim 0.45\%$  であり、約  $0.3 \sim 0.35\%$  であることがより好ましい。領域 14 A は光ファイバーの中心線を横断してスロープが連続してもよく、あるいは任意としてコア領域 14 は  $n_1$  より大きい  $n_0$  を有する領域 14 B を有していてもよい。光ファイバーに沿ってコア領域 14 B を設ける場合、コア領域 14 B のピーク屈折率  $n_0$  の値は約  $0.25 \sim 0.60\%$  であることが好ましく、約  $0.36 \sim 0.46\%$  がより好ましく、コア領域 14 A より高いピーク屈折率を有していることが好ましい。従って、好ましい実施の形態において、コア・セグメント 14 はその最外部付近より光ファイバーの中心線に沿って高い屈折率を有している。

#### 【0034】

前記コアを囲むクラッド 16 は、少なくともコア 14 より低い屈折率デルタ・パーセン  $n_2$  を有する第 1 環状領域 18 と第 1 環状領域 18 の  $n_2$  より低い屈折率デルタ・パーセン  $n_3$  を有する第 2 環状領域 20 とから成っていることが好ましい。第 2 環状領域 20 はランダムに分布した空隙、フッ素、又はその両方を含んで成ることが好ましい。また、第 2 環状領域 20 は（例えば、第 1 環状領域 18 の幅によって）コアから少なくとも  $5 \mu\text{m}$ 、最も好ましくは  $10 \mu\text{m}$  離隔して成ることが好ましい。更に、第 2 環状領域 20 は  $n_4$  を有し、好ましい実施の形態において、フッ素がドーブされガラス・ファイバーの最外周部に広がっていることが好ましい、外部クラッド領域 22 に囲まれていることが好ましい。

#### 【0035】

第 2 環状領域 20 が複数のランダムに分布する空隙を有して成る実施の形態において、前記空隙、即ち、孔は非周期的に配されていることが好ましい。本明細書において“非周期的に配する”あるいは“非周期的分布”とは、断面（例えば、光ファイバーの長手方向の軸に対し垂直な断面）で見たとき、非周期的に配した孔が、孔を含む領域全体にわたりランダム又は非周期的に分布していることを意味する。ファイバーの長さ方向の異なる位置における断面はそれぞれ異なる断面孔パターンを示す、即ち、断面によって孔パターンが異なり、孔の分布及び孔の大きさが一致しない。即ち、空隙あるいは孔は非周期的であり、換言すれば、ファイバー構造体内に周期的に位置していない。これ等の孔は光ファイバーの長さ方向（即ち、長手方向軸）に平行に広げる（伸長する）ことにより、ファイバーの直径方向より軸方向に沿って長くすることができ、伝送ファイバーの一般的な長さ全体にわたり伸長することはない。

#### 【0036】

非周期的に配した孔、即ち、空隙を陥凹環状領域 20 に使用する場合、 $95\%$  超の孔、好ましくはすべての孔が  $1550 \text{ nm}$  未満、好ましくは  $775 \text{ nm}$  未満、最も好ましくは約  $390 \text{ nm}$  未満であるクラッドの平均孔サイズを示すよう形成することが望ましい。同様に、ファイバーの孔の最大径が  $7000 \text{ nm}$  未満であることが好ましく、 $2000 \text{ nm}$  未満であることがより好ましく、 $1550 \text{ nm}$  未満であることが更に好ましく、 $775 \text{ nm}$  未満であることが最も好ましい。一部の実施の形態において、ファイバー断面視、有孔環状領域が 10 以上、好ましくは 100 以上、更に好ましくは 400 以上、最も好ましくは 600 以上の孔を有している。実際、本明細書に開示した技術によって、 $10 \mu\text{m}$  未満、好ましくは  $7 \mu\text{m}$  未満の光ファイバー環状リングに  $1000$  超、更には  $2000$  超の孔を設けることができる。従って、例えば、光ファイバーの特定の好ましい実施の形態において、断面視、最大径が  $1550 \text{ nm}$  未満、平均径が  $775 \text{ nm}$  未満の 10 以上の孔、好ましくは 100 以上の孔を設けることができる。一部の実施の形態において、非周期的に配した孔の平均径が  $500 \text{ nm}$ 、好ましくは  $300 \text{ nm}$ 、より好ましくは  $5 \text{ nm}$  超  $200$

n m未満である。別の実施の形態において、本明細書に開示したファイバーが1 0 0 0未満の孔を有し、更に別の実施の形態において、所定のファイバー垂直断面の孔の合計が1 0 超5 0 0未満である。ランダムに配した空隙を有する実施の形態において、空隙占有率が約1 ~ 1 0 パーセントであることが好ましく、1 . 5 ~ 7 . 5 パーセントであることがより好ましい。本明細書において、“空隙占有率”とは、ファイバー断面視、ランダムに分布する空隙を有する領域（例えば領域2 0）における空隙の全面積をその領域の面積で除した割合を意味する。勿論、一部の実施の形態において、ファイバーはこれ等を組み合わせた特性を示す。従って、例えば、特定の好ましい実施の形態において、光ファイバーは、断面において、最大径が1 5 5 0 n m未満、平均径が7 7 5 n mの1 0 超の孔、好ましくは1 0 0 超3 0 0未満の孔を示す。一部の実施の形態において、非周期分布孔の平均径が5 0 0 n m未満であり、好ましくは3 0 0 n m未満であり、更に好ましくは5 n m超2 0 0 n mである。孔の数、平均径、最大径、および合計空隙面積割合はすべて、倍率約8 0 0 倍の走査型電子顕微鏡及びImage Pro（米国、メリーランド州、シルバースプリング所在のMedia Cybernetics社製）のような画像解析ソフトを活用することにより算出できる。このようにランダムに分布した空隙には、アルゴン、窒素、クリプトン、二酸化炭素、二酸化硫黄、酸素のような気体を一種以上充填することも、実質的に気体含まない真空とすることもできる。気体の存在の有無に関わらず、有孔領域の屈折率は孔の存在によって低下する。これ等の孔はランダム、即ち、非周期的に配することも周期的に配することもできる。一部の実施の形態において、複数の孔が非周期的に配された複数の孔と周期的に配された複数の孔とから成っている。前記の代わりに、あるいは前記に加え、有孔領域のガラスを（例えば、フッ素により）ダウンドープするか一方又は両方の包囲領域を（例えば、酸化ゲルマニウムにより）アップドープすることにより、前記陥凹屈折率領域を設けることができる。

#### 【0 0 3 7】

領域2 0は圧密ガラスブランク材に気体を閉じ込めるのに有効な母材圧密条件を用いる方法により圧密ガラス光ファイバー母材に空隙を形成することにより作製できる。空隙を除去するのではなく、前記母材を使用して空隙、即ち、孔を有する光ファイバーを形成する。本明細書において、孔の直径とは光ファイバーをその中心軸を横断する垂直断面で見たとき、終端が石英内部表面に配され孔を画成する最も長い線分を意味する。光ファイバーにおける微細構造領域の利用及び/又は形成方法の詳細は、米国特許出願番号1 1 / 5 8 3 , 0 9 8（出願日2 0 0 6年1 0月1 8日）、米国仮出願番号6 0 / 8 1 7 , 8 6 3（出願日2 0 0 6年6月3 0日）、6 0 / 8 1 7 , 7 2 1（出願日2 0 0 6年6月3 0日）、6 0 / 8 4 1 , 4 5 8（出願日2 0 0 6年8月3 1日）、6 0 / 8 4 1 , 4 9 0（出願日2 0 0 6年8月3 1日）、及び6 0 / 8 7 9 , 1 6 4（出願日2 0 0 7年1月8日）に記載されている。前記出願はすべてコーニング社に譲渡されたものであり、前記引用によりすべて本出願に組み込まれたものとする。

#### 【0 0 3 8】

本明細書に開示した光ファイバーはコア及び/又はクラッドの屈折率を調整するための酸化ゲルマニウム又はフッ素を含有していてもいなくてもよいが、環状領域2 0にはこれ等のドーパントは使用されず、代わりに孔（及び、孔に配される一種または複数種の気体）を使用して光がコアに沿って導波されるよう調整することができる。環状領域2 0がランダムに分布した空隙を有している場合、この領域は非ドープ（ゲルマニウム又はフッ素不使用）石英から成ることができ、ドーパントの使用を完全に避けることができると共に有孔領域の屈折率を低下させることができる。あるいは、環状領域2 0は、例えば、複数の孔を有するフッ素ドープ石英のようにランダムに分布した空隙及びドープ石英の両方から成ることもできる。

#### 【0 0 3 9】

コア領域は、平均濃度約1 0 ~ 1 0 0 0重量ppmの $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $Li_2O$ 、 $Rb_2O$ 、 $Cs_2O$ 、及びこれらの組合せから成る群から選択されるアルカリ金属酸化物（ $K_2O$ が最も好ましい）を含んでいることが好ましい。また、前記コアは塩素及びフッ素

を含んでいることが好ましい。更に、前記コアは基本的にゲルマニウムを含んでいないことが好ましく、全く含んでいないことがより好ましい。前記コアにおけるフッ素濃度がアルカリ金属酸化物の平均値より高いことが好ましく、塩素の平均値がアルカリ金属酸化物の平均値より高いことが好ましい。前記ファイバーは前記コアを囲む、あるいは一部の実施の形態においては接触包囲する、フッ素をドーブした石英系クラッド（例えば、環状領域 18 及び 22）を有していることが好ましい。前記第 2 環状領域が前記第 1 環状領域より少なくとも 0.1 デルタ・パーセント、好ましくは少なくとも 0.2 デルタ・パーセント低い屈折率デルタを示すことが好ましい。また前記第 2 環状領域の屈折率デルタが前記第 1 および第 3 領域の屈折率デルタより低いことが好ましい。

#### 【0040】

一部の好ましい実施の形態において、前記コア領域がコアの中心線に沿って（約 1  $\mu\text{m}$  に広がる）好ましくは塩素濃度がコアの外部領域（即ち、約 1  $\mu\text{m}$  から約 4  $\mu\text{m}$  に広がる領域）より低い第 1 中央コア領域を有している。特に、前記中央コア領域の平均塩素濃度が 100 ppm 未満であることが好ましく、50 ppm 未満であることがより好ましい。また、前記第 1 領域を囲む前記第 2 即ち外部コア領域の平均塩素濃度が 500 ppm 超であることが好ましく、750 ppm 超であることがより好ましく、1000 ppm 超であることが更に好ましく、1500 ppm 超であることが最も好ましい。前記コア領域のピーク塩素濃度が 500 ppm 超であることが好ましく、1000 ppm 超であることが更に好ましく、1500 ppm 超であることが最も好ましい。

前記中央コア領域における平均フッ素濃度が 500 ppm 超であることが好ましく、750 ppm 超であることがより好ましく、1000 ppm 超であることが最も好ましい。同様に、前記第 1 領域を囲む前記第 2 即ち外部コア領域の平均フッ素濃度が 500 ppm 超であることが好ましく、750 ppm 超であることがより好ましく、1000 ppm 超であることが最も好ましい。

#### 【0041】

コア領域全体の平均フッ素濃度が 500 ppm 超であることが好ましく、750 ppm 超であることがより好ましく、1000 ppm 超であることが最も好ましく、5000 ppm 未満であることが好ましく、4000 ppm 未満であることがより好ましい。特に重要ではないが、本実施の形態において、第 2 コア領域のピーク塩素濃度が前記第 2 領域のピーク塩素濃度より高い。前記コア領域の平均塩素濃度及び平均フッ素濃度が約 500 ppm 超であることが好ましく、約 750 ppm 超であることがより好ましく、約 1000 ppm 超であることが最も好ましい。

#### 【0042】

一部の好ましい実施の形態において、本明細書に開示した光ファイバーが 1 つのコア・セグメント、即ち中央コア・セグメント 14 とこの中央コア・セグメントを接触包囲するクラッド 16 とから成り、このクラッドが純石英に対し負の屈折率を有し、前記コアがフッ素、並びにピーク濃度が 20 ~ 700 ppm、より好ましくは 50 ~ 500 ppm、更に好ましくは 100 ~ 400 ppm である、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$ 、及びこれらの組合せから成る群から選択されるアルカリ金属酸化物を含んでいる。

#### 【0043】

前記ファイバーのコア領域 14 A が（クラッドに対し）0.2 ~ 0.5 %、好ましくは 0.3 ~ 0.4 % のピーク相対屈折率デルタ、 $\Delta n_{\text{MAX}}$  を有している。前記光ファイバーは 90 重量 % 超、好ましくは 95 重量 % 以上の  $\text{SiO}_2$  を含んでいる。

#### 【0044】

図 1 の実施の形態において、ファイバーがクラッド 16 に囲まれた 1 つのコア・セグメント 14 を有している。アルカリ金属酸化物濃度が半径に応じて変化することが好ましい。前記アルカリ金属酸化物濃度がファイバーの中心線から少なくとも半径の特定の部分まで、半径に比例して低下することが好ましい。図 1 に示すように、前記ファイバーのコア領域 14 は一般に階段形状を成すが、円形、アルファ形状、あるいは三角形状を成すこと



もできる。

【0045】

本発明の実施の形態において、図1に示すような光ファイバーの屈折率プロファイルを調整することにより、零分散波長  $\lambda_0$  が1420nm未満、好ましくは1350nm未満、より好ましくは1324nm未満、最も好ましくは約1280nm～1324nm、1310nmにおける分散スロープが約0.09ps/nm<sup>2</sup>/km未満、1550nmにおける分散スロープが約0.07ps/nm<sup>2</sup>/km未満、好ましくは約0.065ps/nm<sup>2</sup>/km未満、最も好ましくは約0.06ps/nm<sup>2</sup>/km未満、及び1550nmにおける総分散量が約13～19ps/nm/km、好ましくは約14～18ps/nm/kmのシングルモード・ファイバーが得られる。しかし、別の屈折率プロファイルを用いて同様の特性を得ることもできる。前記光ファイバーのケーブル・カットオフ波長が約1300nm未満であることが好ましく、約1260nm未満であることがより好ましい。また、前記光ファイバーの1550nmにおける有効面積が約70μm<sup>2</sup>超であることが好ましく、約75μm<sup>2</sup>超であることがより好ましい。前記光ファイバーのコア径が約3μm超であることが好ましく、約3μm～5μmであることがより好ましく、1550nmにおけるモードフィールド径が約9.5μm超であることが好ましく、約10μm～11μmであることがより好ましい。本発明に従ってアルカリ金属酸化物を含めることにより、1310nmにおける減衰が約0.3dB/km未満、1550nmにおける減衰が約0.18dB/km未満、より好ましくは0.175dB/km未満、最も好ましくは0.17dB/km未満の光ファイバーを製造することができる。本発明の好ましい実施の形態において、例えば、実施例9～12に示すように、1550nmにおける減衰が0.18dB/km未満、より好ましくは0.17dB/km未満、1550nmにおける分散/減衰が80ps/nm/dB超、より好ましくは90ps/nm/dB超の光ファイバーがもたらされる。一部の好ましい実施の形態において、1550nmにおける分散/減衰が約80～110ps/nm/dBであり、より好ましくは80～100ps/nm/dBである。これ等の実施の形態において、ファイバーの分散が18ps/nm/km未満であることが好ましく、17ps/nm/km未満であることがより好ましい。本明細書に開示した光ファイバーの20mm径曲げ損失が1dB/巻き未満、より好ましくは0.5dB/巻き未満、最も好ましくは0.25dB/巻き未満である。

【0046】

本発明による光ファイバーの実施例を表1に示す。表1の各実施例において、第2環状クラッド領域20にランダム空隙を設けることにより、クラッド領域18及び22と比較して顕著なダウンドープ効果を得ている。領域20は平均径が200nmであるランダムに分散した空隙を有する石英ガラスから成っている。表1は本発明による各種実施例における、内部コア領域14Bの最大屈折率  $n_1$ 、コア・セグメント14の平均屈折率  $n_1$  (デルタ平均)、コア領域14の半径  $R_1$ 、第1環状クラッド領域18の屈折率  $n_2$ 、第1環状クラッド領域18の外半径、第2環状クラッド領域20の幅、及び空隙占有率を示している。すべての実施例において、コアはゲルマニウムを含まず、クラッドの領域18及び22はフッ素ドープ石英から成り、領域20はランダムに分布した空隙を有している。従って、個々のセグメントの屈折率デルタは外部フッ素ドープ・クラッド領域22に対して算出されたものである。また、表1は各実施例の1310nmにおける分散及び分散スロープ、零分散波長、1550nmにおける分散および分散スロープ、1310nm及び1550nmにおけるモードフィールド径、1310nm及び1550nmにおける有効面積、ケーブル・カットオフ波長、及び1550nmにおける減衰も示している。

【表 1】

表 1

実施例	1	2	3	4	5	6	7	8
14B の最大 $\Delta_1$ (%)	0.38	0.38	0.36	0.35	0.42	0.34	0.30	0.28
コア 14 の平均 $\Delta_1$ (%)	0.33	0.33	0.31	0.29	0.37	0.29	0.25	0.23
コア半径 $R_1$ (um)	3.9	3.9	4.05	3.91	3.9	3.9	3.9	3.9
領域 18 の $\Delta_2$ (%)	0	0.02	0	0.03	-0.01	0.02	0.01	0.03
領域 18 の $R_2$ (um)	15.0	15.0	15.6	15.0	15.0	20.0	20.0	20.0
領域 20 の幅 (um)	7.0	7.0	7.3	7.0	7.0	4.0	4.0	5.0
領域 20 の空隙占有率 (%)	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	2.2	2.2	1.7
1310 nm における分散 (ps/nm/km)	-0.30	-0.54	0.02	-0.85	0.28	-1.25	-1.05	-2.19
1310 nm におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.084	0.084	0.085	0.087	0.083	0.085	0.089	0.088
零分散波長 (nm)	1314	1316	1310	1320	1307	1325	1322	1335
1310 nm における MFD (um)	9.2	9.4	9.5	10.0	8.7	10.1	11.1	11.5
1310 nm における有効面積 (sq. um)	64.8	67.9	69.3	75.9	59.0	76.9	91.3	97.9
1550 nm における分散 (ps/nm/km)	16.4	16.3	16.8	16.7	16.5	15.8	17.0	16.0
1550 nm におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
1550 nm における MFD (um)	10.7	11.0	11.0	11.8	10.0	12.0	13.3	14.2
1550 nm における有効面積 (sq. um)	85.2	90.5	90.9	103.5	75.5	107.3	129.9	150.3
ケーブル・カットオフ (nm)	1170	1210	1180	1225	1200	1200	1225	1230
1550 nm における減衰 (dB/km)	0.170	0.170	0.168	0.165	0.172	0.165	0.163	0.162

光ファイバーのコア及びクラッドの両方がアルカリ金属酸化物ドーパントを含んでいることが好ましい。前記アルカリ金属酸化物はK、Na、Li、Cs、又はRbの酸化物、あるいはこれらの酸化物の組合せであることが好ましく、 $K_2O$ 、 $Rb_2O$ 、 $Cs_2O$ 、又はこれらの組合せであることがより好ましく、 $K_2O$ であることが最も好ましい。アルカリ金属酸化物はコアにおいてピーク濃度を示すことが好ましい。アルカリ金属酸化物濃度が光ファイバーの半径を横断して放射状に変化することができ、場合により、ファイバーの中心線から少なくとも半径の特定の部分まで半径に比例して低下することができる。

#### 【0048】

表1から分かるように、一連の好ましい実施の形態において、環状領域20の内半径は約 $12 \sim 18 \mu m$ であり、特にコアから約 $8 \sim 14 \mu m$ 、好ましくは $9 \sim 12 \mu m$ 離間している。表1に示す一連の実施の形態において、 $1550 nm$ における有効面積は $75 \mu m^2$ 超、より好ましくは $90 \mu m^2$ 超、最も好ましくは $95 \mu m^2$ 超である。また、これ等の実施例においては、幅が約 $5 \sim 10 \mu m$ 、好ましくは約 $6 \sim 9 \mu m$ の領域20を採用している。第2の一連の好ましい実施の形態において、環状リング領域20はコアから少なくとも $10 \mu m$ 、好ましくは $12 \mu m$ 、より好ましくは $15 \mu m$ 離間している。これ等の実施の形態における領域20の幅は約 $2 \sim 8 \mu m$ であることが好ましく、約 $3 \sim 6 \mu m$ であることがより好ましい。第2の一連の好ましい実施の形態においては、 $1550 nm$ において更に大きな有効面積が得られる、即ち、 $80 \mu m^2$ 超、好ましくは $100 \mu m^2$ 超、多くの場合 $120 \mu m^2$ 超の有効面積が得られる。ここに開示したすべてのファイバーの $20 mm$ 径曲げ損失は $1 dB$ /巻き未満、好ましくは $0.5 dB$ /巻き未満、より好ましくは $0.25 dB$ /巻きである。

#### 【0049】

本発明によるファイバーの別の実施例を表2に示す。表2の各実施例において、第2環状クラッド領域20に空隙を設けずフッ素をドーピングすることによりクラッド領域18及び22と比較して顕著なダウンドープ効果を得ている。表2は内部コア・セグメント14Bの最大屈折率 $n_1$ 、コア・セグメント14の平均屈折率 $n_1$ （デルタ平均）、コア領域14の半径 $R_1$ 、第1環状クラッド領域18の屈折率 $n_2$ 、第1環状クラッド領域18の外半径、第2環状クラッド領域20の幅、第2環状クラッド領域20外半径 $R_3$ 、及び第2環状クラッド領域20の屈折率 $n_3$ を示している。すべての実施例において、コアはゲルマニウムを含まず、クラッドの領域18、20、及び22はフッ素ドーピング石英から成りランダムに分布した空隙を設けていない。従って、個々のセグメントの屈折率デルタは外部フッ素ドーピング・クラッド領域22に対して算出されたものである。また、表2は各実施例の $1310 nm$ における分散及び分散スロープ、零分散波長、 $1550 nm$ における分散および分散スロープ、 $1310 nm$ 及び $1550 nm$ におけるモードフィールド径、 $1310 nm$ 及び $1550 nm$ における有効面積、ケーブル・カットオフ波長、及び $1550 nm$ における減衰も示している。

【表 2】

表 2

実施例	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14B の最大 $\Delta_1$ (%)	0.38	0.38	0.36	0.35	0.42	0.34	0.30	0.28	0.24	0.39	0.35	0.24
コア 14 の平均 $\Delta_1$ (%)	0.329	0.329	0.309	0.294	0.365	0.289	0.249	0.23	0.189	0.334	0.294	0.189
コア半径 $R_1$ (um)	3.9	3.9	4.05	3.91	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.91	3.9
領域 18 の $\Delta_2$ (%)	0	0.02	0	0.025	-0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.005	0.025	0.03
半径 $R_2$ (um)	15	15	15.6	15	14.98	20	20	20	20	15	15	20
領域 20 の幅 (um)	7	7	7.3	7	7	4	4	5	5	3	3	3
半径 $R_3$ (um)	22	22	22.9	22	21.98	24	24	25	25	18	18	23
領域 20 の $\Delta_3$ (%)	-0.22	-0.12	-0.24	-0.26	-0.18	-0.26	-0.30	-0.37	-0.36	-0.32	-0.26	-0.46
領域 20 の体積 (%-um <sup>2</sup> )	-57.0	-31.1	-67.5	-66.0	-47.6	-45.8	-52.8	-83.3	-81.0	-31.2	-25.2	-59.3
1310 における分散 (ps/nm/km)	-0.30	-0.54	0.02	-0.85	0.28	-1.25	-1.05	-2.19	-1.90	-0.29	-0.86	-1.87
1310 におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.084	0.084	0.085	0.087	0.083	0.085	0.089	0.088	0.094	0.084	0.087	0.094
零分散波長 (nm)	1314	1316	1310	1320	1307	1325	1322	1335	1330	1313	1320	1330
1310 における MFD (um)	9.2	9.4	9.5	10.0	8.7	10.1	11.1	11.5	13.2	9.2	10.0	13.2
1310 における有効面積 (sq. um)	64.8	67.9	69.3	75.9	59.0	76.9	91.3	97.9	129.1	64.8	75.9	129.0
1550 における分散 (ps/nm/km)	16.4	16.3	16.8	16.7	16.5	15.8	17.0	16.0	17.6	16.5	16.6	17.7
1550 におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07
1550 における MFD (um)	10.7	11.0	11.0	11.8	10.0	12.0	13.3	14.2	16.7	10.7	11.8	16.6
1550 における有効面積 (sq. um)	85.2	90.5	90.9	103.5	75.5	107.3	129.9	150.3	208.1	85.1	103.6	207.3
ケーブル・カットオフ (um)	1170	1210	1180	1225	1200	1200	1225	1230	1200	1180	1226	1210
1550 における減衰 (dB/km)	0.170	0.170	0.168	0.165	0.172	0.165	0.163	0.162	0.160	0.170	0.165	0.160

表 2 から分かるように、実施の形態により、環状領域 20 の内半径は約  $12 \sim 18 \mu\text{m}$  であり、特にコアから約  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 、好ましくは  $9 \sim 12 \mu\text{m}$  離間している。これらの実施の形態において、 $1550 \text{ nm}$  における有効面積は  $75 \mu\text{m}^2$  超、より好ましくは  $90 \mu\text{m}^2$  超、最も好ましくは  $95 \mu\text{m}^2$  超である。これ等の実施例においては、幅が約  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、好ましくは約  $6 \sim 9 \mu\text{m}$  の領域 20 を採用している。第 2 の一連の好ましい実施の形態において、環状リング領域 20 はコアから少なくとも  $10 \mu\text{m}$ 、好ましくは  $12 \mu\text{m}$ 、より好ましくは  $15 \mu\text{m}$  離間している。これ等の実施の形態における領域 20 の幅は約  $2 \sim 8 \mu\text{m}$  であることが好ましく、約  $3 \sim 6 \mu\text{m}$  であることがより好ましい。第 2 の一連の好ましい実施の形態においては、 $1550 \text{ nm}$  において更に大きな有効面積が得られる、即ち、 $80 \mu\text{m}^2$  超、好ましくは  $100 \mu\text{m}^2$  超、多くの場合  $120 \mu\text{m}^2$  超の有効面積が得られる。本明細書に開示したすべてのファイバーの  $20 \text{ mm}$  径曲げ損失は  $1 \text{ dB}$  / 巻き未満、好ましくは  $0.5 \text{ dB}$  / 巻き未満、より好ましくは  $0.25 \text{ dB}$  / 巻きである。表 2 に開示したファイバーの屈折率デルタは  $-0.1$  パーセント未満、好ましくは  $-0.15$  パーセント未満、最も好ましくは  $-0.2$  パーセント未満である。また、これ等のファイバーは、プロファイル体積の絶対値  $|V_3|$  が  $20\% - \mu\text{m}^2$  超、好ましくは  $30\% - \mu\text{m}^2$  超、実施の形態によっては  $40\% - \mu\text{m}^2$  超の第 2 環状クラッド領域 20 を採用している。

#### 【0051】

本発明によるファイバーの更に別の実施例 21 ~ 29 を表 3 に示す。表 3 の各実施例において、第 1 及び外部クラッド領域 22 にフッ素をドーブし、第 2 環状クラッド領域 20 にフッ素ドーブを施すと共に / 又はランダムに分布した空隙を設けることにより、クラッド領域 18 又は 22 と比較して領域 20 に顕著なダウンドープ効果を得ている。表 3 はコア・セグメント 14 の平均屈折率  $n_1$  (デルタ平均)、コア領域 14 の半径  $R_1$ 、第 1 環状クラッド領域 18 の屈折率  $n_2$  及び外部クラッド領域 22 の屈折率  $n_4$  (表 3 の実施例において、両者は実質的に等しい)、コア・セグメントのアルファ (好ましい実施の形態において、アルファは 1 超、好ましくは 4 超である)、第 1 環状クラッド領域 18 の外半径  $R^2$ 、第 2 環状領域 20 の外半径  $R^3$ 、第 2 環状領域 20 のプロファイル体積  $V^3$ 、及びコア/クラッド比 ( $R_1/R_2$ ) を示している。すべての実施例において、コアはゲルマニウム及びアルカリ金属酸化物を含んでいない。個々のセグメントの屈折率デルタは外部フッ素ドーブ・クラッド領域 22 に対して算出されたものである。実施例 21 ~ 25 の領域 20 はフッ素を含み空隙を有していない。また、表 3 は  $1310 \text{ nm}$  及び  $1550 \text{ nm}$  におけるモードフィールド径、 $1550 \text{ nm}$  における有効面積、 $1310 \text{ nm}$  における分散及び分散スロープ、零分散波長、 $1550 \text{ nm}$  における分散及び分散スロープ、 $1550 \text{ nm}$  における減衰、ケーブル・カットオフ波長、LP 11 カットオフ波長、 $10 \text{ mm}$  曲げ損失、 $15 \text{ mm}$  曲げ損失、及び  $20 \text{ mm}$  曲げ損失も示している。

【表 3】

表 3

実施例	21	22	23	24	25	26	27	28	29
コア 14 の平均 $\Delta 1$ , (%)	0.38	0.31	0.31	0.36	0.38	0.27	0.3	0.38	0.39
D2 = D4 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R1 ( $\mu\text{m}$ )	4.4	5.7	5.8	4.5	4.4	6.2	5.6	4.4	4.5
アルファ	8.74	9.2	8.36	8.4	8.24	9.31	8.53	8.82	8.43
D2 (%)	-0.34	-0.44	-0.2	-0.19	-0.21	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
R2 ( $\mu\text{m}$ )	15.0	18.1	18.3	14.4	14.5	19.0	17.5	16.1	14.7
R3 ( $\mu\text{m}$ )	19.4	22.0	25.6	19.0	22.1	21.7	20.5	18.4	16.9
領域 20 の体積 (%-sq. $\mu\text{m}$ )	-52.0	-68.8	-63.1	-32.3	-59.4	-128.5	-140.1	-93.5	-81.2
R1/R2	0.297	0.313	0.318	0.31	0.306	0.323	0.319	0.269	0.302
1310 における MFD ( $\mu\text{m}$ )	8.74	10.22	10.27	8.9	8.68	10.98	10.19	8.67	8.63
1550 における MFD ( $\mu\text{m}$ )	9.94	11.38	11.40	10.17	9.88	12.19	11.40	9.90	9.79
1550 における有効面積 (sq. $\mu\text{m}$ )	75.2	101.0	101.5	78.4	74.2	116.2	100.6	74.4	73.1
1310 における分散 (ps/nm/km)	-0.42	1.87	2.02	-0.57	-0.55	2.22	1.58	-0.76	-0.31
1310 におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.086	0.089	0.089	0.086	0.086	0.090	0.089	0.085	0.086
零分散波長 (nm)	1315	1289	1287	1317	1316	1285	1292	1319	1314
1550 における分散 (ps/nm/km)	16.3	19.2	19.4	16.2	16.2	19.8	18.9	15.9	16.5
1550 におけるスロープ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0.059	0.060	0.060	0.059	0.058	0.061	0.061	0.059	0.059
1550 における減衰 (dB/km)	0.173	0.169	0.168	0.172	0.173	0.167	0.169	0.173	0.173
ケーブル・カットオフ (nm)	1230	1395	1420	1189	1254	1446	1375	1226	1259
LP11 カットオフ (nm)	1270	1462	1500	1267	1260	1486	1405	1247	1286
10 mm 曲げ損失 (dB/turn)	0.31	0.53	0.42	0.76	0.24	0.95	0.30	0.30	0.23
15 mm 曲げ損失 (dB/turn)	0.12	0.21	0.16	0.30	0.09	0.37	0.12	0.11	0.09
20 mm 曲げ損失 (dB/turn)	0.002	0.003	0.002	0.004	0.001	0.005	0.002	0.002	0.001

表 3 から分かるように、実施の形態により、環状領域 20 がコアから約  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 、好ましくは  $9 \sim 13 \mu\text{m}$ 、一部の実施の形態において  $9 \sim 12 \mu\text{m}$  離間している。これらの実施の形態において、 $1550 \text{ nm}$  における有効面積は約  $70 \mu\text{m}^2$  超、より好ましくは  $90 \mu\text{m}^2$  超、一部の実施の形態において  $95 \mu\text{m}^2$  超である。これ等の実施例においては、幅が約  $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 、好ましくは約  $6 \sim 9 \mu\text{m}$  の領域 20 を採用している。ここに開示したすべてのファイバーの  $20 \text{ mm}$  径曲げ損失は  $1 \text{ dB/巻き未満}$ 、好ましくは  $0.5 \text{ dB/巻き未満}$ 、より好ましくは  $0.25 \text{ dB/巻き}$  である。表 3 に開示した光ファイバーは有効屈折率デルタ（平均空隙径  $200 \text{ nm}$  の空隙を有する石英ガラス領域）が 1 パーセント未満の第 2 環状領域 20 を有し、実施例 26 ~ 29 における第 2 環状領域 20 の有効屈折率デルタは  $-1.20$  パーセントである。また、これ等のファイバーは、プロファイル体積の絶対値  $|V_3|$  が  $20\% - \mu\text{m}^2$  超、好ましくは  $30\% - \mu\text{m}^2$  超、一部の実施の形態において  $40\% - \mu\text{m}^2$  超、別の実施の形態において  $60\% - \mu\text{m}^2$  超、 $80\% - \mu\text{m}^2$  超、あるいは  $100\% - \mu\text{m}^2$  超の第 2 環状クラッド領域を有している。アルカリ金属酸化物は線引き処理の段階において都合よく拡散制御できる。所定の方法によって線引き条件を変えることにより、母材全体に所望の濃度プロファイルでアルカリ金属酸化物ドーパントを分布させることができることが分かった。アルカリ金属酸化物ドーパントは半径に対して比較的直線的に拡散させることが好ましい。アルカリ金属酸化物ドーパントの拡散はドーブが行われるガラスの温度及びその持続時間にある程度依存するので、これ等の要素が線引き処理におけるアルカリ金属酸化物ドーパントの拡散を制御する上で重要な役割を果たす。線引き処理において、光ファイバー母材（及び母材から線引きされる光ファイバー）が晒される温度及びその時間は線引き速度、線引き（加熱炉）温度、及び光ファイバー母材の特定の部分が線引き炉内に存在する時間が減少し、アルカリ金属酸化物ドーパントが光ファイバー母材内、従って線引きされた光ファイバー内に拡散する距離が短くなる。これにより、クラッドに拡散するアルカリ金属酸化物ドーパントの量が減少し、光ファイバーのコアにおけるアルカリ金属酸化物の濃度の方が高くなる。逆に、線引き速度を低下させると、炉内存在時間が増大する。従って、アルカリ金属酸化物が光ファイバーのクラッドの奥まで拡散することにより、コアのアルカリ金属酸化物濃度が低下する。同様に、加熱炉の温度を上昇させると、アルカリ金属酸化物の拡散速度が上昇することによりアルカリ金属酸化物濃度が低下する。それ故、線引き速度及び加熱炉温度を利用することにより拡散、従って、線引きされた光ファイバー内におけるアルカリ金属酸化物の分布を効果的に制御できる。

#### 【0053】

従来の外付けプロセスを示す図 2 において、スートバーナー 156 によって石英スート 162 の多層膜が心棒 144 に堆積されることによりスート母材 160 が形成される。次に、形成されたスート母材 160 は通常の塩素による乾燥方法によって乾燥される。その後、乾燥処理における塩素の大部分又は全部が除去される時間及び温度において、フッ素含有化合物（例えば、 $\text{SiF}_4$ ）が存在する雰囲気中にスート母材を晒すことにより、スート母材にフッ素がドーブされる。前記母材はガラスが高いフッ素レベルでドーブされないよう約  $1100$  未満の温度でフッ素含有雰囲気中に晒される（フッ素スweep）ことが好ましい。フッ素レベルは、例えば、 $0.1 \sim 0.4$  重量%のように低いレベルであることが好ましい。その結果、フッ素（及び潜在塩素）がドーブされたスート管が固化される。

#### 【0054】

次に、固化されたガラス管にアルカリがドーブされる。例えば、図 3 において、まず、ガラス管 106 は旋盤 101（例えば、ガラス加工旋盤又は従来の改良型化学気相成長（MCVD）ガラス形成旋盤）のチャックに固定される。環状であることが好ましいアルカリ金属源化合物 110 を入れるための貯蔵タンク 108 が 2 つの首形状を成す環状歪曲体 112 を火炎加工又は溶接によって管 106 の壁に設けることにより管 106 の一端の近傍に形成されている。別の種類の貯蔵タンクも可能である。首形状を成す環状歪曲体 112 は互いに約  $2 \text{ cm}$  離間していることが好ましい。アルカリ金属の結晶化を防止するため

、管 1 0 6 及び管内部に沈着される任意の付加ガラスが基本的に塩素を含んでいないことが好ましい。本明細書において、“基本的に塩素を含んでいない”とは、塩素含有量が十分に低くアルカリ塩化物の結晶化による光損失が回避できることを意味する。そのために、塩素含有量は約 5 0 0 重量 p p m 未満であることが好ましく、約 1 0 0 重量 p p m 未満であることがより好ましく、約 5 0 重量 p p m 未満であることが最も好ましい。また、石英ガラス管 1 0 6 及びその内部に堆積される任意の付加ガラスが基本的に“水分”を含んでいてはならない。本明細書において、“水分”とは水酸基 O H を意味する。水分が約 1 3 8 3 n m における吸収ピークの原因となり、その吸収ピークが光ファイバーの動作波長域に及ぶことがある。この吸収ピークがファイバーの減衰に悪影響を及ぼす。従って、ガラスの O H 含有量をできるだけ小さくして、ウォーターピークとも呼ばれる吸収ピークを小さくすることが好ましい。ガラス管 1 0 6 の O H 含有量が約 1 0 0 重量 p p m 未満であることが好ましく、2 0 重量 p p m 未満であることがより好ましい。石英ガラス管の製造中、従来の塩素による乾燥方法によりアルカリ金属酸化物ドーパントを拡散する前の当初ガラス品が基本的に水分を含まないようにすることができる。

#### 【 0 0 5 5 】

図 3 において、アルカリ源化合物 1 1 0 が管 1 0 6 の貯蔵タンク 1 0 8 に導入され、熱源 1 1 4 によって加熱され、管 1 0 6 が回転するにつれ気化する。酸素又はキャリアガスが回転シール 1 1 8 を介して管 1 0 6 の注入口 1 1 4 から流入され、アルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 の下流にある管 1 0 6 の部分 1 2 0 が加熱されることにより、管 1 0 6 の内表面 1 2 2 へのアルカリ金属酸化物の拡散が促進される。管 1 0 6 は別のガラスロッドのような母材成分が内部に挿入されていなくことが好ましい。アルカリ金属酸化物が内表面 1 2 2 へ急速に拡散されガラスの失透が防止される十分な温度でアルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 の下流にある管 1 0 6 の部分 1 2 0 を加熱する必要がある。熱源 1 2 4 によりアルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 の下流にある管 1 0 6 の部分 1 2 0 を約 1 5 0 0 °C に加熱することが好ましく、約 1 5 0 0 °C ~ 2 0 0 0 °C に加熱することがより好ましい。熱源 1 2 4 を管 1 0 6 の部分 1 2 0 の長手方向に沿って移動させることが好ましい。アルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 は K、Na、Li、及び Rb から成る群から選択される元素を含んでいることが好ましい。アルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 は臭化物、ヨウ化物、又はフッ化物であることが好ましい。アルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 が KBr、KI、又は KNO<sub>3</sub> であることが最も好ましい。管 1 0 6 が崩壊する前に、アルカリ金属酸化物（例えば、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Li<sub>2</sub>O、Rb<sub>2</sub>O、Cs<sub>2</sub>O、又はこれらの組合せ）が管 1 0 6 の内拡散表面 1 2 2 から約 1 0 0 μm ~ 5 0 0 μm 拡散されることにより、アルカリ酸化物ドーパントガラス管が形成されることが好ましい。特に、拡散したアルカリ金属酸化物ドーパントの濃度（重量％）が半径方向に変化することが好ましい。図 3 の拡大図に示すように、ガラス品（例えば、管 1 0 6）は内側半部分 1 0 7 表面において濃度が最も高く、外側半部分 1 0 9 において低くなるようドーパントされることが好ましい。内側半部分と外側半部分との境界は管 1 0 6 の 1/2 半径厚さ位置（点線 1 1 1）である。例えば、外側半部分 1 0 9 におけるアルカリ・ドーパントのピーク濃度が内側半部分 1 0 7 のピーク濃度（重量％）の 5 0 % 未満となるよう拡散されることが好ましい。

#### 【 0 0 5 6 】

拡散処理に続き、当技術分野で周知の従来の方法（又は本明細書に記載の乾燥方法）により更に加熱して管 1 0 6 を部分崩壊させることにより、アルカリ金属酸化物が失われる可能性がある内表面積を小さくする共にアルカリ金属酸化物が拡散されたガラス層を厚くする。次に、熱源 1 2 4 により石英ガラス管 1 0 6 を加熱してアルカリ金属酸化物源化合物 1 1 0 の下流にある管 1 0 6 を崩壊させることによりアルカリ金属酸化物ドーパント固形ガラスロッド 1 3 2 を形成する。例えば、適切な熱源（例えば、トーチ）により加熱する等当技術分野で周知の従来の方法により管 1 0 6 を崩壊させることができる。次に、アルカリ金属源化合物貯蔵タンク 1 0 8 を含むガラス部分からアルカリ金属酸化物ドーパント固形ガラスロッド 1 3 2 が切り離される。

#### 【 0 0 5 7 】



崩壊したアルカリ・ドーブ棒 132 のアルカリ金属酸化物の濃度が（管 106 と同様に）半径方向に変化すると共に、内側半部分 107 に対応する部分においてアルカリ・ドーバントのピーク濃度（重量％）が最も高く、外側半部分 109 に対応する部分において低いピーク濃度を示すことが好ましい。アルカリ・ドーバントのピーク濃度がガラスロッドの中央にあり、 $1/2$  半径位置における濃度がピーク濃度の 50 % 未満であることが最も好ましく、25 % 未満であることがより好ましい。

#### 【0058】

ドーブガラスロッド 132 を再線引き炉 136 内において加熱して細径ガラスロッド 144 に線引きすることができる。その線引き処理を図 4 に示す。前記崩壊処理によって得られたアルカリドーブ・ガラスロッド 132 にガラスハンドル 130 が取り付けられ、従来の再線引き炉 136 の上部において移動式ダンウフィード支持体 134 に取り付けられる。アルカリドーブ・ガラスロッド 132 の下端に取り付け可能な犠牲ガラスロッド 138 がモータ駆動式トラクター 140 によって牽引されることにより、アルカリドーブ・ガラスロッド 132 が適切な速度で線引きされる。適切な線引き速度は  $15 \sim 23 \text{ cm/分}$  であると判明しており、センサー 142 によって検知された径によって制御される。線引き処理によって得られた細径ガラスロッド 144 の外径（ $d_1$ ）は  $3 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$  であることが好ましく、 $6 \text{ mm}$  未満であることがより好ましい。光ファイバー線引き時における細径ガラスロッド 144 のピーク  $\text{K}_2\text{O}$  濃度は、アルカリ・ドーバントの顕著な移動を補正するため、光ファイバーのコアにおける所望のピーク  $\text{K}_2\text{O}$  濃度の約 5 倍  $\sim 10$  倍であることが好ましい。例えば、光ファイバーのコアにおける所望ピーク  $\text{K}_2\text{O}$  濃度が 0.4 重量％であるとき、細径ガラスロッド 144 のピーク  $\text{K}_2\text{O}$  濃度が約 2 重量％  $\sim 4$  重量％であることが好ましい。特に、アルカリドーブ・ロッドの径を非常に小さくするとロッド中の遷移金属不純物とその悪影響が抑制されるファイバーの中心線付近に集中するため有益である。ドーブ・クラッドに大量の材料が付加された場合、ファイバーにおけるピーク濃度は細径ガラスロッドにおけるピーク濃度の  $1/100$  に低下することもある。

#### 【0059】

例えば、図 4 の細径アルカリドーブ・ガラスロッド 144 を当初ロッドとして用い、図 2 の OVD 法によりオーバークラッドとして多孔質ガラススート 162 を更に堆積することができる。追加のスート堆積を行う前に、アルカリドーブ・ガラスロッド 144 にガラスハンドルを取り付け、形成される母材の一体部分とすることができる。このハンドルにより、堆積処理により得られた石英ガラス母材を後の処理段階において支持することができる。ハンドルを取り付けたガラスロッド 144 を回転しバーナーに対し平行移動する旋盤に取り付けることができる。次に、バーナー 156 に対し数回ガラスロッド 144 を移動させることにより石英スートを含む多くの層により外部スート被膜を形成することにより、複合スート母材が形成される。回転しているガラスロッド 144 に沿ってバーナー 156 を移動させるかあるいはバーナー 156 とガラスロッド 144 とを互いに平行移動させることによって前記平行移動運動が得られる。外部スート被膜は純石英であることが好ましい複合母材 160 のコアガラスの少なくとも一部を形成する。このスート被膜の濃度は  $0.35 \text{ g/cc}$  超であることが好ましく、 $0.35 \text{ g/cc} \sim 0.5 \text{ g/cc}$  であることがより好ましい。次に、複合母材 160 を炉内において約  $1000^\circ\text{C}$  の温度で加熱する間に塩素含有ガスに晒すことにより乾燥される。次に、複合母材 160 にフッ素がドーブされる。フッ素ドーブ処理において、スートがフッ素ドーブされるのに適した温度（例えば、約  $1000^\circ\text{C}$ ）において、フッ素を含有するガスに晒すことにより母材にフッ素がドーブされることが好ましい。このようにして、光ファイバーの外部コア領域が形成される。しかし、フッ素ドーブ処理は比較的少量のフッ素（例えば、 $0.1 \sim 0.4$  重量％）をドーブするのに必要な時間だけ行われる。次に、母材 160 が適切な固化温度で加熱固化される。次に、この結果得られた透明ガラスコア母材を再度線引きして第 2 コアロッド、即ち、線引きされるファイバーのコアの少なくとも一部を有するガラスロッドを形成することができる。次に、例えば、ガラス管（ガラス管又はスート管）スリーブの第 2 コアロッドへの取付け、例えば、化学気相法によるガラススートの堆積、スリーブの取付けと

化学気相法の両方、あるいは当技術分野で周知の別の方法により、ガラス追加処理を施すことにより光ファイバーを線引きできる状態にある完全な光ファイバー母材を形成することができる。追加されるガラスはコアガラス、クラッドガラス、あるいはコアガラスとクラッドガラスの両方であってよい。また、幾つかの追加堆積処理ステップにより追加ガラスを所望の厚さにすることができる。この場合、各堆積処理ステップ終了後、スートの乾燥、フッ素ドーブ、固化、及び細径ロッドへの再線引きが行われる。コアに隣接するクラッドであることが好ましい環状クラッド領域 18 及び環状クラッド領域 22 は、ダウンドープされた光ファイバーのクラッド領域を形成するためのフッ素を用いたフラッド・ドーピング（米国特許第 4,629,485 明細書参照）により充分ダウンドープされた石英であることが好ましい。前記ドーピングはコアとクラッドとの間に、例えば、0.2% 超、より好ましくは 0.30% ~ 0.40% の相対屈折率デルタ % を得るのに充分であることが好ましい。特に、モート石英（ファイバーのクラッドに対応する付加ガラス）が堆積により第 2 ロッドに付加される各追加ステップにおいて、モート石英にフッ素がドーブされる。まず塩素含有ガスに晒すことによりモートスートが乾燥され、次に 1225 の温度で 60 ~ 120 分間フッ素含有ガス（例えば、 $\text{SiF}_4$  又は  $\text{CF}_4$ ）に晒し、好ましくはフッ素含有ガス存在下において、7 ~ 10 mm/分 の速度で（1450 ~ 1500 の）ホットゾーンに通すことにより固化される。この母材を再度線引きすることにより第 3 ロッドを形成することができ、これ等のステップ、即ち、堆積、乾燥、フッ素ドーブ、及び固化ステップを繰り返すことにより、適切な径の最終母材が得られる。領域 20 はフッ素ドーブ技術を用いても形成できるが、別の好ましい方法として、強いダウンドープメントとして機能するランダムに分布した空隙が形成される前記固化技術によって形成できる。完全な光ファイバー母材が製造された後、その母材をアルカリ金属酸化物ドーブ光ファイバーに線引きすることができる。

#### 【0060】

本明細書に開示したすべての実施の形態において、光ファイバーがクラッドの最外径を接触包囲する一次被膜及び一次被膜を接触包囲する二次被膜を有して成ることが好ましい。

#### 【0061】

本発明の精神および範囲を逸脱せずに、各種改良および変更が可能であることは当業者にとって明白である。従って、本発明は添付の特許請求の範囲およびその均等物に属する限りにおいて、かかる改良および変更を包含するものである。

#### 【符号の説明】

#### 【0062】

- |     |                |
|-----|----------------|
| 14A | 第1コア領域         |
| 14B | 内部コア領域         |
| 14  | コア領域           |
| 18  | 第1環状クラッド領域     |
| 20  | 第2環状クラッド領域     |
| 22  | 外部環状クラッド領域     |
| 106 | ガラス管           |
| 108 | 貯蔵タンク          |
| 110 | アルカリ金属源化合物     |
| 112 | 環状歪曲体          |
| 130 | ガラスハンドル        |
| 132 | アルカリドーブ・ガラスロッド |
| 136 | 再線引き炉          |
| 144 | 細径ガラスロッド       |
| 156 | バーナー           |
| 160 | スート母材          |

#### 【手続補正2】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

$K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $Li_2O$ 、 $Rb_2O$ 、 $Cs_2O$ 、及びこれらの組合せからなる群から選択されるアルカリ金属酸化物を平均濃度約 10 ~ 10000 重量 ppm 含有する石英系コアと、

前記コアを囲む石英系クラッドであって、ランダムに分布した空隙、フッ素、又はその両方を含み、屈折率デルタが残りの領域より低く、前記コアから離間した少なくとも 1 つの環状領域を有して成るクラッドと

を有して成ることを特徴とする光ファイバー。

【請求項 2】

前記環状領域が前記コアから少なくとも 5 マイクロメートル離間していることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバー。

【請求項 3】

前記コアが基本的にゲルマニウムを含んでいないことを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバー。

【請求項 4】

ケーブル・カットオフが 1260 nm 未満、零分散波長が 1350 nm 未満、1310 nm における分散スロープが  $0.09 \text{ ps}^2/\text{nm}^2/\text{km}$  未満、1550 nm における減衰が  $0.18 \text{ dB/km}$  未満、及び 1550 nm における有効面積が  $70 \mu\text{m}^2$  超であることを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバー。

【請求項 5】

1550 nm における 20 mm マクロバンド損失が  $1 \text{ dB/巻き}$  未満であることを特徴とする請求項 4 記載の光ファイバー。

【請求項 6】

1550 nm における有効面積が  $90 \mu\text{m}^2$  超であり、減衰が  $0.17 \text{ dB/km}$  未満であることを特徴とする請求項 4 記載の光ファイバー。

【請求項 7】

前記環状領域が前記コアから少なくとも 10 マイクロメートル離間していることを特徴とする請求項 6 記載の光ファイバー。

【請求項 8】

前記クラッドが、フッ素ドープ石英から成る第 1 環状領域と、ランダムに分布した空隙を有する、前記 1 環状領域を囲む第 2 環状領域とを含むことを特徴とする請求項 1 記載の光ファイバー。

【請求項 9】

前記クラッドの第 1 環状領域が 500 ppm を超える量のフッ素ドープ石英から成り、前記 1 環状領域を囲む前記第 2 環状領域がランダムに分布した空隙を有して成ることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバー。

【請求項 10】

前記クラッドが、フッ素ドープ石英から成り前記第 2 環状領域を囲む第 3 環状領域を有して成ることを特徴とする請求項 8 記載の光ファイバー。