

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年8月18日(18.08.2022)



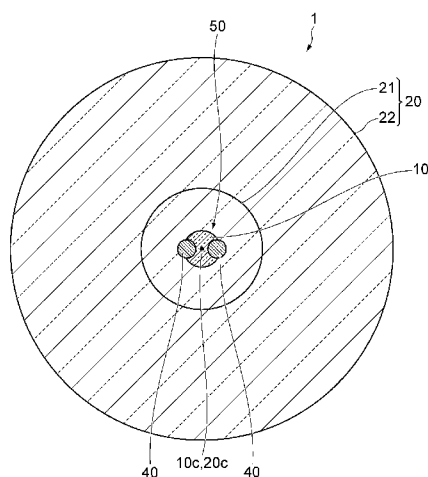
(10) 国際公開番号

WO 2022/172910 A1

- (51) 国際特許分類:
C03B 37/012 (2006.01) G02B 6/024 (2006.01)
G02B 6/02 (2006.01) G02B 6/036 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/004871
- (22) 国際出願日: 2022年2月8日(08.02.2022)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2021-020621 2021年2月12日(12.02.2021) JP
- (71) 出願人: 住友電気工業株式会社
(SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.)
[JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜
四丁目5番33号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 林 哲也(HAYASHI Tetsuya); 〒5410041
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
住友電気工業株式会社内 Osaka (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki
et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二
丁目1番1号丸の内 M Y P L A Z A
(明治安田生命ビル) 9階 創英国際特
許法律事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

(54) Title: POLARIZATION MAINTAINING OPTICAL FIBER AND POLARIZATION MAINTAINING OPTICAL FIBER MANUFACTURING METHOD

(54) 発明の名称: 偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法



(57) Abstract: This polarization maintaining optical fiber comprises: at least one polarization maintaining core; a first clad that surrounds the polarization maintaining core; and a second clad that surrounds the first clad. The polarization maintaining core has a core, and a pair of low refractive index parts each having a lower refractive index than the core. In a cross section, at least portions of the outer circumferences of the respective pair of the low refractive index parts are in contact with the core, and the outer circumference of the core is circular, except for the portions which are in contact with the low refractive index parts. The maximum value of the absolute value of residual stress in the cross section is 100 MPa or less. The mode field flattening f , in an optional wavelength in the range of 850-1625 nm, is 0.05-0.40.

(57) 要約: 偏波保持光ファイバは、少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、偏波保持コアを取り囲む第1クラッドと、第1クラッドを取り囲む第2クラッドと、を備える。偏波保持コアは、コアと、コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する。断面において、一対の低屈折率部のそれぞれの外周の少なくとも一部はコアに接すると共に、低屈折率部に接する部分を除けばコアの外周は円形である。断面内の残留応力の絶対値の最大値は100MPa以下である。モードフィールド扁平率 f が、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、0.05以上0.40以下である。



NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類 :

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称：

偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法に関する。

本出願は、2021年2月12日出願の日本出願第2021-020621号に基づく優先権を主張し、前記日本出願に記載された全ての記載内容を援用するものである。

背景技術

[0002] クラッド内部にクラッドと異なる材料からなる応力印加部 (Stress applying parts (SAP)) が設けられた偏波保持光ファイバが知られている。SAPによれば、応力誘起複屈折を引き起こすことができる。非円形のコアを用いた偏波保持光ファイバも知られている。非円形のコアによれば、ファイバ断面中の屈折率分布形状の非対称性により、偏波の向きによって実効屈折率を変えることができる。

[0003] 非特許文献1には、様々な種類の偏波保持光ファイバと、代表的な製造方法が開示されている。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1：J. Noda, K. Okamoto, and Y. Sasaki, "Polarization-maintaining fibers and their applications," Lightwave Technology, Journal of 4(8), 1071-1089 (1986)

発明の概要

[0005] 本開示の偏波保持光ファイバは、少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、備える。前記少なくとも1つ以

上の偏波保持コアは、ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する。前記光学クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低い。前記共通物理クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低い。前記偏波保持光ファイバの長手方向に直交する断面において、前記一対の低屈折率部のそれぞれの外周の少なくとも一部は前記コアに接すると共に、前記低屈折率部に接する部分を除けば前記コアの外周は円形である。前記断面内の残留応力の絶対値の最大値が100MPa以下であるか、前記偏波保持光ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスの間で熱膨張係数の差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下であるか、前記偏波保持光ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスが B_2O_3 の濃度が質量分率で1%以下又は0%のシリカガラスであるかのいずれかである。前記断面において、X軸が前記一対の低屈折率部のそれぞれの中心間を結ぶ直線に平行で前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心である原点を通る軸、Y軸が前記X軸に垂直で前記原点を通る軸である前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれにおける局所座標系で記述したニアフィールドでの強度分布を $I(X, Y)$ とすると、下式で定義されるモードフィールド扁平率 f が、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、0.05以上0.40以下である。

[数1]

$$f = 1 - \frac{\min(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}{\max(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}$$

$$D4\sigma_x = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (X - \bar{X})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$D4\sigma_y = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (Y - \bar{Y})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$\bar{X} = \frac{\iint I(X, Y) X dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

$$\bar{Y} = \frac{\iint I(X, Y) Y dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

[0006] 本開示の偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなるコアと、前記

コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法である。偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなり、円筒対称であると共に、コア部と光学クラッド部を含む光学母材を用意することと、ガラスからなり、円筒対称であると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する低屈折率部母材を用意することと、前記光学母材の中心軸に直交する断面において前記光学母材の中心軸に関して点対称であると共に、前記光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する円筒状の一対の孔を前記光学母材に形成することと、前記低屈折率部母材を前記光学母材の孔に一本ずつ挿入し、加熱により一体化して前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を形成することと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に共通物理クラッド部を付加したのち、又は付加しながら、延伸することで紡糸することと、を含む。

[0007] 本開示の偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法である。偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなり、円筒対称であるコア部と、前記コア部を取り囲み、円筒対称であると共に、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する光学クラッド部と、前記光学クラッド部を取り囲み、ガラスからなり、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有すると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する共通物理クラッド部と、を有する基本光ファイバ母材を用意することと、前記コア部の中心軸に直交する断面において前記コア部の中心軸に関して点対称であると共に、前記コア部の中心軸に対し

て平行となる中心軸を有する円筒状の一对の孔を、それぞれの少なくとも一部が前記コア部と光学クラッド部とにわたり形成されるように、前記基本光ファイバ母材に形成することと、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差及び前記共通物理クラッド部の熱膨張係数との差がそれぞれ $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、円筒対称であり、前記孔に挿入可能なように調整された外径を有する低屈折率部母材を用意することと、前記低屈折率部母材を前記基本光ファイバ母材の孔に一本ずつ挿入し、一体化したのち、又は一体化しながら、延伸することで紡糸することと、を含む。

図面の簡単な説明

- [0008] [図1]図1は、第1比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図2]図2は、第2比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図3]図3は、第3比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図4]図4は、第4比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図5]図5は、偏波クロストークと偏波モード損失との関係を示すグラフである。
- [図6]図6は、実施形態に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図7]図7は、図6に示される偏波保持光ファイバの一部拡大断面図である。
- [図8]図8は、第1変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図9]図9は、第2変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図10]図10は、第3変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図11]図11は、第4変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図12]図12は、第5変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図13]図13は、第6変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図14]図14は、第7変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図15]図15は、第8変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図16]図16は、第9変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図17]図17は、第10変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。
- [図18]図18は、第1実施形態に係る製造方法を示すフローチャートである。

。

[図19]図19は、第1実施形態の変形例に係る製造方法を示すフローチャートである。

[図20]図20は、第2実施形態に係る製造方法を示すフローチャートである

。

[図21]図21は、第2実施形態の変形例に係る製造方法を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0009] [本開示が解決しようとする課題]

SAPを備える偏波保持光ファイバでは、偏波を保持するのに十分な強さの複屈折を引き起こすために、SAPの材料の熱膨張係数を、クラッドの材料の熱膨張係数とは大きく異ならせる必要がある。このことにより、光ファイバ母材が非常に割れやすくなるので、製造が難しい。非円形のコアを備える偏波保持光ファイバでは、汎用シングルモードファイバ等の通常の標準的な光ファイバと接続した際の接続損失が高い。

[0010] 近年データセンターでは、単一偏波のレーザ光源と、偏波依存性のあるシリコンフォトニクス導波路との間の非常に短距離（例えば、10cm以上1m以下、1m以上5m以下、又は、5m以上10m以下）を、偏波を保持したまま接続する偏波保持光ファイバに対するニーズが高まっている。このようなデータセンター用途では、非常に安価で、かつ、大量の偏波保持光ファイバが必要となる。しかしながら、量産が難しく高価な従来の偏波保持光ファイバではニーズにこたえることができない。

[0011] そこで、製造しやすく、通常の光ファイバとの接続損失（言い換えると、進行方向に垂直な断面上で円対称なガウス分布状の強度分布を持つと近似できる光ビームを入出射する際の結合損失（ガウスビーム結合損失））を抑制することができると共に、短距離において伝搬中の偏波クロストークに起因する偏波モード損失を抑制するのに十分な偏波保持性能を有する偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法を提供することを目的とする。

[0012] [本開示の効果]

本開示によれば、製造しやすく、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができると共に、短距離において十分な偏波保持性能を有する偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法を提供することができる。

[0013] [本開示の実施態様の説明]

最初に本開示の実施態様を列記して説明する。本開示の実施形態に係る偏波保持光ファイバは、少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、備える。前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアは、ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一对の低屈折率部と、を有する。前記光学クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低い。前記共通物理クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低い。前記偏波保持光ファイバの長手方向に直交する断面において、前記一对の低屈折率部のそれぞれの外周の少なくとも一部は前記コアに接すると共に、前記低屈折率部に接する部分を除けば前記コアの外周は円形である。前記断面内の残留応力の絶対値の最大値が100MPa以下であるか、前記偏波保持光ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスの間で熱膨張係数の差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下であるか、前記偏波保持光ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスが B_2O_3 の濃度が質量分率で1%以下又は0%のシリカガラスであるかのいずれかである。前記断面において、X軸が前記一对の低屈折率部のそれぞれの中心間を結ぶ直線に平行で前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心である原点を通る軸、Y軸が前記X軸に垂直で前記原点を通る軸である前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれにおける局所座標系で記述したニアフィールドでの強度分布を $I(X, Y)$ とすると、下式で定義されるモードフィールド扁平率 f が、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、0.05以上0.40以下である。

[数2]

$$f = 1 - \frac{\min(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}{\max(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}$$

$$D4\sigma_x = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (X - \bar{X})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$D4\sigma_y = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (Y - \bar{Y})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$\bar{X} = \frac{\iint I(X, Y) X dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

$$\bar{Y} = \frac{\iint I(X, Y) Y dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

[0014] ここで、

[数3]

$$(\bar{X}, \bar{Y})$$

は、 $I(X, Y)$ の重心で、 $D4\sigma_x$ は X 軸方向における $D4\sigma$ ビーム幅、 $D4\sigma_y$ は Y 軸方向における $D4\sigma$ ビーム幅である。複屈折の大きさは、例えば、JIS C6872:2008「偏波面保存光ファイバビート長試験方法」に記載の方法により測定することができる。 1×10^{-5} 以上の複屈折を実現するためには $f \geq 0.05$ が必要である。ガウスビーム結合損失が 0.35 dB 以下になるためには $f \leq 0.40$ が必要であり、0.2 dB 以下になるためには $f \leq 0.30$ が必要であり、0.1 dB 以下になるためには $f \leq 0.25$ が必要である。

[0015] 上記偏波保持光ファイバでは、通常の光ファイバと接続した際の接続損失を抑制することができる。コア及びクラッドの内部には、SAP が不要なので、熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすい。短距離において十分な偏波保持性能を有する。

[0016] 上記偏波保持光ファイバでは、前記断面において、第 1 の条件を、前記一対の低屈折率部のそれぞれの外周は円形であることとし、第 2 の条件を、前

記一对の低屈折率部は、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸に関して点対称に配置されていることとし、第3の条件を、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの屈折率分布は、前記低屈折率部を除けば、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸に関して軸対称であることとし、第4の条件を、前記一对の低屈折率部のそれぞれの前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに接しない外周は、前記光学クラッドに接することとし、第5の条件を、前記一对の低屈折率部のそれぞれは、ガラスからなり、前記偏波保持光ファイバを構成する前記低屈折率部のガラスの熱膨張係数と、そのほかの部分のガラスの熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7}/K$ 以下であるか、又は、前記低屈折率部のガラスにおける B_2O_3 の濃度は質量分率で1%以下又は0%であることとし、前記第1から前記第5の条件のいずれか一つ以上を満たしてもよい。この場合、光ファイバ母材に中心軸に平行な孔あけを行い、前記孔に低屈折率ロッドを挿入し、前記光ファイバ母材と前記低屈折率ロッドを加熱一体化することで、前記光ファイバ母材中に前記低屈折率部を形成することが容易となり、かつ、光ファイバ化した際に良好な偏波保持性能を実現することができる。

[0017] 上記偏波保持コアは、複数の偏波保持コアであってもよい。この場合、複数の偏波保持光を伝搬することができる。

[0018] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記共通物理クラッドの中心軸に関して2回以上の回転対称性を有するように配置されていてもよい。この場合、2回以上の回転対称性を有するように配置されたグレーティングカプラと容易に光結合することができる。

[0019] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、前記偏波保持方向の方向も含めて、前記共通物理クラッドの中心軸に関して2回以上の回転対称性を有するように配置されていてもよい。この場合、グレーティングカプラにより光の入出射を行うシリコンフォトニクス基板上の導波路における配線の向きも回転対

称性を有するようにできるため、グレーティングカプラへの導波路配線が容易になる。

[0020] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、全ての前記偏波保持方向が互いに平行になるように配置されてもよい。この場合、入出射可能な偏波方向（偏波軸）が平行となるように配置されたグレーティングカプラと容易に光結合することができる。

[0021] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、前記偏波保持方向の方向も含めて、前記共通物理クラッドの中心軸を通る直線に関して線対称となるように配置されていてもよい。この場合、クラッドの中心軸を通る直線に関して線対称となるような位置及び偏波軸で配置されたグレーティングカプラとも容易に結合することができる。

[0022] 前記コアの半径を r_{10} 、前記低屈折率部の半径を r_{40} 、前記光学クラッドの半径を r_{21} とし、前記共通物理クラッドの屈折率を基準とする、前記コアの比屈折率差を Δ_{10} 、前記低屈折率部の比屈折率差を Δ_{40} 、前記光学クラッドの比屈折率差を Δ_{21} とし、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸と前記低屈折率部の中心軸の距離を d とすると、下式を満たしてもよい。

$$0.8 \leq r_{40} / r_{10} \leq 2.0$$

$$0.2 \leq (d - r_{21}) / r_{10} \leq 0.6$$

$$0.5\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{40} \leq 2.0\%$$

$$0.5\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{21} \leq 2.0\%$$

この場合、複屈折の増大とガウスビーム接続損の低減とを両立できる。

[0023] 下式で示される条件1又は条件2を満たしてもよい。

条件1：

$$3 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.6$$

$$0.70\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{40} \leq 0.85\%$$

$$0.70\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{21} \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta_{10} \leq 0.63\%$$

$$\Delta_{21} \leq 0\%$$

$$\Delta_{40} \leq 0\%$$

条件2：

$$3 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.7$$

$$0.50\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{40} \leq 0.65\%$$

$$0.50\% \leq \Delta_{10} - \Delta_{21} \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta_{10} \leq 0.53\%$$

$$\Delta_{21} \leq 0\%$$

$$\Delta_{40} \leq 0\%$$

この場合、複屈折の増大とガウスビーム接続損の低減に加えて、曲げ損失の低減と波長1310nmでの実効的なシングルモード動作を実現できる。

[0024] 波長1310nmにおいて、下式で定義されるモードフィールド平均径が、3μm以上12μm以下、又は、8.2μm以上9.6μm以下であってもよい。

[数4]

$$MFD_{avg} = \sqrt{\frac{D4\sigma_x^2 + D4\sigma_y^2}{2}} = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{\iint I(X,Y) [(X-\bar{X})^2 + (Y-\bar{Y})^2] dXdY}{\iint I(X,Y) dXdY}}$$

MFD_{avg} は、MFD扁平率 f が0のときには、Petermann 1のMFDと呼ばれる、ニアフィールドパターンの2次モーメント幅で規定されるMFDと等しくなる。 MFD_{avg} が上記の範囲であることにより、一般的なシングルモード光ファイバとのMFD不整合による接続損失を抑えることができる。

- [0025] 850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、複屈折は 5×10^{-6} 以上 5×10^{-5} 以下であってもよい。この場合、短距離のデータセンター用途では、偏波を十分に保持することができる。
- [0026] 前記長手方向における長さが10 cm以上1 m以下、1 m以上5 m以下、又は、5 m以上10 m以下のときに、850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークが -26.4 dB以上であってもよい。この場合、偏波クロストークの過剰な抑制を避けることができ、製造容易な偏波保持光ファイバを実現することができる。
- [0027] 前記長手方向における長さが10 cm以上1 m以下、1 m以上5 m以下、又は、5 m以上10 m以下のときに、850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークが -7.2 dB以下、 -9.1 dB以下、 -10.8 dB以下、 -12.3 dB以下、 -15.5 dB以下、 -16.3 dB以下、又は、 -19.4 dB以下であってもよい。この場合、偏波モード損失を抑制することができる。
- [0028] 850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、複屈折が 1×10^{-4} 未満であってもよい。この場合、強い複屈折を生じさせる必要がなくなり、SAPが不要になる。よって、製造中に光ファイバが破裂しづらくなる。
- [0029] 850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、複屈折が 5×10^{-6} 以上 5×10^{-5} 以下であり、又は、複屈折が 1×10^{-5} 以上 3×10^{-5} 以下である。この場合、ファイバの長手方向における長さが10 cm以上1 m以下、1 m以上5 m以下、又は、5 m以上10 m以下のときに、偏波モード損失を抑制することができる。
- [0030] 前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアは、前記断面において、前記一対の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向を有してもよい。前記偏波保持光ファイバは、半径10 mm以下の曲げが付与されると共に、前記断面において、曲げ半径方向と前記偏波保持方向とが互いに直交するか、互いに平行

をなすように保持部材に固定されていてもよい。この場合、偏波モード損失を抑制することができる。

[0031] 本開示の実施形態に係る偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一对の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法である。偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなり、円筒対称であると共に、コア部と光学クラッド部を含む光学母材を用意することと、ガラスからなり、円筒対称であると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する低屈折率部母材を用意することと、前記光学母材の中心軸に直交する断面において前記光学母材の中心軸に関して点対称であると共に、前記光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する円筒状の一对の孔を前記光学母材に形成することと、前記低屈折率部母材を前記光学母材の孔に一本ずつ挿入し、加熱により一体化して前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を形成することと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に共通物理クラッド部を付加したのち、又は付加しながら、延伸することで紡糸することと、を含む。

[0032] 上記偏波保持光ファイバの製造方法では、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができる。非軸対称な屈折率分布を有し、偏波保持性能を発揮する偏波保持コアが形成される。熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすい。

[0033] 前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する共通物理クラッド部を付加することにより、偏波保持光ファイバ母材を形成してもよい。前記偏波保持光ファイバ母材を加熱により熔融すると共に延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸してもよい。この場合、光学

母材の熱膨張係数と共通物理クラッド部の熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが更に抑制される。よって、更に製造しやすい。

[0034] 前記偏波保持光ファイバ母材を形成することは、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の少なくとも1つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも1つの孔に一本ずつ挿入することと、前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材とを加熱により一体化することと、を含んでもよい。この場合、クラッド部を容易に設けることができる。

[0035] 前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に共通物理クラッド部を付加したのち、又は付加しながら、延伸することで紡糸することは、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の少なくとも1つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも1つ以上の孔に一本ずつ挿入することと、前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材とを加熱により一体化すると共に、熔融及び延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸することと、を含んでもよい。この場合、コア部の熱膨張係数と物理クラッド母材の熱膨張係数との違いにより、光ファイバ母材が破損又は破裂することが更に抑制される。よって、更に製造しや

すい。

[0036] 本開示の実施形態に係る偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一对の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法である。偏波保持光ファイバの製造方法は、ガラスからなり、円筒対称であるコア部と、前記コア部を取り囲み、円筒対称であると共に、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する光学クラッド部と、前記光学クラッド部を取り囲み、ガラスからなり、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有すると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する共通物理クラッド部と、を有する基本光ファイバ母材を用意することと、前記コア部の中心軸に直交する断面において前記コア部の中心軸に関して点対称であると共に、前記コア部の中心軸に対して平行となる中心軸を有する円筒状の一对の孔を、それぞれの少なくとも一部が前記コア部と光学クラッド部にわたり形成されるように、前記基本光ファイバ母材に形成することと、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差及び前記共通物理クラッド部の熱膨張係数との差がそれぞれ $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、円筒対称であり、前記孔に挿入可能なように調整された外径を有する低屈折率部母材を用意することと、前記低屈折率部母材を前記基本光ファイバ母材の孔に一本ずつ挿入し、一体化したのち、又は一体化しながら、延伸することで紡糸することと、を含む。

[0037] 上記偏波保持光ファイバの製造方法では、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができる。非軸対称な屈折率分布を有し、偏波保持性能を発揮する偏波保持コアが形成される。熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすい。

[0038] 前記基本光ファイバ母材と、前記基本光ファイバ母材の孔に挿入された前

記低屈折率部母材とを加熱により一体化して偏波保持光ファイバ母材を形成した後、前記偏波保持光ファイバ母材を加熱により溶融すると共に延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸してもよい。この場合、紡糸の前に一体化された偏波保持光ファイバ母材を形成することができるので、より安定した品質の偏波保持光ファイバを作りやすい。

[0039] 前記基本光ファイバ母材と、前記基本光ファイバ母材の孔に挿入された前記低屈折率部母材とを加熱により一体化すると共に、溶融及び延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸してもよい。この場合、紡糸前の一体化工程を省略することができるので、偏波保持光ファイバの製造コストをより下げることができる。

[0040] 前記基本光ファイバ母材を用意することは、前記コア部及び前記光学クラッド部を有する前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも1つ以上の光学母材を用意することと、ガラスからなり、前記少なくとも1つ以上の光学母材の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも1つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、前記少なくとも1つ以上の光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも1つの孔に一本ずつ挿入することと、前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記光学母材とを加熱により一体化することにより、前記基本光ファイバ母材を形成することと、を含んでもよい。この場合、円筒対称であるコア部を有する基本光ファイバ母材を容易に形成することができる。

[0041] [本開示の実施形態の詳細]

本開示の偏波保持光ファイバの具体例を、以下に図面を参照しつつ説明する。なお、本発明はこれらの例示に限定されるものではなく、請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味及び範囲内での全ての変更が含まれ

ることが意図される。図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

[0042] 図1は、第1比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図1に示されるように、第1比較例に係る偏波保持光ファイバ101は、偏波保持光ファイバ101の長手方向に直交する断面において、非円形のコア10と、コア10を取り囲む円形のクラッド20と、を備えている。

[0043] 図2は、第2比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図2に示されるように、第2比較例に係る偏波保持光ファイバ102は、偏波保持光ファイバ102の長手方向に直交する断面において、円形のコア10と、コア10を取り囲む非円形のSAP30と、SAP30を介してコア10を取り囲む円形のクラッド20と、を備えている。通常、クラッド20はシリカガラスからなり、SAP30はボロン(B)を含んだシリカガラスからなる。シリカガラスには、微量のゲルマニウム(Ge)、リン(P)、又は塩素(Cl)等を含んでいる場合もある。

[0044] 図3は、第3比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図3に示されるように、第3比較例に係る偏波保持光ファイバ103は、偏波保持光ファイバ103の長手方向に直交する断面において、円形のコア10と、コア10を取り囲む円形のクラッド20と、クラッド20の内部に配置された一对のSAP30と、を備えている。一对のSAP30は、円形であり、コア10の中心軸に関して点対称に配置されている。偏波保持光ファイバ103は、いわゆるPANDA(Polarization-maintaining AND Absorption-reducing)型のである。

[0045] 図4は、第4比較例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図4に示されるように、第4比較例に係る偏波保持光ファイバ104は、偏波保持光ファイバ104の長手方向に直交する断面において、円形のコア10と、コア10を取り囲む円形のクラッド20と、クラッド20の内部に配置された一对のSAP30と、を備えている。一对のSAP30は、コア10の中心軸に関して点対称に配置されている。一对のSAP30は、コア10から離

間して配置されている。一对のSAP30は、略台形であり、短辺側が互いに対向するように配置されている。つまり、各SAP30は、短辺側がコア10の中心軸を向くように配置されている。各SAP30の短辺及び長辺は、コア10の外周に沿って湾曲している。偏波保持光ファイバ104は、いわゆるボウタイ型である。

[0046] 上述の非特許文献1に記載の偏波保持光ファイバ、及び、偏波保持光ファイバ101、102のような断面構造を持つ偏波保持光ファイバでは、光ファイバ母材が溶けているときに断面構造を変形させることにより、非円形のコア又はSAPが実現されている。このような製造工程が必要な場合、完成した光ファイバのクラッド外周の真円度の制御が困難である。また、コアの形状及び寸法の制御も困難である。更に、偏波保持光ファイバ101では、コア10が非円形であるため、コア10を導波する伝搬モードの電界分布の形状が円対称ではなくなる。よって、円対称な伝搬モードとの整合性が悪くなる。この結果、偏波保持光ファイバ101と通常の光ファイバとの接続損失が増大する。

[0047] 偏波保持光ファイバ102、103、104は、いずれもSAP30を備えている。上述のように、SAP30の熱膨張係数は、コア10の熱膨張係数及びクラッド20熱膨張係数と大きく異ならせる必要がある。このため、製造途中で光ファイバ母材に非常に大きな残留応力（内部応力）が加わるので、光ファイバ母材が破損又は破裂しやすく、製造が非常に難しい。よって、現在広く普及している偏波保持光ファイバは、量産が難しく高価である。

[0048] 本発明者らは、単一偏波のレーザ光源と、偏波依存性のあるシリコンフォトニクス導波路との間の非常に短距離（例えば、10cm以上1m以下、1m以上5m以下、又は、5m以上10m以下）を、偏波を保持したまま接続するデータセンター用途の偏波保持光ファイバについて検討した。その結果、本発明者らは、データセンター用途の偏波保持光ファイバに求められる性能は、2つの直交する偏波間のクロストークを抑えることではなく、レーザ光源から出力した単一偏波の光をなるべく損失なく、シリコンフォトニクス

導波路の光入力部（グレーティングカップラ又はエッジカップラ等）に所定向きの偏波で入力することであると発見した。

[0049] 偏波保持光ファイバが曲がったり振れたりすると、偏波モード間の結合が生じる。偏波モード間の結合は、mmオーダーよりも小さい微小でランダムな曲げであるマイクロバンドによっても生じる。偏波保持光ファイバでは、偏波モード間の結合を抑制することにより、偏波クロストーク（所定の偏波モードから他方の偏波モードへの漏話又は混信）を極めて低く（100m伝搬後でも−30dB以下に）抑制する必要がある。そのためには、偏波保持光ファイバでは、偏波間で強い複屈折（ 10^{-4} 以上）を生じさせる必要がある。よって、従来、製造の難しい形状又は組み合わせのガラス材料を用い、偏波保持光ファイバを造る必要があった。

[0050] 本発明者らは、データセンター用途の偏波保持光ファイバでは、偏波モード損失が問題であり、偏波クロストークを−30dB以下というレベルの従来の偏波保持光ファイバほど抑制する必要があることを発見した。偏波モード損失とは、偏波モード結合により、単一偏波のレーザ光を伝搬する所定の偏波モードから光が漏れて他方の偏波モードに結合することにより生じる、所定の偏波モードの伝送損失である。よって、偏波モード損失があると、所定の偏波モードの光強度が低くなる。

[0051] 偏波保持光ファイバの直交する2つの偏波保持軸をx軸及びy軸とする。偏波保持光ファイバの一端面から直線偏波の光を入射し、偏波保持光ファイバの他端面から出力された光の強度のx軸偏光成分を P_x 、y軸偏光成分を P_y とする。x軸方向が偏光方向である光を一端面に入射した場合、偏波クロストーク[dB]は、 $10 \log_{10} (P_y / P_x)$ で定義され、偏波モード損失[dB]は、 $-10 \log_{10} [P_x / (P_x + P_y)]$ で定義される。y軸方向が偏光方向である光を一端面に入射した場合、偏波クロストーク[dB]は、 $10 \log_{10} (P_x / P_y)$ で定義され、偏波モード損失[dB]は、 $-10 \log_{10} [P_y / (P_x + P_y)]$ で定義される。

[0052] 偏波クロストークは、ファイバ長が10倍になると10dB増加すること

が知られている。例えば、従来100m伝搬後で偏波クロストークが-30dB以下であるということは、10m伝搬後で-40dB以下であり、1m伝搬後で-50dB以下であり、10cm伝搬後で-60dB以下であることと同義である。実際に測定される偏波クロストークには、測定下限値がある。よって、短い偏波保持光ファイバでは、見かけ上は偏波クロストークが偏波保持光ファイバ自体の真の値よりも大きく見えることがある。測定下限値の原因として、偏波クロストーク測定時の偏波保持光ファイバへの入射光自体の偏波消光比が十分に高くないことが挙げられる。また、偏波保持光ファイバの速軸・遅軸（すなわち偏波保持可能な偏波方向）と入射偏光の角度との不整合や、出射側の偏光子の角度や偏波消光比が完全でないことも挙げられる。

[0053] 図5は、偏波クロストークと偏波モード損失との関係を示すグラフである。横軸は偏波クロストーク [dB] を示し、縦軸は偏波モード損失 [dB] を示す。

[0054] 偏波モード損失を1.0dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-5.9dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.75dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-7.2dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.50dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-9.1dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.35dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-10.8dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.25dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-12.3dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.12dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-15.5dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.1dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-16.3dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.05dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-19.4dB以下であれば十分である。偏波モード損失を0.01dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは-26.4dB以下であれば十分である。偏波モー

ド損失を0.005 dB以下に抑えるためには、偏波クロストークは−29.4 dB以下であれば十分である。

[0055] このため、従来の偏波保持光ファイバに求められる100 m伝搬後で−30 dB以下（すなわち、10 m伝搬後で−40 dB以下、1 m伝搬後で−50 dB以下、そして、10 cm伝搬後で−60 dB以下）という偏波クロストークの性能は、データセンター用途においては、過剰な偏波保持性能である。偏波保持性能を低くすることにより、製造しやすく、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができると共に、短距離において十分な偏波保持性能を有する偏波保持光ファイバ及び偏波保持光ファイバの製造方法を提供できる。

[0056] 長さが10 cm以上1 m以下、1 m以上5 m以下、又は5 m以上10 m以下のときに、850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークは、−26.4 dB以上であることがより更に好ましい。これにより、更に偏波保持性能を下げて、製造が容易な構造を有する偏波保持光ファイバを製造できる。偏波モード損失を一層低減するために、長さが10 cm以上1 m以下、1 m以上5 m以下、又は5 m以上10 m以下のときに、850 nm以上1625 nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークは、−7.2 dB以下、−9.1 dB以下、−10.8 dB以下、−12.3 dB以下、−15.5 dB以下、−16.3 dB以下、又は−19.4以下であることが一層好ましい。これらの偏波クロストークは、偏波保持光ファイバが、半径5 cm以上20 cm以下に曲げられた状態で実現されることが好ましい。

[0057] 図6は、実施形態に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図7は、図6に示される偏波保持光ファイバの一部拡大断面図である。図6及び図7に示されるように、実施形態に係る偏波保持光ファイバ1は、偏波保持光ファイバ1の長手方向に直交する断面（以下、単に「断面」とも言う。）において、コア10と、コア10を取り囲むクラッド20と、それぞれの少なくとも一部がコア10の内部に配置された一対の低屈折率部40と、を備えてい

る。コア10及びクラッド20の内部にはSAPが設けられていない。断面において、コア10の外周面は、低屈折率部40を除けば円形であり、楕円率(=1-短軸/長軸)は、5%以下、3%以下、2%以下、1%以下、又は0%である。本実施形態では、コア10の外周面は、低屈折率部40によらず円形である。クラッド20の外周面も円形である。

[0058] 本実施形態では、1つのコア10がクラッド20の中心に配置されている。コア10の中心軸10c及びクラッド20の中心軸20cは、互いに一致している。断面において、コア10及びクラッド20は、同心円状に配置されているとも言える。このようにコア10がクラッド20の中心に配置されている構成は、標準的な光ファイバとの接続性を高める観点から望ましいが、コア10がクラッド20の中心以外に配置された構成であってもよいし、同一のクラッド20の内部に複数のコア10が配置された構成であってもよい。

[0059] コア10の半径 r_{10} は、例えば、 $3\mu\text{m}$ 以上 $6\mu\text{m}$ 以下である。クラッド20は、コア10を取り囲む第1クラッド21(光学クラッド)と、第1クラッド21を取り囲む第2クラッド22(共通物理クラッド)と、を有する。第1クラッド21の外周面、及び、第2クラッド22の外周面は、それぞれ円形である。第1クラッド21は、コア10の外周面と接している。第2クラッド22は、第1クラッド21の外周面と接している。第1クラッド21の半径 r_{21} は、例えば、 r_{21}/r_{10} は2.5以上4以下である。第2クラッド22の半径は、例えば、 $30\mu\text{m}$ 以上 $63\mu\text{m}$ 以下、又は、 $63\mu\text{m}$ 以上 $125\mu\text{m}$ 以下である。同一のクラッド20の内部に複数のコア10が配置された構成では、第2クラッド22の半径が $63\mu\text{m}$ 以上 $125\mu\text{m}$ 以下であることで、より多くのコア10を配置できる。

[0060] 一对の低屈折率部40は、断面において、それぞれ円形である。低屈折率部40の楕円率は、5%以下、3%以下、2%以下、1%以下、又は0%である。1つのコア10につき、一对の低屈折率部40が設けられている。一对の低屈折率部40は、断面において、対応するコア10の中心軸10cに

関して点対称に配置されている。互いに一体化された一对の低屈折率部40とコア10とにより、偏波保持コア50が構成されている。偏波保持コア50は、断面において、一对の低屈折率部40それぞれの中心軸40cを結ぶ直線に垂直である第1偏波保持方向と、一对の中心軸40cを結ぶ直線に平行である第2偏波保持方向とを有している。偏波保持コア50の中心軸は、コア10の中心軸10cと一致している。

[0061] 低屈折率部40の一部のみがコア10の内部に配置されている。低屈折率部40の残りの部分は、コア10からはみ出し、第1クラッド21の内部に配置されている。低屈折率部40は、コア10だけでなく、第1クラッド21とも接する。すなわち、コア10の半径を r_{10} 、低屈折率部40の半径を r_{40} 、コア10の中心軸10cと低屈折率部40の中心軸40cとの間の距離を d とすると、 $r_{10} < r_{40} + d$ が成り立つ。コア10の外周面は、低屈折率部40を除けば円形であるものの、完全な円形ではない。よって、コア10の半径 r_{10} は、断面において、2つの低屈折率部それぞれの中心を結ぶ線分に垂直な方向におけるコア10の中心軸とコア10の外周面との間の距離で定義される。

[0062] 低屈折率部40の半径 r_{40} とコア10の半径 r_{10} との比は、例えば、 r_{40} / r_{10} は0.8以上2.0以下である。 $(d - r_{40}) / r_{10}$ が0.2以上0.6以下であることが好ましく、更には0.3以上0.5以下であることが好ましい。

[0063] 例えば、 $3.5 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 4.0 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \leq (d - r_{40}) / r_{10} \leq 0.4$ 、 $0.8 \leq r_{40} / r_{10} \leq 2.0$ 、 $2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.6$ 、第1クラッド21を基準としたコア10の比屈折率差の平均値が0.70%以上0.85%以下、第1クラッド21を基準とした低屈折率部40の比屈折率差が約0.0%、第2クラッド22を基準としたコア10の比屈折率差の平均値が0.40%以上0.63%以下であることで、波長1310nmで基底モードの複屈折が約 2×10^{-5} となり、MFDが8.6 μm のガウスビームを光ファイバに結合させた際の接続損失（ガウスビーム

結合損失)を約0.35 dBに抑えられるため望ましい。

[0064] 例えば、 $3.5 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 4.0 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \leq (d - r_{40}) / r_{10} \leq 0.6$ 、 $0.8 \leq r_{40} / r_{10} \leq 2.0$ 、 $2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.7$ 、第1クラッド21を基準としたコア10の比屈折率差の平均値が0.50%以上0.65%以下、第1クラッド21を基準とした低屈折率部40の比屈折率差が-0.2以上0%以下、第2クラッド22を基準としたコア10の比屈折率差の平均値が0.40%以上0.53%以下であることで、波長1310 nmで基底モードの複屈折が約 1×10^{-5} となり、MFDが8.6 μm のガウスビームを光ファイバに結合させた際の接続損失(ガウスビーム結合損失)を約0.1 dBに抑えられるため望ましい。

[0065] コア10の屈折率分布は、コア10の内部の低屈折率部40を除けば、中心軸10cに関して円対称である。クラッド20及び低屈折率部40は、コア10の屈折率(平均値)よりも低い屈折率を有する。第1クラッド21の屈折率は、第2クラッド22の屈折率よりも低い。

[0066] 低屈折率部40の屈折率は、第1クラッド21の屈折率以下である。第1クラッド21を基準とした低屈折率部40の比屈折率差は、-2%以上-1%以下、-1%以上-0.5%以下、-0.5%以上-0.3%以下、-0.3%以上-0.1%以下、又は、-0.1%以上0.1%以下である。第1クラッド21を基準としたコア10の比屈折率差の平均値は、0.3%以上0.5%以下、又は、0.5%以上1.0%以下である。半径 r_{10} は、3 μm 以上6 μm 以下である。

[0067] コア10の半径を r_{10} 、低屈折率部40の半径を r_{40} 、第1クラッド21の半径を r_{21} とし、第2クラッド22の屈折率を基準とする、コア10の比屈折率差を Δ_{10} 、低屈折率部40の比屈折率差を Δ_{40} 、第1クラッド21の比屈折率差を Δ_{21} とし、コア10の中心軸10cと低屈折率部40の中心軸40cの距離を d とすると、下式が満たされている。

$$0.8 \leq r_{40} / r_{10} \leq 2.0$$

$$0.2 \leq (d - r_{21}) / r_{10} \leq 0.6$$

$$0.5\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 2.0\%$$

$$0.5\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 2.0\%$$

[0068] 下式で示される条件1又は条件2が更に満足されている。

条件1：

$$3 \mu\text{m} \leq r 10 \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r 21 / r 10 \leq 3.6$$

$$0.70\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 0.85\%$$

$$0.70\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta 10 \leq 0.63\%$$

$$\Delta 21 \leq 0\%$$

$$\Delta 40 \leq 0\%$$

条件2：

$$3 \mu\text{m} \leq r 10 \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r 21 / r 10 \leq 3.7$$

$$0.50\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 0.65\%$$

$$0.50\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta 10 \leq 0.53\%$$

$$\Delta 21 \leq 0\%$$

$$\Delta 40 \leq 0\%$$

[0069] コア10の熱膨張係数と低屈折率部40の熱膨張係数との差は、 $5 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下、 $2 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下である。コア10の熱膨張係数と第1クラッド21の熱膨張係数との差は、 $5 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下、 $2 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下である。熱膨張係数の差が抑制されているので、光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。第1クラッド21の熱膨張係数と低屈折率部40の熱膨張係数との差も、 $5 \times 10^{-7}/\text{K}$ 以下であってもよい。

[0070] コア10、第1クラッド21、第2クラッド22、及び低屈折率部40は、いずれもガラス製である。コア10は、ガラスからなる。第1クラッド2

1、第2クラッド22、及び低屈折率部40は、コア10とは組成が異なるガラスからなる。例えば、微量に塩素(Cl)又はフッ素(F)を含んだシリカガラスは、塩素(Cl)又はフッ素(F)を含まないシリカガラスとは組成が異なるガラスに含まれる。GeO₂を含んだシリカガラスも、GeO₂を含まないシリカガラスとは組成が異なるガラスに含まれる。第1クラッド21の組成と第2クラッド22の組成とは、互いに同じであってもよい。

[0071] 偏波保持光ファイバ1は、長手方向における長さが10cm以上1m以下、1m以上5m以下、又は、5m以上10m以下のときに、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークが-29.4dB以上であり、かつ、-5.98dB以下である。このとき、偏波クロストークは、-26.4dB以上であってもよい。偏波クロストークは、-7.2dB以下、-9.1dB以下、-10.8dB以下、-12.3dB以下、-15.5dB以下、-16.3dB以下、又は、-19.4dB以下であってもよい。

[0072] 偏波保持光ファイバ1では、断面内の残留応力の絶対値の最大値は、100MPa以下、50MPa以下、20MPa以下、又は、10MPa以下である。850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、複屈折は 5×10^{-6} 以上 5×10^{-5} 以下、又は、 1×10^{-5} 以上 3×10^{-5} 以下である。

[0073] 断面において、コア10それぞれにおける局所座標系を、コア10の中心(中心軸10c)を原点、2つの低屈折率部40の中心(中心軸40c)間を結ぶ直線に平行な原点を通る軸をX軸、前記直線に垂直な前記原点を通る軸をY軸とし、ニアフィールドでの強度分布をI(X, Y)とすると、下式で定義されるモードフィールド扁平率fが、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、0.05以上0.40以下、0.05以上0.30以下、又は、0.05以上0.25以下である。

[数5]

$$f = 1 - \frac{\min(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}{\max(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}$$

$$D4\sigma_x = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (X - \bar{X})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$D4\sigma_y = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) (Y - \bar{Y})^2 dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

$$\bar{X} = \frac{\iint I(X, Y) X dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

$$\bar{Y} = \frac{\iint I(X, Y) Y dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}$$

[0074] ここで、

[数6]

$$(\bar{X}, \bar{Y})$$

は、 $I(X, Y)$ の重心で、 $D4\sigma_x$ は X 軸方向における $D4\sigma$ ビーム幅、 $D4\sigma_y$ は Y 軸方向における $D4\sigma$ ビーム幅である。複屈折の大きさは、例えば、JIS C6872:2008「偏波面保存光ファイバビート長試験方法」に記載の方法により測定することができる。 1×10^{-5} 以上の複屈折を実現するためには $f \geq 0.05$ が必要である。ガウスビーム結合損失が 0.35 dB 以下になるためには $f \leq 0.40$ が必要であり、0.2 dB 以下になるためには $f \leq 0.30$ が必要であり、0.1 dB 以下になるためには $f \leq 0.25$ が必要である。

[0075] 波長 1310 nm において、下式で定義されるモードフィールド平均径が、 $3 \mu\text{m}$ 以上 $12 \mu\text{m}$ 以下、又は、 $8.2 \mu\text{m}$ 以上 $9.6 \mu\text{m}$ 以下である。

[数7]

$$MFD_{\text{avg}} = \sqrt{\frac{D4\sigma_x^2 + D4\sigma_y^2}{2}} = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{\iint I(X, Y) [(X - \bar{X})^2 + (Y - \bar{Y})^2] dXdY}{\iint I(X, Y) dXdY}}$$

MFD_{avg} は、 MFD 扁平率 f が 0 のときには、Petermann I の MFD と呼ばれる、ニアフィールドパターンの 2 次モーメント幅で規定される

MFDと等しくなる。MFD_{avg}が上記の範囲であることにより、一般的なシングルモード光ファイバとのMFD不整合による接続損失を抑えることができる。

[0076] 偏波保持光ファイバ1の一つの例では、コア10は、GeO₂を含んだシリカガラスからなる。クラッド20及び低屈折率部40は、GeO₂を含んでいないシリカガラス、又は、GeO₂の含有量がコア10におけるGeO₂の含有量よりも少ないシリカガラスからなる。これにより、コア10、クラッド20及び低屈折率部40に用いる含有物の総量を減らしつつ、コア10とクラッド20との間、及びコア10と低屈折率部40との間にそれぞれ適切な比屈折率差を設けることができる。

[0077] この例では、コア10、クラッド20及び低屈折率部40には、塩素を含んでいてもよい。塩素の含有量は、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下であってもよい。塩素を含むことにより、ガラス中のOH基による光の吸収損失を低減することができる。

[0078] 低屈折率部40には、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下のフッ素を含んでいてもよい。フッ素を含むことにより、コア10と低屈折率部40との間に十分な比屈折率差を設けることができる。クラッド20には、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下のフッ素を含んでいてもよい。フッ素を含むことにより、コア10とクラッド20との間に十分な比屈折率差を設けることができる。

[0079] コア10、クラッド20及び低屈折率部40は、B₂O₃を含んでいなくてもよい。B₂O₃の含有量（濃度）の上限は、質量分率で1%以下であることが好ましく、0.1%以下であることが更に好ましく、B₂O₃を含んでいないことが最も好ましい。これにより、コア10、クラッド20及び低屈折率部40の材料間における熱膨張係数差が抑えられるので、製造が困難になることが避けられる。

- [0080] 偏波保持光ファイバ1の別の例では、コア10は、 GeO_2 を含んでいないシリカガラスからなる。クラッド20及び低屈折率部40は、フッ素を含んでいるシリカガラスからなる。コア10に GeO_2 を含んでいないことにより、コア部に研削により孔をあける場合にコア部が破損し難く、より安定した研削が可能となる。よって、製造が更に容易である。
- [0081] この例では、コア10に塩素を含んでいてもよい。塩素の含有量は、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下であってもよい。塩素を含むことにより、ガラス中のOH基による光の吸収損失を低減することができる。
- [0082] 低屈折率部40には、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下のフッ素を含んでいてもよい。フッ素を含むことにより、コア10と低屈折率部40との間に十分な比屈折率差を設けることができる。クラッド20には、質量分率で0.1%以上0.5%以下、0.5%以上2.0%以下、又は、2.0%以上10%以下のフッ素を含んでいてもよい。フッ素を含むことにより、コア10とクラッド20との間に十分な比屈折率差を設けることができる。
- [0083] コア10、クラッド20及び低屈折率部40は、 B_2O_3 を含んでいなくてもよい。 B_2O_3 の含有量の上限は、質量分率で1%以下であることが好ましく、0.1%以下であることが更に好ましく、 B_2O_3 を含んでいないことが最も好ましい。これにより、コア10、クラッド20及び低屈折率部40の材料間における熱膨張係数差が抑えられるので、製造が困難になることが避けられる。
- [0084] 図8は、第1変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図8に示されるように、第1変形例に係る偏波保持光ファイバ1Aは、複数のコア10と、複数対の低屈折率部40を備える点で、偏波保持光ファイバ1と相違している。すなわち、偏波保持光ファイバ1Aは、複数の偏波保持コア50を備える。これにより、偏波保持光ファイバ1Aは、複数の偏波保持光を伝搬することができる。

- [0085] 各中心軸10c及びクラッド20の中心軸20cは、互いに一致していない。断面において、複数の偏波保持コア50は、クラッド20の中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の偏波保持方向も含めて、中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。これにより、偏波保持光ファイバ1Aは2回以上の回転対称性を有するように配置されたグレーティングカップラと容易に光結合することができる。
- [0086] ここでは、8つの複数の偏波保持コア50が中心軸20cに関して点対称に配置されている。各コア10の中心軸10cは、中心軸20cから互いに等距離に位置している。偏波保持光ファイバ1Aは、8回対称である。すなわち、偏波保持光ファイバ1Aは、中心軸のまわりに45度(=360度/8)回転させたときに自らと重なる。
- [0087] 各偏波保持コア50における一对の低屈折率部40は、中心軸10cと中心軸20cとを結ぶ直線L1に沿って並んで配置されている。各低屈折率部40の中心軸40c(図7参照)は、直線L1上に配置されている。各偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L1に直交しており、第2偏波保持方向は直線L1に平行である。偏波保持光ファイバ1Aにおいても、各偏波保持コア50における一对の低屈折率部40は、中心軸10cに関して点対称である。
- [0088] 図9は、第2変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図9に示されるように、第2変形例に係る偏波保持光ファイバ1Bは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Aと相違している。偏波保持光ファイバ1Bでは、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L1に平行である。各低屈折率部40の中心軸40c(図7参照)は、直線L1上に配置されていない。各コア10の内部において、一对の低屈折率部40が直線L1に関して線対称となるように配置されている。
- [0089] 偏波保持光ファイバ1Bにおいても、偏波保持光ファイバ1Aと同様に、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向の方向

も含めて中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。偏波保持光ファイバ1Bにおいても、各偏波保持コア50における一对の低屈折率部40は、中心軸10cに関して点対称である。

[0090] 図10は、第3変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図10に示されるように、第3変形例に係る偏波保持光ファイバ1Cは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Aと相違している。偏波保持光ファイバ1Cでは、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L1に対して等しい角度で傾斜している。各低屈折率部40の中心軸40c（図7参照）は、直線L1上に配置されていない。各偏波保持コア50における一对の低屈折率部40は、直線L1に関して線対称ではない。

[0091] 偏波保持光ファイバ1Cにおいても、偏波保持光ファイバ1Aと同様に、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向の方向も含めて中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。各偏波保持コア50における一对の低屈折率部40は、中心軸10cに関して点対称である。

[0092] 図11は、第4変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図11に示されるように、第4変形例に係る偏波保持光ファイバ1Dは、全ての偏波保持コア50が、それらの中心軸10cがクラッド20の中心軸20cを通る一本の直線L2上に乗るように配置されている点で、偏波保持光ファイバ1Aと相違している。

[0093] 偏波保持光ファイバ1Dでは、複数の偏波保持コア50は、全ての偏波保持コア50の第1偏波保持方向が平行となるように配置されている。これにより、偏波保持光ファイバ1Dは、第1偏波保持方向が平行となるように配置されたグレーティングカップラ、又は、平面導波路の光入出射端等と容易に光結合することができる。

[0094] 各中心軸10c及びクラッド20の中心軸20cは、互いに一致していない。断面において、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向の方向も含めて中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を

有するように配置されている。これにより、偏波保持光ファイバ1Dは、2回以上の回転対称性を有するように配置されたグレーティングカプラと容易に光結合することができる。

[0095] ここでは、4つの複数の偏波保持コア50が中心軸20cに関して点対称に配置されている。偏波保持光ファイバ1Dは、2回対称である。すなわち、偏波保持光ファイバ1Aは、中心軸のまわりに180度(=360度/2)回転させたときに自らと重なる。

[0096] 断面において、複数の偏波保持コア50は一列に並んで配置されている。ここでは、4つの偏波保持コア50が等間隔で一列に並んで配置されている。全ての低屈折率部40の中心軸40c(図7参照)も、一本の直線L2上に配置されている。偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L2に直交している。

[0097] 図12は、第5変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図12に示されるように、第5変形例に係る偏波保持光ファイバ1Eは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Dと相違している。偏波保持光ファイバ1Eでは、低屈折率部40の中心軸40c(図7参照)は、いずれも直線L2上に配置されていない。偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L2に対して傾斜している。偏波保持光ファイバ1Eにおいても、複数のコア10は、全ての偏波保持コア50の第1偏波保持方向が平行となるように配置されている。

[0098] 図13は、第6変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図13に示されるように、第6変形例に係る偏波保持光ファイバ1Fは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Dと相違している。偏波保持光ファイバ1Fでは、低屈折率部40の中心軸40c(図7参照)は、いずれも直線L2上に配置されていない。偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L2に平行である。偏波保持光ファイバ1Eにおいても、複数の偏波保持コア50は、全ての偏波保持コア50の第1偏波保持方向が平行となるように配置されている。

[0099] 図14は、第7変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図14に示されるように、第7変形例に係る偏波保持光ファイバ1Gは、複数の偏波保持コア50が一行ではなく二列で配置されている点で、偏波保持光ファイバ1Dと相違している。ここでは、8つのコア10が等間隔で4つずつ二列に並んで配置されている。一方の列における全てのコア10の中心軸10cを通る一本の直線L2と、他方の列における全てのコア10の中心軸10cを通る一本の直線L2とは、クラッド20の中心軸20cを挟んで平行に配置されている。全ての低屈折率部40の中心軸40c（図7参照）は、対応する直線L2上に配置されている。偏波保持コア50の第1偏波保持方向は、直線L2に直交している。

[0100] 偏波保持光ファイバ1Gにおいても、複数の偏波保持コア50は、全ての偏波保持コア50の第1偏波保持方向が平行となるように配置されている。断面において、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の第1偏波保持方向の方向も含めて中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。偏波保持光ファイバ1Gも2回対称である。

[0101] 図15は、第8変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図15に示されるように、第8変形例に係る偏波保持光ファイバ1Hは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Gと相違している。偏波保持光ファイバ1Hでは、各低屈折率部40の中心軸40c（図7参照）は、対応する直線L2上に配置されていない。偏波保持コア50の偏波保持方向は、直線L2に対して傾斜している。偏波保持光ファイバ1Hにおいても、複数の偏波保持コア50は、全ての偏波保持コア50の対応する偏波保持方向が平行となるように配置されている。

[0102] 図16は、第9変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図16に示されるように、第9変形例に係る偏波保持光ファイバ1Iは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Gと相違している。偏波保持光ファイバ1Iでは、各低屈折率部40の中心軸40c（図7参照）は、対応する直線L2上に配置されていない。偏波保持コア50の偏波保持方向は、

直線L2に対して傾斜している。偏波保持光ファイバ1Iでは、複数の偏波保持コア50は、偏波保持コア50の対応する偏波保持方向が平行となるように配置されていない。

[0103] 偏波保持光ファイバ1Iにおいても、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の対応する偏波保持方向の方向も含めて中心軸20cに関して2回以上の回転対称性を有するように配置されている。偏波保持光ファイバ1Iも2回対称である。複数の偏波保持コア50は、クラッド20の中心軸20cを通り、一对の直線L2に平行な直線L3に関して、各偏波保持コア50の対応する偏波保持方向の方向も含めて線対称となるように配置されている。複数のコア10は、クラッド20の中心軸20cを通り、一对の直線L2に直交する直線L4に関して、各偏波保持コア50の対応する偏波保持方向の方向も含めて線対称となるように配置されている。これにより、偏波保持光ファイバ1Iは、直線L3及び直線L4に関して線対称となるような位置及び偏波軸で配置されたグレーティングカップラとも容易に結合することができる。

[0104] 図17は、第10変形例に係る偏波保持光ファイバの断面図である。図17に示されるように、第10変形例に係る偏波保持光ファイバ1Jは、低屈折率部40の配置の点で、偏波保持光ファイバ1Gと相違している。偏波保持光ファイバ1Jでは、各低屈折率部40の中心軸40c（図7参照）は、対応する直線L2上に配置されていない。偏波保持コア50の偏波保持方向は、直線L2に対して傾斜している。一方の直線L2上に配置された複数の偏波保持コア50の対応する偏波保持方向は、互いに平行である。他方の直線L2上に配置された複数の偏波保持コア50の対応する偏波保持方向は、互いに平行である。一方の直線L2上に配置された複数の偏波保持コア50の偏波保持方向と、他方の直線L2上に配置された複数の偏波保持コア50の対応する偏波保持方向とは、互いに交差（ここでは直交）している。

[0105] 偏波保持光ファイバ1Iにおいても、複数の偏波保持コア50は、各偏波保持コア50の偏波保持方向の方向も含めて中心軸20cに関して2回以上

の回転対称性を有するように配置されている。偏波保持光ファイバ1 Jも2回対称である。複数の偏波保持コア50は、クラッド20の中心軸20cを通り、一对の直線L2に平行な直線L3に関して、各偏波保持コア50の偏波保持方向の方向も含めて線対称となるように配置されている。これにより、偏波保持光ファイバ1 Iは、直線L3に関して線対称となるような位置及び偏波軸で配置されたグレーティングカップラとも容易に結合することができる。

[0106] 上述の偏波保持光ファイバ1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, 1G, 1H, 1I, 1J（以下、偏波保持光ファイバ1等）は、通常の偏波保持光ファイバに比べて、偏波保持性能が劣る。よって、極めて小さい曲げ半径で曲げると、偏波クロストークが増大し、偏波モード損失も増大するおそれがある。このため、偏波保持光ファイバ1等は、半径10mm以下の曲げを付与される場合、曲げの半径方向と全ての偏波保持コア50の偏波保持方向とが互いに直交するか、互いに平行をなすように保持部材に固定されてもよい。

[0107] 続いて、偏波保持光ファイバ1等の製造方法について説明する。図18は、第1実施形態に係る製造方法を示すフローチャートである。第1実施形態に係る製造方法では、コア部及び第1クラッド部（光学クラッド部）を含む光学母材と低屈折率部母材とを一体化して偏波保持光学母材を形成した後、偏波保持光学母材の周囲に第2クラッド部（共通物理クラッド部）を設ける。図18に示されるように、具体的には、第1実施形態に係る製造方法は、以下に説明する工程S1a、工程S1b、工程S1c、工程S1d、工程S1e、工程S1f、工程S1g、及び工程S1hを含む。第1実施形態に係る製造方法によれば、偏波保持光ファイバ1等の全ての偏波保持光ファイバを製造することができる。

[0108] 工程S1aは、光学母材、第2クラッド母材（物理クラッド母材）、及び、低屈折率部母材を用意する工程である。工程S1aでは、ガラスからなり、中心軸から円筒対称である光学母材、第2クラッド母材、及び、低屈折率

部母材がそれぞれ用意される。光学母材のコア部の屈折率は、第2クラッド母材の屈折率及び低屈折率部母材の屈折率のそれぞれよりも高い。第2クラッド母材は、ガラスからなり、コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有する。第2クラッド母材では、外周が所定の軸に沿って所定の長さにより並進対称性を有している。第2クラッド母材は、例えば、円筒対称である。低屈折率部母材は、光学母材のコア部及び第1クラッド部それぞれの熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下、 $2 \times 10^{-7} / K$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有する。

- [0109] 光学母材は、例えば、コア母材及び第1クラッド母材（光学クラッド母材）を用意する工程と、第1クラッド母材にコア母材を挿入するための孔を形成する工程と、孔にコア母材を挿入する工程と、加熱によりコア母材及び第1クラッド母材を一体化する工程とを経て用意される。
- [0110] 工程S1bは、光学母材に孔を形成する工程である。工程S1bでは、工程S1aにより用意された光学母材に、低屈折率部母材を挿入するための一対の孔が形成される。孔は、円筒状であり、光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する。一対の孔は、光学母材の中心軸に直交する断面において、光学母材の中心軸に関して点对称な位置に形成される。孔は、光学母材からはみ出さず、内周面の全体が光学母材により構成されるように形成される。孔の一部は、コア部に設けられ、残りの部分は、コア部からはみ出し、第1クラッド部に設けられている。一対の孔のそれぞれの少なくとも一部がコア部と光学クラッド部とにより形成される。
- [0111] 工程S1cは、光学母材の孔に、低屈折率部母材を挿入する工程である。工程S1cでは、工程S1bにより光学母材に形成された一対の孔に、工程S1aにより用意された低屈折率部母材が一本ずつ挿入される。低屈折率部母材の挿入は、低屈折率部母材の外径を孔の内径に合わせて適切に調節した状態で行われる。低屈折率部母材の外径は、低屈折率部母材が孔に挿入可能なように調整される。
- [0112] 工程S1dは、偏波保持コア母材を形成する工程である。工程S1dでは

、光学母材と、工程S 1 cにより光学母材の孔に挿入された一对の低屈折率部母材とが、加熱により一体化される。これにより、偏波保持光学母材が形成される。

[0113] 工程S 1 eは、第2クラッド母材に孔を形成する工程である。工程S 1 eでは、工程S 1 aにより用意された第2クラッド母材に、偏波保持光学母材を挿入するための少なくとも1つの孔が形成される。孔は、円筒状であり、第2クラッド母材の所定の軸（例えば、中心軸）と平行な中心軸を有する。孔は、第2クラッド母材からはみ出さず、内周面の全体が第2クラッド母材により構成されるように形成される。

[0114] 工程S 1 fは、第2クラッド母材の孔に偏波保持光学母材を挿入する工程である。工程S 1 fでは、工程S 1 dにより形成された偏波保持光学母材が、工程S 1 eにより第2クラッド母材に形成された孔に一本ずつ挿入される。偏波保持光学母材の挿入は、偏波保持光学母材の外径を孔の内径に合わせて適切に調節した状態で行われる。偏波保持光学母材の外径は、偏波保持光学母材が孔に挿入可能なように調整される。

[0115] 工程S 1 gは、偏波保持光ファイバ母材を形成する工程である。工程S 1 gでは、第2クラッド母材と、工程S 1 fにより第2クラッド母材の孔に挿入された偏波保持光学母材とが加熱により一体化される。これにより、第2クラッド母材からなる第2クラッド部が、光学母材からなるコア部及び第1クラッド部の周囲に形成される。第2クラッド部では、外周が所定の軸に沿って所定の長さにわたり並進対称性を有している。第2クラッド部は、例えば、円筒対称である。第1実施形態に係る製造方法は、偏波保持コア母材の周囲に、ガラスからなり、光学母材のコア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有する第2クラッド部を形成する工程を含むと言える。第2クラッド部を形成する工程は、工程S 1 a、工程S 1 e、工程S 1 f及び工程S 1 gからなる。この結果、偏波保持光ファイバ母材が形成される。第2クラッド部は公知の他の方法で付加されてもよい。例えば、第2クラッド部は、第1クラッド部の周囲にガラス微粒子を堆積させたガラス

スス体を形成し、ガラススス体を焼結して透明化することで付加されてもよい。

[0116] 工程S 1 hは、偏波保持光ファイバ母材を紡糸する工程である。工程S 1 hでは、工程S 1 gにより加熱一体化された偏波保持光ファイバ母材を加熱により溶融すると共に延伸することで偏波保持光ファイバ1として紡糸する。

[0117] 以上により、偏波保持光ファイバ1を製造することができる。

[0118] 次に、第1実施形態の変形例について説明する。図19は、第1実施形態の変形例に係る製造方法を示すフローチャートである。図19に示されるように、この変形例に係る製造方法は、工程S 1 fにおいて、第2クラッド母材に形成された孔の一端を封止した上で、孔の開放された他端から偏波保持光学母材を一本ずつ挿入する点と、工程S 1 g及び工程S 1 hの代わりに、工程S 1 iを含む点とにおいて、第1実施形態に係る製造方法と相違している。

[0119] 工程S 1 iは、第2クラッド母材と偏波保持光学母材とを一体化しながら紡糸する工程である。工程S 1 iでは、第2クラッド母材と、第2クラッド母材の孔に挿入された偏波保持光学母材とが、加熱により溶融されると共に延伸される。これにより、第2クラッド母材と偏波保持光学母材とを一体化しながら偏波保持光ファイバとして紡糸することができる。

[0120] 第1実施形態の他の変形例について説明する。この他の変形例に係る製造方法は、第2クラッド母材を用いて第2クラッド部を形成する代わりに、偏波保持光学母材の周囲に堆積させた多孔質のクラッド原層から第2クラッド部を形成する点で、第1実施形態に係る製造方法と相違している。クラッド原層は、一本の偏波保持光学母材の周囲、あるいは、中心軸が互いに平行に配置された複数の偏波保持光学母材の周囲に、化学合成によりガラス微粒子を堆積させることによって形成される。第2クラッド部は、クラッド原層を焼結により透明化することで形成される。このとき、偏波保持光学母材の全長にわたってクラッド原層を形成した後、焼結により第2クラッド部を形成

してもよい。偏波保持コア母材の長手方向の一部にクラッド原層を形成し焼結することを、偏波保持光学母材の長手方向の異なる位置で繰り返し、その結果、偏波保持光学母材の全長にわたって第2クラッド部を形成してもよい。

[0121] 第2クラッド部を形成する際、ガラスからなり、第2クラッド部外形の原型となるクラッド型を用いてもよい。まず、クラッド型を一本又は複数の偏波保持光学母材の周囲に設け、クラッド型と偏波保持光学母材との間を砂状のガラス粒子で満たす。続いて、クラッド型、ガラス粒子、及び、偏波保持光学母材を加熱一体化する。これにより、第2クラッド部を有する偏波保持光ファイバ母材が形成される。

[0122] クラッド型を用い、砂状のガラス粒子の代わりに、ガラス粒子を分散させたスラリーでクラッド型と偏波保持光学母材との間を満たしてもよい。スラリー内の液体を蒸発させることで、多孔質のクラッド原層が形成される。クラッド原層を焼結により透明化することにより、第2クラッド部が形成される。

[0123] 続いて、第2実施形態に係る製造方法について説明する。図20は、第2実施形態に係る製造方法を示すフローチャートである。第1実施形態に係る製造方法では、光学母材と低屈折率部母材とを一体化して偏波保持光学母材を形成した後、第2クラッド部を設けるのに対し、第2実施形態に係る製造方法は、光学母材と第2クラッド母材とが予め一体化された基本光ファイバ母材を用い、基本光ファイバ母材に低屈折率部母材を設ける点で相違している。図20に示されるように、具体的には、第2実施形態に係る製造方法は、工程S2a、工程S2b、工程S2c、工程S2d、工程S2e、工程S2f、工程S2g、及び工程S2hを含む。第2実施形態に係る製造方法によれば、偏波保持光ファイバ1等の全ての偏波保持光ファイバを製造することができる。

[0124] 工程S2aは、コア母材、クラッド母材、及び、低屈折率部母材を用意する工程である。クラッド母材は、例えば、第1クラッド母材及び第2クラッド

ド母材を用意する工程と、第2クラッド母材に第1クラッド母材を挿入するための孔を形成する工程と、孔に第1クラッド母材を挿入する工程と、加熱により第1クラッド母材及び第2クラッド母材を一体化する工程とを経て用意される。クラッド母材では、外周が所定の軸に沿って所定の長さにわたり並進対称性を有している。クラッド母材は、例えば、円筒対称である。

[0125] 工程S 2 bは、クラッド母材に孔を形成する工程である。工程S 2 bでは、工程S 2 aにより用意されたクラッド母材に、コア母材を挿入するための少なくとも1つの孔が形成される。孔は、円筒状であり、クラッド母材の所定の軸（例えば、中心軸）と平行な中心軸を有する。孔は、クラッド母材からはみ出さず、内周面の全体がクラッド母材により構成されるように形成される。

[0126] 工程S 2 cは、クラッド母材の孔にコア母材を挿入する工程である。工程S 2 cでは、工程S 2 bによりクラッド母材に形成された孔に、工程S 2 aにより用意されたコア母材が一本ずつ挿入される。コア母材の挿入は、コア母材の外径を孔の内径に合わせて適切に調節した状態で行われる。コア母材の外径は、コア母材が孔に挿入可能なように調整される。クラッド母材の所定の軸（例えば、中心軸）とコア母材の中心軸とは、互いに平行である。

[0127] 工程S 2 dは、基本光ファイバ母材を形成する工程である。工程S 2 dでは、クラッド母材と、工程S 2 cによりクラッド母材の孔に挿入された少なくとも1つのコア母材とが、加熱により一体化される。これにより、コア母材がクラッド母材に内蔵されてなる基本光ファイバ母材が形成される。基本光ファイバ母材は、コア母材からなるコア部と、クラッド母材からなるクラッド部と、を有する。これにより、基本光ファイバ母材が用意される。すなわち、第2実施形態に係る製造方法は、基本光ファイバ母材を用意する工程を含む。基本光ファイバ母材を用意する工程は、工程S 2 a、工程S 2 b、工程S 2 c、及び工程S 2 dからなる。

[0128] 工程S 2 eは、基本光ファイバ母材に孔を形成する工程である。工程S 2 eでは、工程S 2 dにより形成された基本光ファイバ母材に、低屈折率部母

材を挿入するための一对の孔がコア部ごとに形成される。孔は、円筒状であり、コア部の中心軸と平行な中心軸を有する。一对の孔は、コア部の中心軸に直交する断面において、コア部の中心軸に関して点対称な位置に形成される。一对の孔は、それぞれの少なくとも一部がコア部に形成されるように、基本光ファイバ母材に形成される。

[0129] 工程 S 2 f は、基本光ファイバ母材の孔に低屈折率部母材を挿入する工程である。工程 S 2 f では、工程 S 2 e により基本光ファイバ母材に形成された孔に、工程 S 2 a により用意された低屈折率部母材が一本ずつ挿入される。低屈折率部母材の挿入は、低屈折率部母材の外径を穴の内径に適切に調節した状態で行われる。低屈折率部母材の外径は、低屈折率部母材が孔に挿入可能なように調整される。

[0130] 工程 S 2 g は、偏波保持光ファイバ母材を形成する工程である。工程 S 2 g では、基本光ファイバ母材と、工程 S 2 f により基本光ファイバ母材の孔に挿入された低屈折率部母材とが加熱により一体化される。これにより、偏波保持光ファイバ母材が形成される。

[0131] 工程 S 2 h は、工程 S 1 h と同じである。

[0132] 以上により、偏波保持光ファイバ 1 等が製造される。

[0133] 次に、第 2 実施形態の変形例に係る製造方法について説明する。図 2 1 は、第 2 実施形態の変形例に係る製造方法を示すフローチャートである。図 2 1 に示されるように、この変形例に係る製造方法は、工程 S 2 f において、基本光ファイバ母材に形成された孔の一端を封止した上で、孔の開放された他端から低屈折率部母材が一本ずつ挿入される点と、工程 S 2 g 及び工程 S 2 h の代わりに、工程 S 2 i を含む点とにおいて、第 1 実施形態に係る製造方法と相違している。

[0134] 工程 S 2 i は、基本光ファイバ母材と低屈折率部母材とを一体化しながら紡糸する工程である。工程 S 2 i では、基本光ファイバ母材と、基本光ファイバ母材の孔に挿入された低屈折率部母材とが、加熱により熔融されると共に延伸される。これにより、基本光ファイバ母材と低屈折率部母材とを一体

化しながら偏波保持光ファイバとして紡糸することができる。

[0135] 以上説明したように、偏波保持光ファイバ1等では、偏波保持コア50がコア10と一对の低屈折率部40を有し、一对の低屈折率部40は、コア10の中心軸10cに関して点对称に配置されている。これにより、偏波保持コア50が非対称な屈折率分布を有し、偏波保持性能が発揮される。断面において、低屈折率部40を除けばコア10の外周面が円形である。このため、非円形のコアの場合のように、非円形のガラス外径加工、及び、非円形の孔形成等が不要である。よって、製造しやすく、量産性が良い。また、偏波保持性能を有さない円形のコアを有する通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができる。コア10が円形であることにより、クラッド20の外周面の真円度の制御も容易である。また、コア10の形状及び寸法の制御も容易である。

[0136] 偏波保持光ファイバ1等では、コア10及びクラッド20の内部には、SAPが設けられていない。また、低屈折率部40の熱膨張係数とコア10の熱膨張係数との差は、 $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下、 $2 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である。このため、熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすく、生産性が向上する。長さが10cm以上1m以下、1m以上5m以下、又は5m以上10m以下のときに、850nm以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークは、 -5.98 dB 以下である。このため、短距離において十分な偏波保持性能を有する。偏波保持光ファイバ1等では、長さが10cm以上1m以下、1m以上5m以下、又は5m以上10m以下でも、10dB以上の偏波消光比を実現することができる。

[0137] 第1実施形態及び第2実施形態に係る偏波保持光ファイバ1等の製造方法では、円筒対称である光学母材が用いられるので、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができる。低屈折率部母材は、光学母材の中心軸に関して点对称であると共に、光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する一对の孔に一本ずつ挿入される。これにより、非対称な屈折率分布を有し、偏波保

持性能を発揮する偏波保持コアが形成される。低屈折率部母材は、光学母材の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7}/K$ 以下、 $2 \times 10^{-7}/K$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7}/K$ 以下である熱膨張係数を有する。このため、熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすい。

[0138] 第2実施形態に係る偏波保持光ファイバ1等の製造方法では、円筒対称であるコア部を有する基本光ファイバ母材が用いられるので、通常の光ファイバとの接続損失を抑制することができる。低屈折率部母材は、コアの中心軸に関して点対称であると共に、光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する一対の孔に一本ずつ挿入される。これにより、非対称な屈折率分布を有し、偏波保持性能を発揮する偏波保持コアが形成される。低屈折率部母材は、光学母材の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7}/K$ 以下、 $2 \times 10^{-7}/K$ 以下、又は、 $1 \times 10^{-7}/K$ 以下である熱膨張係数を有する。このため、熱膨張係数の違いにより光ファイバ母材が破損又は破裂することが抑制される。よって、製造しやすい。

[0139] 本開示は上記実施形態及び上記変形例に限定されない。上記実施形態と上記変形例とは、適宜組み合わせられてもよい。

符号の説明

[0140] 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, 1G, 1H, 1I, 1J, 1O
 1, 102, 103, 104…偏波保持光ファイバ
 10…コア
 10c…中心軸
 20…クラッド
 20c…中心軸
 21…第1クラッド
 22…第2クラッド
 30…SAP
 40…低屈折率部

40c…中心軸

50…偏波保持コア

r10, r40…半径

r40…半径

d…距離

L1, L2, L3, L4…直線

請求の範囲

[請求項1]

少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、
前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、
、
前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、
を備える偏波保持光ファイバであって、
前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアは、ガラスからなるコアと、
前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一对の低屈折率部と、
を有し、
前記光学クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低く、
前記共通物理クラッドの屈折率は、前記コアの屈折率よりも低く、
前記偏波保持光ファイバの長手方向に直交する断面において、前記
一对の低屈折率部のそれぞれの外周の少なくとも一部は前記コアに接
すると共に、前記低屈折率部に接する部分を除けば前記コアの外周は
円形であり、
前記断面内の残留応力の絶対値の最大値が100MPa以下である
か、前記偏波保持光ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスの間
で熱膨張係数の差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下であるか、前記偏波保持光
ファイバを構成するそれぞれの部分のガラスが B_2O_3 の濃度が質量
分率で1%以下又は0%のシリカガラスであるかのいずれかであり、
前記断面において、X軸が前記一对の低屈折率部のそれぞれの中心
間を結ぶ直線に平行で前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞ
れの中心である原点を通る軸、Y軸が前記X軸に垂直で前記原点を通
る軸である前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれにおける
局所座標系で記述したニアフィールドでの強度分布を $I(X, Y)$ と
すると、下式で定義されるモードフィールド扁平率 f が、850nm
以上1625nm以下の範囲のいずれかの波長において、0.05以
上0.40以下である、

[数1]

$$f = 1 - \frac{\min(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}{\max(D4\sigma_x, D4\sigma_y)}$$

$$D4\sigma_x = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y)(X - \bar{X})^2 dXdY}{\iint I(X, Y)dXdY}}$$

$$D4\sigma_y = 4 \sqrt{\frac{\iint I(X, Y)(Y - \bar{Y})^2 dXdY}{\iint I(X, Y)dXdY}}$$

$$\bar{X} = \frac{\iint I(X, Y)XdXdY}{\iint I(X, Y)dXdY}$$

$$\bar{Y} = \frac{\iint I(X, Y)YdXdY}{\iint I(X, Y)dXdY}$$

偏波保持光ファイバ。

[請求項2]

前記断面において、

第1の条件を、前記一对の低屈折率部のそれぞれの外周は円形であることとし、

第2の条件を、前記一对の低屈折率部は、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸に関して点対称に配置されていることとし、

第3の条件を、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの屈折率分布は、前記低屈折率部を除けば、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸に関して軸対称であることとし、

第4の条件を、前記一对の低屈折率部のそれぞれの前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに接しない外周は、前記光学クラッドに接することとし、

第5の条件を、前記一对の低屈折率部のそれぞれは、ガラスからなり、前記偏波保持光ファイバを構成する前記低屈折率部のガラスの熱膨張係数と、そのほかの部分のガラスの熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下であるか、又は、前記低屈折率部のガラスにおける B_2O_3 の濃度は質量分率で1%以下又は0%であることとし、

前記第1から前記第5の条件のいずれか一つ以上を満たす、

請求項 1 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項3] 前記偏波保持コアは、複数の偏波保持コアである、
請求項 1 又は 2 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項4] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記共通物理クラッドの中心軸に関して 2 回以上の回転対称性を有するように配置されている、

請求項 3 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項5] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、前記偏波保持方向の方向も含めて、前記共通物理クラッドの中心軸に関して 2 回以上の回転対称性を有するように配置されている、

請求項 3 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項6] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、全ての前記偏波保持方向が互いに平行になるように配置されている、

請求項 3 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項7] 前記複数の偏波保持コアは、前記断面において、前記一对の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記複数の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向をそれぞれ有すると共に、前記偏波保持方向の方向も含めて、前記共通物理クラッドの中心軸を通る直線に関して線対称となるように配置されている、

請求項 3 に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項8] 前記コアの半径を r_{10} 、前記低屈折率部の半径を r_{40} 、前記光学クラッドの半径を r_{21} とし、

前記共通物理クラッドの屈折率を基準とする、前記コアの比屈折率差を Δ_{10} 、前記低屈折率部の比屈折率差を Δ_{40} 、前記光学クラッド

ドの比屈折率差を $\Delta 21$ とし、

前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸と前記低屈折率部の中心軸の距離を d とすると、

下式を満たす、

$$0.8 \leq r_{40} / r_{10} \leq 2.0$$

$$0.2 \leq (d - r_{21}) / r_{10} \leq 0.6$$

$$0.5\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 2.0\%$$

$$0.5\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 2.0\%$$

請求項1から請求項7のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項9]

下式で示される条件1又は条件2を満たす、

条件1：

$$3 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.6$$

$$0.70\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 0.85\%$$

$$0.70\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta 10 \leq 0.63\%$$

$$\Delta 21 \leq 0\%$$

$$\Delta 40 \leq 0\%$$

条件2：

$$3 \mu\text{m} \leq r_{10} \leq 6 \mu\text{m}$$

$$2.5 \leq r_{21} / r_{10} \leq 3.7$$

$$0.50\% \leq \Delta 10 - \Delta 40 \leq 0.65\%$$

$$0.50\% \leq \Delta 10 - \Delta 21 \leq 0.85\%$$

$$0.40\% \leq \Delta 10 \leq 0.53\%$$

$$\Delta 21 \leq 0\%$$

$$\Delta 40 \leq 0\%$$

請求項8に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項10]

波長1310nmにおいて、下式で定義されるモードフィールド平

均径が、 $3 \mu\text{m}$ 以上 $12 \mu\text{m}$ 以下である、

[数2]

$$MFD_{\text{avg}} = \sqrt{\frac{D4\sigma_x^2 + D4\sigma_y^2}{2}}$$

請求項1から請求項9のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項11] 850 nm 以上 1625 nm 以下の範囲のいずれかの波長において、複屈折は 5×10^{-6} 以上 5×10^{-5} 以下である、

請求項1から請求項10のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項12] 前記長手方向における長さが 10 cm 以上 10 m 以下のときに、 850 nm 以上 1625 nm 以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークが -26.4 dB 以上である、

請求項1から請求項11のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項13] 前記長手方向における長さが 10 cm 以上 10 m 以下のときに、 850 nm 以上 1625 nm 以下の範囲のいずれかの波長において、偏波クロストークが -7.2 dB 以下である、

請求項1から請求項12のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイバ。

[請求項14] 前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアは、前記断面において、前記対の低屈折率部の中心軸を結ぶ直線に垂直で前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアそれぞれの中心軸を通る偏波保持方向を有し、

前記偏波保持光ファイバは、半径 10 mm 以下の曲げが付与されると共に、前記断面において、曲げ半径方向と前記偏波保持方向とが互いに直交するか、互いに平行をなすように保持部材に固定されている、

請求項1から請求項13のいずれか1項に記載の偏波保持光ファイ

バ。

[請求項15]

ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法であって、

ガラスからなり、円筒対称であると共に、コア部と光学クラッド部を含む光学母材を用意することと、

ガラスからなり、円筒対称であると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有する低屈折率部母材を用意することと、

前記光学母材の中心軸に直交する断面において前記光学母材の中心軸に関して点対称であると共に、前記光学母材の中心軸と平行な中心軸を有する円筒状の一対の孔を前記光学母材に形成することと、

前記低屈折率部母材を前記光学母材の孔に一本ずつ挿入し、加熱により一体化して前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を形成することと、

前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に共通物理クラッド部を付加したのち、又は付加しながら、延伸することで紡糸することと、を含む、

偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項16]

前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有する共通物理クラッド部を付加することにより、偏波保持光ファイバ母材を形成し、

前記偏波保持光ファイバ母材を加熱により熔融すると共に延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸する、

請求項15に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項17]

前記偏波保持光ファイバ母材を形成することは、

ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が 5×10^{-7} / K以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、

前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の少なくとも1つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、

前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも1つの孔に一本ずつ挿入することと、

前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材とを加熱により一体化することと、を含む、

請求項16に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項18]

前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材の周囲に共通物理クラッド部を付加したのち、又は付加しながら、延伸することで紡糸することは、

ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が 5×10^{-7} / K以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、

前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の少なくとも1つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、

前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも1つ以上の孔に一本ずつ挿入することと、

前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記少なくとも1つ以上の偏波保持光学母材とを加熱により一体化すると共に、溶融及び延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸することと、を含む、

請求項15に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項19]

ガラスからなるコアと、前記コアの屈折率よりも低い屈折率を有する一対の低屈折率部と、を有する少なくとも1つ以上の偏波保持コアと、前記少なくとも1つ以上の偏波保持コアを取り囲む光学クラッドと、前記光学クラッドを取り囲む共通物理クラッドと、を備える偏波保持光ファイバの製造方法であって、

ガラスからなり、円筒対称であるコア部と、前記コア部を取り囲み、円筒対称であると共に、ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する光学クラッド部と、前記光学クラッド部を取り囲み、ガラスからなり、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有すると共に、前記コア部の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有する共通物理クラッド部と、を有する基本光ファイバ母材を用意することと、

前記コア部の中心軸に直交する断面において前記コア部の中心軸に関して点対称であると共に、前記コア部の中心軸に対して平行となる中心軸を有する円筒状の一対の孔を、それぞれの少なくとも一部が前記コア部と光学クラッド部とにわたり形成されるように、前記基本光ファイバ母材に形成することと、

ガラスからなり、前記コア部の熱膨張係数との差及び前記共通物理クラッド部の熱膨張係数との差がそれぞれ $5 \times 10^{-7} / \text{K}$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、円筒対称であり、前記孔に挿入可能なように調整された外径を有する低屈折率部母材を用意することと、

前記低屈折率部母材を前記基本光ファイバ母材の孔に一本ずつ挿入し、一体化したのち、又は一体化しながら、延伸することで紡糸することと、を含む、

偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項20]

前記基本光ファイバ母材と、前記基本光ファイバ母材の孔に挿入された前記低屈折率部母材とを加熱により一体化して偏波保持光ファイ

バ母材を形成した後、前記偏波保持光ファイバ母材を加熱により溶融すると共に延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸する、

請求項 19 に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項21]

前記基本光ファイバ母材と、前記基本光ファイバ母材の孔に挿入された前記低屈折率部母材とを加熱により一体化すると共に、溶融及び延伸することで偏波保持光ファイバとして紡糸する、

請求項 19 に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

[請求項22]

前記基本光ファイバ母材を用意することは、

前記コア部及び前記光学クラッド部を有する前記少なくとも 1 つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも 1 つ以上の光学母材を用意することと、

ガラスからなり、前記少なくとも 1 つ以上の光学母材の熱膨張係数との差が $5 \times 10^{-7} / K$ 以下である熱膨張係数を有すると共に、外周が所定の軸に沿って並進対称性を有する物理クラッド母材を用意することと、

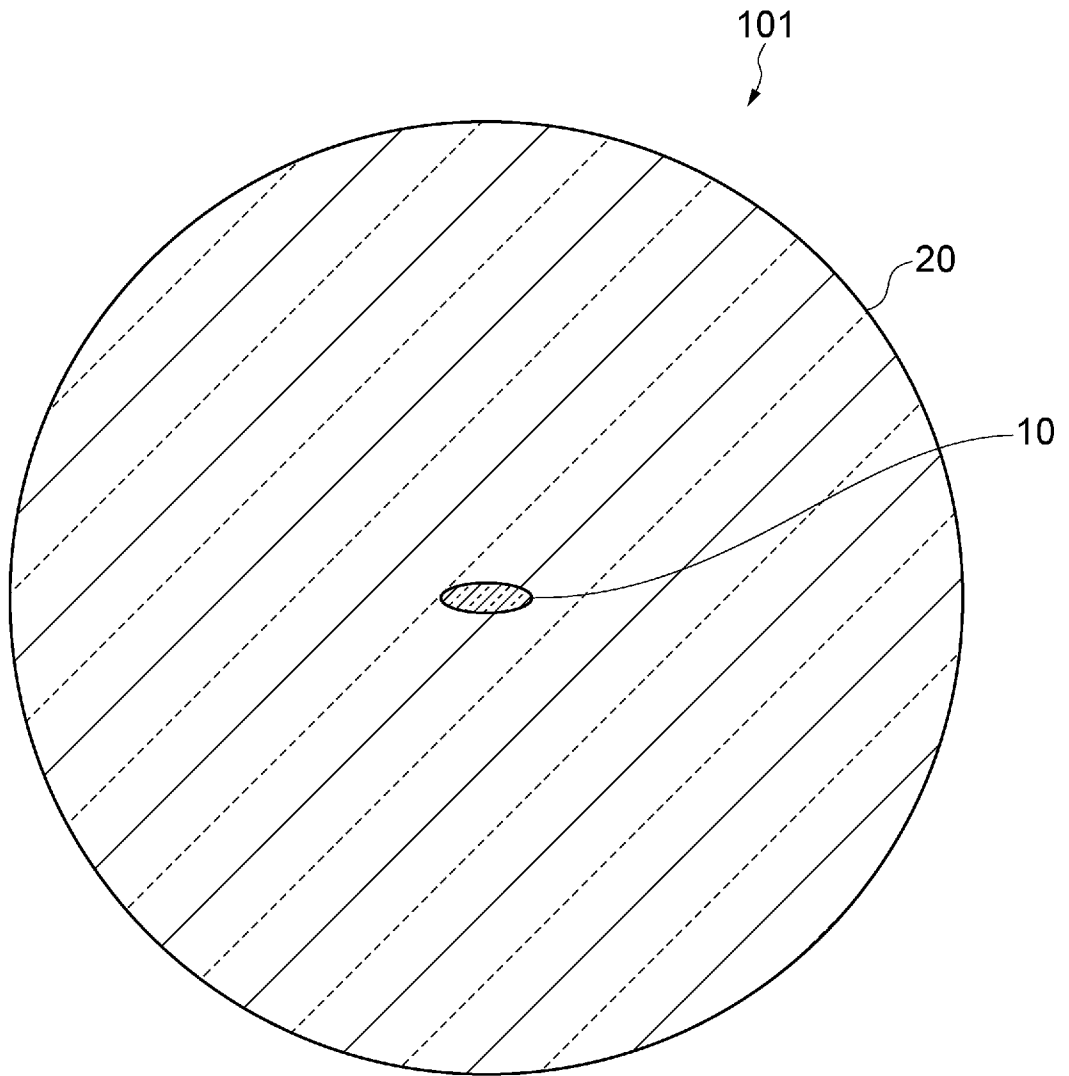
前記物理クラッド母材の前記所定の軸に直交する断面において、前記物理クラッド母材の前記所定の軸と平行な中心軸を有する円筒状の前記少なくとも 1 つ以上の偏波保持コアに対応する少なくとも 1 つの孔を前記物理クラッド母材に形成することと、

前記少なくとも 1 つ以上の光学母材を前記物理クラッド母材の前記少なくとも 1 つの孔に一本ずつ挿入することと、

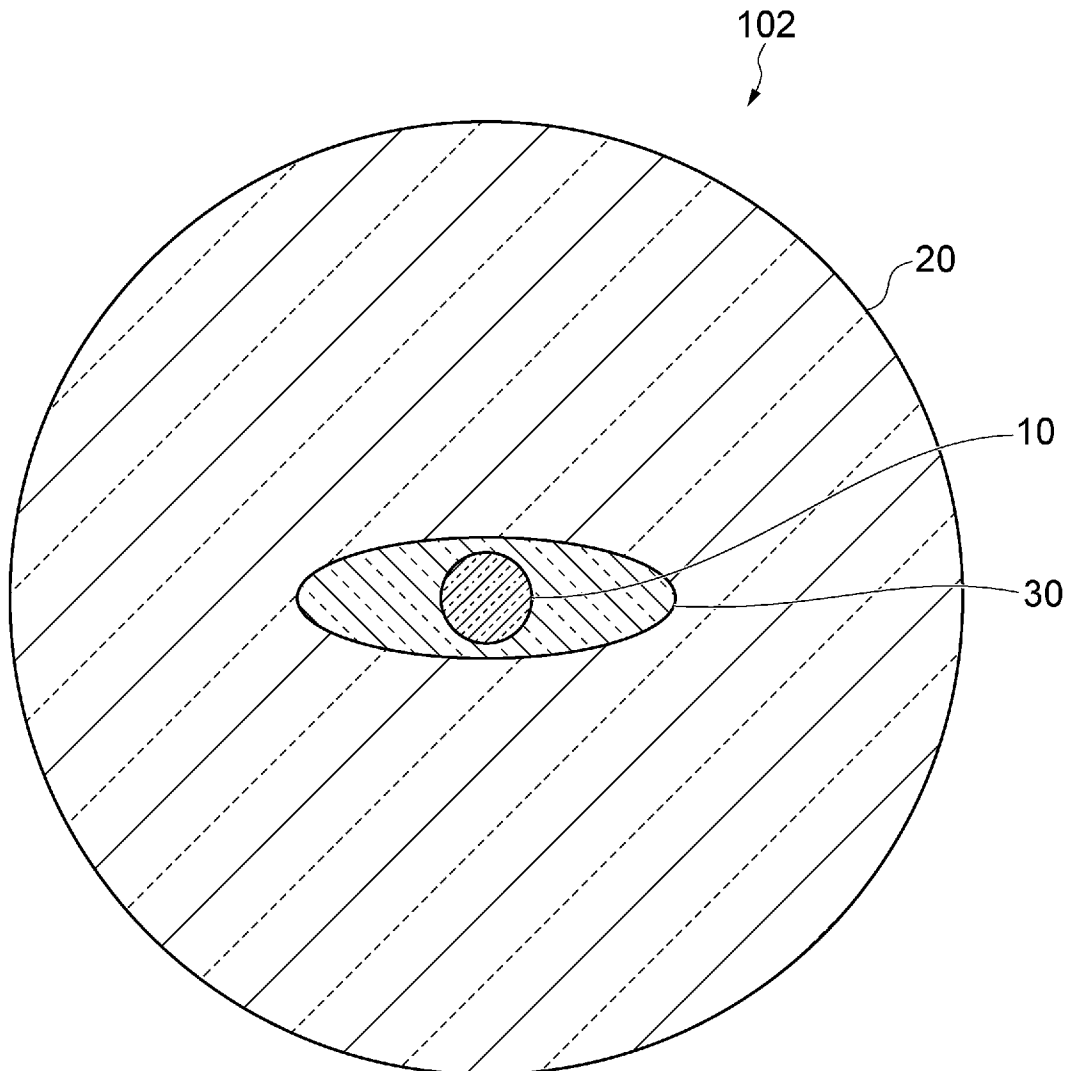
前記物理クラッド母材と、前記物理クラッド母材に挿入された前記光学母材とを加熱により一体化することにより、前記基本光ファイバ母材を形成することと、を含む、

請求項 19 から請求項 21 のいずれか 1 項に記載の偏波保持光ファイバの製造方法。

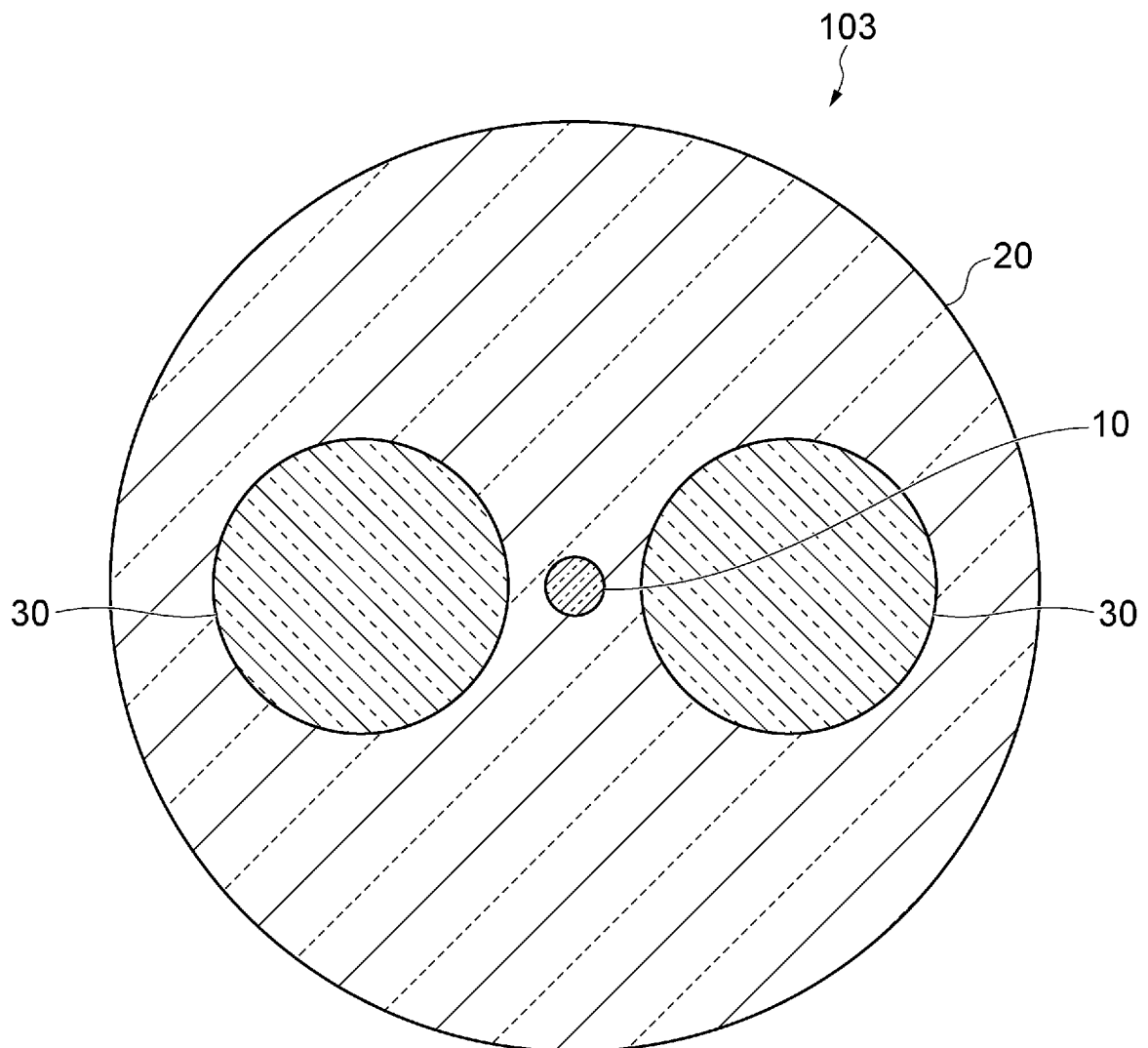
[図1]



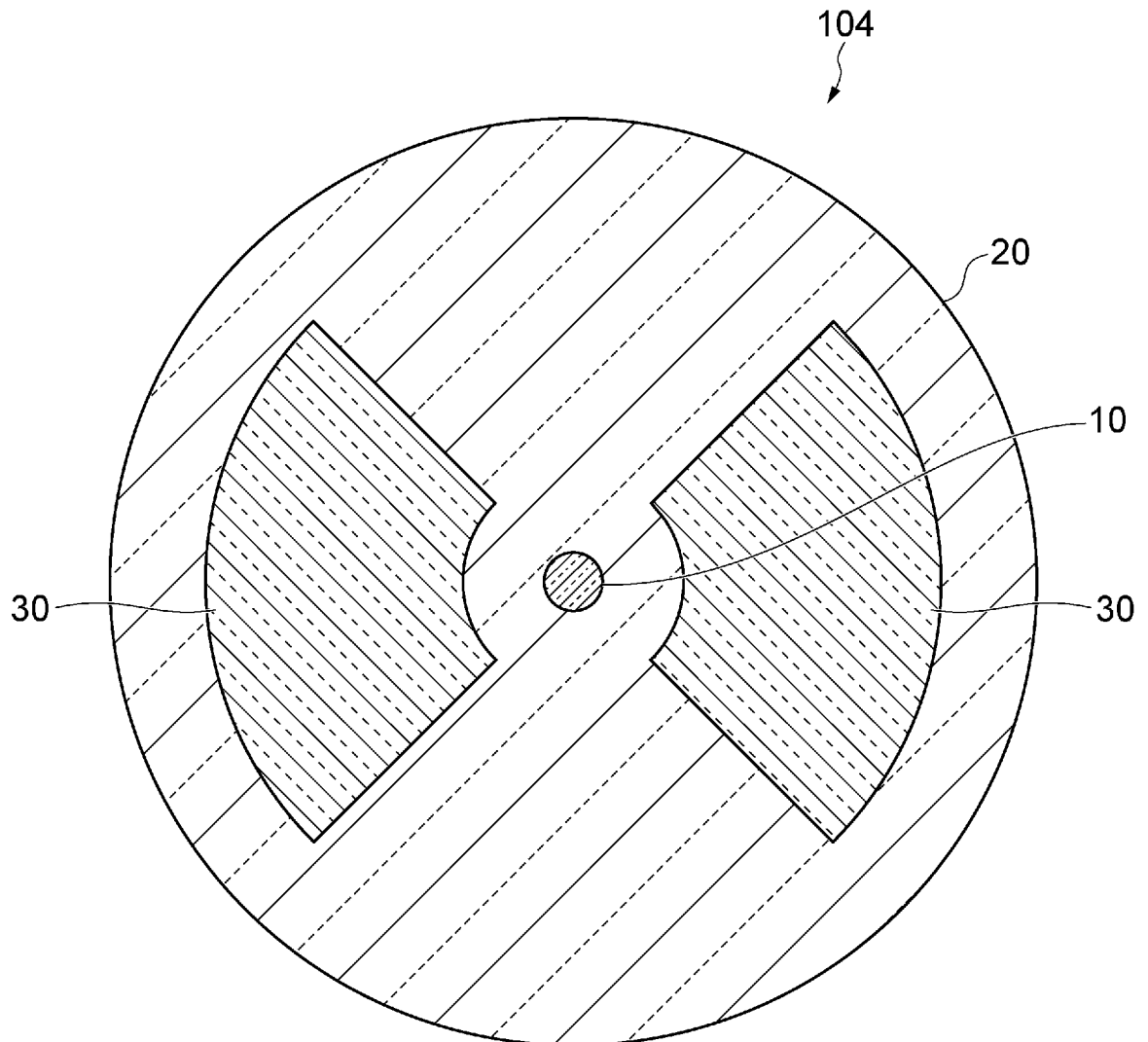
[図2]



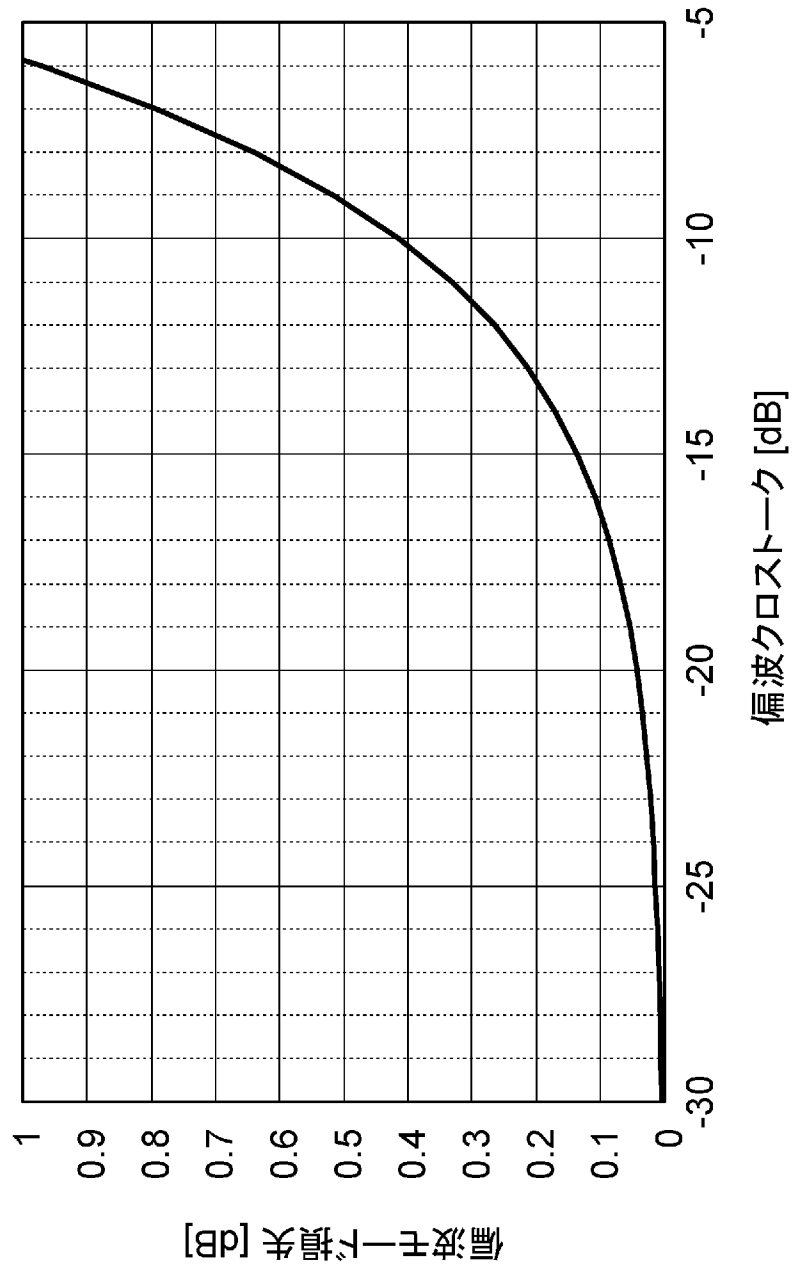
[図3]



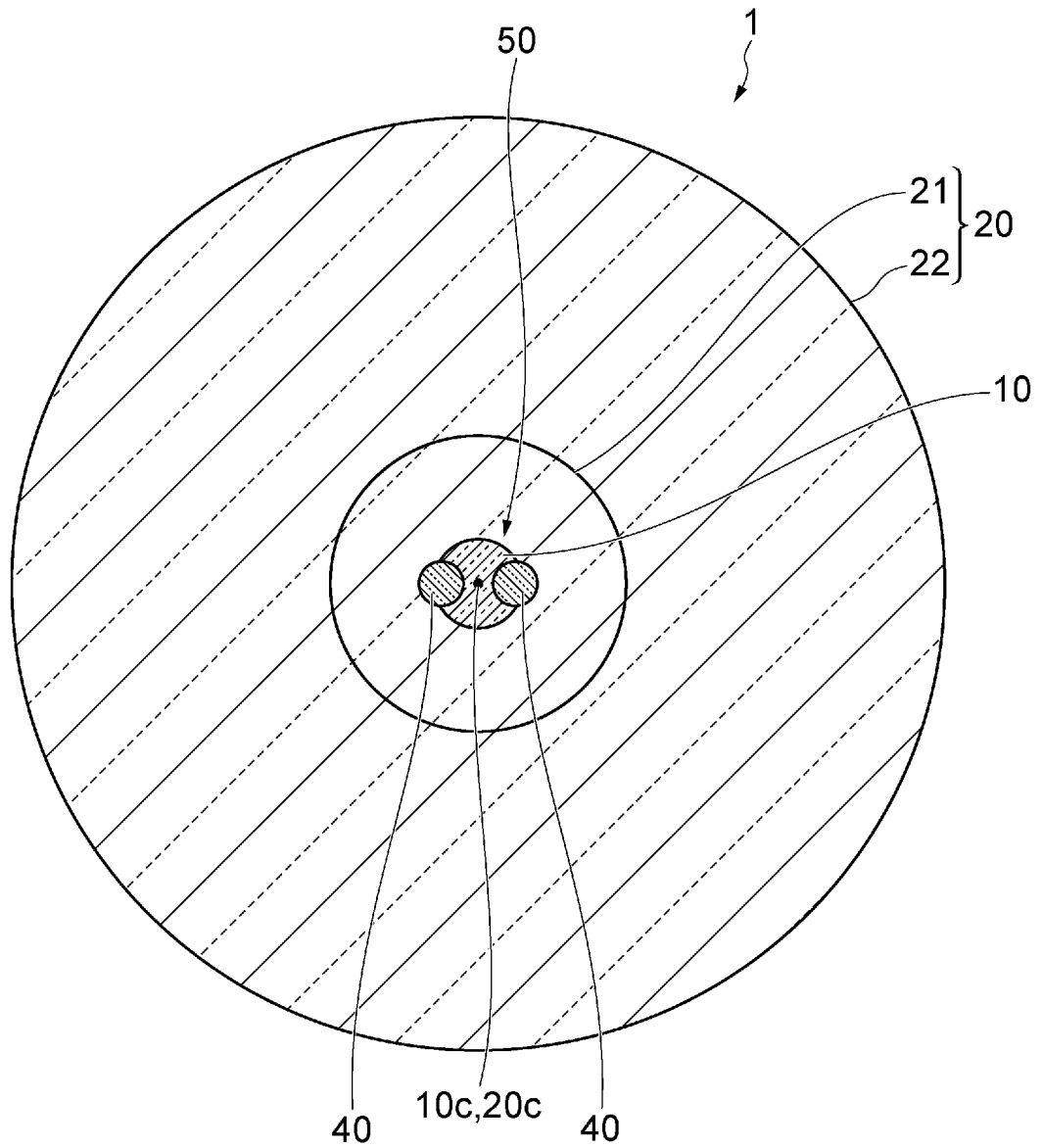
[図4]



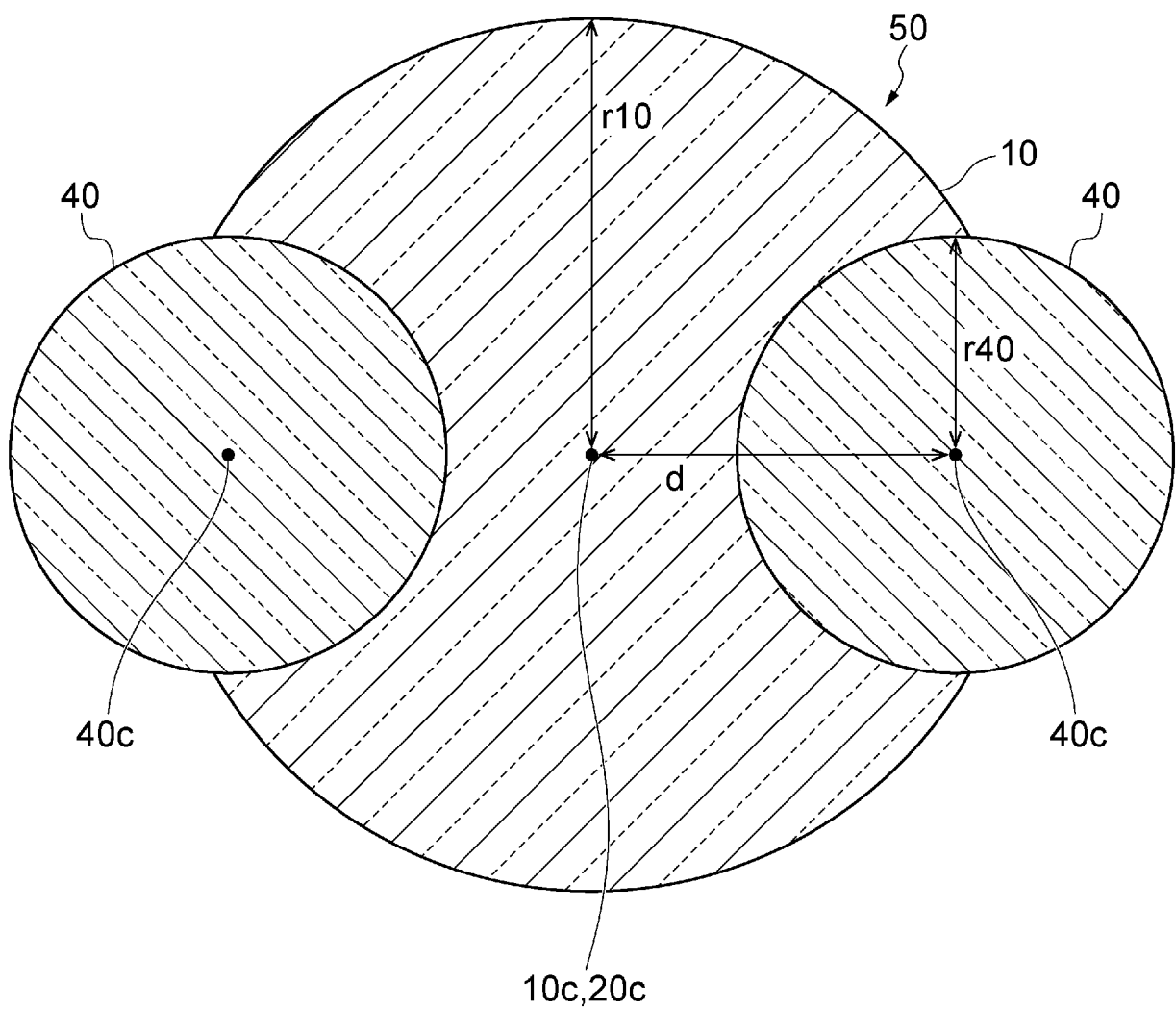
[図5]



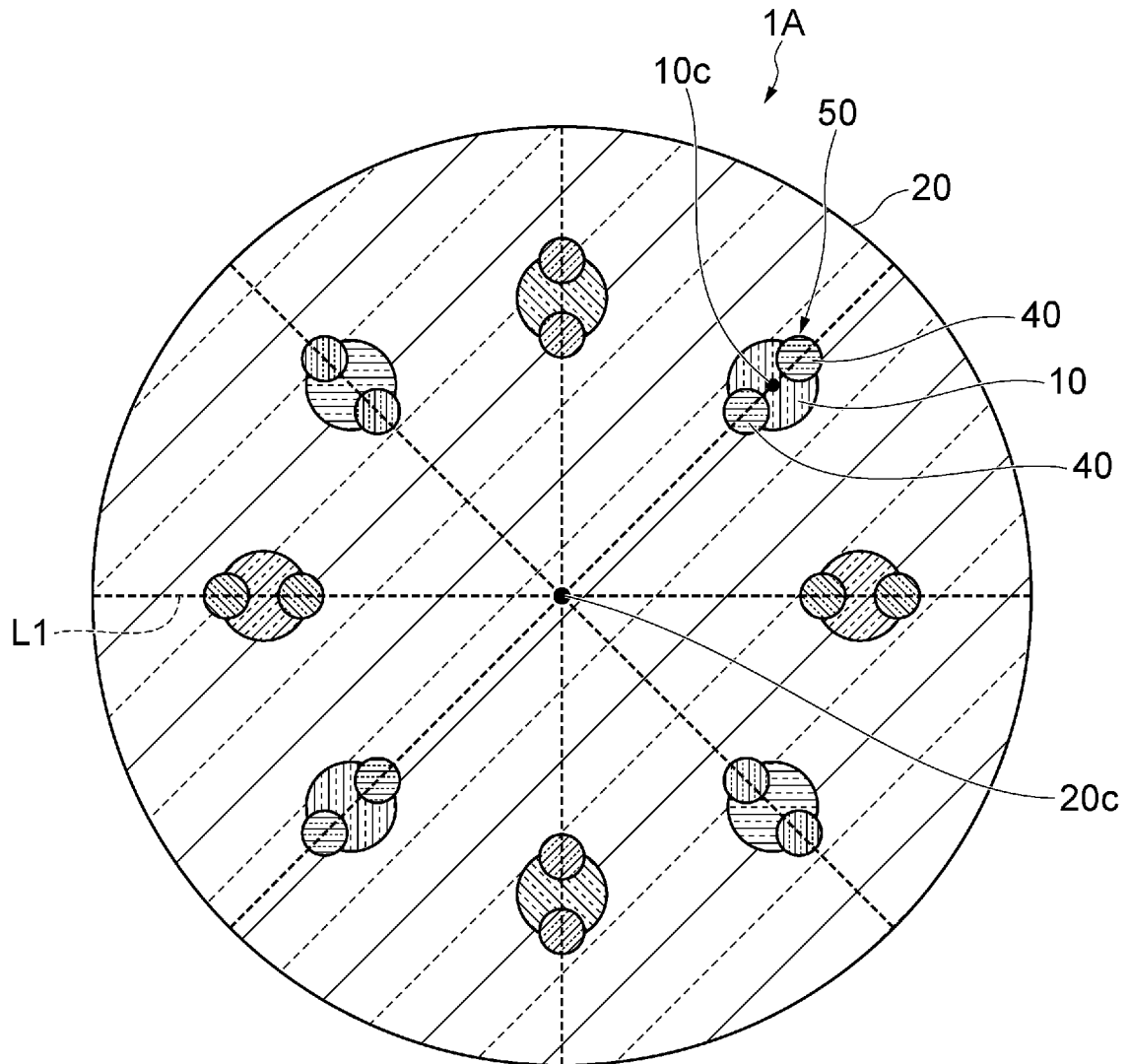
[図6]



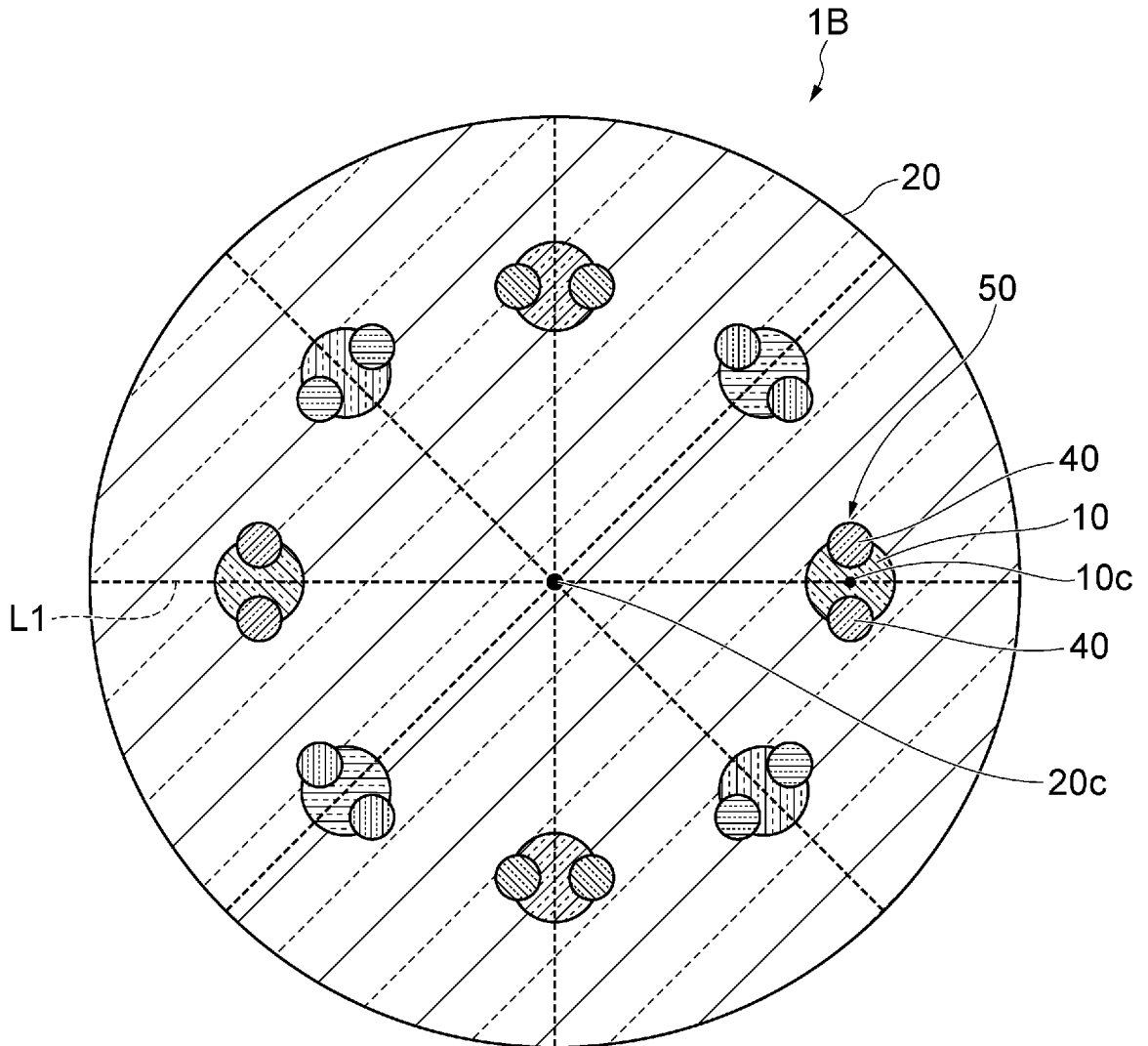
[図7]



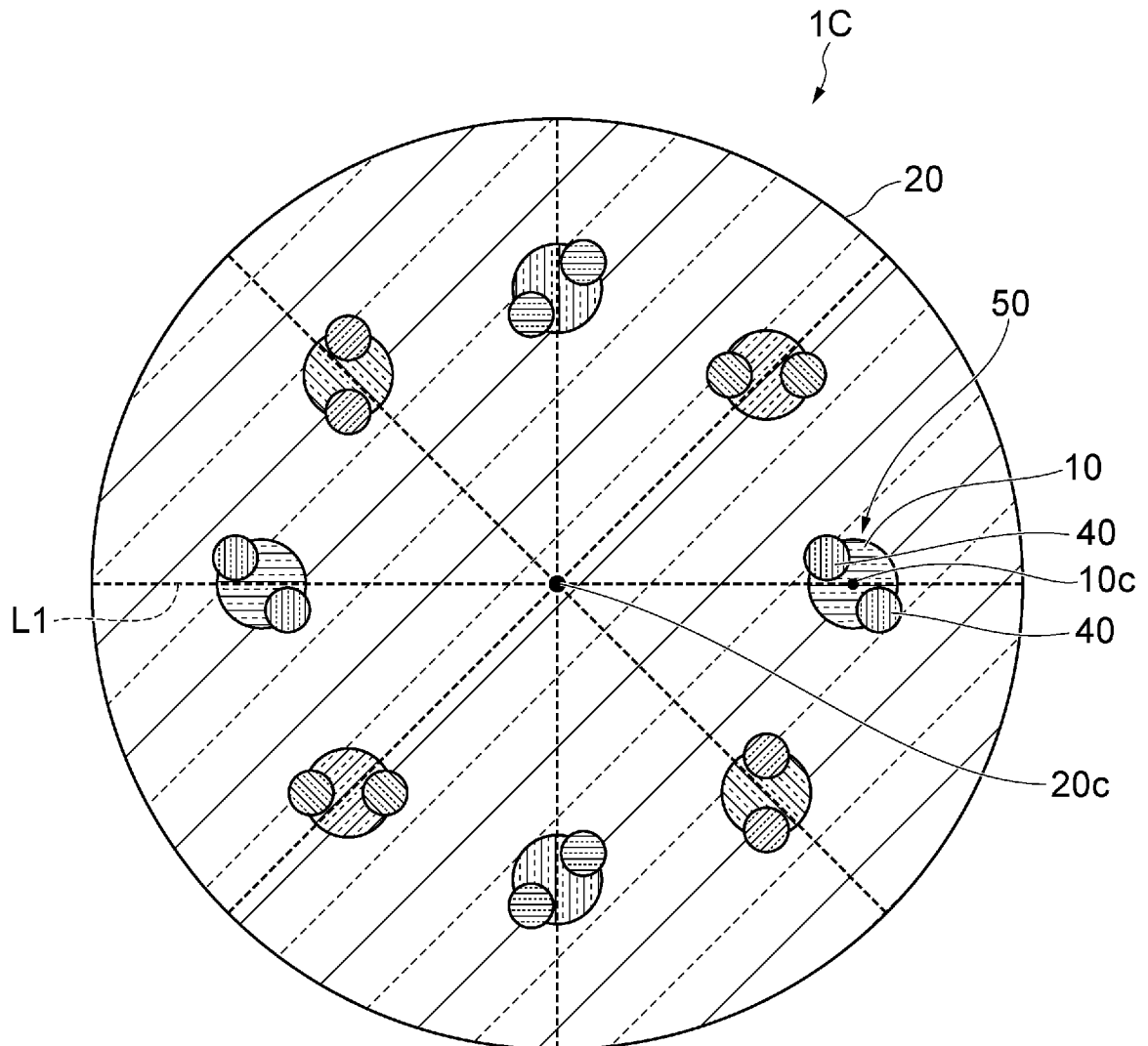
[図8]



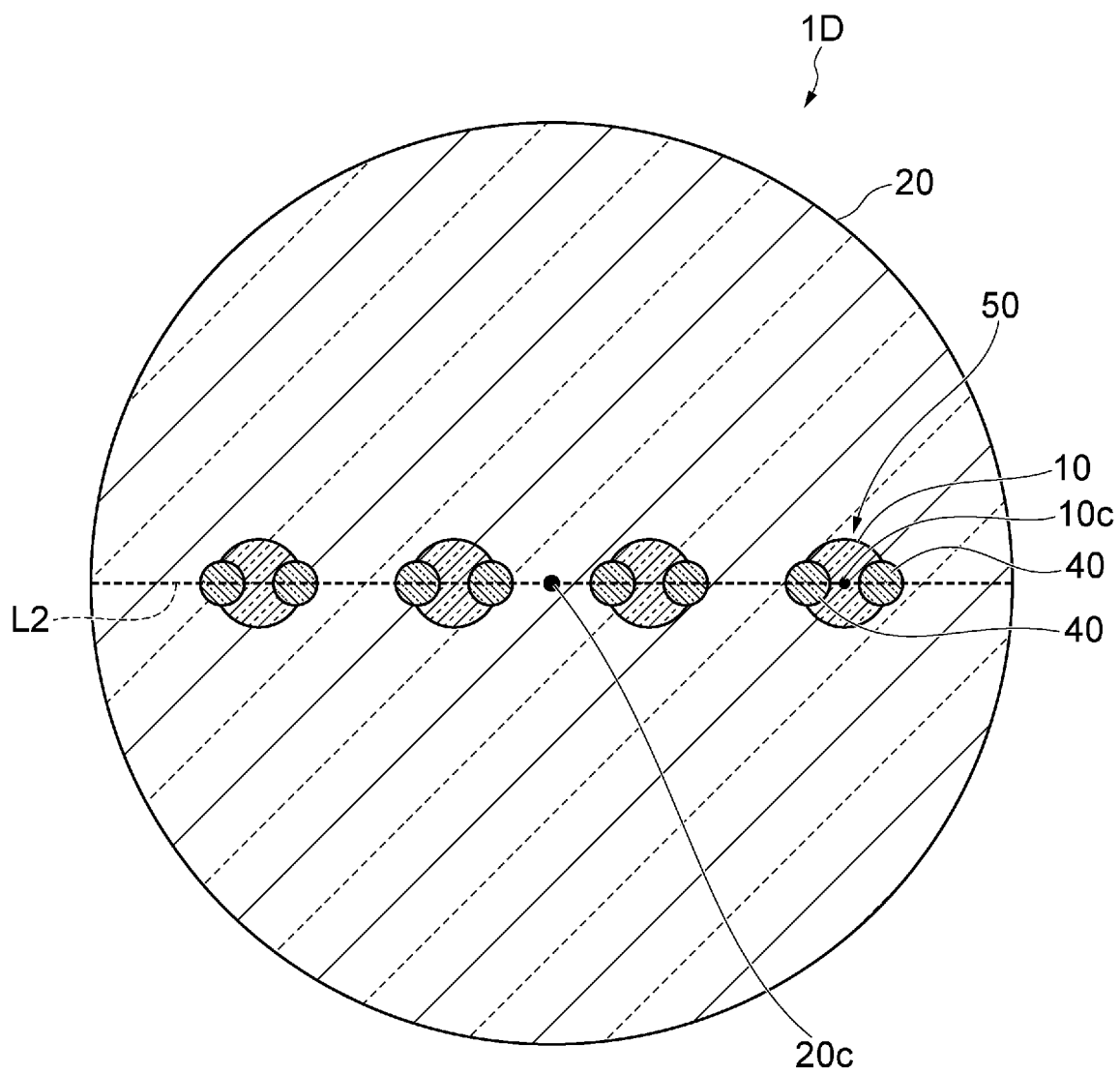
[図9]



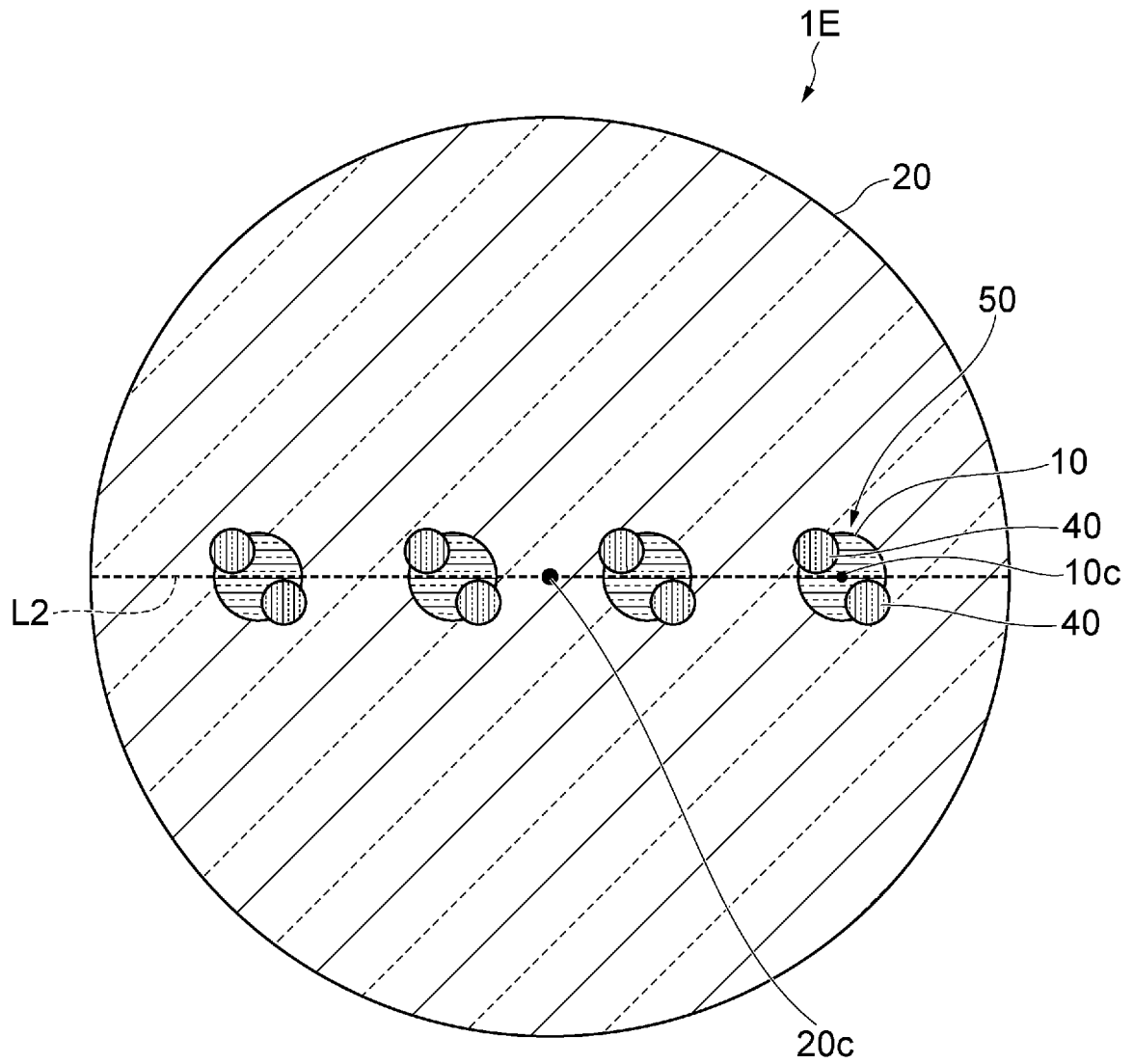
[図10]



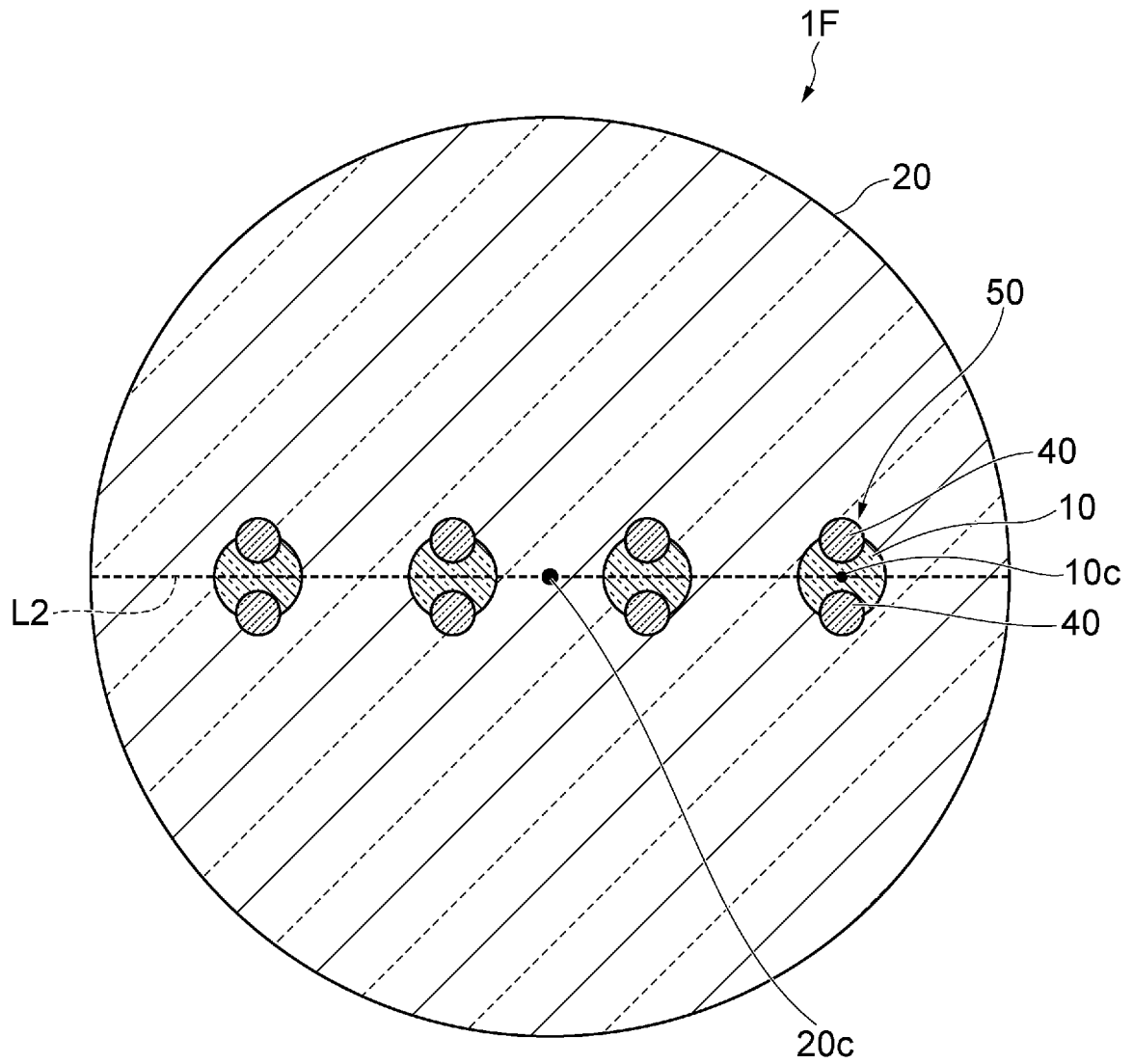
[図11]



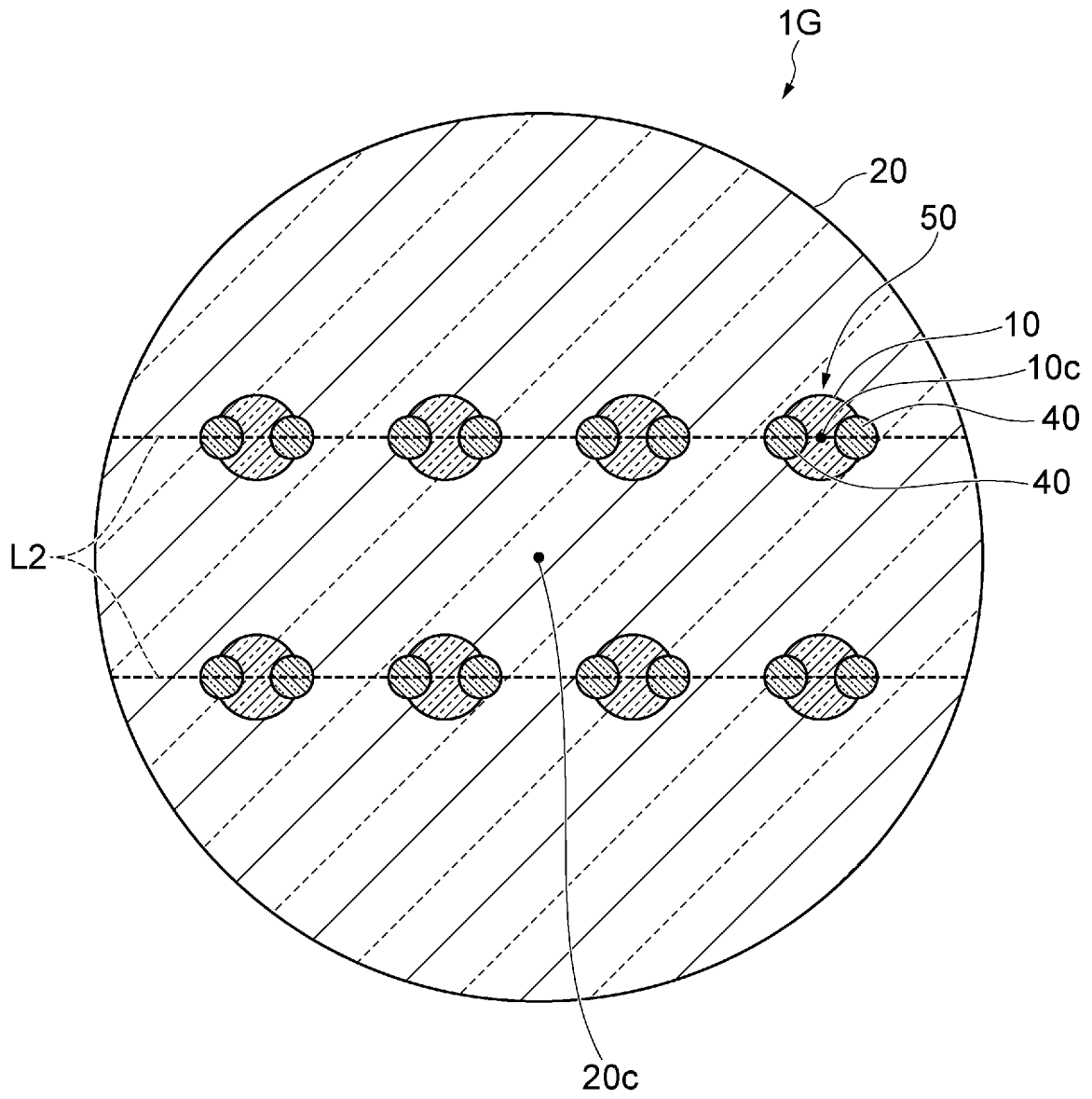
[図12]



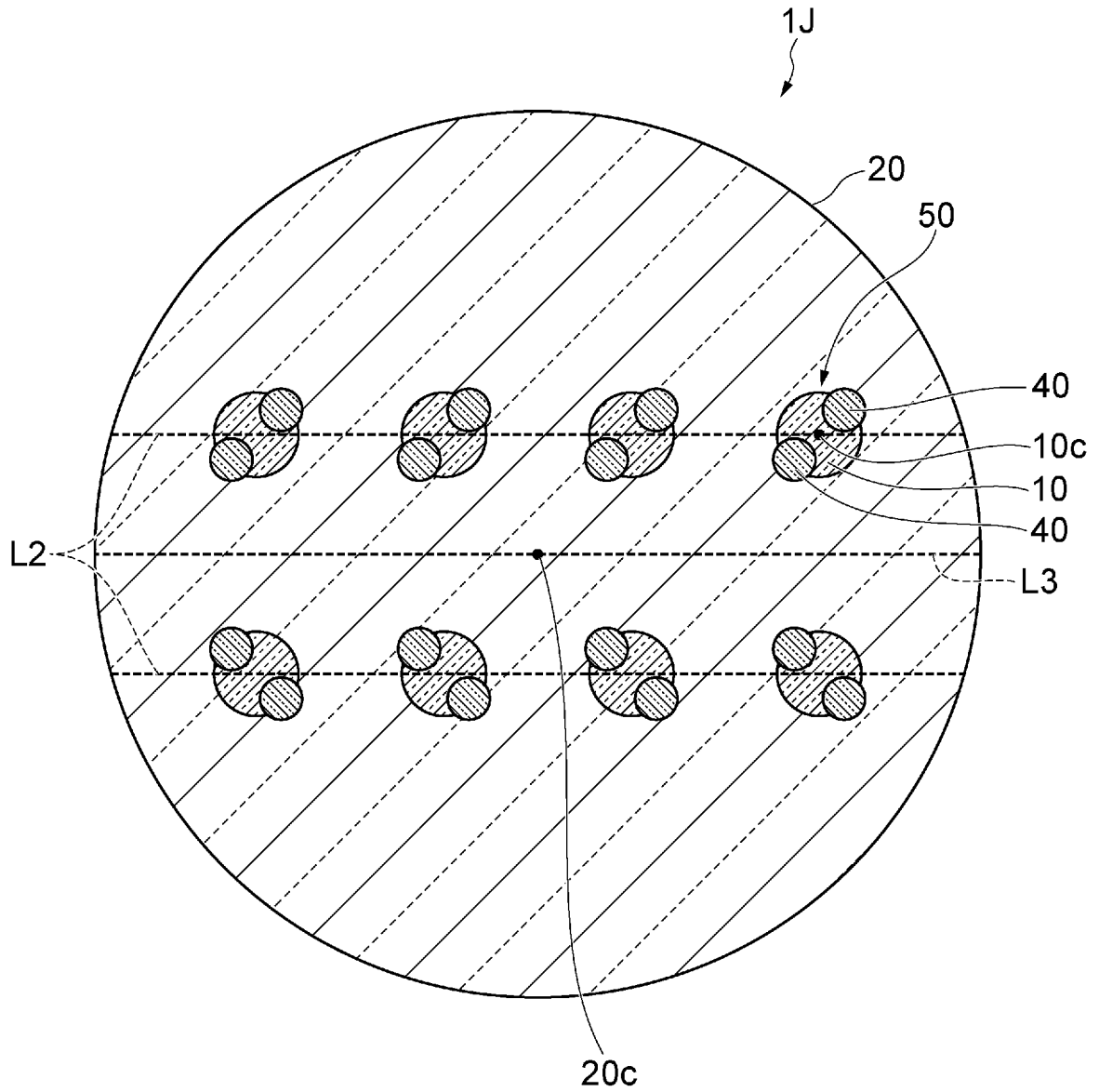
[図13]



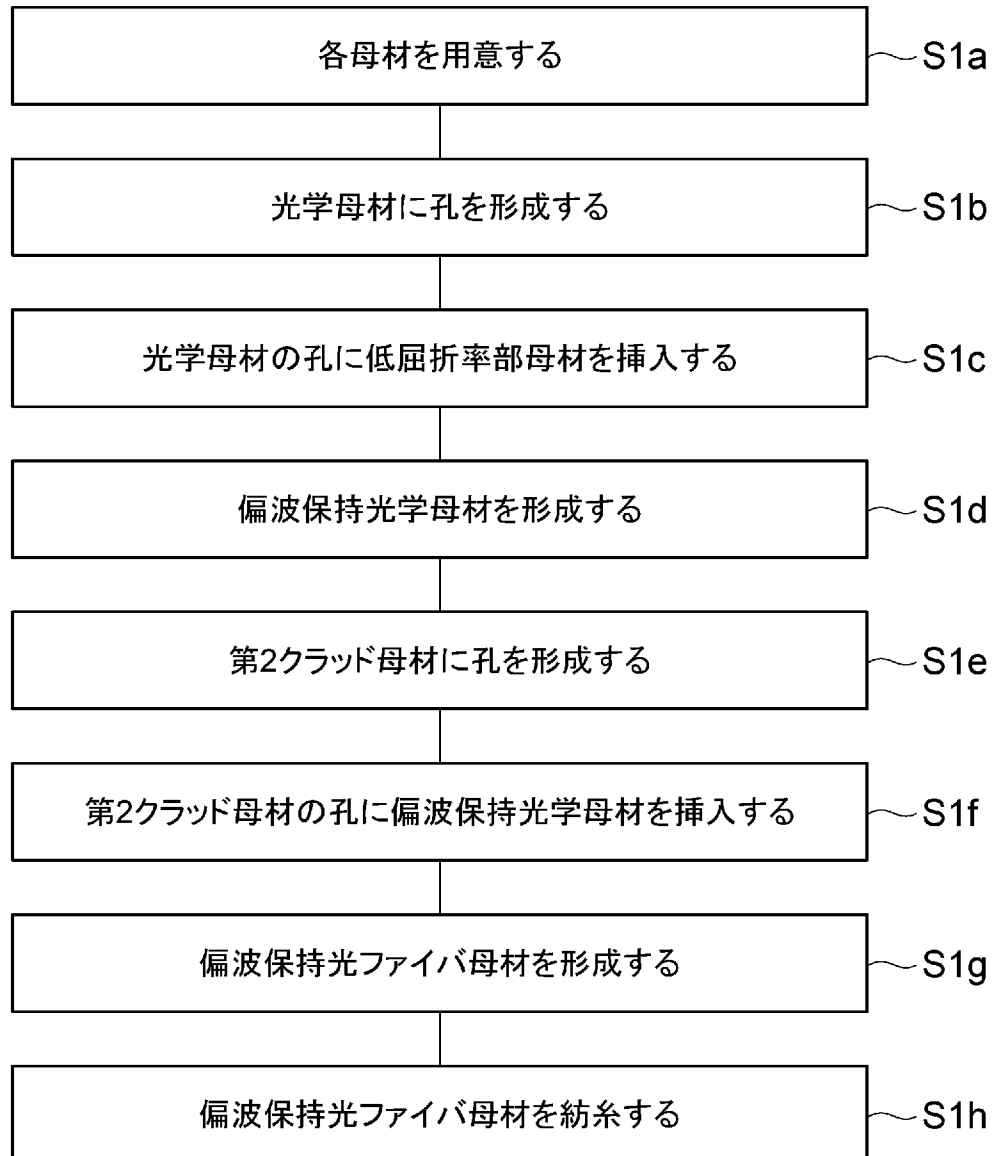
[図14]



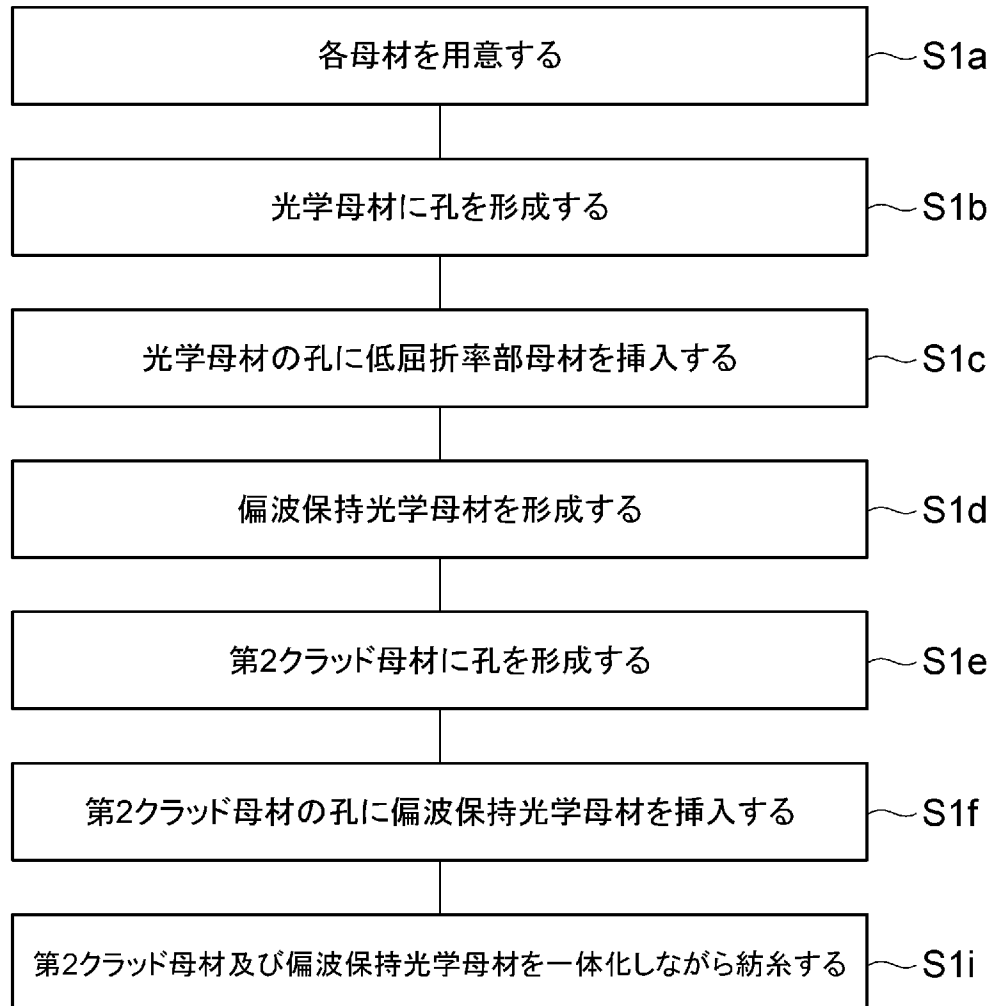
[図17]



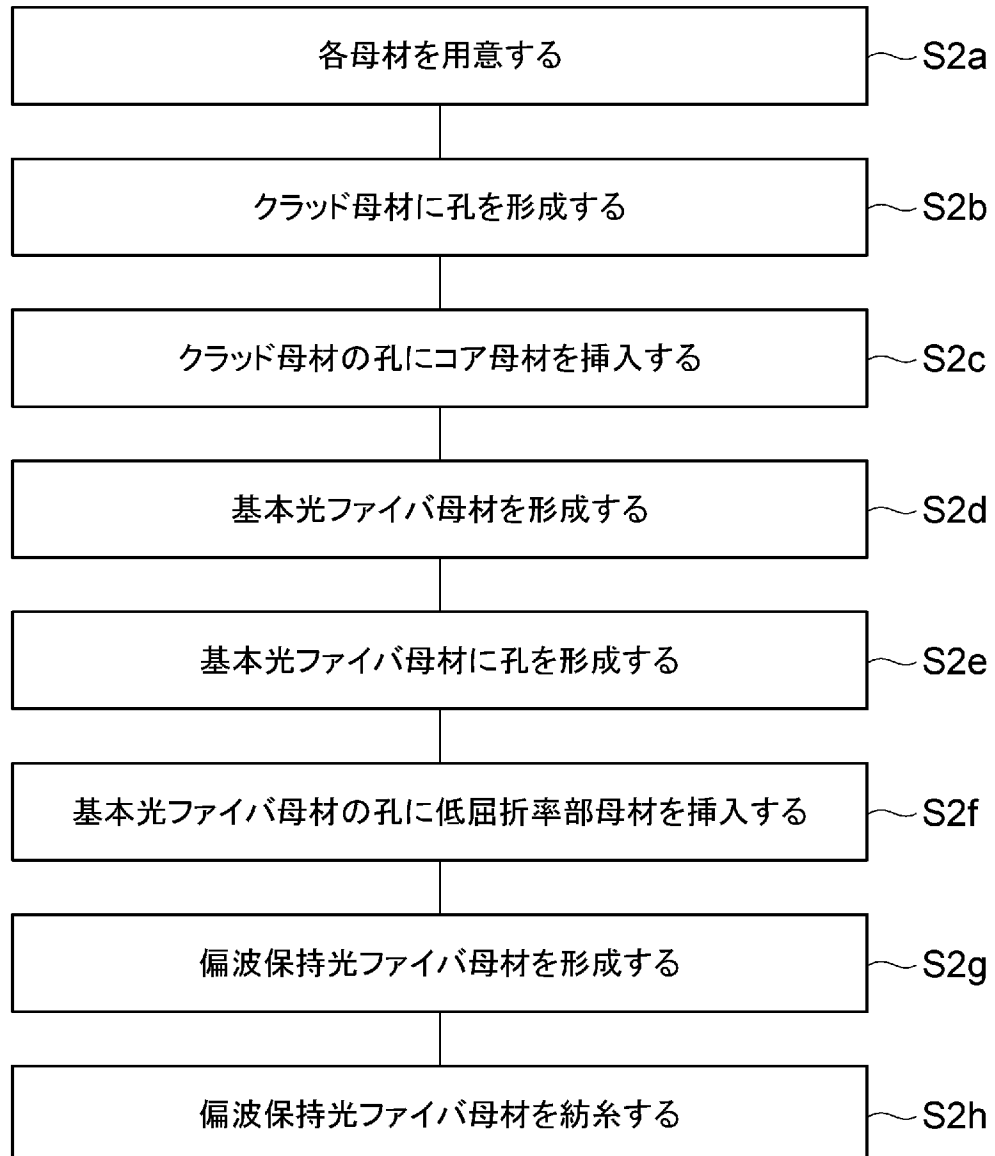
[図18]



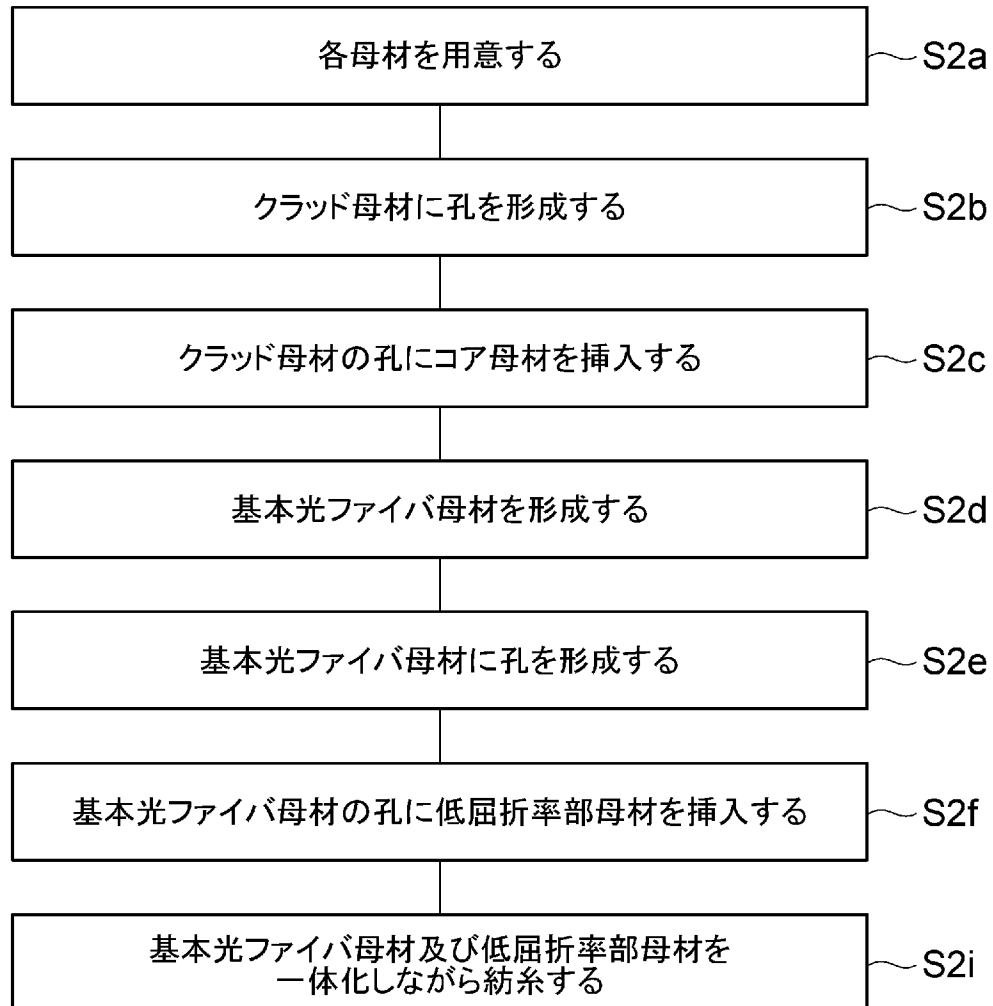
[図19]



[図20]



[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/004871

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>C03B 37/012</i> (2006.01)i; <i>G02B 6/02</i> (2006.01)i; <i>G02B 6/024</i> (2006.01)i; <i>G02B 6/036</i> (2006.01)i FI: G02B6/024; G02B6/02 356A; G02B6/036; G02B6/02 461; C03B37/012 C		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B6/02-6/036; G02B6/44; C03B37/00-37/16		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2018-512618 A (CORNING INCORPORATED) 17 May 2018 (2018-05-17) paragraphs [0003]-[0064], fig. 1, 2B	1-2, 8-17
Y		3-14, 18-22
Y	JP 2013-080126 A (SUMITOMO ELECTRIC IND LTD) 02 May 2013 (2013-05-02) paragraphs [0021]-[0029], [0034]-[0040], [0044], fig. 3-4, 7-8	3-14, 18
Y	US 2013/0071082 A1 (GAGNON et al.) 21 March 2013 (2013-03-21) paragraphs [0025]-[0083], fig. 1-6	19-22
Y	JP 61-267707 A (SUMITOMO ELECTRIC IND LTD) 27 November 1986 (1986-11-27) p. 3, lower left column, line 16 to p. 5, lower right column, line 3, fig. 1-2	19-22
A	US 2009/0080843 A1 (BOOKBINDER et al.) 26 March 2009 (2009-03-26) paragraphs [0002]-[0036], fig. 2A	1-22
A	JP 2017-016002 A (FUJIKURA LTD) 19 January 2017 (2017-01-19) paragraph [0030]	1-22
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 28 March 2022		Date of mailing of the international search report 12 April 2022
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/004871

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2018-512618	A	17 May 2018	US 2016/0274299 A1 paragraphs [0004]-[0047], fig. 1, 2B KR 10-2017-0129237 A	
JP	2013-080126	A	02 May 2013	US 2013/0108206 A1 paragraphs [0031]-[0039], [0044]-[0050], [0054], fig. 3-4, 7-8	
US	2013/0071082	A1	21 March 2013	CN 102933995 A	
JP	61-267707	A	27 November 1986	(Family: none)	
US	2009/0080843	A1	26 March 2009	(Family: none)	
JP	2017-016002	A	19 January 2017	US 2017/0219768 A1 paragraph [0035] EP 3163339 A1 CN 106489087 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） C03B 37/012(2006.01)i; G02B 6/02(2006.01)i; G02B 6/024(2006.01)i; G02B 6/036(2006.01)i FI: G02B6/024; G02B6/02 356A; G02B6/036; G02B6/02 461; C03B37/012 C		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G02B6/02-6/036; G02B6/44; C03B37/00-37/16 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2022年 日本国実用新案登録公報 1996-2022年 日本国登録実用新案公報 1994-2022年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2018-512618 A (コーニング インコーポレイテッド) 17.05.2018 (2018-05-17) [0003]-[0064], 図1, 2B	1-2, 8-17
Y		3-14, 18-22
Y	JP 2013-080126 A (住友電気工業株式会社) 02.05.2013 (2013-05-02) [0021]-[0029], [0034]-[0040], [0044], 図3-4, 7-8	3-14, 18
Y	US 2013/0071082 A1 (GAGNON et al.) 21.03.2013 (2013-03-21) [0025]-[0083], 図1-6	19-22
Y	JP 61-267707 A (住友電気工業株式会社) 27.11.1986 (1986-11-27) 第3頁左下欄第16行-第5頁右下欄第3行, 第1-2図	19-22
A	US 2009/0080843 A1 (BOOKBINDER et al.) 26.03.2009 (2009-03-26) [0002]-[0036], 図2A	1-22
A	JP 2017-016002 A (株式会社フジクラ) 19.01.2017 (2017-01-19) [0030]	1-22
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 28.03.2022	国際調査報告の発送日 12.04.2022	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 奥村 政人 2L 4752 電話番号 03-3581-1101 内線 3295	

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
 PCT/JP2022/004871

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2018-512618 A	17.05.2018	US 2016/0274299 A1 [0004]-[0047], 図1, 2B KR 10-2017-0129237 A	
JP 2013-080126 A	02.05.2013	US 2013/0108206 A1 [0031]-[0039], [0044]- [0050], [0054], 図3-4, 7-8	
US 2013/0071082 A1	21.03.2013	CN 102933995 A	
JP 61-267707 A	27.11.1986	(ファミリーなし)	
US 2009/0080843 A1	26.03.2009	(ファミリーなし)	
JP 2017-016002 A	19.01.2017	US 2017/0219768 A1 [0035] EP 3163339 A1 CN 106489087 A	