(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
2011 年 9 月 22 日(22.09.2011)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2011/114795 A1

(51) 国際特許分類:
G02B 6/04 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2011/052381

(22) 国際出願日: 2011 年 2 月 4 日(04.02.2011)

(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 2010-059960 2010 年 3 月 16 日(16.03.2010) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 古河電気工業株式会社 (**FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.**) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内二丁目２番３号 Tokyo (JP).

(72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 今村 勝徳 (**IMAMURA, Katsunori**) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内二丁目２番３号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 酒井 宏明, 外 (**SAKAI, Hiroaki** et al.); 〒1006020 東京都千代田区霞が関三丁目２番５号 霞が関ビルディング 酒井国際特許事務所 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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

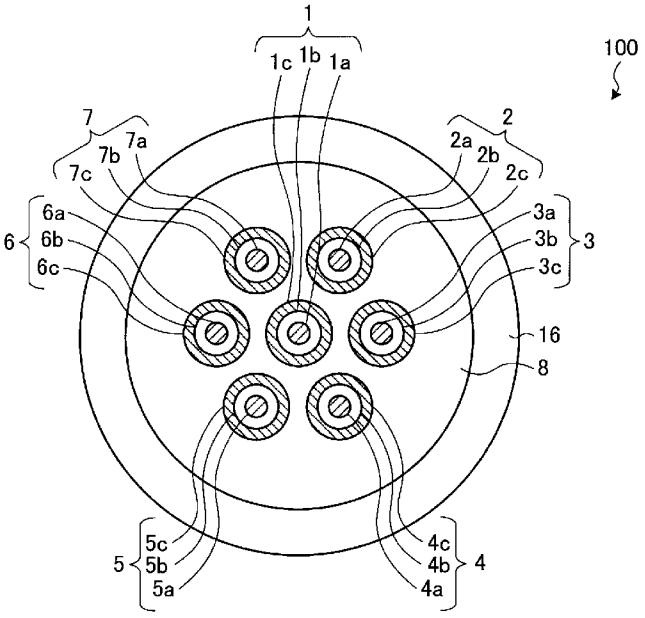
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM,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

添付公開書類:
— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

(54) **Title**: MULTI-CORE OPTICAL FIBRE AND PRODUCTION METHOD FOR SAME

(54) 発明の名称 : マルチコア光ファイバおよびその製造方法

[図1]



(57) **Abstract**: The disclosed multi-core optical fibre has a plurality of core sections, and cladding sections which are positioned at the outer circumference of each of the core sections. The core sections are each provided with a centrally positioned central core section having a greater refractive index than the cladding section, and a depressed section which is formed so as surround the outer circumference of the central core section whilst leaving a gap there-from, and which has a lower refractive index than the cladding section. For each core section, the separation from the adjacent core sections is set such that crosstalk in the light between core sections in the entire length is not greater than -30dB at a wavelength of 1.55 μm. Thus, the disclosed multi-core optical fibre and production method for the same enable crosstalk between core sections to be suppressed, and core sections to be arranged at a higher density.

(57) 要約: 複数のコア部と、前記各コア部の外周に位置するクラッド部と、を有し、前記コア部は、中心に位置し前記クラッド部よりも屈折率が高い中心コア部と、前記中心コア部の外周を離間して囲むように形成され前記クラッド部の屈折率よりも低い屈折率を有するディプレスト部と、を備え、前記各コア部は、隣接するコア部との離隔距離が、全長における該コア部間での光のクロストークが波長１．５５μｍにおいて－３０ｄＢ以下となるように、設定されている。これによって、コア部間のクロストークを抑制しつつ、より高密度にコア部を配置できるマルチコア光ファイバおよびその製造方法を提供する。

WO 2011/114795 A1

明　細　書

発明の名称 ： マルチコア光ファイバおよびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、マルチコア光ファイバおよびその製造方法に関するものである。

背景技術

[0002] 複数のコア部を有するマルチコア光ファイバは、光通信ケーブルに光ファイバを高密度に収容することが要求される光伝送路や、機器内における高密度配線が要求されている光インターコネクションシステムなどにおいて利用されることが想定されている。マルチコア光ファイバには、従来の光ファイバと同様に、互いに屈折率が異なる媒質からなるコア部とクラッド部との屈折率差によってコア部に光を閉じ込める種類のもの（たとえば非特許文献１参照）がある。マルチコア光ファイバでは、長手方向に垂直な断面において複数のコア部が所定の間隔で互いに離隔しており、コア部間のクロストークを抑制しつつコア部の高密度な配置が実現されている。

[0003] 一方、シングルモード光ファイバの有効コア断面積（Ａeff）の拡大を実現するために、トレンチ型の屈折率プロファイルを有する光ファイバが開示されている（たとえば非特許文献２）。

先行技術文献

非特許文献

[0004] 非特許文献1：M. Koshiba, et al., “Heterogeneous multi-core fibers proposal and design principle”, IEICE Electronics Express, vol. 6, no. 2, pp. 98-103 (2009)

非特許文献2：M. B. Astruc, et al., “Trench-Assisted Profiles for Large-Effective-Area Single-Mode Fibers”, ECOC 2008, MO.4.B.1(2008)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] ところで、光通信のさらなる大容量化に伴い、コア部間のクロストークを抑制しつつ、より高密度にコア部を配置したマルチコア光ファイバが要求されている。

[0006] 本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、コア部間のクロストークを抑制しつつ、より高密度にコア部を配置できるマルチコア光ファイバおよびその製造方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明に係るマルチコア光ファイバは、複数のコア部と、前記各コア部の外周に位置するクラッド部と、を有し、前記コア部は、中心に位置し前記クラッド部よりも屈折率が高い中心コア部と、前記中心コア部の外周を囲むように形成され前記中心コア部よりも屈折率が低い第２コア部と、前記第２コア部の外周を囲むように形成され第２コア部および前記クラッド部よりも屈折率が低いディプレスト部と、を備え、前記各コア部は、隣接するコア部との離隔距離が、全長における該コア部間での光のクロストークが波長１．５５μｍにおいて－３０ｄＢ以下となるように、設定されていることを特徴とする。

[0008] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記中心コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ１、前記第２コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ２、前記ディプレスト部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ３とし、前記コア部の直径を２Ａ、前記第２コア部の外径を２Ｂ、前記ディプレスト部の外径を２Ｃとし、Ｂ／ＡをＲａ２、Ｃ／ＡをＲａ３とすると、Δ１は０．０５～１．２％であり、Δ２はほぼ０％であり、Δ３は－０．６％以上であり、２Ａは４～１４μｍであり、Ｒａ２は１～３であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）は２以下であり、カットオフ波長が１～１．５３μｍであり、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が３０～１８０μm^2であることを特徴とする。

[0009] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、全長

が１００ｋｍ以上であり、全ての前記複数のコア部は、Δ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３がそれぞれ同じであり、隣接するコア部との離隔距離が４０μｍ以上であることを特徴とする。

[0010] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、全長が１００ｋｍ以上であり、前記複数のコア部は、Δ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３の全てがそれぞれ同じである２以上のコア部と、Δ１、Δ３、２Ａのうちの少なくとも１つの値が前記２以上のコア部と異なる、少なくとも１つの異種コア部を含み、前記２以上のコア部は、互いの離隔距離が４０μｍ以上であり、前記異種コア部は、隣接する他のコア部との離隔距離が前記２以上のコア部同士の離隔距離よりも短いことを特徴とする。

[0011] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記クラッド部の外周に最も近接している前記コア部の中心と、前記クラッド部の外周との最短距離が２０μｍ以上であることを特徴とする。

[0012] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、波長１．５５μｍにおける直径２０ｍｍで巻いた場合の曲げ損失が、当該マルチコア光ファイバと等しいカットオフ波長および有効コア断面積を有するステップインデックス型屈折率プロファイルのマルチコア光ファイバの曲げ損失よりも小さいことを特徴とする。

[0013] また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、波長１．５５μｍにおける直径２０ｍｍで巻いた場合の曲げ損失が、当該マルチコア光ファイバと等しいカットオフ波長および有効コア断面積を有するステップインデックス型屈折率プロファイルのマルチコア光ファイバの曲げ損失の１／５以下であることを特徴とする。

[0014] また、本発明に係るマルチコア光ファイバの製造方法は、上記の発明のいずれか一つに記載のマルチコア光ファイバを製造する方法であって、前記各コア部を形成するためのコア領域と、前記ディプレスト部を形成するためのディプレスト領域とを備えるキャピラリーを、前記クラッド部を形成するためのガラス部材内に配置して光ファイバ母材を形成し、前記光ファイバ母材

を線引きすることを特徴とする。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、コア部間のクロストークを抑制しつつ、より高密度にコア部を配置できるマルチコア光ファイバを実現できるという効果を奏する。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]図１は、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

[図2]図２は、図１に示すマルチコア光ファイバのコア部の周辺の屈折率プロファイルを示す図である。

[図3]図３は、Δ３が－０．６%、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失（規格化値）との関係を示す図である。

[図4]図４は、Δ３が－０．４%、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失（規格化値）との関係を示す図である。

[図5]図５は、Δ３が－０．２%、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失（規格化値）との関係を示す図である。

[図6]図６は、Ｒａ２が２、Δ３が－０．６%、－０．４%、－０．２%の場合の、（Ｒａ３－Ｒａ２）と曲げ損失（規格化値）との関係を示す図である。

[図7]図７は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffと Δ１との関係を示す図である。

[図8]図８は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffと２Ａとの関係を示す図である。

[図9]図９は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffとコア部の離隔間隔との関係を示す図である。

[図10]図１０は、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバの製造方法の一例を説明する説明図である。

[図11]図１１は、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバの製造方法の他の一例を説明する説明図である。

[図12]図１２は、実施の形態２に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

[図13]図１３は、実施の形態３に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

[図14]図１４は、実施の形態３に係るマルチコア光ファイバの製造方法の一例を説明する説明図である。

[図15]図１５は、実施の形態３に係るマルチコア光ファイバの製造方法の他の一例を説明する説明図である。

[図16]図１６は、トレンチ型シングルコア光ファイバにおいて、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffとクラッド部外径との関係を示す図である。

[図17]図１７は、実施例１～４のマルチコア光ファイバを製造する際に用いたコア部の構造パラメータを示す図である。

[図18]図１８は、製造した実施例１のマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

[図19]図１９は、参考例１～３のシングルコア光ファイバの特性の測定結果を示す図である。

[図20]図２０は、参考例１～３のシングルコア光ファイバでのクラッド厚、およびクラッド部外径を示す図である。

[図21]図２１は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部の特性の測定結果を示す図である。

[図22]図２２は、実施例１～４および比較例１のマルチコア光ファイバでのコア部間の離隔距離、クラッド厚、およびクラッド部外径を示す図である。

[図23]図２３は、実施例１～４のマルチコア光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。

[図24]図２４は、比較例１のマルチコア光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。

[図25]図２５は、参考例１～３のシングルコア光ファイバの伝送損失スペク

トルを示す図である。

[図26]図２６は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、λ_{cc}とＡeffとの関係を示す図である。

[図27]図２７は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、λ_{cc}と曲げ損失との関係を示す図である。

[図28]図２８は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、λ_{cc}と伝送損失との関係を示す図である。

[図29]図２９は、実施例１～４のマルチコア光ファイバの各コア部の伝送損失スペクトルと、参考例１のシングルコア光ファイバの伝送損失スペクトルとの差分スペクトルを示す図である。

[図30]図３０は、実施例１、３ならびに比較例１に係るマルチコア光ファイバの波長１．５５μｍにおけるクロストークの、マルチコア光ファイバの長さ依存性を示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下に、図面を参照して本発明に係るマルチコア光ファイバおよびその製造方法の実施の形態を詳細に説明する。なお、この実施の形態によりこの発明が限定されるものではない。また、図において、同一または対応する要素には適宜同一符号を付している。また、本明細書においては、カットオフ波長（λ_c）とは、高次モードの閉じ込め損失が１０ｄＢ／ｍ以上になる最短の波長をいう。また、ケーブルカットオフ波長（λ_{cc}）とは、ＩＴＵ－Ｔ（国際電気通信連合） Ｇ．６５０に規定されたケーブルカットオフ波長をいう。また、曲げ損失とは、波長１．５５μｍにおける直径２０ｍｍで巻いた場合の値をいう。また、その他、本明細書で特に定義しない用語についてはＩＴＵ－Ｔ Ｇ．６５０．１における定義、測定方法に従うものとする。

[0018] （実施の形態１）

図１は、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図１に示すように、このマルチコア光ファイバ１００は、７つのコア部１～７と、各コア部１～７の外周に位置するクラッド部８と、を備え、各

コア部１～７は、中心に位置する中心コア部１ａ～７ａと各中心コア部１ａ～７ａの外周を囲むように形成された第２コア部１ｂ～７ｂと、各第２コア部１ｂ～７ｂを囲むように形成されたディプレスト部１ｃ～７ｃと、を備えている。また、クラッド部８の外周には、被覆部１６が形成されている。

[0019] コア部１は、マルチコア光ファイバ１００の中心軸の近傍に位置し、その他のコア部２～７は、コア部１を中心として、ほぼ正六角形の頂点に位置するように配置している。

[0020] コア部１～７および、クラッド部８は、いずれもたとえば石英系ガラスからなる。また、クラッド部８は、中心コア部１ａ～７ａの屈折率よりも低い屈折率を有する。また、第２コア部１ｂ～７ｂは中心コア部１ａ～７ａよりも低い屈折率を有する。また、ディプレスト部１ｃ～７ｃは、第２コア部１ｂ～７ｂおよびクラッド部８の屈折率よりも低い屈折率を有する。たとえば、中心コア部１ａ～７ａは、屈折率を高めるドーパントであるＧｅが添加された石英ガラスからなる。また、第２コア部１ｂ～７ｂおよびクラッド部８は、屈折率調整用のドーパントを含まない純石英ガラスからなる。また、ディプレスト部１ｃ～７ｃは、屈折率を低くするドーパントであるフッ素（Ｆ）が添加された石英ガラスからなる。

[0021] また、被覆部１６は、クラッド部８を保護できるように厚さが適宜設定されたものであり、厚さはたとえば６２．５μｍである。

[0022] 図２は、図１に示すマルチコア光ファイバ１００のコア部１の周辺の屈折率プロファイルを示す図である。図２に示すように、屈折率プロファイルＰはトレンチ型となっている。

[0023] 屈折率プロファイルＰのうち、部分Ｐ１、Ｐ２、Ｐ３、Ｐ４はそれぞれ、中心コア部１ａ、第２コア部１ｂ、ディプレスト部１ｃ、クラッド部８の屈折率プロファイルをそれぞれ示している。また、図２において、比屈折率差Δ１、Δ２、Δ３は、コア部１の最大屈折率をｎ１、ディプレスト部１ｃの最小屈折率をｎ３、クラッド部８の屈折率をｎｃとすると、それぞれ下記式（１）～（３）で定義される。

$$\Delta 1=\{(n1-nc)/nc\}\times 100 \quad [\%] \cdots\cdots (1)$$

$$\Delta 2=\{(n2-nc)/nc\}\times 100 \quad [\%] \cdots\cdots (2)$$

$$\Delta 3=\{(n3-nc)/nc\}\times 100 \quad [\%] \cdots\cdots (3)$$

また、中心コア部１ａの直径（コア径）２Ａは、Δ１の１／２となる位置での径とする。また、第２コア部の外径２Ｂは、第２コア部１ｂとディプレスト部１ｃとの境界領域でΔ３の１／２の比屈折率を有する位置における外径、ディスプレイ部１ｃの外径２Ｃは、ディプレスト部１ｃとクラッド部８との境界領域でΔ３の１／２の比屈折率差を有する位置における外径として定義される。

[0024] また、上述した第２コア部１ｂの外径２Ｂ、ディプレスト部１ｃの外径２Ｃとコア径２Ａとの比をそれぞれＲａ２＝Ｂ／Ａ、Ｒａ３＝Ｃ／Ａとすると、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００は、全てのコア部１～７について、構造パラメータであるΔ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３がそれぞれ同じである。

[0025] つぎに、このマルチコア光ファイバ１００の光のクロストークについて具体的に説明する。マルチコア光ファイバ１００の２つのコア部（たとえばコア部１、２）が平行に存在するような導波路構造における、コア部間の光の干渉の大きさは、モード結合理論によって表される。すなわち、一方のコア部１に入射した光のうち、このコア部１を伝送する間にモード結合によって他方のコア部２に乗り移る光のパワーＰwは、伝送距離ｚと、２つのコア部間のモード結合定数χとを用いて、下記式（４）で計算することができる。

$$Pw = f \times \sin^2(\chi z) \quad \cdots \quad (4)$$

[0026] 式（４）において、コア部１とコア部２とで、構造パラメータが同一の場合は、ｆ＝１である。したがって、ｚ＝π／（２χ）のときに、Ｐw＝１となり、光のパワーの１００%が一方のコア部から他方のコア部に乗り移ることとなる。このように光のパワーの１００%が乗り移るまでの伝送距離は結合長Ｌと呼ばれる。すなわち、Ｌ＝π／（２χ）である。なお、このモード結合定数χは、各コア部１、２のコア径、比屈折率差およびコア部１、２の離

隔距離により定まる。

[0027] ここで、設定された各コア部１、２のコア径および比屈折率差と、所望の全長とに対して、モード結合定数χが３．１６×１０$^{-7}$／ｍになるように、コア部１とコア部２との離隔距離を設定すれば、上記所望の全長において、コア部間のクロストークが－３０ｄＢ以下となり、２つのコア部１、２を伝送する光信号のクロストークが十分に低いものとなる。

[0028] なお、このマルチコア光ファイバ１００では、コア部１に関しては、隣接するコア部はコア部２～７であり、その数は６である。一方、各コア部２～７に関しては、隣接するコア部の数は３であり、残りの３つのコア部は、隣接する３つのコア部よりも大きく離隔している。ここで、コア部間のクロストークは、離隔距離が大きくなるにつれて急激に減少するので、隣接するコア部とのクロストークのみを考慮すればよい。

[0029] そこで、このマルチコア光ファイバ１００においては、隣接するコア部の数が最も多く、クロストークが最も大きくなるコア部１におけるクロストークを勘案して、隣接するコア部間の離隔距離を設定している。

[0030] たとえば、Δ１が０．０５～１．２%であり、Δ２が０%であり、Δ３が－０．６%以上であり、２Ａが４～１４μｍであり、Ｒａ２が１～３であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）が２以下であり、カットオフ波長が１～１．５３μｍであり、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が３０～１８０μｍ^{2}であるとする。この場合、コア部１と他のコア部２～７との離隔距離を４０μｍ以上とすれば、マルチコア光ファイバ１００の全長が１００ｋｍの場合において、各コア部２～７において個別に伝送する光信号の、コア部１におけるクロストークが－３０ｄＢ以下となる。また、他のコア部２～７におけるクロストークについては、コア部１のクロストークよりも小さくなるので、確実に－３０ｄＢ以下となる。さらに、マルチコア光ファイバ１００の全長が１００ｋｍより長い場合についても、コア部間の離隔距離を４０μｍより大きい値として、コア部間のクロストークを－３０ｄＢ以下とできる。

[0031] 以下、ＦＥＭ（Ｆｉｎｉｔｅ　Ｅｌｅｍｅｎｔ　Ｍｅｔｈｏｄ）によるシ

ミュレーション計算結果を用いて、マルチコア光ファイバ１００のクロストークについて、クロストークと相関関係がある曲げ損失をもとに説明する。一般に光ファイバのクロストークと曲げ損失とには正の相関関係があり、曲げ損失が小さくなればクロストークも小さくなる。はじめに、Ｒａ２、および（Ｒａ３－Ｒａ２）と曲げ損失との関係について説明する。なお、比屈折率差Δ２は０％に固定し、コア径２Ａ、比屈折率差Δ１については、カットオフ波長が１．３１μｍ、有効コア断面積が８０μｍ^{2}になるような値に設定している。

[0032] 図３は、Δ３が－０．６％、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失との関係を示す図である。図４は、Δ３が－０．４％、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失との関係を示す図である。図５は、Δ３が－０．２％、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５の場合の、Ｒａ２と曲げ損失との関係を示す図である。ただし、図３～図５の曲げ損失は、上記の設計パラメータの組み合わせのもとに計算した曲げ損失［ｄＢ／ｍ］を、ディプレスト部が無く（すなわちΔ３が０％）、屈折率プロファイルがステップインデックス型であり、カットオフ波長が１．３１μｍかつ有効コア断面積が８０μｍ^{2}になるような値に比屈折率差Δ１を設定した場合の曲げ損失［ｄＢ／ｍ］で規格化した値を示している。

[0033] 図３～５に示すように、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００は、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．５、１、１．５、かつＲａ２が１～３の場合において、曲げ損失の規格化値が１より小さく、好ましくは０．２以下であるから、同じカットオフ波長および有効コア断面積を有するステップインデックス型屈折率プロファイルの光ファイバと比較して、曲げ損失を小さい値、好ましくは１／５以下の小さい値にすることができる。

[0034] また、図６は、Ｒａ２が２、Δ３が－０．６％、－０．４％、－０．２％の場合の、（Ｒａ３－Ｒａ２）と曲げ損失（規格化値）との関係を示す図である。図６において、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０とは、ディプレスト部が無く

、屈折率プロファイルがステップインデックス型であることを意味する。

[0035] 図６に示すように、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００は、Δ３の値に応じて（Ｒａ３－Ｒａ２）の値、すなわちディプレスト部の層厚を２以下に設定することによって、曲げ損失を一層低減することができる。また、Δ３をより小さくすることによって、曲げ損失を一層低減することができる。

[0036] 以上の図４～６では、コア径２Ａ、比屈折率差Δ１については、カットオフ波長が１．３１μｍ、有効コア断面積が８０μｍ^{2}になるような値に設定している。以下では、カットオフ波長と有効コア断面積とを変化させた場合のコア径２Ａ、比屈折率差Δ１の値について説明する。なお、比屈折率差Δ２は０％に固定し、比屈折率差Δ３、Ｒａ２、（Ｒａ３－Ｒａ２）については、図６において曲げ損失が最小となる組み合わせである、Δ３が－０．６％、Ｒａ２が２、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．７５という値に固定する。そして、カットオフ波長は、１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍと変化させ、有効コア断面積は３０～１８０μｍ^{2}の範囲で変化させる。

[0037] 図７は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、有効コア断面積Ａeffと比屈折率差Δ１との関係を示す図である。図８は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、有効コア断面積Ａeffとコア径２Ａとの関係を示す図である。図７、８に示すように、カットオフ波長が１～１．５５μｍ、有効コア断面積が３０～１８０μｍ^{2}の場合に、曲げ損失を最小値近傍の値とするには、比屈折率差Δ１は０．０５～１．２％、２Ａは４～１４μｍとする必要がある。

[0038] つぎに、図９は、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffと、コア部の隣接するコア部との離隔間隔との関係を示す図である。図９に示す離隔間隔は、全長が１００ｋｍの場合に、隣接するコア部との光のクロストークが－３０ｄＢとなる離隔間隔である。したがって、それぞれのＡeffに対して、データ点で示した値以上の離隔距離であれば、クロストークが－３０ｄＢ以下となる。図９に示すように、有効コア断面積が

３０～１８０μｍ^{2}の場合に、離隔間隔は４０μｍ以上となる。

[0039] 以上の結果から、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００において、Δ１が０．０５～１．２％であり、Δ２が０％であり、Δ３が－０．６％以上であり、２Ａが４～１４μｍであり、Ｒａ２が１～３であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）が２以下であり、カットオフ波長が１～１．５３μｍであり、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が３０～１８０μｍ^{2}であれば、全長１００ｋｍ以上において、コア部の離隔距離を４０μｍ以上として、上記の－３０ｄＢ以下のクロストークを実現できる。

[0040] （製造方法）

つぎに、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００の製造方法について説明する。図１０は、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００の製造方法の一例を説明する説明図である。図１０に示すように、この製造方法においては、まず、７本のキャピラリー２１を、クラッド部８を形成するためのガラス部材であるガラス管２２内に配置する。このキャピラリー２１は、ＶＡＤ（Vapor phase Axial Deposition）法等によって製造したものであって、コア部１～７のいずれかの中心コア部を形成するための中心コア領域２１ａと、第２コア部を形成するための第２コア領域２１ｂと、ディプレスト部を形成するためのディプレスト領域２１ｃと、クラッド部８の一部を形成するためのクラッド領域２１ｄとを有するものである。その後、ガラス管２２内の隙間に、クラッド部８と同じ材料からなる充填用キャピラリー２３、２４を充填し、光ファイバ母材２００を作製する。なお、充填用キャピラリー２３、２４の代わりにガラスの粉を充填してもよい。つぎに、この光ファイバ母材２００を、所望のコア径ならびにコア部間の離隔距離を実現するように計算された外径を保ちつつ線引きすることで、図１に示すマルチコア光ファイバ１００を製造できる。

[0041] 図１１は、本実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００の製造方法の他の一例を説明する説明図である。図１１に示すように、この製造方法においては、まず、７本のキャピラリー３１を準備する。このキャピラリー３

１は、中心コア領域２１ａと、同心円状に形成した、第２コア領域２１ｂと、ディプレスト領域２１ｃとを有するものである。つぎに、クラッド部８を形成するために、純石英ガラス棒の長手方向にドリル等によってキャピラリー３１の外径よりやや大きい内径の７つの空孔３２ａを形成してガラス部材３２を作製する。つぎに、ガラス部材３２の空孔３２ａ内にキャピラリー３１を挿入して配置し、光ファイバ母材３００を形成する。つぎに、この光ファイバ母材３００を、所望のコア径ならびにコア部間の離隔距離を実現するように計算された外径を保ちつつ線引きすることで、図１に示すマルチコア光ファイバ１００を製造できる。

[0042] 図１１に示す方法によれば、ガラス部材３２の空孔３２ａに７本のキャピラリー３１を挿入することによって、キャピラリー３１を位置精度高く配置できるので、製造するマルチコア光ファイバ１００においてコア部１～７の位置精度が高くなる。また、このキャピラリー３１は、キャピラリー２１と比較して、クラッド領域２１ｄの分だけガラス層が少ないので、より少ない工程数で低コストかつ簡易に製造できる。

[0043] なお、ガラス部材３２は、ドリル法でなく公知のゾル／ゲル法を用いて作製してもよい。この場合、ガラス部材３２内にキャピラリー３１を配置する方法として、たとえばガラス管の内部に予めキャピラリー３１を配置しておき、このガラス管の中にガラス部材３２の材料となるゾルを流し込んで、その後にゲル化してガラス部材３２を形成するという方法を用いてもよい。

[0044] （実施の形態２）

上記実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００では、全てのコア部１～７について、Δ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３のそれぞれが同じである。これに対して、本実施の形態２に係るマルチコア光ファイバは、Δ１、Δ３、２Ａのうちの少なくとも１つの値が他のコア部と異なる異種コア部を含むものである。

[0045] 図１２は、本実施の形態２に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図１２に示すように、このマルチコア光ファイバ４００は、図１に

示すマルチコア光ファイバ１００において、コア部１、３、５、７の中心コア部１ａ、３ａ、５ａ、７ａを、それぞれ中心コア部４１ａ、４２ａ、４３ａ、４４ａに置き換えてコア部４１、４２、４３、４４とした構造を有している。このコア部４１は、Δ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３のうちの少なくとも１つの値が、コア部２、４、６の対応する値に対して１%程度以上異なるものである。さらに、コア部４２、４３、４４は、互いに同じΔ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３を有するが、これらの構造パラメータのうちの少なくとも１つの値が、コア部２、４、６およびコア部４１のいずれとも異なるものである。すなわち、コア部２、４、６、コア部４１、およびコア部４２、４３、４４は互いに異種のコア部である。

[0046] なお、コア部４１、およびコア部４２、４３、４４は、たとえば、Δ１が０．０５～１．２%であり、Δ２が０%であり、Δ３が－０．６%以上であり、２Ａが４～１４μｍであり、Ｒａ２が１～３であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）が２以下であり、カットオフ波長が１～１．５３μｍであり、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が３０～１８０μｍ^{2}である。

[0047] ここで、非特許文献１に記載されるように、構造パラメータの異なる異種のコア部間では、上述した式（４）における係数ｆが１より小さくなるため、コア部間を乗り移る光のパワーの最大値が小さくなる。したがって、同じクロストークを実現する場合であっても、異種のコア部間の離隔距離は、構造パラメータが同じである同種のコア部間の離隔距離と比較して小さくできる。しかしながら、同種のコア部間の離隔距離は、たとえば－３０ｄＢのクロストークを実現するためには、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００の場合と同じにする必要がある。

[0048] そこで、本実施の形態２に係るマルチコア光ファイバ４００は、コア部２、４、６を、互いの離隔距離が最も大きくなるように配置し、かつ、コア部４２、４３、４４を、互いの離隔距離が最も大きくなるように配置している。したがって、コア部２、４、６の互いの離隔距離を４０μｍ以上、たとえば４０μｍとし、コア部４２、４３、４４の互いの離隔距離を４０μｍ以上

、たとえば４０μｍとしても、コア部２、４、６、コア部４１、コア部４２、４３、４４のうちの任意のコア部について、隣接するコア部とのクロストークを－３０ｄＢ以下とできる。

[0049] この場合、コア部２、４、６、コア部４１、コア部４２、４３、４４は、正六角形の頂点および中心に位置するものであるから、隣接するコア部との離隔距離は、４０μｍ×１／√３、すなわち約２３．１μｍであり、実施の形態１の場合の４０μｍよりも大幅に小さくなる。すなわち、本実施の形態２に係るマルチコア光ファイバ４００は、より高密度にコア部を配置できるものとなる。

[0050] なお、本実施の形態２の変形例として、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００において、コア部１～７のうち２つのコア部以外を、互いに異種のコア部に置き換えて、マルチコア光ファイバを構成することもできる。この場合、たとえば最も離隔しているコア部２およびコア部５以外を異種のコア部に置き換えるようにすると、同種のコア部であるコア部２とコア部５との離隔距離を、たとえば４０μｍとすれば、各コア部において－３０ｄＢのクロストークを実現できる。この場合、隣接するコア部間の離隔距離を４０μｍ×１／２、すなわち２０μｍにできるので、コア部をさらに高密度に配置することができる。

[0051] （実施の形態３）

つぎに、本発明の実施の形態３に係るマルチコア光ファイバについて説明する。図１３は、本実施の形態３に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図１３に示すように、このマルチコア光ファイバ５００は、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００において、コア部１～７の各ディプレスト部１ｃ～７ｃの外周のクラッド部８を、ディプレスト部１ｃ～７ｃと同じ屈折率差を有しディプレスト部１ｃ～７ｃと一体になったクラッド部５８に置き換えた構成を有している。また、クラッド部５８の外周には、被覆部５９が形成されている。

[0052] このマルチコア光ファイバ５００も、屈折率プロファイルはトレンチ型と

なっている。ただし、マルチコア光ファイバ５００において、或るディプレスト部の外径とは、或るコア部の中心から、このコア部と最も隣接するコア部の外周に形成されたクラッド部の外縁までの距離として定義される。たとえば、コア部１の場合は、たとえば隣接するコア部２の外周のクラッド部５８の外縁（第２コア部２ｂとの境界）までの距離である。また、たとえばコア部２の場合は、たとえば隣接するコア部３の外周のクラッド部５８の外縁（第２コア部３ｂとの境界）までの距離である。

[0053] このマルチコア光ファイバ５００は、たとえば、Δ１が０．３４％であり、Δ３が－０．２％であり、２Ａが７．９７μｍであり、Ｒａ２が４であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）が１．５である場合に、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が８０μm^2なるとともに、各コア部１～７間の離隔距離が約３７．９μｍとなる。この離隔距離は、全長が１ｋｍの場合において各コア部１～７間のクロストークが－３０ｄＢとなる離隔間隔である３６．４３μｍよりも大きいので、各コア部１～７におけるクロストークが－３０ｄＢ以下となる。

[0054] このマルチコア光ファイバ５００は、以下のようにして製造することができる。図１４は、本実施の形態３に係るマルチコア光ファイバ５００の製造方法の一例を説明する説明図である。図１４に示すように、この製造方法においては、図１１に示す製造方法と同様に、まず、７本のキャピラリー６１を準備する。このキャピラリー６１は、中心コア領域２１ａと、同心円状に形成した、第２コア部のいずれかを形成するための第２コア領域２１ｂとを有するものである。つぎに、ディプレスト部５８を形成するために、フッ素を添加した石英ガラス棒の端面にドリル等によってキャピラリー６１の外径よりやや大きい内径の７つの空孔６２ａを形成してガラス部材６２を作製する。つぎに、ガラス部材６２の空孔６２ａ内にキャピラリー６１を挿入して配置し、光ファイバ母材６００を形成する。つぎに、この光ファイバ母材６００を、所望のコア径ならびにコア部間の離隔距離を実現するように計算された外径を保ちつつ線引きすることで、図１３に示すマルチコア光ファイバ

５００を製造できる。

[0055] 図１４に示す方法によれば、図１１に示す方法と同様に、キャピラリー６１を位置精度高く配置できるので、製造するマルチコア光ファイバ５００においてコア部１～７の位置精度が高くなる。また、このキャピラリー６１は、キャピラリー３１と比較しても、ディプレスト領域２１ｃの分だけガラス層が少ないので、さらに少ない工程数で低コストかつ簡易に製造できる。

[0056] なお、ガラス部材６２は、図１１に示すガラス部材３２の場合と同様に、ドリル法でなく公知のゾル／ゲル法を用いて作製してもよい。

[0057] また、図１５は、実施の形態３に係るマルチコア光ファイバの製造方法の他の一例を説明する説明図である。図１５では、図１４に示すガラス部材６２の外周にさらに純石英ガラス管７１を配置し、ガラス部材６２の空孔６２ａ内にキャピラリー６１を挿入して配置し、光ファイバ母材７００を形成している。フッ素を添加した石英ガラスからなるガラス部材６２は比較的軟らかいため、このように外周に純石英ガラス管７１を配置することによって、光ファイバ母材７００の機械的強度を高め、その外径形状を安定させることができる。

[0058] なお、上記実施の形態１、３では、全てのコア部について、構造パラメータであるΔ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３がそれぞれ同じであり、実施の形態２では、３種類の異種のコア部を備えるものである。しかしながら、本発明はこれに限らず、一部または全てのコア部が異種であるコア部を備えるマルチコア光ファイバでも良い。

[0059] ところで、本発明に係るマルチコア光ファイバは、複数のコア部を備え、かつこれらを所定の離隔距離で配置するようにしているので、コア部の中には、クラッド部の外周との距離が近いものがある。このため、各コア部についてマイクロベンドの影響を考慮する必要がある。なお、マイクロベンド損失は、光ファイバに側圧が加えられたときに、この側圧を加えた物（たとえばボビン）の表面の微少な凹凸等によって光ファイバに微小な曲げが加えられることによる伝送損失の増加量として定義される。

[0060] そこで、以下に、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバ１００と同様のトレンチ型屈折率プロファイルを有するコア部を、１つだけクラッド部の中心に有するシングルコア光ファイバにおいて、ＩＴＵ－Ｔ　Ｇ．６５２に規定される、クラッド部の外径が１２５μｍのシングルモード光ファイバ（ＳＭＦ）と同等のマイクロベンド損失を実現するために必要なクラッド部の外径について計算した結果を示す。なお、この計算では、トレンチ型シングルコア光ファイバにおける比屈折率差Δ３、Ｒａ２、（Ｒａ３－Ｒａ２）について、図６において曲げ損失が最小となる組み合わせである、Δ３が－０．６％、Ｒａ２が２、（Ｒａ３－Ｒａ２）が０．７５という値に固定し、カットオフ波長は、１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍと変化させ、有効コア断面積は３０～１８０μｍ^{2}の範囲で変化させた。

[0061] 図１６は、トレンチ型シングルコア光ファイバにおいて、カットオフ波長が１μｍ、１．３１μｍ、１．５３μｍの場合の、Ａeffと、ＳＭＦと同等のマイクロベンド損失を実現するために必要なクラッド部外径との関係を示す図である。なお、比較として、ＳＭＦのクラッド部外径とＡeffとを示している。図１６に示すように、トレンチ型シングルコア光ファイバにおいて、クラッド部外径が４０μｍ以上、すなわち外半径が２０μｍ以上であれば、ＳＭＦと同等のマイクロベンド損失を実現することができる。したがって、実施の形態１に係るマルチコア光ファイバにおいても、クラッド部８の外周に最も近接しているコア部２～７の中心と、クラッド部８の外周との最短距離が２０μｍ以上であれば、全てのコア部１～７において、ＳＭＦと同等のマイクロベンド損失を実現することができる。

[0062] （実施例１～４、比較例１、参考例１～３）

つぎに、本発明の実施例１～４として、図１０に示した製造方法を用いて、異種コア部を含む７つのコア部を有するマルチコア光ファイバを製造した。図１７は、実施例１～４のマルチコア光ファイバを製造する際に用いたコア部の構造パラメータを示す図である。実施例１～４のマルチコア光ファイバに含まれる各コア部の構造パラメータは、図１７に示す構造パラメータの

値の近傍の値（２Ａについては図１７の値に対して約±５％の値、それ以外の構造パラメータについては図１７の値に対して約±２％の値）を有している。

[0063] また、本発明の比較例１として、図１０に示した製造方法において、ディプレスト領域を有さないキャピラリーを用いて、異種コア部を含む７つのコア部を有するマルチコア光ファイバを製造した。ただし、製造する際に用いたコア部の構造パラメータは、Δ１を０．３４％、２Ａを９．１μｍとした。この比較例１のマルチコア光ファイバは、各コア部の屈折率プロファイルがステップインデックス型となる。

[0064] さらに、本発明の参考例１～３として、本発明の実施例１～４のマルチコア光ファイバを製造する際に用いたものと同じキャピラリーを用いて、シングルコア光ファイバを製造した。

[0065] 図１８は、製造した実施例１のマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図１８では、後の説明のために、各コア部に符号Ａ～Ｇを付している。なお、他の実施例２～４、比較例１のマルチコア光ファイバのコア部を説明する際にも、対応するコア部についてはこの符号Ａ～Ｇを使用する。また、図中の３つの黒丸は、コア部の配置を特定するために形成した空孔マーカである。

[0066] つぎに、実施例１～４、比較例１、参考例１～３の特性の測定結果について説明する。

[0067] はじめに、参考例１～３のシングルコア光ファイバの特性について説明する。図１９は、参考例１～３のシングルコア光ファイバの特性の測定結果を示す図である。図２０は、参考例１～３のシングルコア光ファイバでのクラッド厚、およびクラッド部外径を示す図である。なお、「ＭＦＤ」はモードフィールド径を意味する。また、各特性は、ケーブルカットオフ波長λｃｃ以外は、波長１．５５μｍにおける値である。この参考例１～３では、カットオフ波長が１～１．５３μｍ（１０００～１５３０ｎｍ）、かつ有効コア断面積（Ａｅｆｆ）が３０～１８０μm^2という特性が満たされている。特に

、有効コア断面積については９０μｍ^{2}以上が実現されている。

[0068] つぎに、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの特性について説明する。図２１は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部Ａ～Ｇの特性の測定結果を示す図である。なお、「ＭＦＤ」はモードフィールド径を意味する。また、各特性は、ケーブルカットオフ波長λｃｃ以外は、波長１．５５μｍにおける値である。また、図中「ー」は、未測定の項目を示している。図２１に示す実施例１～４では、カットオフ波長が１～１．５３μｍ（１０００～１５３０ｎｍ）、かつ有効コア断面積（Ａｅｆｆ）が３０～１８０μｍ^{2}であり、参考例１～３と同程度の特性が満たされている。また、実施例１～４のマルチコア光ファイバは、比較例１のマルチコア光ファイバよりも平均的に大きな有効コア断面積および小さな曲げ損失が得られたが、これについては後で詳述する。

[0069] 図２２は、実施例１～４および比較例１のマルチコア光ファイバでのコア部間の離隔距離、クラッド厚、およびクラッド部外径を示す図である。なお、クラッド厚とは、コア部のうち、クラッド部の外周に最も近接しているコア部の中心と、クラッド部の外周との最短距離を意味する。実施例１～４および比較例１のマルチコア光ファイバは、参考例１～３と比較してもいずれも十分なクラッド厚を有しており、通常の光通信の通信波長帯域（１．３～１．６５μｍ）においては、コア部はマイクロベンドの影響はほぼ受けないと考えられる。

[0070] つぎに、実施例１～４、比較例１、参考例１～３の伝送損失スペクトルを示す。図２３は、実施例１～４のマルチコア光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。なお、図２３（ａ）～（ｄ）が、それぞれ実施例１～４の伝送損失スペクトルを示している。図２４は、比較例１のマルチコア光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。図２５は、参考例１～３のシングルコア光ファイバの伝送損失スペクトルを示す図である。なお、図２３、２４の凡例の符号Ａ～Ｇは、コア部の符号を示している。

[0071] 図２３に示すように、実施例１～４のマルチコア光ファイバは、波長１５

５０ｎｍ（１．５５μｍ）において、１ｄＢ／ｋｍ以下の伝送損失を実現しており、特に実施例１、２では、図２４、２５に示す参考例１、２のシングルコア光ファイバ、および比較例１のステップインデックス型のマルチコア光ファイバの伝送損失と同程度の低い伝送損失を実現している。

[0072] つぎに、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの有効コア断面積、曲げ損失、および伝送損失についてさらに具体的に説明する。図２６は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、ケーブルカットオフ波長（λ_{cc}）とＡeffとの関係を示す図である。図中のデータ点は、実施例１についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｄ、Ｇ、実施例２についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｇ、実施例３についてはコア部Ａ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、実施例４についてはコア部Ａ、Ｃ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、比較例１についてはコア部Ａ～Ｇに対応している。また、図中実線は実施例１～４、比較例１のそれぞれのデータ点に対する線形近似曲線を示しており、破線は、図１７に示す構造パラメータから計算されるλ_{cc}とＡeffとの関係を示している。

[0073] 図２６に示すように、実施例１～４のマルチコア光ファイバの各コア部のλ_{cc}とＡeffとの関係は、図１７に示す構造パラメータから計算される関係と良く一致している。また、実施例１～４と比較例１とを比較すると、同じλ_{cc}の値に対して、実施例１～４の方が比較例１よりもＡeffを８μm^2程度大きくできることが確認された。

[0074] 図２７は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、ケーブルカットオフ波長（λ_{cc}）と曲げ損失との関係を示す図である。図２６と同様に、図中のデータ点は、実施例１についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｄ、Ｇ、実施例２についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｇ、実施例３についてはコア部Ａ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、実施例４についてはコア部Ａ、Ｃ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、比較例１についてはコア部Ａ～Ｇに対応している。また、図中実線は実施例１～４、比較例１のそれぞれのデータ点に対する線形近似曲線を示している。

[0075] 図２７に示すように、実施例１～４と比較例１とを比較すると、同じλ_{cc}の値に対して、実施例１～４の方が比較例１よりも曲げ損失を１／１０倍程

度に小さくできることが確認された。

[0076] 図２８は、実施例１～４、比較例１のマルチコア光ファイバの各コア部について、ケーブルカットオフ波長（λ_{cc}）と伝送損失との関係を示す図である。図２６と同様に、図中のデータ点は、実施例１についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｄ、Ｇ、実施例２についてはコア部Ａ、Ｂ、Ｇ、実施例３についてはコア部Ａ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、実施例４についてはコア部Ａ、Ｃ、Ｅ、Ｆ、Ｇ、比較例１についてはコア部Ａ～Ｇに対応している。また、図中実線は実施例１～４、比較例１のそれぞれのデータ点に対する線形近似曲線を示している。

[0077] 図２８に示すように、実施例１、２および比較例１の場合、コア部の位置によらず、λ_{cc}が大きくなるにつれ伝送損失が小さくなる傾向を示すことが確認された。また、実施例３、４の場合、コア部の位置によらず、λ_{cc}が小さくなるにつれ伝送損失が小さくなる傾向を示すことが確認された。このように、伝送損失がケーブルカットオフ波長依存性を示す要因としては、マクロベンド、マイクロベンド（曲げ損失）、クロストーク等が考えられる。

[0078] そこで、実施例１～４のマルチコア光ファイバの各コア部の伝送損失スペクトルと、ケーブルカットオフ波長が約１２６０ｎｍである参考例１のシングルコア光ファイバの伝送損失スペクトルとの差分を計算した。図２９は、実施例１～４のマルチコア光ファイバの各コア部の伝送損失スペクトルと、参考例１のシングルコア光ファイバの伝送損失スペクトルとの差分スペクトルを示す図である。図２９に示すように、各差分スペクトルは線形の波長依存性を示すことが確認された。ここで、曲げ損失やマイクロベンド損失は波長に対して指数関数的に増大することを考えると、マルチコア光ファイバにおいて、図２８に示すようにλ_{cc}が大きくなるにつれ伝送損失が小さくなる傾向あるいはλ_{cc}が小さくなるにつれ伝送損失が小さくなる傾向を示すのは、コア部間の光の干渉に起因する可能性が高いことが分った。

[0079] 図３０は実施例１、３ならびに比較例１に係るマルチコア光ファイバの波長１．５５μｍにおけるクロストークの、マルチコア光ファイバの長さ依存性を示す図である。図中、たとえば「実施例１　Ｂ」とは、実施例１に係る

マルチコア光ファイバにおいて、中心に位置する符号Ａのコア部に光を入射したときの、符号Ａのコア部と符号Ｂのコア部との間のクロストークを示している。図３０に示すようにいずれのデータにおいてもコア部間での光のクロストークが波長１．５５μｍにおいて－４５ｄＢ以下であり、各コア部において個別に伝送する光信号のクロストークが十分に低いものとなっている。

[0080] なお、上記実施の形態により本発明が限定されるものではない。また、上記各実施形態の各構成要素を適宜組み合わせて構成したものも本発明に含まれる。たとえば、実施の形態３に係るマルチコア光ファイバにおいて、実施の形態２に係るマルチコア光ファイバのように異種のコア部を含むような構成としてもよい。また、コア部の個数も特に限定はされず、２以上であればよい。

産業上の利用可能性

[0081] 以上のように、本発明に係るマルチコア光ファイバおよびその製造方法は、大容量光通信の分野に利用して好適なものである。

符号の説明

[0082] １～７、４１～４４　コア部

１ａ～７ａ、４１ａ～４４ａ　中心コア部

１ｂ～７ｂ　第２コア部

１ｃ～７ｃディプレスト部

８、５８　クラッド部

１６、５９　被覆部

２１、３１、６１　キャピラリー

２１ａ　中心コア領域

２１ｂ　第２コア領域

２１ｃ　ディプレスト領域

２１ｄ　クラッド領域

２２　ガラス管

２３　充填用キャピラリー

３２、６２　ガラス部材

３２ａ、６２ａ　空孔

７１　純石英ガラス管

１００、４００、５００　マルチコア光ファイバ

２００、３００、６００、７００　光ファイバ母材

Ｐ　屈折率プロファイル

Ｐ１～Ｐ４　部分

請求の範囲

[請求項1] 複数のコア部と、

前記各コア部の外周に位置するクラッド部と、を有し、

前記コア部は、中心に位置し前記クラッド部よりも屈折率が高い中心コア部と、前記中心コア部の外周を囲むように形成され前記中心コア部よりも屈折率が低い第２コア部と、前記第２コア部の外周を囲むように形成され第２コア部および前記クラッド部よりも屈折率が低いディプレスト部と、

を備え、前記各コア部は、隣接するコア部との離隔距離が、全長における該コア部間での光のクロストークが波長１．５５μｍにおいて－３０ｄＢ以下となるように、設定されていることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

[請求項2] 前記中心コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ１、前記第２コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ２、前記ディプレスト部の前記クラッド部に対する比屈折率差をΔ３とし、前記コア部の直径を２Ａ、前記第２コア部の外径を２Ｂ、前記ディプレスト部の外径を２Ｃとし、Ｂ／ＡをＲａ２、Ｃ／ＡをＲａ３とすると、Δ１は０．０５～１．２％であり、Δ２はほぼ０％であり、Δ３は－０．６％以上であり、２Ａは４～１４μｍであり、Ｒａ２は１～３であり、（Ｒａ３－Ｒａ２）は２以下であり、カットオフ波長が１～１．５３μｍであり、波長１．５５μｍにおける有効コア断面積が３０～１８０μｍ^{2}であることを特徴とする請求項１に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項3] 全長が１００ｋｍ以上であり、全ての前記複数のコア部は、Δ１、Δ３、２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３がそれぞれ同じであり、隣接するコア部との離隔距離が４０μｍ以上であることを特徴とする請求項２に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項4] 全長が１００ｋｍ以上であり、前記複数のコア部は、Δ１、Δ３、

２Ａ、Ｒａ２、Ｒａ３の全てがそれぞれ同じである２以上のコア部と、Δ１、Δ３、２Ａのうちの少なくとも１つの値が前記２以上のコア部と異なる、少なくとも１つの異種コア部を含み、前記２以上のコア部は、互いの離隔距離が４０μｍ以上であり、前記異種コア部は、隣接する他のコア部との離隔距離が前記２以上のコア部同士の離隔距離よりも短いことを特徴とする請求項２に記載のマルチコア光ファイバ。

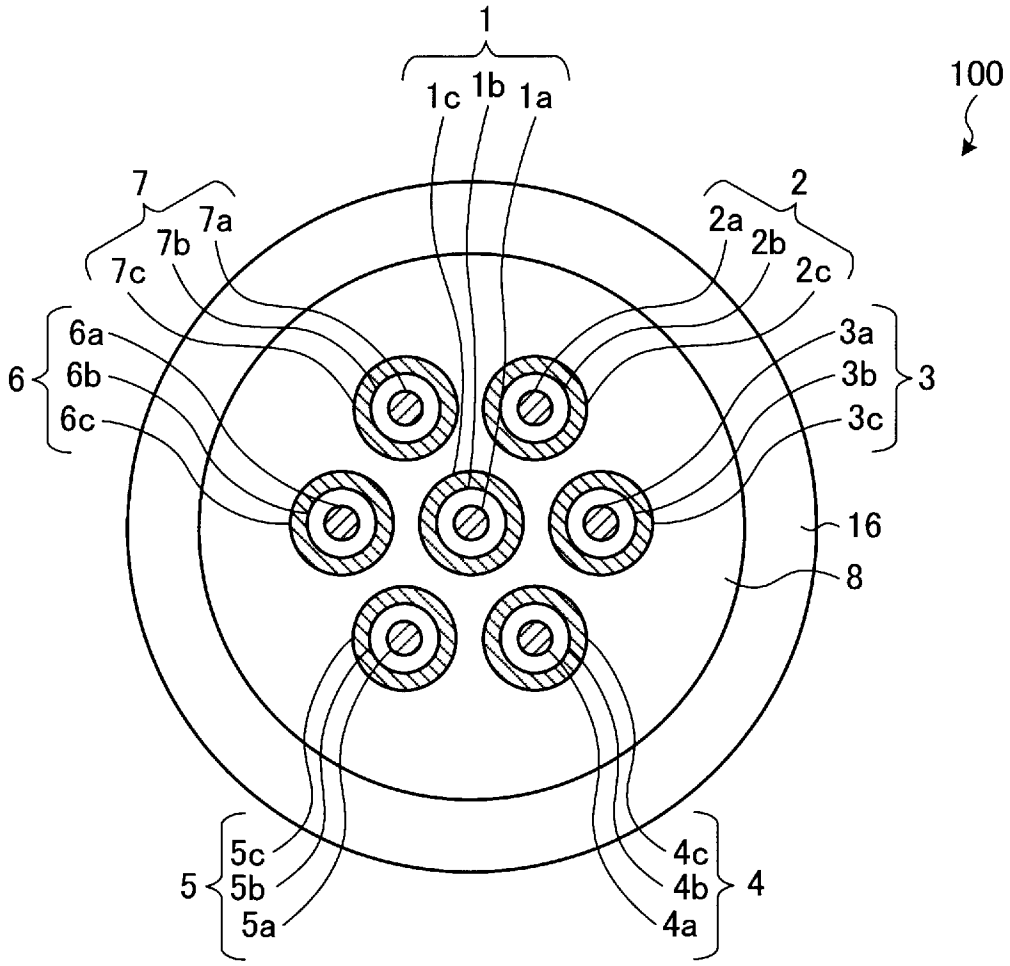
[請求項5] 前記クラッド部の外周に最も近接している前記コア部の中心と、前記クラッド部の外周との最短距離が２０μｍ以上であることを特徴とする請求項２～４のいずれか一つ記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項6] 波長１．５５μｍにおける直径２０ｍｍで巻いた場合の曲げ損失が、当該マルチコア光ファイバと等しいカットオフ波長および有効コア断面積を有するステップインデックス型屈折率プロファイルのマルチコア光ファイバの曲げ損失よりも小さいことを特徴とする請求項１～５のいずれか一つに記載のマルチコア光ファイバ。

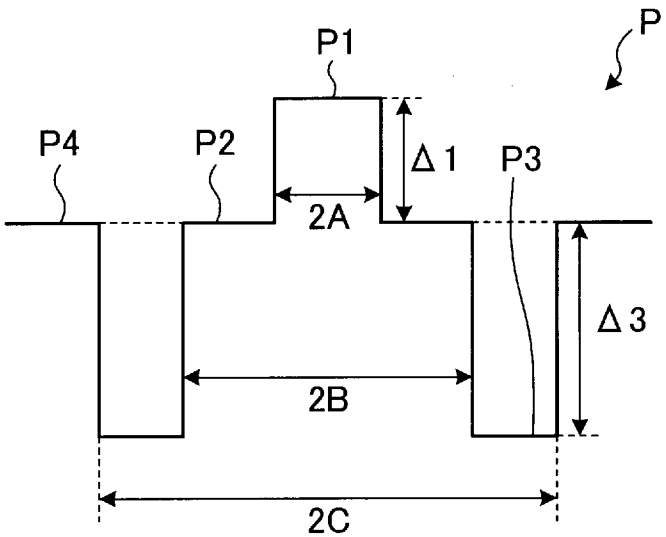
[請求項7] 波長１．５５μｍにおける直径２０ｍｍで巻いた場合の曲げ損失が、当該マルチコア光ファイバと等しいカットオフ波長および有効コア断面積を有するステップインデックス型屈折率プロファイルのマルチコア光ファイバの曲げ損失の１／５以下であることを特徴とする請求項１～５のいずれか一つに記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項8] 請求項１～７のいずれか一つに記載のマルチコア光ファイバを製造する方法であって、 前記各コア部を形成するためのコア領域と、前記ディプレスト部を形成するためのディプレスト領域とを備えるキャピラリーを、前記クラッド部を形成するためのガラス部材内に配置して光ファイバ母材を形成し、前記光ファイバ母材を線引きすることを特徴とするマルチコア光ファイバの製造方法。

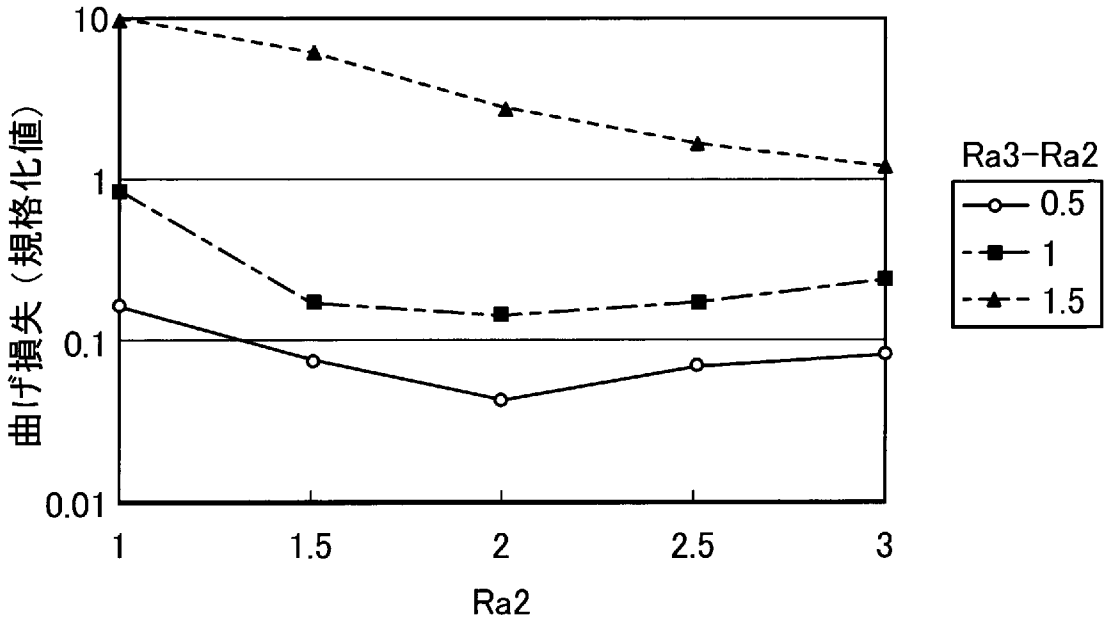
[図1]


1
1c
1b
1a
100
7
7a
7b
7c
2
2a
2b
2c
6
6a
6b
6c
3
3a
3b
3c
16
8
5
5c
5b
5a
4
4c
4b
4a

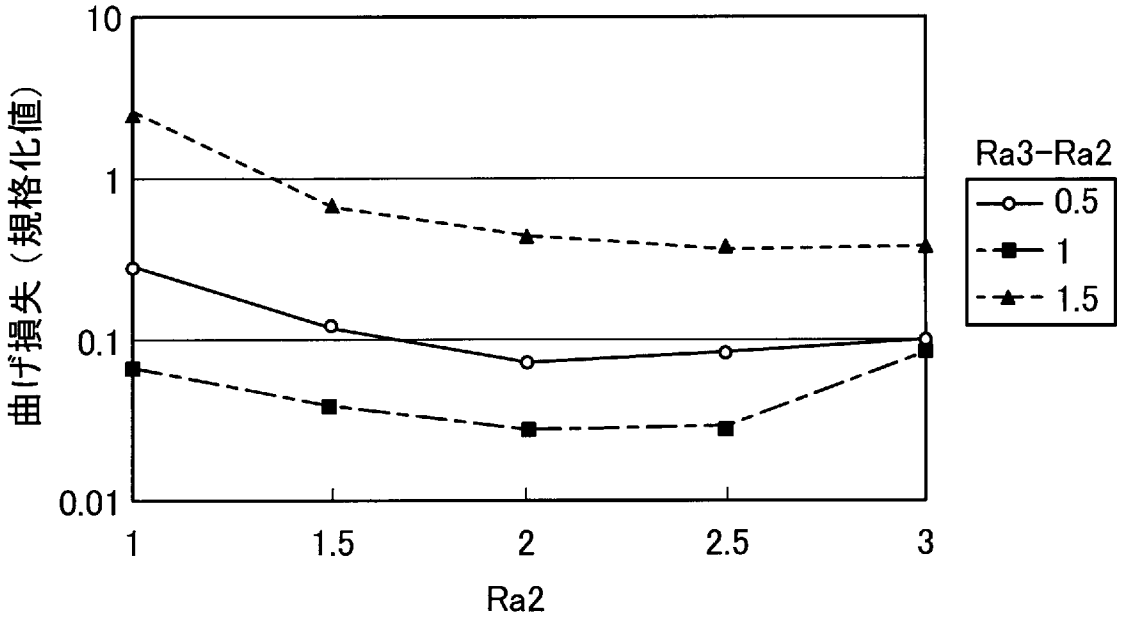
[図2]


P
P1
P4
P2
Δ1
P3
2A
Δ3
2B
2C

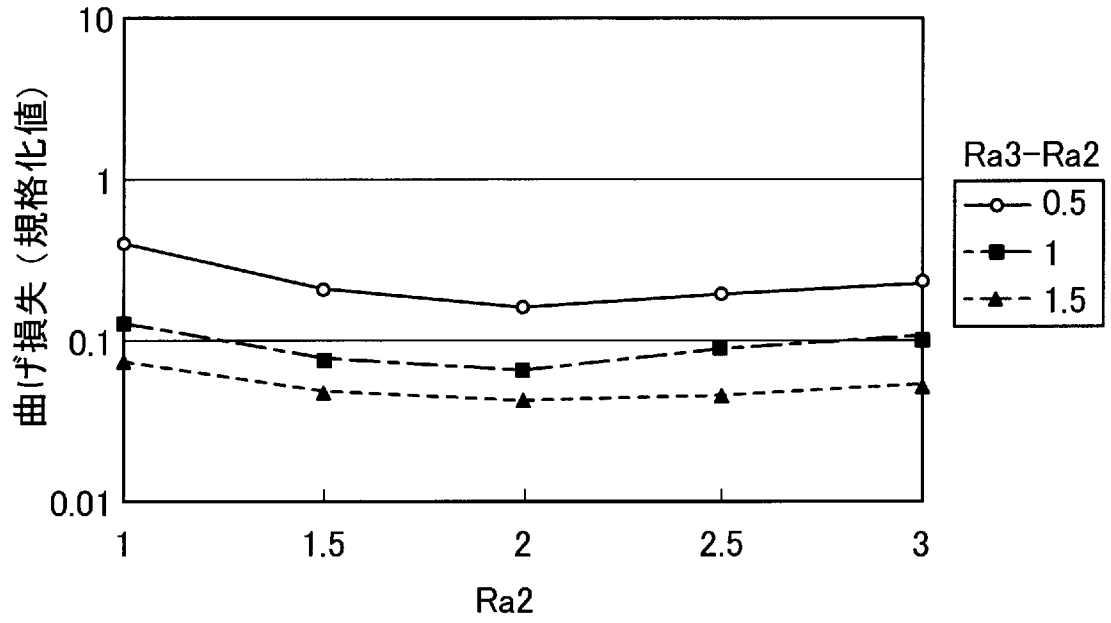
[図3]


10
1
0.1
0.01
曲げ損失（規格化値）
1
1.5
2
2.5
3
Ra2
Ra3−Ra2
0.5
1
1.5

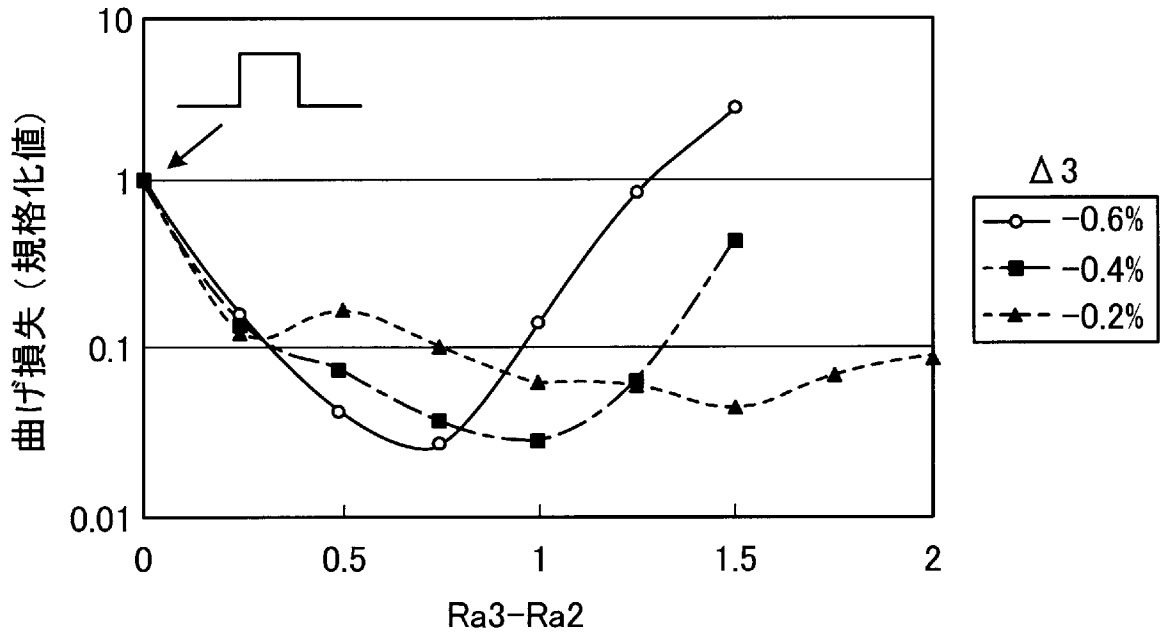
[図4]


10
1
0.1
0.01
曲げ損失（規格化値）
1
1.5
2
2.5
3
Ra2
Ra3−Ra2
0.5
1
1.5

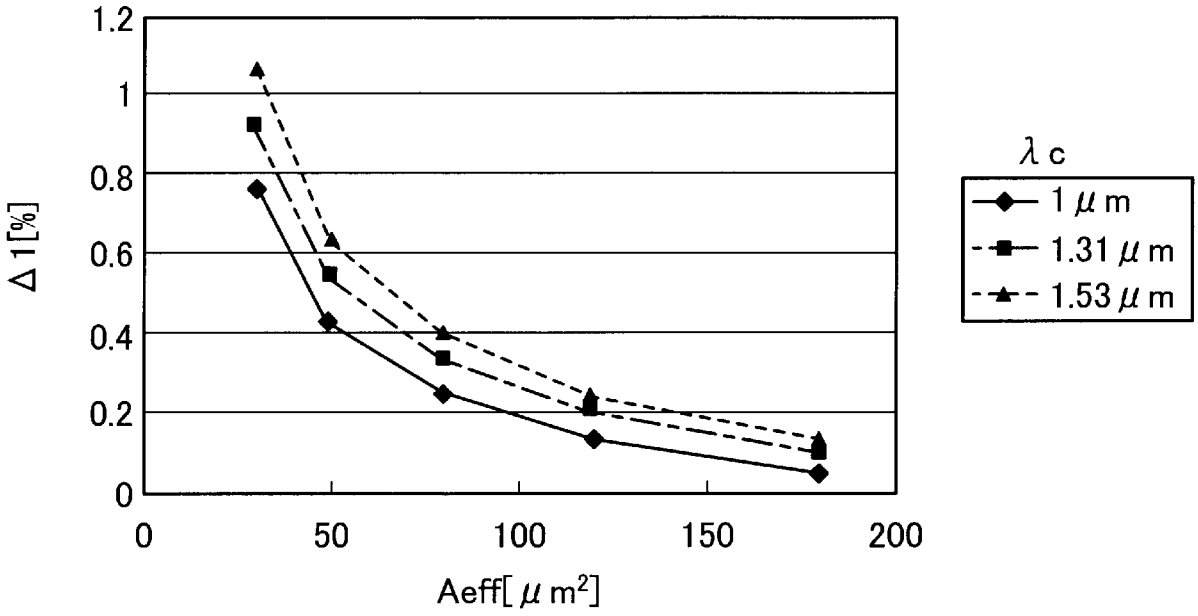
[図5]


10
1
0.1
0.01
曲げ損失（規格化値）
1
1.5
2
2.5
3
Ra2
Ra3−Ra2
0.5
1
1.5

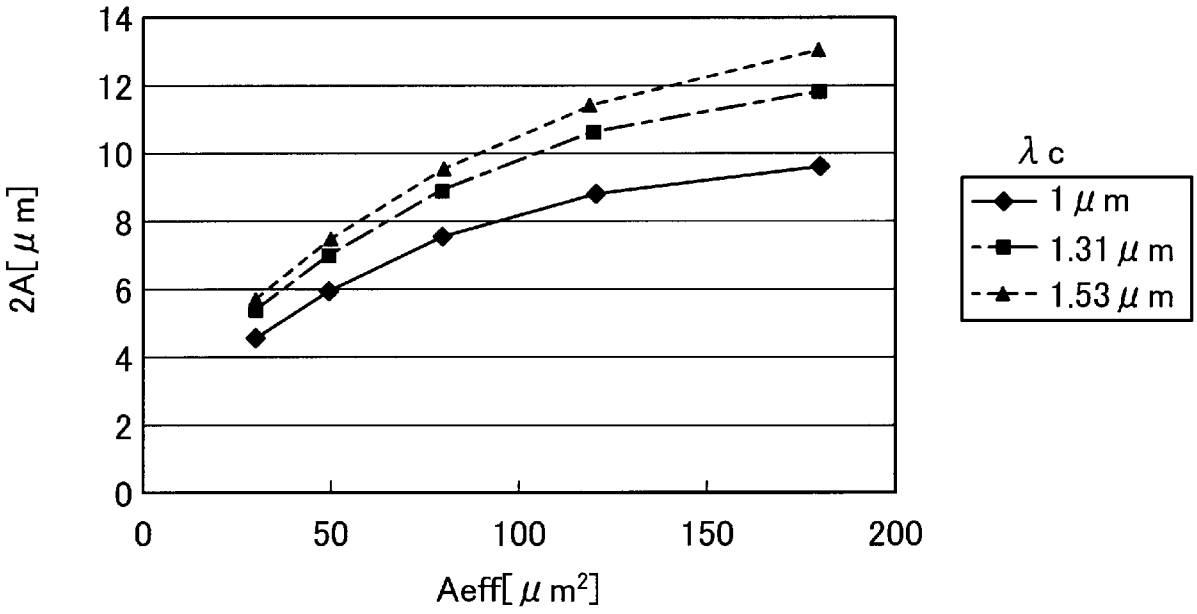
[図6]


10
1
0.1
0.01
曲げ損失（規格化値）
0
0.5
1
1.5
2
Ra3−Ra2
Δ3
−0.6%
−0.4%
−0.2%

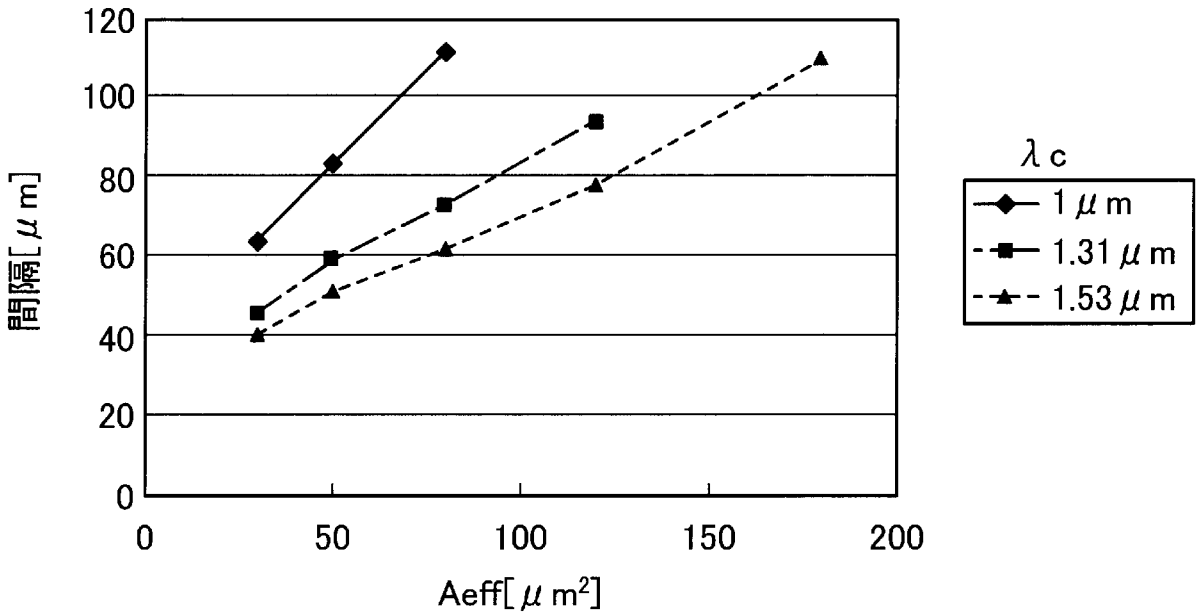
[図7]


1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Δ1[%]
0
50
100
150
200
Aeff[μm²]
λc
1μm
1.31μm
1.53μm

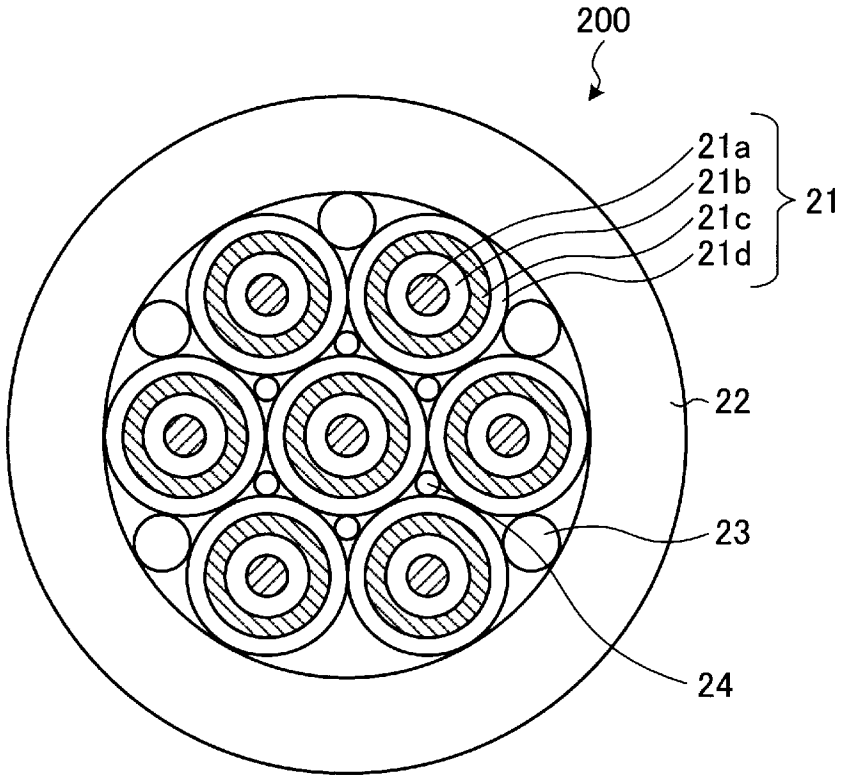
[図8]


14
12
10
8
6
4
2
0
2A[μm]
0
50
100
150
200
Aeff[μm²]
λc
1μm
1.31μm
1.53μm

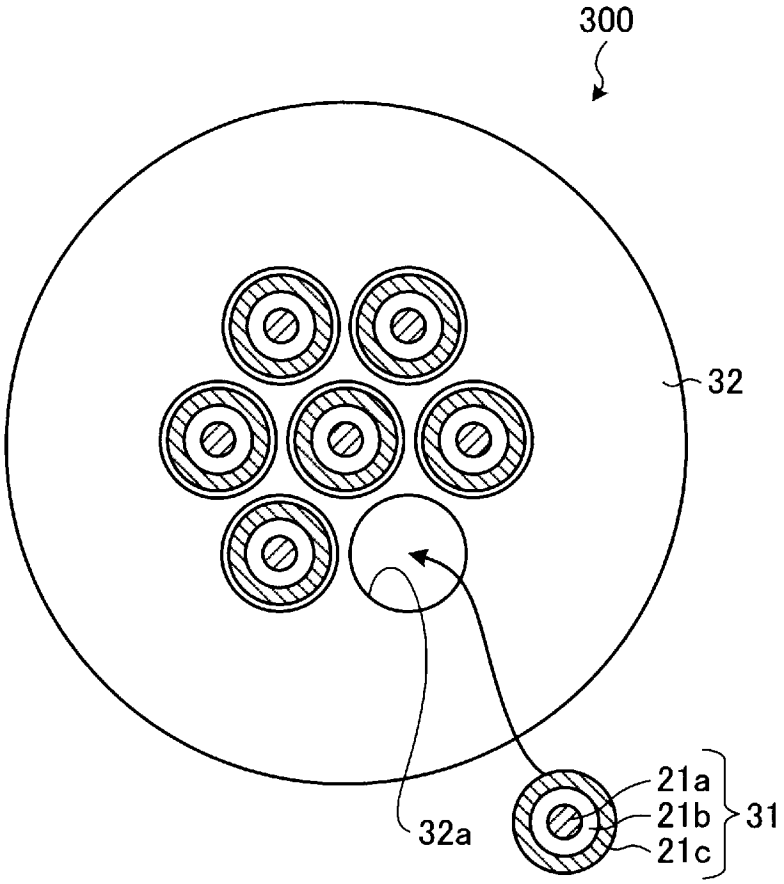
[図9]


120
100
80
60
40
20
0
間隔[μm]
0
50
100
150
200
Aeff[μm²]
λc
1μm
1.31μm
1.53μm

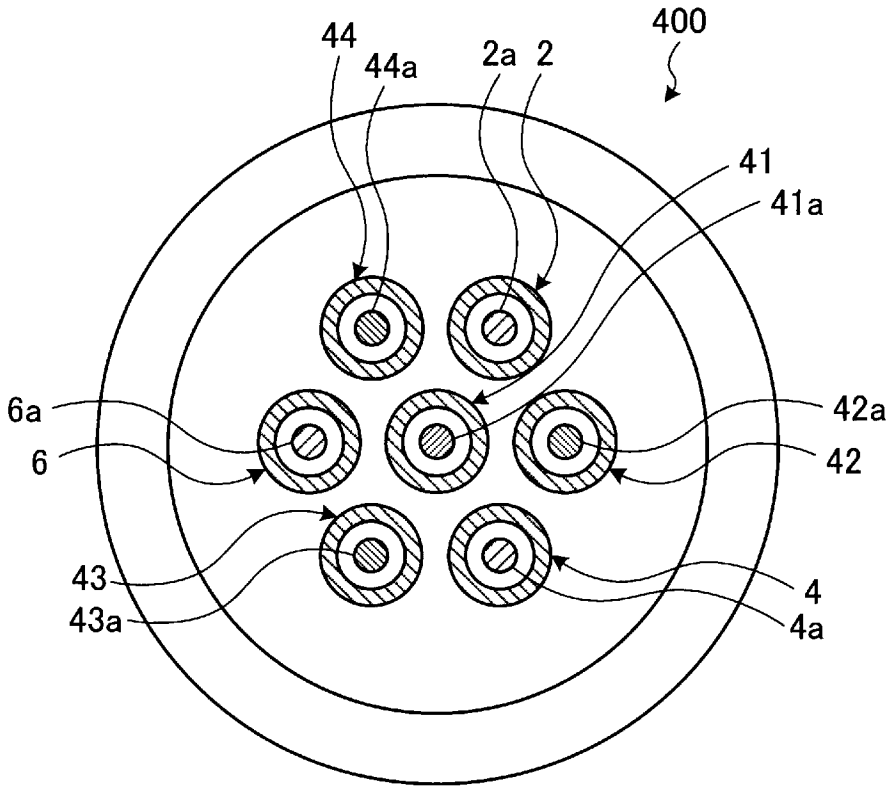
[図10]


200
21a
21b
21c
21d
21
22
23
24

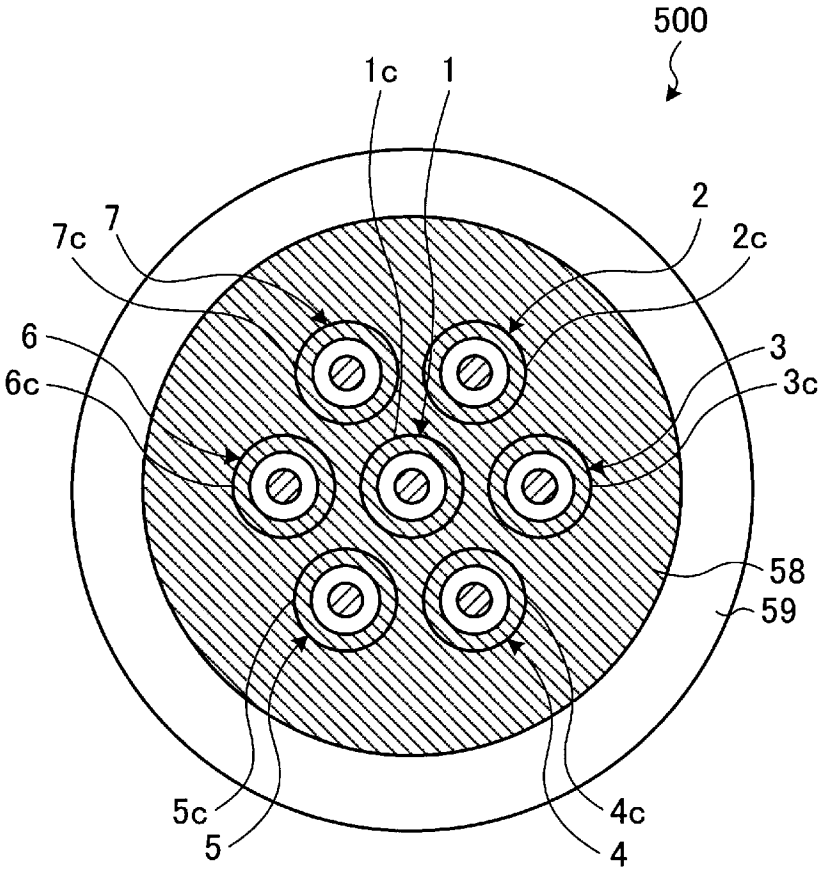
[図11]


300
32
32a
21a
21b
21c
31

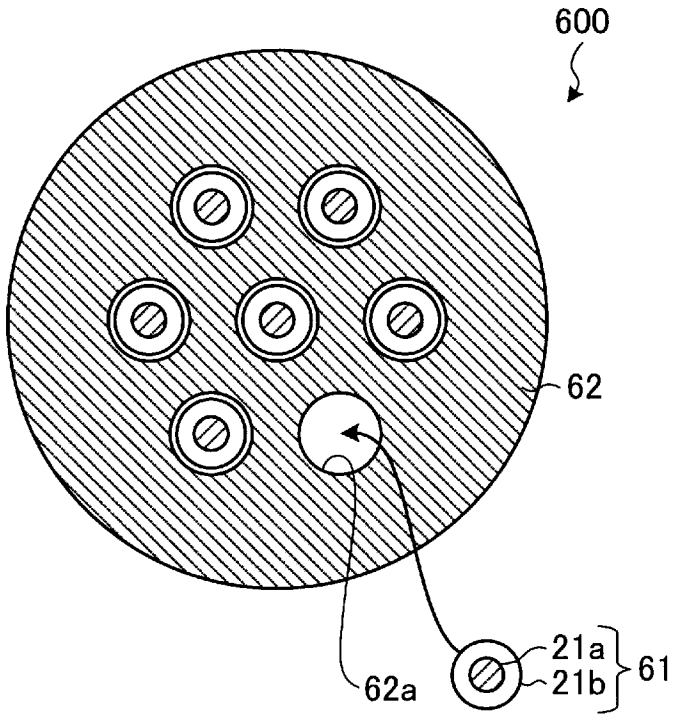
[図12]


400
44
44a
2a
2
41
41a
6a
6
42a
42
43
43a
4
4a

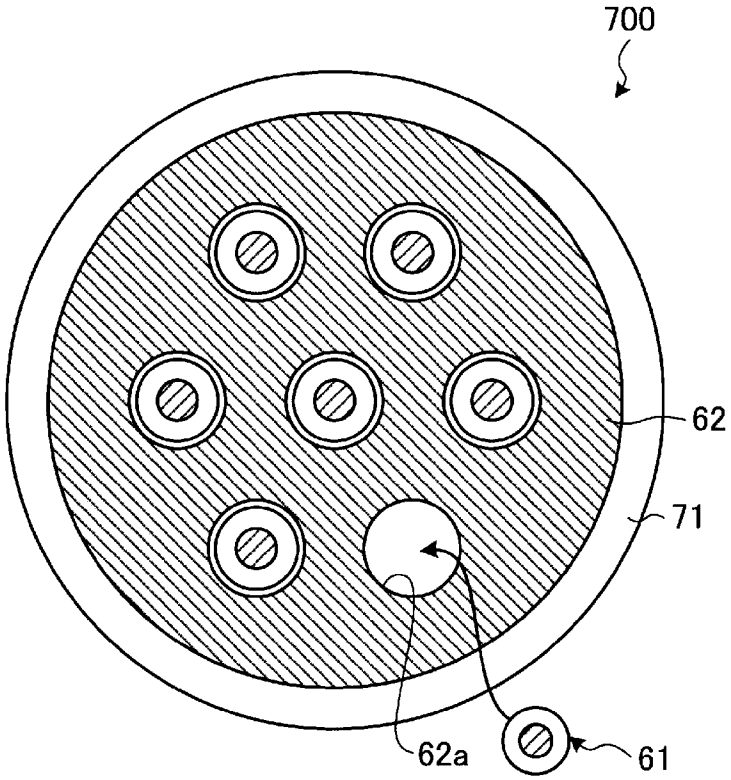
[図13]



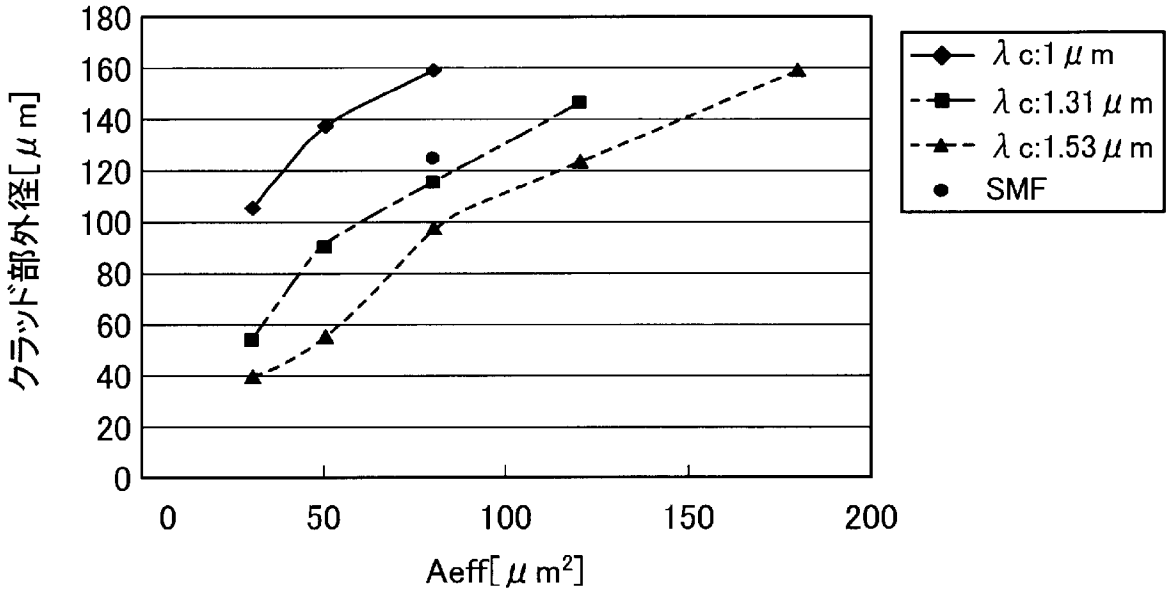
[図14]



[図15]


700
62
71
62a
61

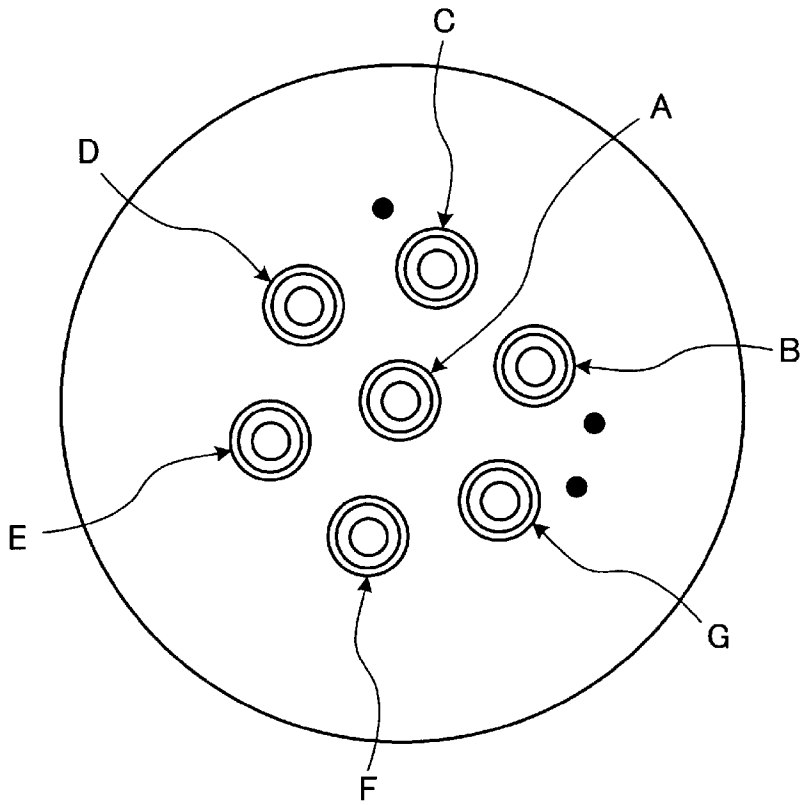
[図16]


180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
50
100
150
200
クラッド部外径[μm]
Aeff[μm²]
λc:1μm
λc:1.31μm
λc:1.53μm
SMF

[図17]

Δ1	Δ2	Δ3	2A	Ra2	Ra3	Ra3-Ra2
0.287%	0%	-0.35%	9.8μm	2	3.05	1.05

[図18]



[図19]

参考例		1	2	3
λcc	nm	1255	1339	1441
Aeff	μm^2	90.3	96.3	103.6
MFD	μm	10.8	11.1	11.4
曲げ損失	dB/m	1.9	0.4	0.4
伝送損失	dB/km	0.188	0.189	0.199
波長分散	ps/nm/km	19.8	19.9	20.2
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.064	0.064	0.064

[図20]

参考例		1	2	3
クラッド厚	μm	58.5	62.5	66.5
クラッド部外径	μm	117.0	125.0	133.0

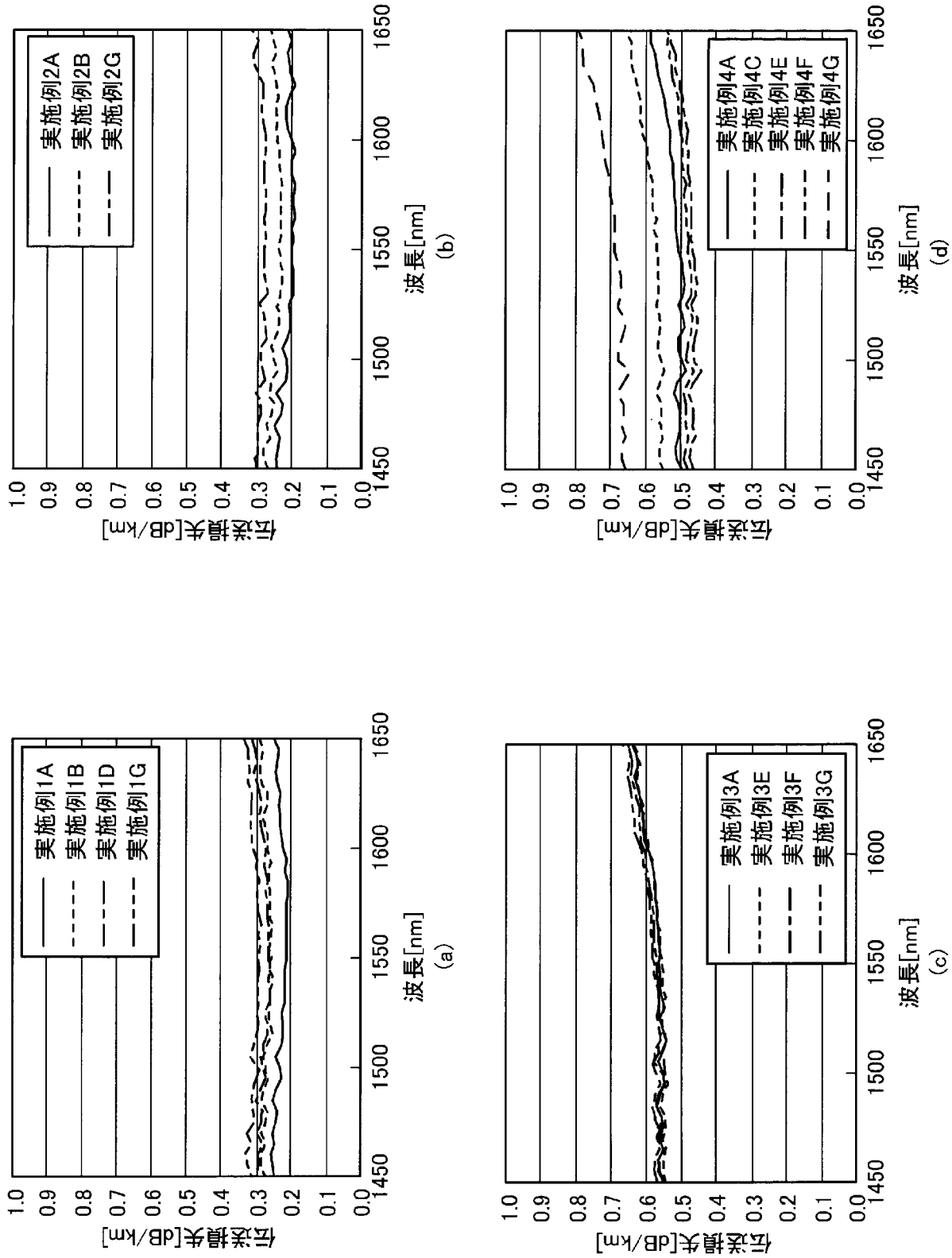
[図21]

実施例1		A	B	C	D	E	F	G
λcc	nm	1359	1284	1222	1270	1212	1278	1212
Aeff	μm^2	98.5	94.4	–	93.0	–	–	89.3
MFD	μm	11.2	10.9	–	10.9	–	–	10.6
曲げ損失	dB/m	0.4	1.0	–	1.0	–	–	1.7
伝送損失	dB/km	0.215	0.254	–	0.262	–	–	0.290
波長分散	ps/nm/km	20.1	19.9	–	19.7	–	–	19.7
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.064	0.064	–	0.064	–	–	0.064
実施例2		A	B	C	D	E	F	G
λcc	nm	1414	1338	1247	1308	1255	1315	1259
Aeff	μm^2	101.9	96.8	–	–	–	–	92.3
MFD	μm	11.4	11.1	–	–	–	–	10.8
曲げ損失	dB/m	0.2	0.6	–	–	–	–	0.9
伝送損失	dB/km	0.202	0.233	–	–	–	–	0.278
波長分散	ps/nm/km	20.2	20.0	–	–	–	–	19.8
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.064	0.064	–	–	–	–	0.064
実施例3		A	B	C	D	E	F	G
λcc	nm	1281	1266	1292	1266	1257	1265	1330
Aeff	μm^2	93.8	–	–	–	91.6	91.8	95.9
MFD	μm	10.9	–	–	–	10.8	10.8	11.0
曲げ損失	dB/m	0.9	–	–	–	1.4	1.0	0.9
伝送損失	dB/km	0.562	–	–	–	0.551	0.565	0.574
波長分散	ps/nm/km	19.9	–	–	–	19.8	19.8	19.8
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.064	–	–	–	0.064	0.064	0.063
実施例4		A	B	C	D	E	F	G
λcc	nm	1335	1314	1335	1331	1316	1311	1381
Aeff	μm^2	96.4	–	96.4	–	94.4	95.0	99.1
MFD	μm	11.1	–	11.1	–	10.9	11.0	11.2
曲げ損失	dB/m	0.4	–	0.5	–	1.0	0.5	0.5
伝送損失	dB/km	0.508	–	0.570	–	0.466	0.478	0.688
波長分散	ps/nm/km	20.0	–	19.9	–	19.9	19.9	19.9
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.064	–	0.064	–	0.064	0.064	0.064
比較例1		A	B	C	D	E	F	G
λcc	nm	1438	1395	1336	1399	1320	1405	1324
Aeff	μm^2	92.1	89.8	88.4	90.3	87.1	90.4	87.8
MFD	μm	11.1	11.0	10.9	11.0	10.8	11.0	10.9
曲げ損失	dB/m	1.0	2.7	7.8	2.6	7.3	2.5	7.3
伝送損失	dB/km	0.263	0.268	0.296	0.282	0.315	0.282	0.298
波長分散	ps/nm/km	18.9	–	17.9	18.4	–	–	–
分散スロープ	$ps/nm^2/km$	0.061	–	0.060	0.060	–	–	–

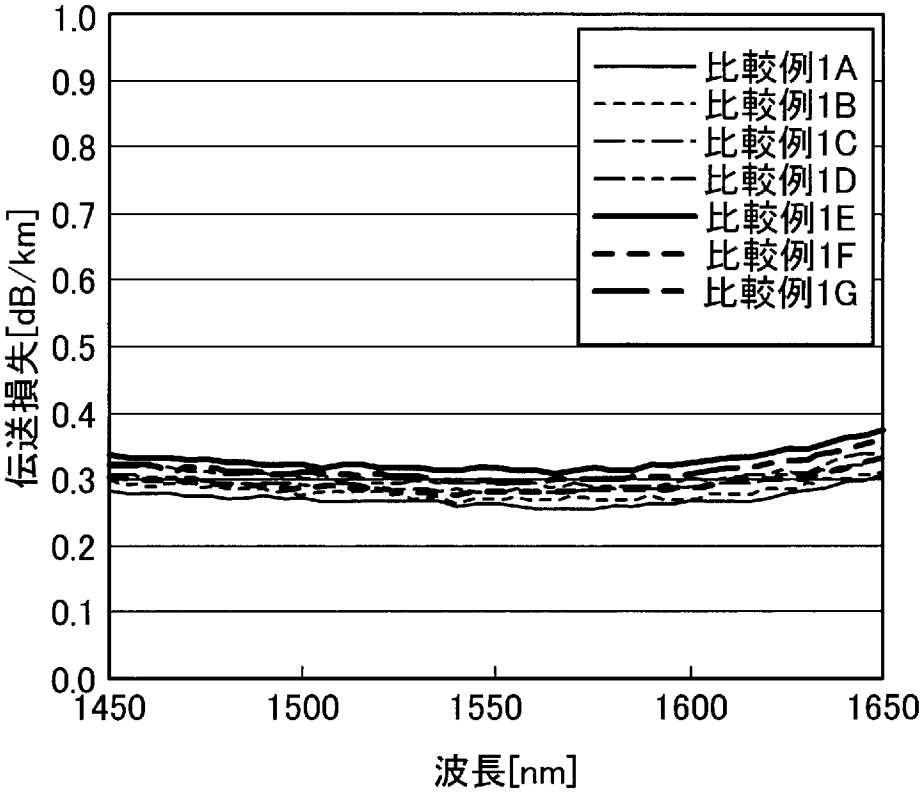
[図22]

		実施例1	実施例2	実施例3	実施例4	比較例1
離隔間隔	μm	48.6	50.5	48.3	50.2	48.4
クラッド厚	μm	71.3	74.2	70.3	73.0	70.8
クラッド部外径	μm	239.8	249.5	237.1	246.5	238.4

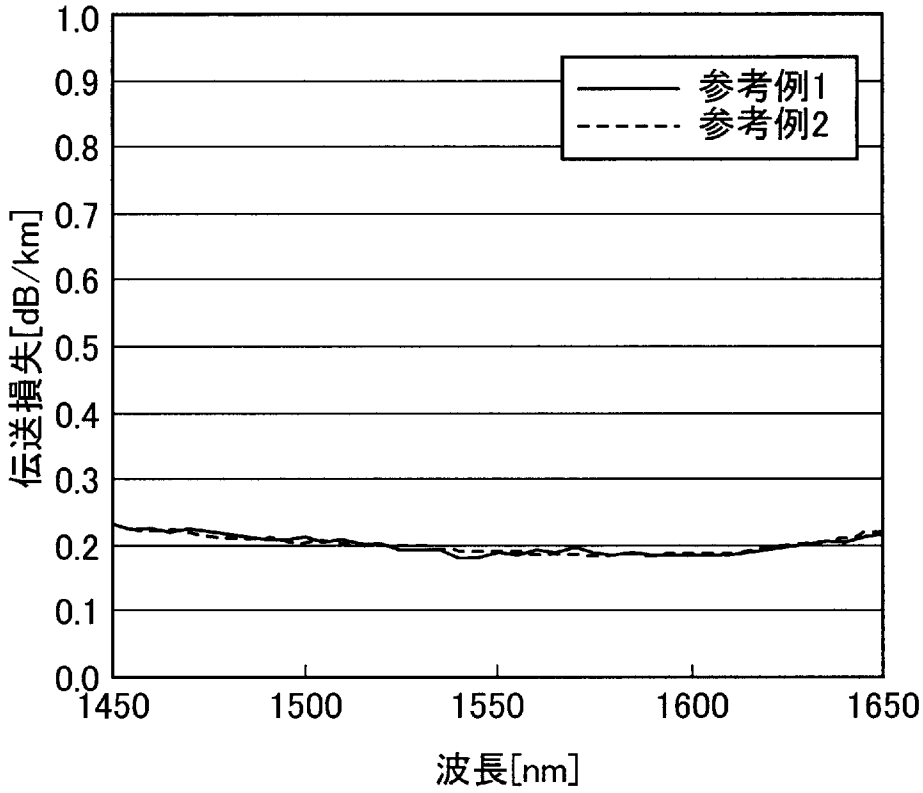
[図23]


実施例1A
実施例1B
実施例1D
実施例1G
伝送損失[dB/km]
波長[nm]
(a)
実施例2A
実施例2B
実施例2G
伝送損失[dB/km]
波長[nm]
(b)
実施例3A
実施例3E
実施例3F
実施例3G
伝送損失[dB/km]
波長[nm]
(c)
実施例4A
実施例4C
実施例4E
実施例4F
実施例4G
伝送損失[dB/km]
波長[nm]
(d)

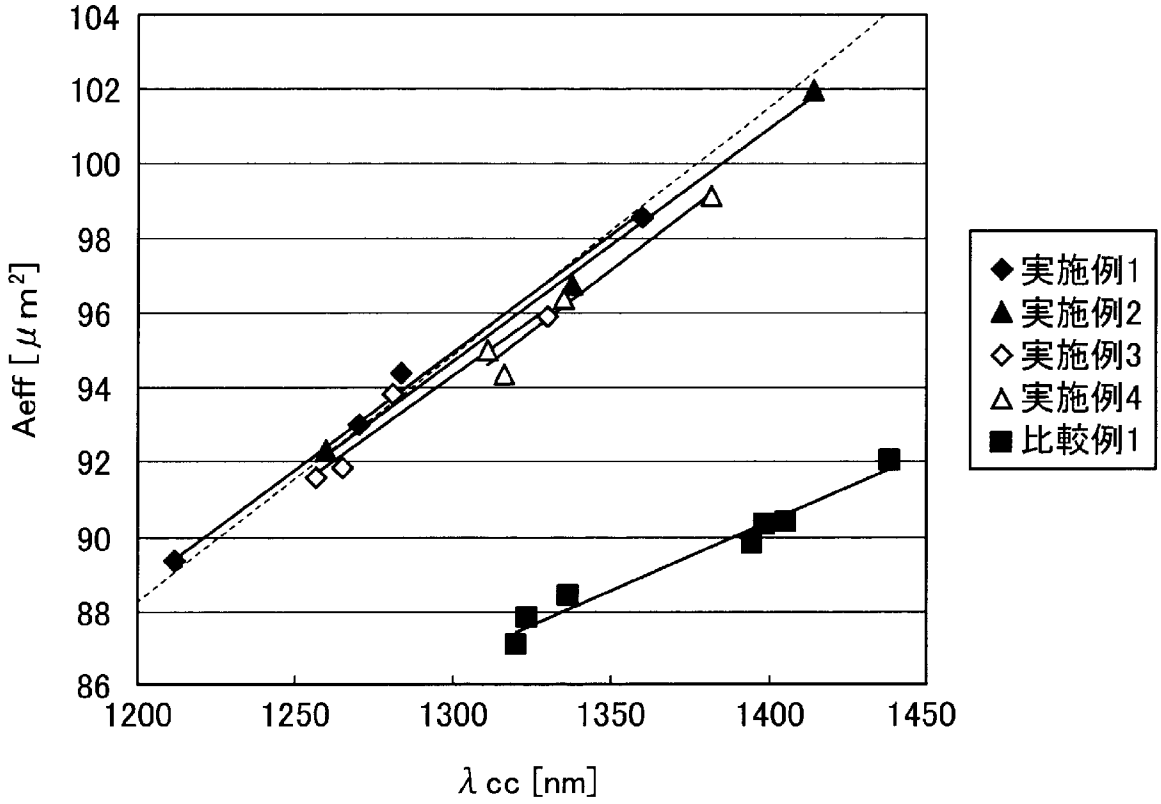
[図24]


1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
伝送損失[dB/km]
1450
1500
1550
1600
1650
波長[nm]
比較例1A
比較例1B
比較例1C
比較例1D
比較例1E
比較例1F
比較例1G

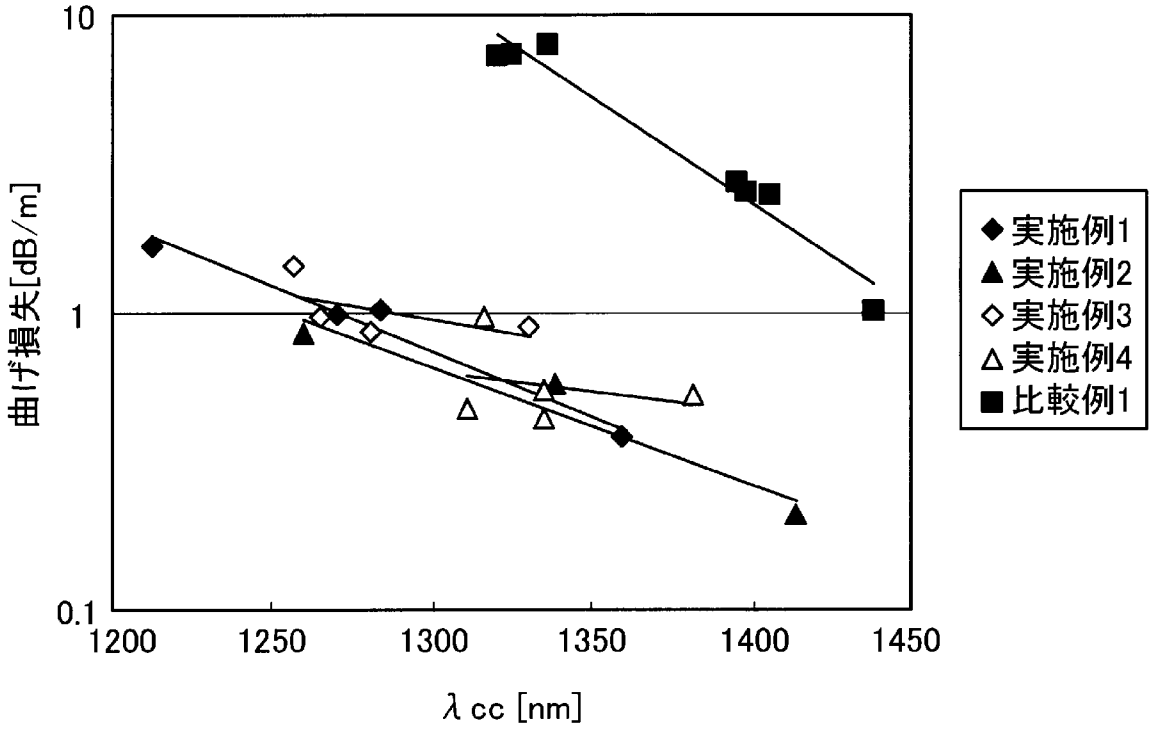
[図25]


1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
伝送損失[dB/km]
1450
1500
1550
1600
1650
波長[nm]
参考例1
参考例2

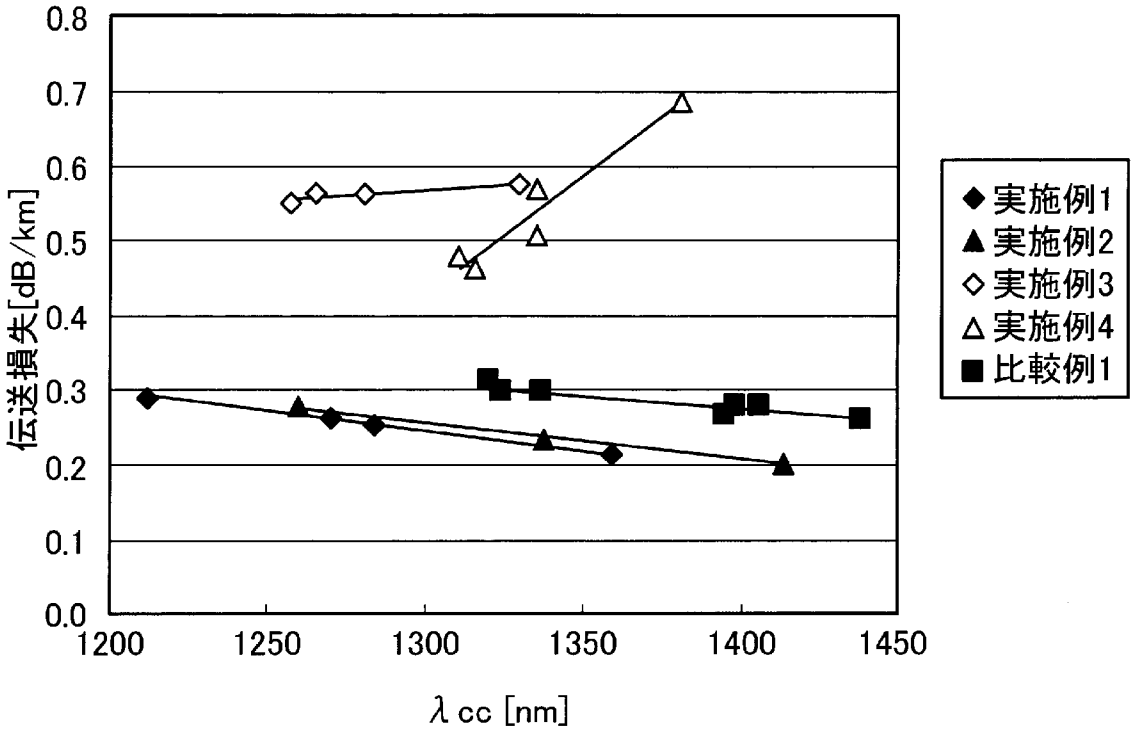
[図26]


104
102
100
98
96
94
92
90
88
86
Aeff [μm²]
1200
1250
1300
1350
1400
1450
λcc [nm]
実施例1
実施例2
実施例3
実施例4
比較例1

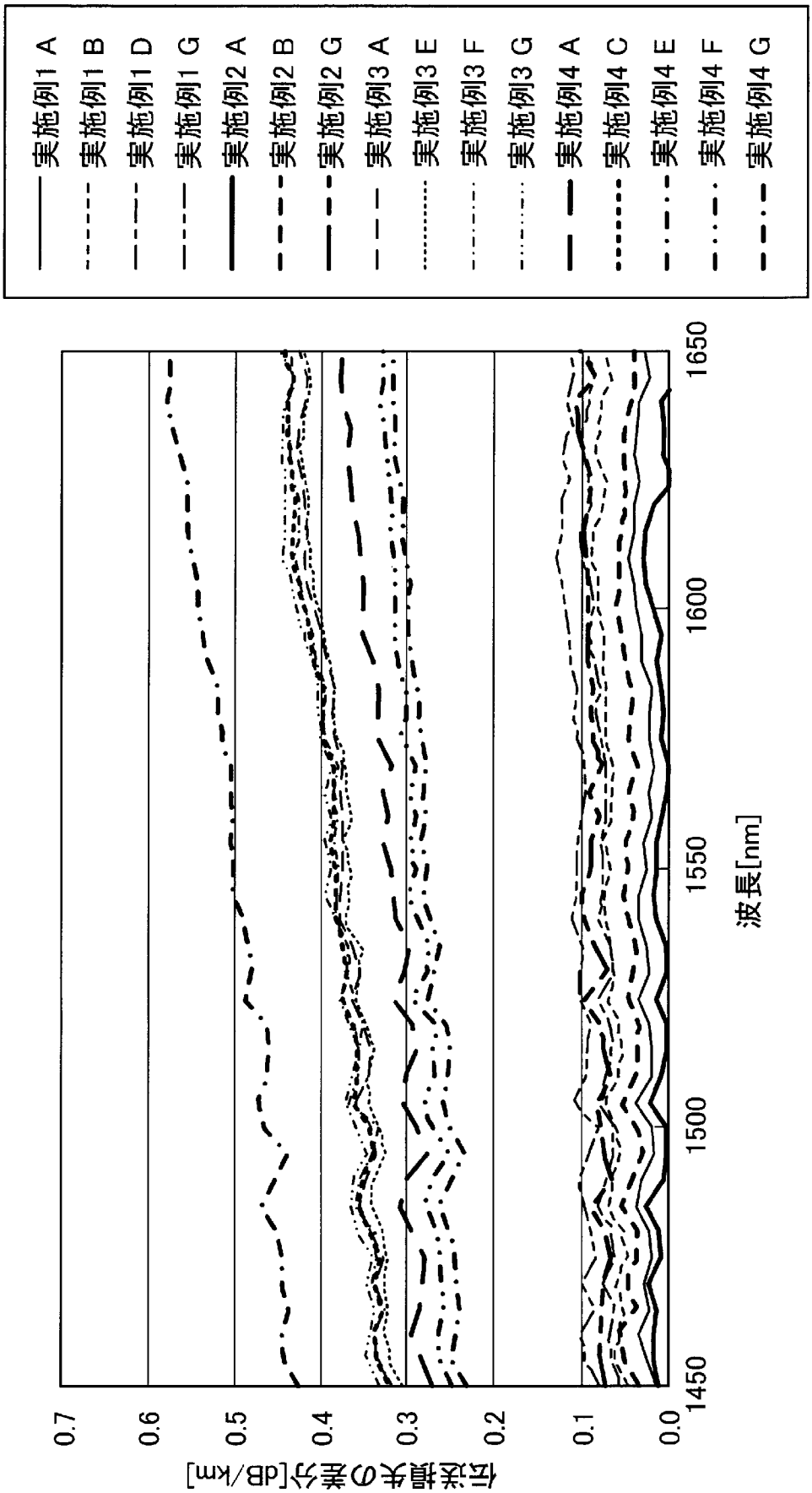
[図27]


10
1
0.1
曲げ損失[dB/m]
1200
1250
1300
1350
1400
1450
λcc [nm]
実施例1
実施例2
実施例3
実施例4
比較例1

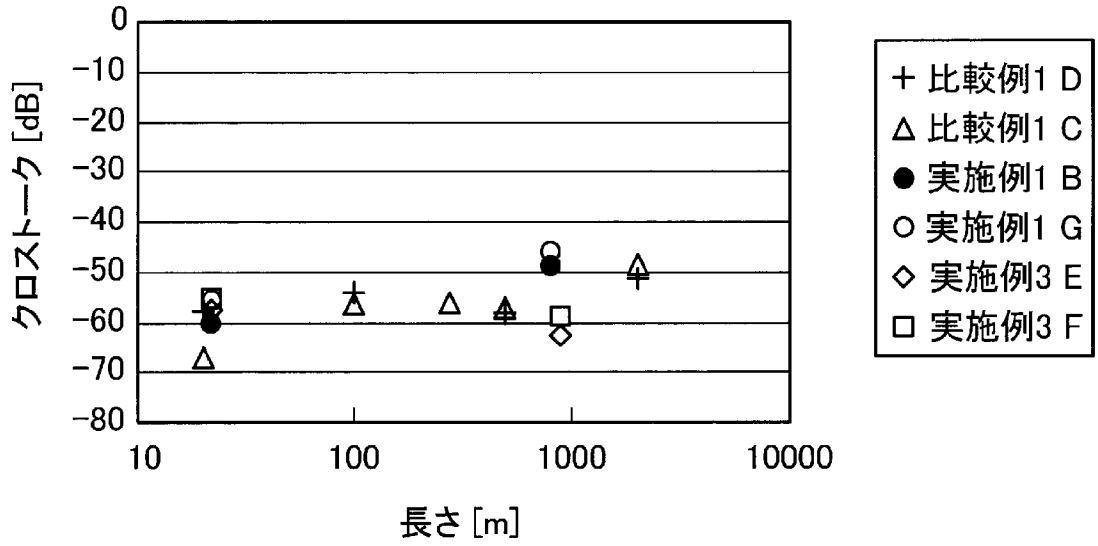
[図28]


0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
伝送損失[dB/km]
1200
1250
1300
1350
1400
1450
λcc [nm]
実施例1
実施例2
実施例3
実施例4
比較例1

[図29]


実施例1 A
実施例1 B
実施例1 D
実施例1 G
実施例2 A
実施例2 B
実施例2 G
実施例3 A
実施例3 E
実施例3 F
実施例3 G
実施例4 A
実施例4 C
実施例4 E
実施例4 F
実施例4 G
伝送損失の差分[dB/km]
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
1450
1500
1550
1600
1650
波長[nm]

[図30]


0
−10
−20
−30
−40
−50
−60
−70
−80
クロストーク [dB]
10
100
1000
10000
長さ [m]
＋ 比較例1 D
△ 比較例1 C
● 実施例1 B
○ 実施例1 G
◇ 実施例3 E
□ 実施例3 F

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2011/052381

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G02B6/04(2006.01)i

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)
G02B6/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2011 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2011

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
IEEE Xplore, CiNii, JSTPlus(JDreamII), JST7580(JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Kunimasa SAITO, Takashi MATSUI, Taiji SAKAMOTO, Masanori KOSHIBA, Shigeru TOMITA, "Multi-Core Hole-Assisted Fibers for High Core Density", 2010 Nen The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu, 02 March 2010 (02.03.2010), Tsushin 2, page 523	1-8
A	Kuniharu Himeno, Shoichiro Matsuo, Ning Guan, and Akira Wada, Low-Bending-Loss Single-Mode Fibers for Fiber-to-the-Home, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2005.11, Vol. 23, No. 11, p. 3494 - 3499	1-8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ 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	Date of mailing of the international search report
17 February, 2011 (17.02.11)	01 March, 2011 (01.03.11)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2011/052381

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Jian ZHOU, Kazuhide NAKAJIMA, Katsusuke TAJIMA, Kazuo HOGARI, Kiminori SATO, Izumi SANKAWA, "Application of PCF to Optical Fiber Wiring in Residential and Business Premises", IEICE Technical Report, 16 January 2003 (16.01.2003), vol.102, no.581, pages 41 to 46	1-8
A	WO 2004/092794 A1 (Fujikura Ltd.), 28 October 2004 (28.10.2004), page 6, lines 1 to 2; page 6, lines 20 to 27; tables 1 to 3; fig. 1 & US 2006/0039665 A1 & EP 1657575 A1 & WO 2004/092794 A1 & KR 10-2006-0009839 A & CN 1768282 A	1-8
A	Yoko ARAKAWA, Katsuhiro TAKENAGA, Shoji TANIKAWA, Ning GUAN, Shoichiro MATSUO, Kunimasa SAITO, Masanori KOSHIBA, "Reduction of crosstalk by quasi-homogeneous solid multi-core fiber", 2010 Nen The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu, 02 March 2010 (02.03.2010), Tsushin 2, page 357	4
A	Masanori Koshiba, Kunimasa Saitoh and Yasuo Kokubun, Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle, IEICE Electronics Express, Vol. 6, No. 2, 2009.01.25, p. 98 - 103	4

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１１／０５２３８１

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G02B6/04(2006.01)i

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））

Int.Cl.　G02B6/04

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	１９７１－２０１１年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１１年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１１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）

IEEE Xplore, CiNii, JSTPlus(JDreamII), JST7580(JDreamII)

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	齊藤晋聖、松井隆、坂本泰志、小柴正則、冨田茂，マルチコア空孔アシストファイバによるコア多重数の高密度化，２０１０年電子情報通信学会総合大会講演論文集，2010.03.02，通信２，５２３頁	1-8
A	Kuniharu Himeno, Shoichiro Matsuo, Ning Guan, and Akira Wada, Low-Bending-Loss Single-Mode Fibers for Fiber-to-the-Home, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2005.11, Vol. 23, No. 11, p. 3494 - 3499	1-8

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。　　☐　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矛盾するものではなく、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 １７．０２．２０１１	国際調査報告の発送日 ０１．０３．２０１１
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｘ　９１２４ 吉田　英一 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２９４

Ｃ（続き）．　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
A	周健、中島和秀、田嶋克介、保苅和男、佐藤公紀、三川泉，フォトニック結晶ファイバの宅内、ビル内配線への適用に関する検討，電子情報通信学会技術研究報告，2003.01.16，Vol. 102，No. 581，４１－４６頁	1-8
A	WO 2004/092794 A1（株式会社フジクラ）2004.10.28，６頁１－２行，６頁２０－２７行，表１－３，ＦＩＧ．１ & US 2006/0039665 A1 & EP 1657575 A1 & WO 2004/092794 A1 & KR 10-2006-0009839 A & CN 1768282 A	1-8
A	荒川葉子、竹永勝宏、谷川庄二、官寧、松尾昌一郎、齊藤晋聖、小柴正則，準均一マルチコアファイバによるクロストークの低減，２０１０年電子情報通信学会総合大会講演論文集，2010.03.02，通信２，３５７頁	4
A	Masanori Koshiba, Kunimasa Saitoh and Yasuo Kokubun, Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle, IEICE Electronics Express, Vol. 6, No. 2, 2009.01.25, p. 98 - 103	4