

(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
2017年8月3日(03.08.2017)



(10) 国際公開番号

WO 2017/130487 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/02 (2006.01) G02B 6/036 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/081523
- (22) 国際出願日: 2016年10月25日(25.10.2016)
- (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 2016-016652 2016年1月29日(29.01.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社フジクラ (FUJIKURA LTD.)
[JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場一丁目5番
1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 安間 淑通 (AMMA Yoshimichi); 〒2858550
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内 Chiba (JP). 竹永 勝宏
(TAKENAGA Katsuhiko); 〒2858550 千葉県佐倉市
六崎1440番地 株式会社フジクラ佐倉事業

所内 Chiba (JP). 齊藤 翔太 (SAITO Shota); 〒
2858550 千葉県佐倉市六崎1440番地 株式
会社フジクラ佐倉事業所内 Chiba (JP).

- (74) 代理人: 森村靖男, 外 (MORIMURA Yasuo et al.);
〒1010032 東京都千代田区岩本町三丁目10番
9号 秋葉原花岡ビル6階 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, KE, KG, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH,
PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, 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,

[続葉有]

(54) Title: MULTICORE FIBER

(54) 発明の名称: マルチコアファイバ

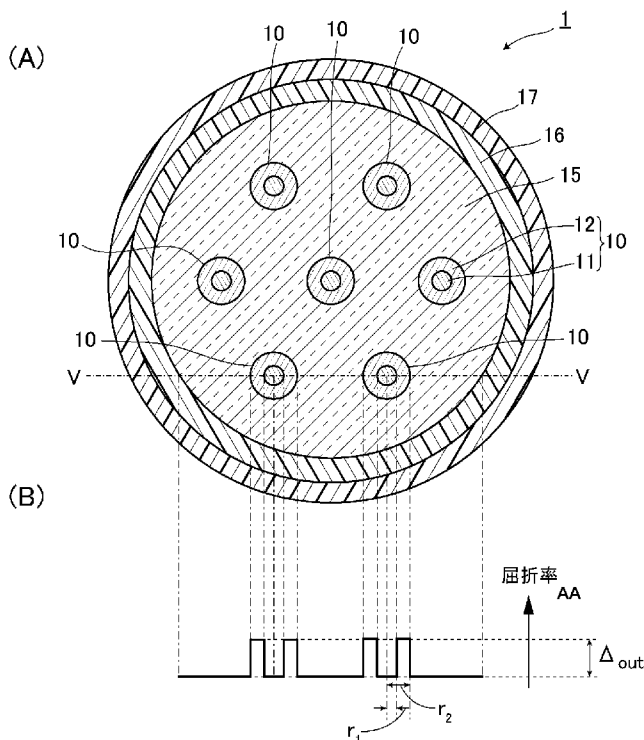


FIG. 1:
AA Refractive index

(57) Abstract: The present invention is characterized by the following: a plurality of cores 10 and a cladding 15 that surrounds the plurality of cores 10 are provided; each of the cores 10 has an inner core 11 and an outer core 12, which surrounds the inner core 11 with no gap therebetween, and which has a refractive index higher than that of the inner core 11 and the cladding 15; no rare earth elements are added to the cores 10; and light of two or more LP modes and having a prescribed wavelength is propagated through the cores 10 with a loss of 0.3 dB/km or less.

(57) 要約: 複数のコア10と複数のコア10を囲むクラッド15とを備え、コア10は、内側コア11と、内側コア11を隙間なく囲むと共に内側コア11及びクラッド15より屈折率が高い外側コア12と、を有し、希土類元素がコア10に非添加であると共に、所定の波長の2つ以上のLPモードの光が0.3dB/km以下の損失でコア10を伝搬することを特徴とする。

WO 2017/130487 A1



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:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： マルチコアファイバ

技術分野

[0001] 本発明はマルチコアファイバに関し、各コアに複数のモードの光が伝搬される場合に好適なものである。

背景技術

[0002] 一般に普及している光ファイバ通信システムに用いられる光ファイバは、1本のコアの外周面がクラッドにより囲まれた構造をしており、このコア内を光信号が伝搬することで情報が伝送される。そして、近年、光ファイバ通信システムの普及に伴い、伝送される情報量が飛躍的に増大している。

[0003] こうした光ファイバ通信システムの伝送容量増大を実現するために、複数のコアの外周面が1つのクラッドにより囲まれたマルチコアファイバを用いて、それぞれのコアを伝搬する光により、複数の信号を伝送させることが知られている。また、更なる伝送容量の増大を実現するために、マルチコアファイバの各コアにおいて、基本モードである LP_{01} モードの光に情報を重畳させると共に、基本モードよりも高次のモードの光にも情報を重畳させて情報通信を行う多モード通信を行うためのフューモードマルチコアファイバ（FM-MCF）を用いた伝送も知られている。このようなフューモードマルチコアファイバは、例えば下記非特許文献1に開示されている。

[0004] マルチコアファイバにおいて問題となるのが、各コアから互いに隣り合うコアへの光遷移であるコア間クロストークである。フューモードマルチコアファイバでは、このクロストークがより顕著になりやすい。例えば、屈折率が径方向に概ね一定である所謂ステップインデックス型のコアが一般的に光ファイバに用いられる。ステップインデックス型のコアでは、 LP_{11} モードのような高次モードの光は LP_{01} モードの光よりもコアの外側に広がりやすい。これにより、高次モードの光は LP_{01} モードの光と比べて有効断面積が大きくなり、互いに隣り合うコアを伝搬する高次モードの光同士のクロスト

ークが生じやすくなる。

[0005] 上記問題に対して、高次モードの光の有効断面積を小さくすることが考えられる。しかし、高次モードの光の有効断面積を小さくするとLP₀₁モードの光の有効断面積が非常に小さくなり、非線形効果による信号品質の劣化や接続損失の増加が懸念される。そのため、フューモードマルチコアファイバの設計では、LP₀₁モードの光の有効断面積を小さくすることなく高次モードの光のクロストークが抑制されることが好ましい。この条件を満たすものとして、例えば下記非特許文献2に開示されているような異種コア型のフューモードマルチコアファイバがある。

[0006] 非特許文献1：D. Soma et al., “2.05 Peta-bit/s Super-Nyquist-WDM SDM Transmission Using 9.8-km 6-mode 19-core Fiber in C band,” Proc.ECOC 2015, PDP3.2, 2015.

非特許文献2：T.Mizuno et al., “Dense SDM(12-core×3-mode)Transmission over 527 km with 33.2-ns Mode-Dispersion Employing Low-Complexity Parallel MIMO Frequency-Domain Equalization,” Proc.OFC2015, Th5C.3, 2015.

発明の概要

[0007] 上記非特許文献2に開示されているような異種コア型のフューモードマルチコアファイバは、複数の種類のコアが設計通りに正確に作製されなければならないという製造上の難点を有する。また、コアの種類によって光学特性に差が生じるという難点も有する。従って、異種コア型とは異なる方法でクロストークが抑制されることが望まれている。

[0008] そこで、本発明は、クロストークが抑制されるマルチコアファイバを提供しようとするものである。

[0009] 上記課題を解決するため、本発明のマルチコアファイバは、複数のコアと前記複数のコアを囲むクラッドとを備え、前記コアは、内側コアと、前記内側コアを隙間なく囲むと共に前記内側コア及び前記クラッドより屈折率が高い外側コアと、を有し、希土類元素が前記コアに非添加であると共に、所定

の波長の2つ以上のLPモードの光が 0.3 dB/km 以下の損失で前記コアを伝搬することを特徴とするものである。

[0010] コアが内側コアと内側コアを囲むと共に内側コアより屈折率が高い外側コアとを有することによって、コアの屈折率が径方向に概ね一定であるステップインデックス型に比べて、LP₀₁モードの光の電界分布が広がると共に高次モードの光の電界分布が狭くなる傾向にある。よって、上記マルチコアファイバでは、LP₀₁モードの光の有効断面積と高次モードの光の有効断面積とが近い値となりやすい。その結果、LP₀₁モードの光の有効断面積が小さくなりすぎることを抑制しつつ高次モードの光の有効断面積を小さくすることができるので、非線形効果による信号品質の劣化や接続損失の増加を抑制しつつ、高次モードの光のクロストークを抑制することができる。

[0011] また、上記マルチコアファイバのコアとステップインデックス型のコアとにおいて、カットオフ波長及びLP₀₁モードの光の有効断面積が同じになるようにした場合、上記マルチコアファイバのコアを伝搬する光の実効屈折率はステップインデックス型のコアを伝搬する光の実効屈折率よりも大きくなる傾向にある。従って、この点からも上記マルチコアファイバはクロストークを抑制することができる。

[0012] また、コアに希土類元素が非添加であり、伝搬損失が 0.3 dB/km 以下で所定の波長の2つ以上のLPモードの光がコアを伝搬することによって、上記マルチコアファイバは伝送容量が大きな長距離通信に好適である。

[0013] 上記マルチコアファイバにおいて、前記内側コアの半径 r_1 と前記外側コアの半径 r_2 との比である r_1/r_2 は、 0.6 以下であることが好ましく、 0.3 以上 0.5 以下であることがより好ましい。

[0014] 後述するように、本発明者らは、 r_1/r_2 が 0.6 以下である場合、クロストークがより抑制され、 r_1/r_2 が 0.3 以上 0.5 以下である場合にさらにクロストークが抑制されやすくなることを見出した。従って、上記構成のマルチコアファイバによれば、より適切な情報通信を行うことができる。

[0015] また、前記コアが前記クラッドより屈折率が低い低屈折率部に囲まれるこ

とが好ましい。

[0016] コアが低屈折率部に囲まれることによって、コアを伝搬する光の電界の広がりを抑制することができ、クロストークがより抑制されやすくなる。

[0017] また、前記外側コアの前記クラッドに対する比屈折率差が3%以下であることが好ましい。

[0018] 外側コアのクラッドに対する比屈折率差が小さくなるように外側コア及びクラッドの構成材料が選択されることによって、マルチコアファイバの製造過程において母材に内部応力が生じることが抑制され、母材が破損することが抑制される。

[0019] また、上記マルチコアファイバのコアに所定の波長の2つ又は3つのLPモードの光を伝搬させることができる。

[0020] 本発明者らは、コアが内側コアと内側コアを囲むと共に内側コアより屈折率が高い外側コアとを有することによって、ステップインデックス型のコアに比べてLP₀₁モードの光の有効断面積とLP₁₁モード及びLP₂₁モードの光の有効断面積とが近い値となる傾向があることを見出した。従って、上記マルチコアファイバによれば、LP₀₁モードの光の有効断面積が小さくなりすぎることを抑制しつつLP₁₁モード及びLP₂₁モードの光の有効断面積を小さくすることができるので、非線形効果による信号品質の劣化や接続損失の増加を抑制しつつ、LP₁₁モード及びLP₂₁モードの光のクロストークを抑制することができる。

[0021] 以上のように、本発明によれば、クロストークが抑制されるマルチコアファイバが提供される。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]本発明の第1実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。

[図2]図1に示すコアの中心からの距離と当該コア近傍のクラッドに対する比屈折率差との関係、及び当該コアを伝搬する光の電界分布を概略的に示す図である。

[図3] LP_{21} モードのカットオフ波長及び LP_{01} モードの有効断面積を固定した場合における図1に示すコアとステップインデックス型のコアとの比屈折率差及び各コアを伝搬する光の電界分布を示す図である。

[図4] 図3とは尺度を変えて、図1に示すコアとステップインデックス型のコアとを伝搬する光の電界分布を示す図である。

[図5] 図1に示すコアを伝搬する光及びステップインデックス型のコアを伝搬する光の実効屈折率を示す図である。

[図6] 本発明の第2実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。

[図7] 実施例1及び比較例1の評価結果を示す図である。

[図8] 実施例2及び比較例2の評価結果を示す図である。

[図9] 実施例3及び比較例3の評価結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0023] 以下、本発明に係るマルチコアファイバの好適な実施形態について図面を参照しながら詳細に説明する。

[0024] (第1実施形態)

図1は、本発明の第1実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。具体的には、図1(A)は当該断面におけるマルチコアファイバ1の構造を示し、図1(B)は当該断面におけるV-V線での屈折率分布を示す。

[0025] 図1(A)に示すように、本実施形態のマルチコアファイバ1は、複数のコア10と、これら複数のコア10を隙間なく囲むクラッド15と、クラッド15の外周面を被覆する内側保護層16と、内側保護層16の外周面を被覆する外側保護層17とを主な構成として備える。なお、コア10の数や配置は特に限定されないが、本例ではコア10の数が7つとされる。

[0026] 上記のように本実施形態のコア10の数は7つとされ、1つのコア10がマルチコアファイバ1の中心に配置され、当該中心に配置されたコア10の周囲に他の6つのコア10が配置される。この状態で、それぞれのコア10

の中心を結ぶ線が三角格子状とされ、それぞれの互いに隣り合うコア 10 の中心間距離は等しくされる。

[0027] また、コア 10 は、内側コア 11 と内側コア 11 を隙間なく囲む外側コア 12 とを有する。以後の説明において、内側コア 11 の半径を r_1 とし外側コアの半径を r_2 とする。 r_1 と r_2 との比 r_1/r_2 は、0.6 以下であることが好ましく、0.3 以上 0.5 以下であることがより好ましい。

[0028] 図 1 (B) に示すように、外側コア 12 の屈折率は内側コア 11 の屈折率及びクラッド 15 の屈折率より高い。本例では、内側コア 11 の屈折率はクラッド 15 の屈折率と同等である。以後の説明において、外側コア 12 のクラッド 15 に対する比屈折率差を Δ_{out} とする。外側コア 12 のクラッド 15 に対する比屈折率差 Δ_{out} は 3% 以下であることが好ましい。外側コア 12 のクラッド 15 に対する比屈折率差 Δ_{out} が小さくなるように外側コア 12 及びクラッド 15 の構成材料が選択されることによって、マルチコアファイバ 1 の製造過程において母材に内部応力が生じることが抑制され、母材が破損することが抑制される。

[0029] 上記のようなコア 10 において、外側コア 12 は、例えば屈折率を高くするゲルマニウム等のドーパントが添加された石英から成り、内側コア 11 及びクラッド 15 は、例えば純粋な石英からなる。

[0030] また、コア 10 には希土類元素が非添加であり、所定の波長の 2 つ以上の LP モードの光が 0.3 dB/km 以下の損失でコア 10 を伝搬する。よって、マルチコアファイバ 1 は伝送容量が大きな長距離通信に好適である。

[0031] 内側保護層 16 及び外側保護層 17 はそれぞれ紫外線硬化樹脂等の樹脂から成り、内側保護層 16 及び外側保護層 17 は互いに異なる樹脂から成る。

[0032] 次に、コア 10 を伝搬する光の電界分布について説明する。図 2 は、マルチコアファイバ 1 に含まれるコア 10 のうち一つのコア 10 の中心からの距離とコア 10 近傍のクラッド 15 に対する比屈折率差との関係、及び当該コア 10 を伝搬する光の電界分布を概略的に示す図である。図 2 において、点線はクラッド 15 に対する比屈折率差を示し、破線は LP₀₁ モードの光の電

界分布を示し、実線は LP_{11} モードの光の電界分布を示す。

[0033] 図2からわかるように、コア10では、 LP_{01} モードの光の電界分布と高次モードである LP_{11} モードの光の電界分布とが近くなっている。これは、コア10が屈折率の低い内側コア11と内側コア11を囲う屈折率の高い外側コア12とを有していることによって、コア10の中心付近において LP_{01} モードの光の電界分布が広がりやすくなっていることが主な要因であると考えられる。このように LP_{01} モードの光の電界分布と高次モードである LP_{11} モードの光の電界分布とが近いことによって、コア10では、 LP_{01} モードの光の有効断面積と LP_{11} モードの光の有効断面積とが近い値となる。コア10とステップインデックス型のコアとの比較について以下に説明する。

[0034] 図3は、 LP_{21} モードの光のカットオフ波長及び LP_{01} モードの光の有効断面積を固定した場合におけるコア10とステップインデックス型のコアとのクラッドに対する比屈折率差及び各コアを伝搬する光の電界分布を示す図である。図4は、図3とは尺度を変えて、コア10とステップインデックス型のコアとを伝搬する光の電界分布を示す図である。ここで、 LP_{21} モードの理論カットオフ波長は $1.5\mu m$ とし、 LP_{01} モードの光の有効断面積は波長 $1550nm$ において $80\mu m^2$ としている。なお、図3以降の図及び以下の説明において、コア10のように屈折率が高い部分がリング状に形成されるコアを「R1」と表記し、ステップインデックス型のコアを「S1」と表記することがある。

[0035] 図3からわかるように、コアの中心近傍において、ステップインデックス型のコアに比べてコア10の方が、 LP_{11} モードの光の電界分布と LP_{01} モードの光の電界分布とが近くなる。また、図4からわかるように、ステップインデックス型のコアに比べてコア10の方が、コアを伝搬する光の電界分布の広がりが小さくなる。その結果、互いに隣り合うコア10ではクロストークが抑制される。

[0036] また、図5は、波長 $1550nm$ の LP_{01} モードの光の有効断面積を $80\mu m^2$ 、 LP_{21} モードの光の理論カットオフ波長を $1.5\mu m$ とするときの、

コア10を伝搬する光の実効屈折率及びステップインデックス型のコアを伝搬する光の実効屈折率を示す図である。

[0037] 図5からわかるように、 LP_{21} モードの光の理論カットオフ波長及び LP_{01} モードの光の有効断面積をコア10とステップインデックス型のコアとで同じにして考える場合において、コア10を伝搬する光の実効屈折率はステップインデックス型のコアを伝搬する光よりも大きくなる。実効屈折率が高い方がクロストークが小さくなる傾向にあるため、上記のようにコア10を伝搬する光の実効屈折率が大きくなることから、マルチコアファイバ1ではクロストークが抑制されることがわかる。

[0038] 以上説明したように、本実施形態のマルチコアファイバ1では、コア10が内側コア11と内側コア11を囲むと共に内側コア11より屈折率が高い外側コア12とを有することによって、コアの屈折率が径方向に概ね一定であるステップインデックス型に比べて、 LP_{01} モードの光の電界分布が広がると共に高次モードの光の電界分布が狭くなる。よって、 LP_{01} モードの光の有効断面積と高次モードの光の有効断面積とが近い値となる。その結果、 LP_{01} モードの光の有効断面積が小さくなりすぎることを抑制しつつ高次モードの光の有効断面積を小さくすることができるので、非線形効果による信号品質の劣化や接続損失の増加を抑制しつつ、高次モードの光のクロストークを抑制することができる。また、マルチコアファイバ1のコア10とステップインデックス型のコアとにおいて、カットオフ波長及び LP_{01} モードの光の有効断面積が同じになるようにした場合、マルチコアファイバ1のコア10を伝搬する光の実効屈折率はステップインデックス型のコアを伝搬する光の実効屈折率よりも大きくなる傾向にある。従って、この点からもマルチコアファイバ1はクロストークを抑制することができる。

[0039] (第2実施形態)

次に、本発明の第2実施形態について説明する。なお、第1実施形態と同一又は同等の構成要素については、同一の参照符号を付して特に説明する場合を除き重複する説明は省略する。

[0040] 図6は、本発明の第2実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。具体的には、図6（A）は当該断面におけるマルチコアファイバ2の構造を示し、図6（B）は当該断面におけるV-V線での屈折率分布を示す。

[0041] 図6に示すように本実施形態のマルチコアファイバ2は、コア10がクラッド15より屈折率が低い低屈折率部13に囲まれる点において、第1実施形態のマルチコアファイバ1と異なる。図6に示す r_3 は低屈折率部13の内径であり、 r_4 は低屈折率部13の外径であり、 Δ_t はクラッド15に対する低屈折率部13の比屈折率差である。低屈折率部13は、例えば、屈折率を低くするフッ素等のドーパントが添加された石英で構成される。

[0042] 本実施形態のマルチコアファイバ2においても、マルチコアファイバ1と同様にクロストークが抑制される。さらに、マルチコアファイバ2では、コア10が低屈折率部13に囲まれることによって、コア10を伝搬する光の有効断面積の広がり抑制することができ、クロストークがより抑制されやすい。

[0043] 以上、本発明について、上記実施形態を例に説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。例えば、第1実施形態及び第2実施形態における内側コア11の半径 r_1 と外側コア12の半径 r_2 との比 r_1/r_2 は0.6以下に限定されず、外側コア12のクラッド15に対する比屈折率差は3%以下に限定されない。

[0044] また、上記実施形態ではコア10に LP_{01} モード及び LP_{11} モードの光が伝搬する例を挙げて説明したが、コア10には所定の波長の2つ以上のLPモードの光を伝搬させることができる。すなわち、コア10に伝搬させることができるのは LP_{01} モード及び LP_{11} モードの2つのLPモードの光に限定されず、3つのLPモードの光を伝搬させることもできる。例えば、コア10には LP_{21} モードの光を伝搬させることもできる。本発明者らは、コア10を伝搬する LP_{01} モードの光の有効断面積と LP_{11} モード及び LP_{21} モードの光の有効断面積との差が、これらの光がステップインデックス型のコ

アを伝搬する場合に比べて小さくなる傾向にあることを見出した。従って、本発明のマルチコアファイバによれば、 LP_{01} モードの光の有効断面積が小さくなりすぎることを抑制しつつ LP_{11} モード及び LP_{21} モードの光の有効断面積を小さくすることができるので、非線形効果による信号品質の劣化や接続損失の増加を抑制しつつ、互いに隣り合うコア間において LP_{11} モード及び LP_{21} モードの光のクロストークを抑制することができる。

実施例

[0045] 以下、実施例及び比較例を挙げて本発明をより具体的に説明するが、本発明は、以下の実施例に限定されるものではない。なお、以下の実施例及び比較例は多層分割法を用いた計算機シミュレーションによるものである。

[0046] (実施例 1)

第 1 実施形態のマルチコアファイバ 1 をモデル (R 1) としてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表 1 に示す。表 1 における Δ_{out} はクラッド 15 に対する外側コア 12 の比屈折率差であり、 r_1 は内側コア 11 の半径であり、 r_2 は外側コア 12 の半径であり、 $A_{eff}(LP_{01})$ は波長 1550 nm の LP_{01} モードの光の有効断面積であり、 $A_{eff}(LP_{11})$ は波長 1550 nm の LP_{11} モードの光の有効断面積であり、 $\lambda_{ct}(LP_{21})$ は第 2 次高次モードである LP_{21} モードの光の理論カットオフ波長であり、 $n_{eff}(LP_{11})$ は LP_{11} モードの光の実効屈折率であり、 Λ はコア間距離であり、100-km XT は互いに隣り合うコアを伝搬する LP_{11} モードの光同士の 100 km 当たりのクロストークの大きさである。

[0047] (比較例 1)

コアがステップインデックス型であること以外は実施例 1 と同様のモデル (S 1) についてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表 1 に示す。なお、比較例 1 のマルチコアファイバは、コアがステップインデックス型であるため、 $r_1=0$ としており、実施例 1 の外側コア 12 に相当する要素のみでコアが形成されていると考えられる。従って、比較例 1 では、 Δ_{out} はコアのクラッドに対する比屈折率差を意味する。

[0048]

表1

Item	Δ_{out}	r_1	r_2	r_1/r_2	A_{eff} (LP ₀₁)	A_{eff} (LP ₁₁)	λ_{ct} (LP ₂₁)	n_{eff} (LP ₁₁)	Λ	100-km XT
Unit	%	μm	μm	-	μm^2	μm^2	μm	-	μm	dB
RI	0.950	0.69	4.57	0.15	60	86	1.5	1.4495	45	-74.5
	0.721	0.79	5.29	0.15	80	114	1.5	1.4483	45	-51.6
	0.582	0.89	5.91	0.15	100	141	1.5	1.4475	45	-35.7
	0.486	0.97	6.48	0.15	120	170	1.5	1.4470	45	-23.6
	1.060	1.08	4.33	0.25	60	77	1.5	1.4500	45	-82.9
	0.804	1.25	5.00	0.25	80	103	1.5	1.4486	45	-58.5
	0.647	1.40	5.59	0.25	100	128	1.5	1.4478	45	-41.6
	0.541	1.53	6.13	0.25	120	153	1.5	1.4472	45	-29.0
	1.180	1.44	4.12	0.35	60	71	1.5	1.4503	45	-88.2
	0.899	1.67	4.76	0.35	80	94	1.5	1.4489	45	-63.8
	0.718	1.86	5.32	0.35	100	118	1.5	1.4480	45	-45.2
	0.601	2.04	5.83	0.35	120	141	1.5	1.4474	45	-32.5
	1.330	1.78	3.95	0.45	60	67	1.5	1.4505	45	-91.7
	1.001	2.05	4.56	0.45	80	90	1.5	1.4489	45	-64.7
	0.800	2.29	5.09	0.45	100	112	1.5	1.4480	45	-46.0
	0.671	2.51	5.58	0.45	120	134	1.5	1.4474	45	-33.5
	1.520	2.09	3.80	0.55	60	66	1.5	1.4504	45	-90.7
	1.144	2.41	4.38	0.55	80	87	1.5	1.4488	45	-63.6
	0.916	2.69	4.89	0.55	100	109	1.5	1.4479	45	-45.1
	0.768	2.95	5.36	0.55	120	130	1.5	1.4473	45	-32.8
	2.376	2.64	3.52	0.75	60	65	1.5	1.4499	45	-83.7
SI	1.810	3.05	4.06	0.75	80	85	1.5	1.4486	45	-59.6
	1.449	3.40	4.53	0.75	100	106	1.5	1.4477	45	-41.3
	1.209	3.72	4.96	0.75	120	127	1.5	1.4471	45	-28.5
	0.855	0	4.83	0	60	95	1.5	1.4490	45	-65.6
	0.648	0	5.58	0	80	126	1.5	1.4479	45	-43.5
	0.520	0	6.24	0	100	158	1.5	1.4472	45	-27.9
	0.433	0	6.83	0	120	189	1.5	1.4467	45	-16.2

[0049] (評価結果)

実施例1及び比較例1の評価結果を図7に示す。図7は、横軸を r_1/r_2 として、縦軸を100-km XTとしている。

[0050] 表1からわかるように、実施例1の方が比較例1よりもLP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁)とLP₁₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₁₁)との差が小さくなっている。そして、図7からわかるように、LP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁)が同じである場合、実施例1の方が比較例1よりも、互いに隣り合うコアを伝搬するLP₁₁モードの光同士のクロストークが小さく、特に $0 < r_1/r_2 \leq 0.6$ の範囲で実施例1の方が比較例1よりクロストークが小さく、 $0.3 < r_1/r_2 \leq 0.5$ の範囲では実施例1の方がよりクロストークが小さい。

[0051] (実施例 2)

第 2 実施形態のマルチコアファイバ 2 をモデル (T A - R 1) としてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表 2 に示す。表 2 における Δ_{out} , r_1 , r_2 , $A_{eff}(LP_{01})$, $A_{eff}(LP_{11})$, $n_{eff}(LP_{11})$, Λ 及び $100\text{-km} \times T$ は、表 1 と同様であり、 r_3 は低屈折率部 13 の内径であり、 r_4 は低屈折率部 13 の外径であり、 $\lambda_{cc}(LP_{21})$ は、 LP_{21} モードの光のケーブルカットオフ波長である。ここで、低屈折率部 13 のクラッド 15 に対する比屈折率差 Δ_t は -0.7% とし、 $(r_4 - r_3) / r_2 = 1.0$ とし、 $r_3 / r_2 = 1.7$ とした。

[0052] (比較例 2)

コアがステップインデックス型であること以外は実施例 2 と同様のモデル (T A - S 1) についてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表 2 に示す。なお、比較例 2 のマルチコアファイバは、コアがステップインデックス型であるため、 $r_1 = 0$ としており、実施例 2 の外側コア 12 に相当する要素のみでコアが形成されていると考えられる。従って、比較例 2 では、 Δ_{out} はコアのクラッドに対する比屈折率差を意味する。

[0053]

表2

Item	Δ_{out}	r_1	r_2	r_3	r_4	r_1/r_2	A_{eff} (LP ₀₁)	A_{eff} (LP ₁₁)	λ_{cc} (LP ₂₁)	n_{eff} (LP ₁₁)	Λ	100-km XT
Unit	%	μm	μm	μm	μm	-	μm^2	μm^2	μm	-	μm	dB
TA-RI	0.824	0.67	4.49	7.63	12.12	0.15	60	88	1.35	1.4478	45	-77.9
	0.614	0.78	5.17	8.79	13.96	0.15	80	116	1.35	1.4468	45	-64.3
	0.469	0.86	5.74	9.76	15.50	0.15	100	147	1.35	1.4460	45	-52.7
	0.369	0.93	6.23	10.59	16.82	0.15	120	178	1.35	1.4454	45	-44.7
	0.924	1.07	4.26	7.24	11.50	0.25	60	79	1.35	1.4481	45	-83.2
	0.690	1.23	4.92	8.36	13.28	0.25	80	105	1.35	1.4471	45	-68.6
	0.538	1.37	5.48	9.32	14.80	0.25	100	132	1.35	1.4463	45	-57.8
	0.424	1.49	5.96	10.13	16.09	0.25	120	160	1.35	1.4457	45	-48.3
	1.027	1.42	4.05	6.89	10.94	0.35	60	73	1.35	1.4483	45	-84.7
	0.769	1.64	4.68	7.96	12.64	0.35	80	97	1.35	1.4472	45	-69.6
	0.603	1.83	5.22	8.87	14.09	0.35	100	121	1.35	1.4465	45	-58.7
	0.489	2.00	5.70	9.69	15.39	0.35	120	146	1.35	1.4459	45	-51.3
	1.150	1.74	3.87	6.58	10.45	0.45	60	69	1.35	1.4482	45	-83.3
	0.870	2.02	4.48	7.62	12.10	0.45	80	91	1.35	1.4473	45	-69.7
	0.683	2.25	5.00	8.50	13.50	0.45	100	114	1.35	1.4465	45	-58.4
	0.560	2.46	5.47	9.30	14.77	0.45	120	136	1.35	1.4460	45	-51.7
	1.320	2.04	3.71	6.31	10.02	0.55	60	66	1.35	1.4481	45	-79.6
	0.988	2.36	4.29	7.29	11.58	0.55	80	88	1.35	1.4470	45	-64.4
	0.796	2.65	4.81	8.18	12.99	0.55	100	108	1.35	1.4465	45	-57.3
	0.648	2.89	5.26	8.94	14.20	0.55	120	130	1.35	1.4460	45	-49.3
	2.100	2.58	3.44	5.85	9.29	0.75	60	64	1.35	1.4476	45	-70.2
TA-SI	1.578	2.99	3.98	6.77	10.75	0.75	80	83	1.35	1.4467	45	-56.1
	1.256	3.35	4.46	7.58	12.04	0.75	100	103	1.35	1.4462	45	-47.4
	1.046	3.68	4.90	8.33	13.23	0.75	120	123	1.35	1.4458	45	-43.1
	0.753	0	4.71	8.01	12.72	0	60	96	1.35	1.4475	45	-74.3
	0.548	0	5.40	9.18	14.58	0	80	128	1.35	1.4464	45	-59.0
	0.420	0	5.98	10.17	16.15	0	100	161	1.35	1.4457	45	-49.3
	0.331	0	6.47	11.00	17.47	0	120	194	1.35	1.4452	45	-42.5

[0054] (評価結果)

実施例2及び比較例2の評価結果を図8に示す。図8は、横軸を r_1/r_2 として、縦軸を100-km XTとしている。

[0055] 表2からわかるように、実施例2の方が比較例2よりもLP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁)とLP₁₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₁₁)との差が小さくなっている。そして、図8からわかるように、LP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁)が同じである場合、実施例2の方が比較例2よりも、互いに隣り合うコアを伝搬するLP₁₁モードの光同士のクロストークが概ね小さく、特に $0 < r_1/r_2 \leq 0.6$ の範囲で実施例2の方が比較例2よりクロストークが小さく、 $0.3 < r_1/r_2 \leq 0.5$ の範囲では実施例2の方がよりクロストークが小さい。

[0056] (実施例3)

第1実施形態のマルチコアファイバ1をモデル(R1)としてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表3に示す。表3における Δ_{out} , r_1 , r_2 , $A_{eff}(LP_{01})$, $\lambda_{ct}(LP_{21})$, Λ は表1と同様であり、 $A_{eff}(LP_{21})$ は波長1550nmの LP_{21} モードの光の有効断面積であり、 $n_{eff}(LP_{21})$ は LP_{21} モードの光の実効屈折率であり、 $100\text{-km} \times T$ は互いに隣り合うコアを伝搬する LP_{21} モードの光同士の100km当たりのクロストークの大きさである。

[0057] (比較例3)

コアがステップインデックス型であること以外は実施例3と同様のモデル(S1)についてシミュレーションを行った。各パラメータを下記表3に示す。なお、比較例3のマルチコアファイバは、コアがステップインデックス型であるため、 $r_1=0$ としており、実施例3の外側コア12に相当する要素のみでコアが形成されていると考えられる。従って、比較例3では、 Δ_{out} はコアのクラッドに対する比屈折率差を意味する。

[0058]

表3

Item	Δ_{out}	r_1	r_2	r_1/r_2	A_{eff} (LP ₀₁)	A_{eff} (LP ₂₁)	λ_{ct} (LP ₂₁)	n_{eff} (LP ₂₁)	Λ	100-km XT
Unit	%	μm	μm	—	μm^2	μm^2	μm	—	μm	dB
RI	1.221	0.71	4.73	0.15	60	99	1.8	1.4470	45	-43.0
	0.920	0.82	5.46	0.15	80	131	1.8	1.4464	45	-26.5
	0.743	0.92	6.10	0.15	100	164	1.8	1.4459	45	-15.3
	0.620	1.00	6.68	0.15	120	198	1.8	1.4456	45	-6.2
	1.361	1.12	4.47	0.25	60	89	1.8	1.4473	45	-49.0
	1.025	1.29	5.16	0.25	80	118	1.8	1.4465	45	-31.0
	0.824	1.44	5.77	0.25	100	147	1.8	1.4461	45	-19.5
	0.699	1.58	6.32	0.25	120	176	1.8	1.4458	45	-11.2
	1.495	1.50	4.28	0.35	60	81	1.8	1.4476	45	-54.7
	1.140	1.73	4.94	0.35	80	108	1.8	1.4467	45	-35.5
	0.903	1.93	5.52	0.35	100	135	1.8	1.4462	45	-22.7
	0.758	2.12	6.05	0.35	120	161	1.8	1.4459	45	-14.6
	1.630	1.86	4.14	0.45	60	77	1.8	1.4477	45	-57.2
	1.236	2.15	4.78	0.45	80	101	1.8	1.4469	45	-39.2
	0.990	2.40	5.34	0.45	100	126	1.8	1.4463	45	-25.6
	0.828	2.63	5.85	0.45	120	151	1.8	1.4460	45	-16.6
	1.854	2.22	4.03	0.55	60	73	1.8	1.4479	45	-60.4
	1.367	2.56	4.65	0.55	80	96	1.8	1.4470	45	-40.6
	1.109	2.86	5.20	0.55	100	120	1.8	1.4464	45	-27.9
	0.925	3.13	5.69	0.55	120	143	1.8	1.4461	45	-17.9
SI	2.696	2.89	3.85	0.75	60	70	1.8	1.4480	45	-59.5
	2.041	3.33	4.44	0.75	80	92	1.8	1.4470	45	-40.1
	1.645	3.72	4.96	0.75	100	114	1.8	1.4465	45	-27.3
	1.380	4.08	5.44	0.75	120	135	1.8	1.4462	45	-18.4
	1.071	0	5.05	0	60	113	1.8	1.4466	45	-34.3
	0.809	0	5.82	0	80	150	1.8	1.4461	45	-19.1
	0.658	0	6.52	0	100	187	1.8	1.4457	45	-9.3
	0.544	0	7.13	0	120	224	1.8	1.4455	45	-2.4

[0059] (評価結果)

実施例3及び比較例3の評価結果を図9に示す。図9は、横軸を r_1/r_2 として、縦軸を 100-km XTとしている。

[0060] 表3からわかるように、実施例3の方が比較例3よりもLP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁) とLP₂₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₂₁) との差が小さくなっている。そして、図9からわかるように、LP₀₁モードの光の有効断面積 A_{eff} (LP₀₁) が同じである場合、実施例3の方が比較例3よりも、互いに隣り合うコアを伝搬するLP₂₁モードの光同士のクロストークが小さい。なお、ステップインデックス型では第3次高次モードであるLP₀₂モードの光とLP₂₁モードの光とのカットオフ波長がほぼ等しいため、波長1550nmにおいては4つのLPモード(LP₀₁モード、LP₁

$_{1}$ モード、 LP_{21} モード、 LP_{02} モード)の光が伝搬する。一方、実施例3のようなリングインデックス型では、 r_1/r_2 が大きくなると LP_{02} モードの光と LP_{21} モードの光とのカットオフ波長の差が大きくなる。このため、表3に示す条件では、波長1550nmで $r_1/r_2=0.15$ の場合は4つのLPモードの光がコアを伝搬するが、 r_1/r_2 がそれより大きくなると3つのLPモード(LP_{01} モード、 LP_{11} モード、 LP_{21} モード)の光のみがコアを伝搬するようになる。

[0061] 本発明に係るマルチコアファイバは、伝搬損失が抑制されると共に高次モードのクロストークを抑制されており、伝送容量が大きな光ファイバ通信システムを取り扱う産業において利用することができる。

符号の説明

[0062] 1, 2・・・マルチコアファイバ

10・・・コア

11・・・内側コア

12・・・外側コア

13・・・低屈折率部

15・・・クラッド

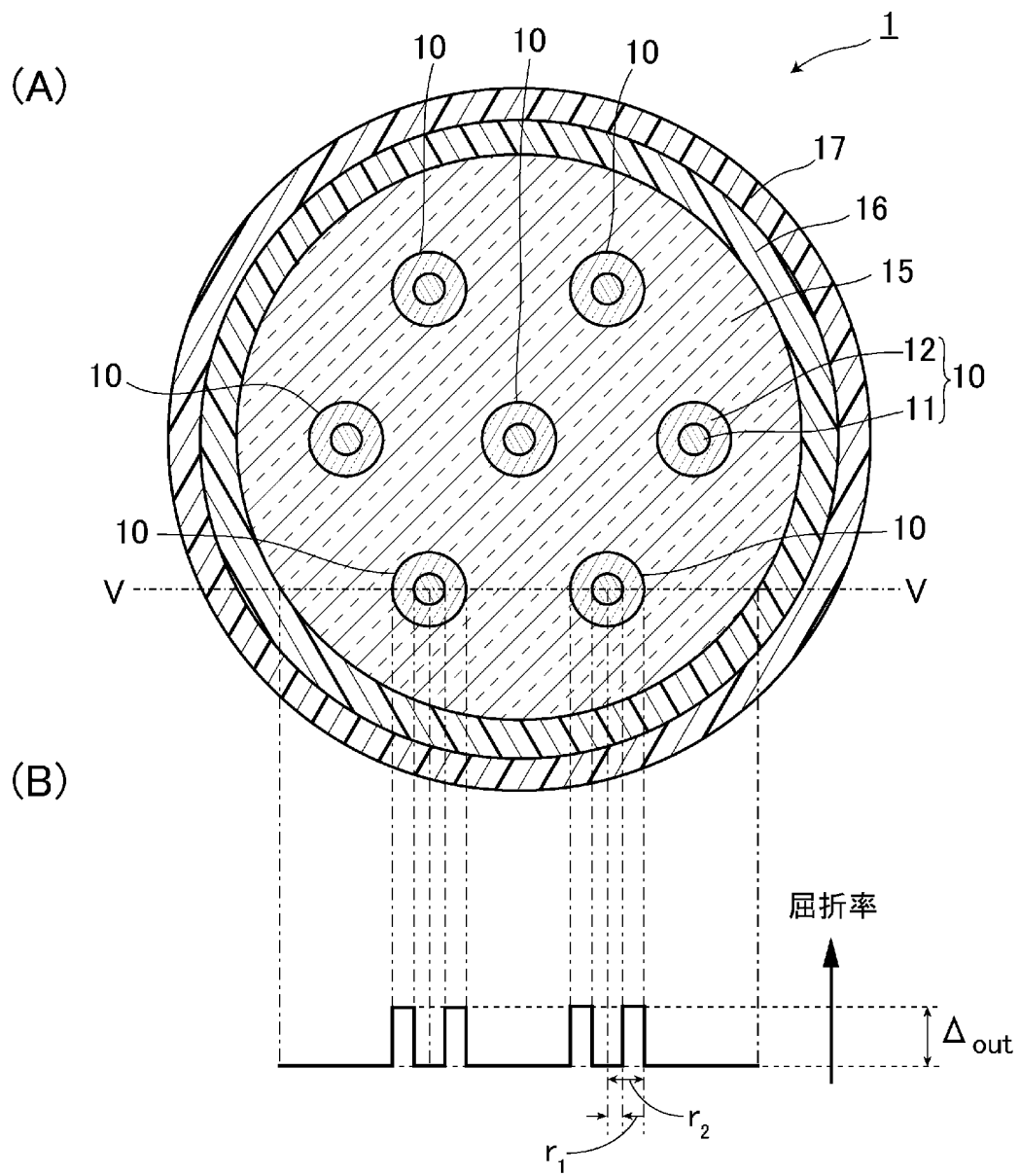
16・・・内側保護層

17・・・外側保護層

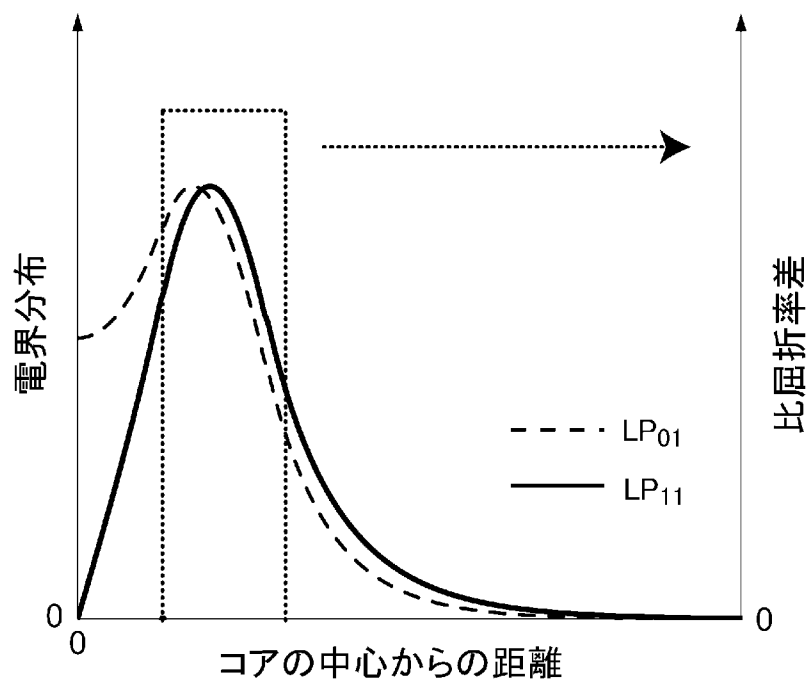
請求の範囲

- [請求項1] 複数のコアと前記複数のコアを囲むクラッドとを備え、
前記コアは、内側コアと、前記内側コアを隙間なく囲むと共に前記内側コア及び前記クラッドより屈折率が高い外側コアと、を有し、
希土類元素が前記コアに非添加であると共に、所定の波長の2つ以上のLPモードの光が0.3 dB/km以下の損失で前記コアを伝搬する
ことを特徴とするマルチコアファイバ。
- [請求項2] 前記内側コアの半径 r_1 と前記外側コアの半径 r_2 との比 r_1 / r_2 が0.6以下である
ことを特徴とする請求項1に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項3] 前記比 r_1 / r_2 が0.3以上0.5以下である
ことを特徴とする請求項2に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項4] 前記コアが、前記クラッドより屈折率が低い低屈折率部に囲まれる
ことを特徴とする請求項1から3のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項5] 前記外側コアの前記クラッドに対する比屈折率差が3%以下である
ことを特徴とする請求項1から4のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項6] 所定の波長の2つのLPモードの光が前記コアを伝搬する
ことを特徴とする請求項1から5のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項7] 所定の波長の3つのLPモードの光が前記コアを伝搬する
ことを特徴とする請求項1から5のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。

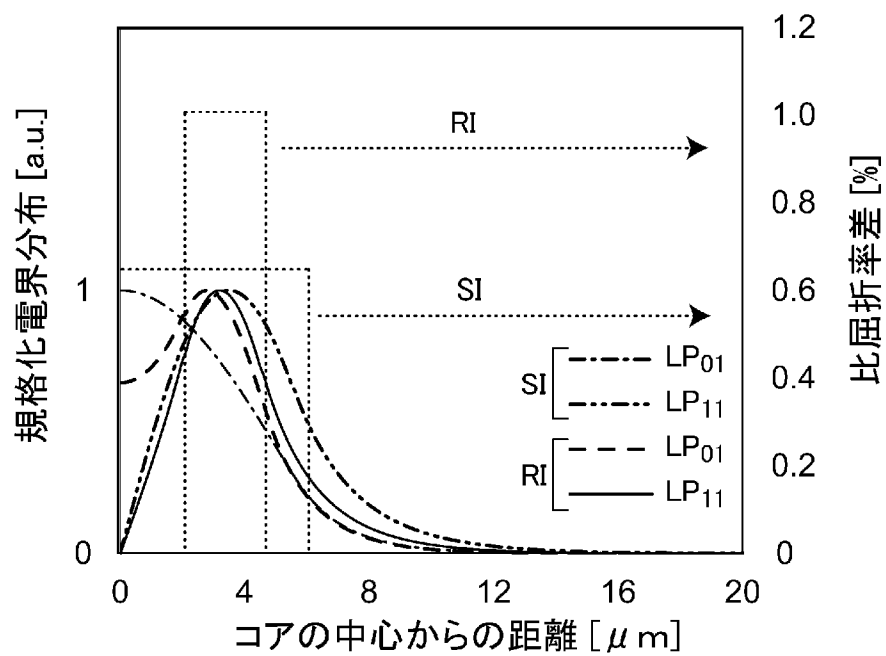
[図1]



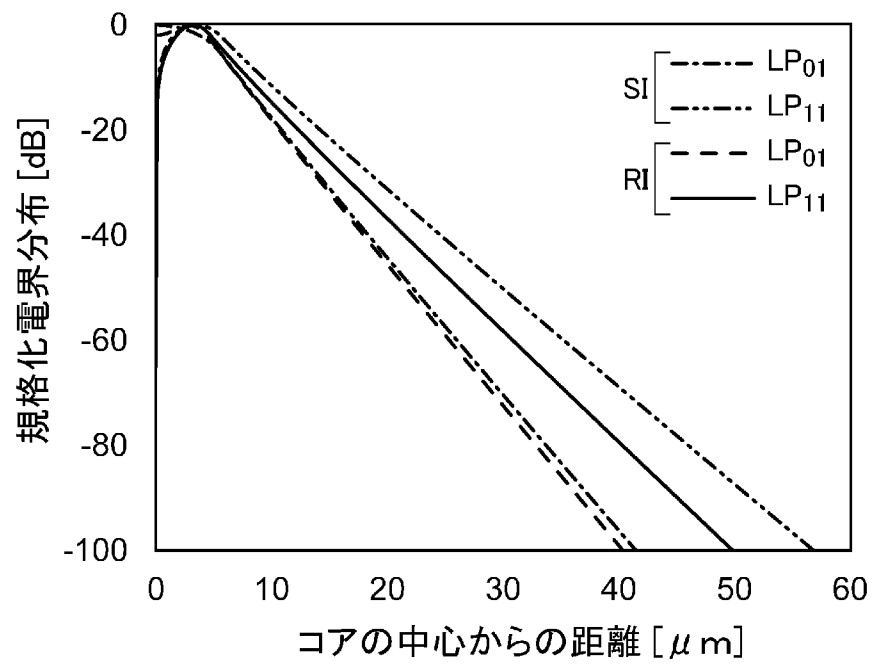
[図2]



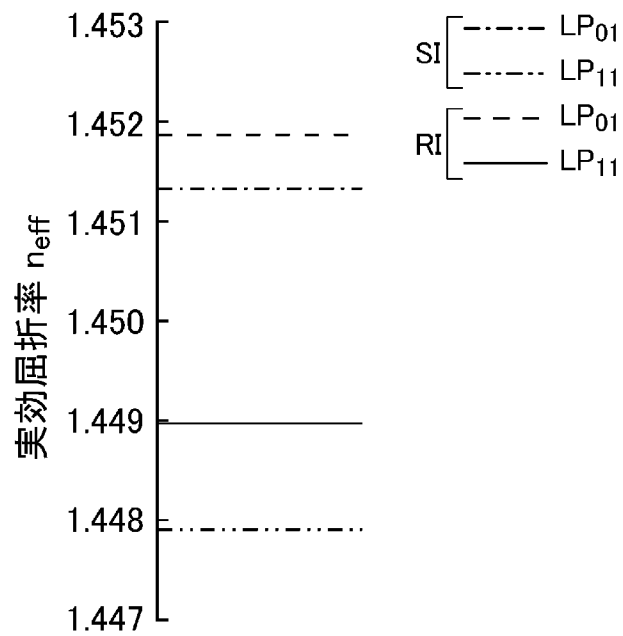
[図3]



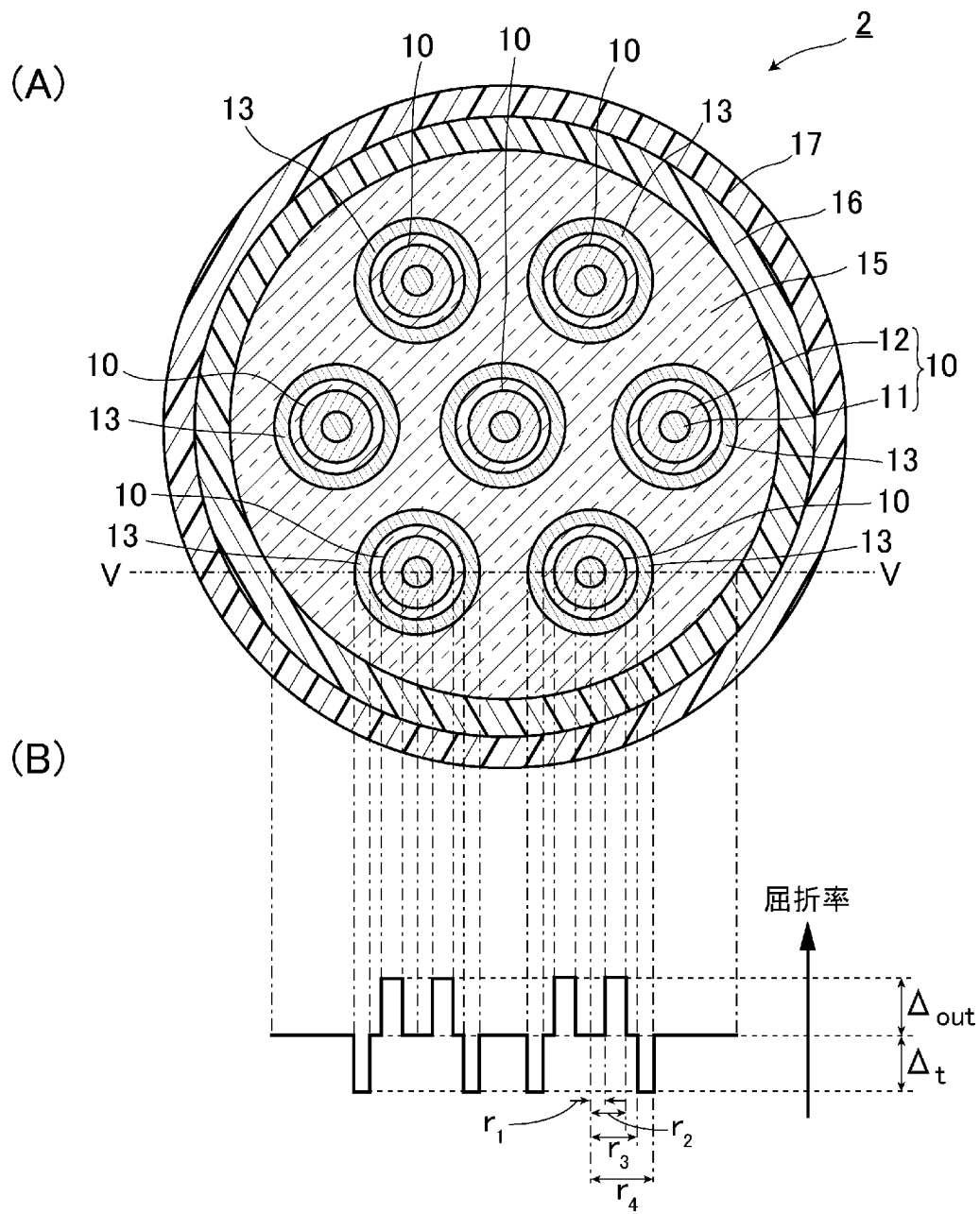
[図4]



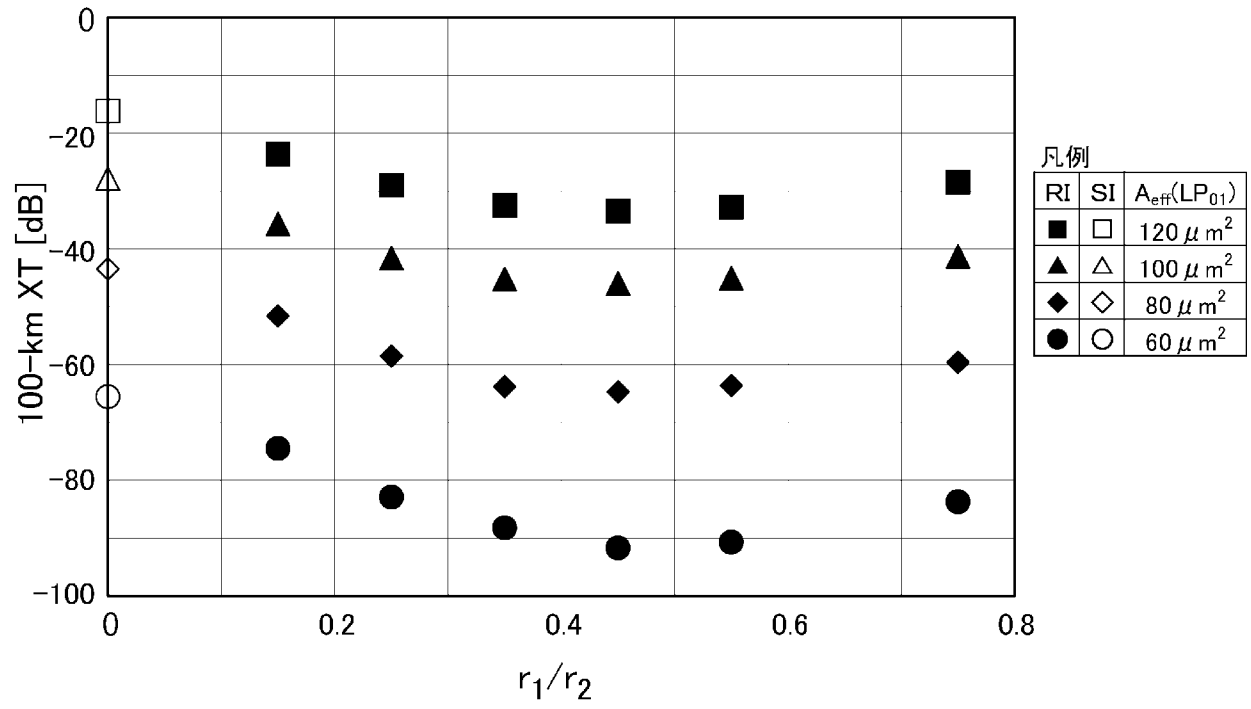
[図5]



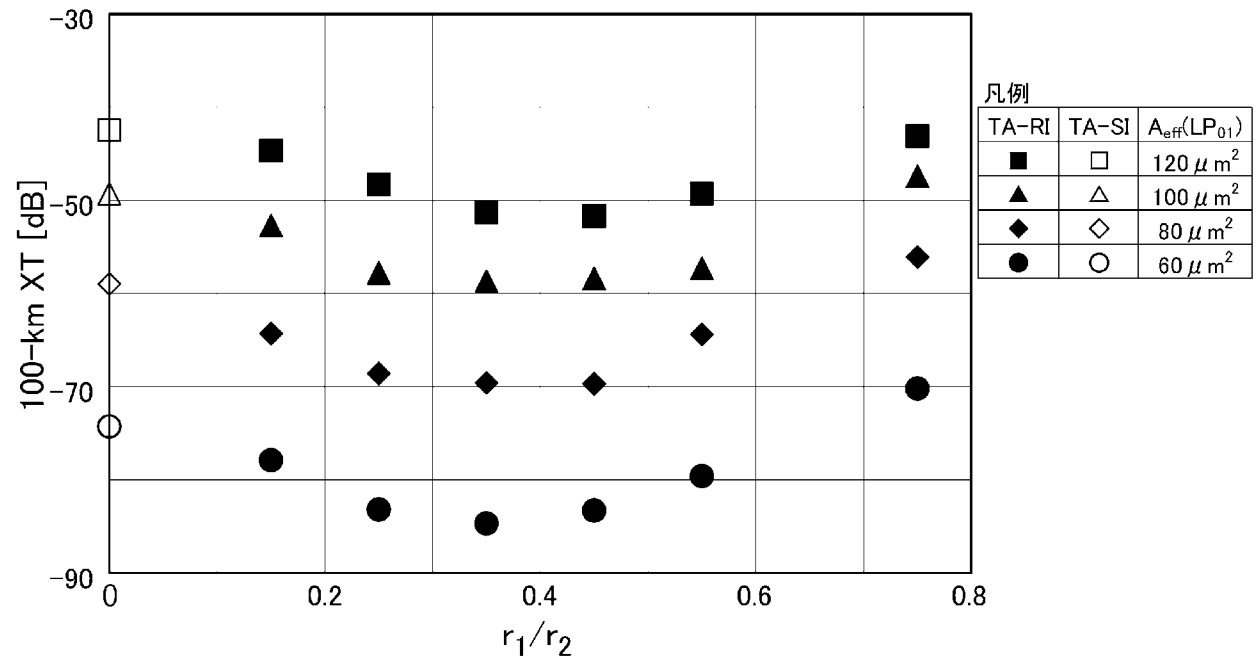
[図6]



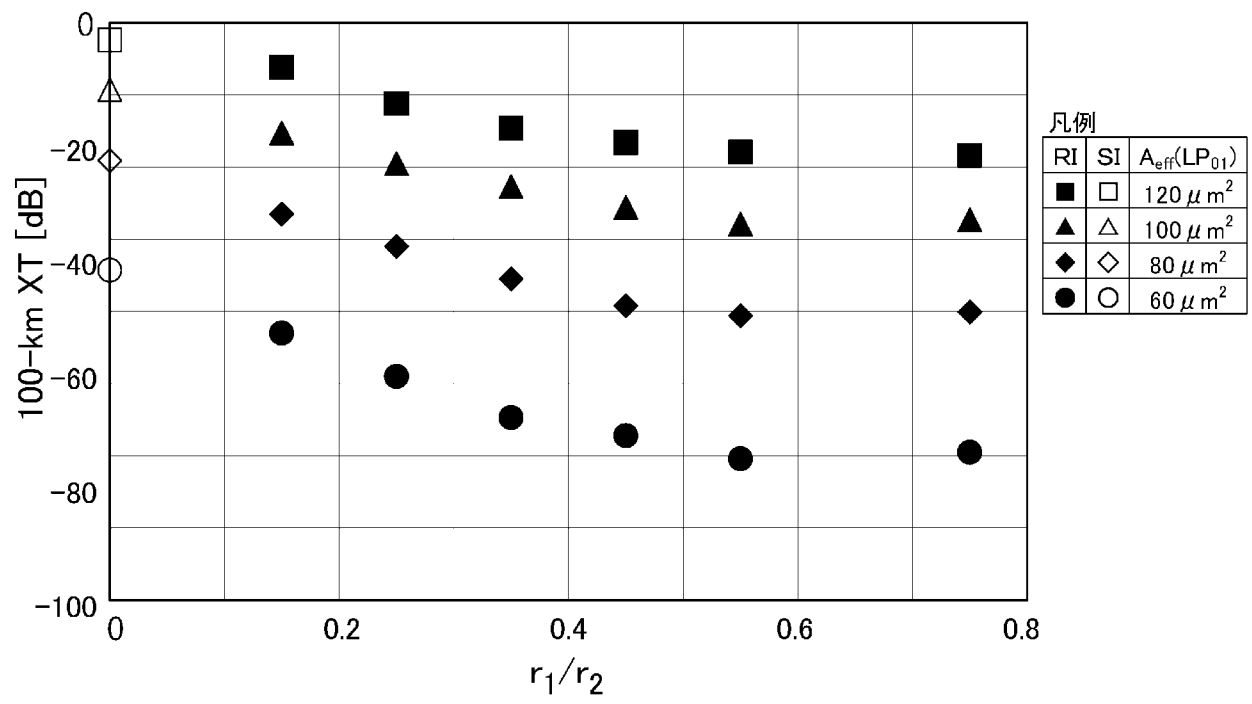
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/081523

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B6/02(2006.01)i, G02B6/036(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)

G02B6/02, G02B6/036

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	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

IEEE Xplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2014-509410 A (OFS Fitel, LLC), 17 April 2014 (17.04.2014), fig. 4, 5; paragraphs [0066] to [0074], [0175] & US 2014/0093205 A1 fig. 4, 5; paragraphs [0159] to [0167], [0429] & US 2014/0161404 A1 & WO 2012/161809 A1 & WO 2012/161810 A1 & WO 2012/161811 A1 & EP 2678722 A1 & EP 2678723 A1 & EP 2678729 A1 & CN 103547953 A & CN 103649797 A & CN 103827708 A	1-7
Y	SILLARD, P., Next-Generation Fibers for Space-Division-Multiplexed Transmissions, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2015.03.01, VOL.33, NO.5, 1092-1099	1-7

☒ 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
16 January 2017 (16.01.17)

Date of mailing of the international search report
31 January 2017 (31.01.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/081523

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2015-152774 A (Fujikura Ltd.), 24 August 2015 (24.08.2015), paragraphs [0038], [0050] to [0051]; fig. 4, 5 & US 2015/0234120 A1 paragraphs [0049], [0061], [0062]; fig. 4, 5 & US 9477035 B2 & JP 5986594 B2	2-3, 5
E, Y	JP 2016-218375 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 22 December 2016 (22.12.2016), paragraph [0060] (Family: none)	1-7
A	X.Q.Jin, et al., Influence of Refractive Index Profile of Ring-Core Fibers for Space Division Multiplexing Systems, IEEE Summer Topicals Meeting Series, 2014, 178-179	1-7

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02(2006.01)i, G02B6/036(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. G02B6/02, G02B6/036

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	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017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

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
Y	JP 2014-509410 A（オーエフエス ファイテル，エルエルシー） 2014.04.17, [図4], [図5], [0066]-[0074], [0175] & US 2014/0093205 A1, FIG. 4, FIG. 5, [0159]-[0167], [0429] & US 2014/0161404 A1 & WO 2012/161809 A1 & WO 2012/161810 A1 & WO 2012/161811 A1 & EP 2678722 A1 & EP 2678723 A1 & EP 2678729 A1 & CN 103547953 A & CN 103649797 A & CN 103827708 A	1-7

☑ 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

16.01.2017

国際調査報告の発送日

31.01.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

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）

佐藤 宙子

2 L

9316

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

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
Y	SILLARD, P., Next-Generation Fibers for Space-Division-Multiplexed Transmissions, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2015.03.01, VOL. 33, NO. 5, 1092-1099	1-7
Y	JP 2015-152774 A (株式会社フジクラ) 2015.08.24, [0038], [0050]-[0051], [図 4], [図 5] & US 2015/0234120 A1, [0049], [0061] [0062], FIG. 4, FIG. 5 & US 9477035 B2 & JP 5986594 B2	2-3, 5
E, Y	JP 2016-218375 A (日本電信電話株式会社) 2016.12.22, [0060] (ファミリーなし)	1-7
A	X.Q.Jin, et al., Influence of Refractive Index Profile of Ring-Core Fibers for Space Division Multiplexing Systems, IEEE Summer Topicals Meeting Series, 2014, 178-179	1-7