

(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
2024年9月19日(19.09.2024)



(10) 国際公開番号

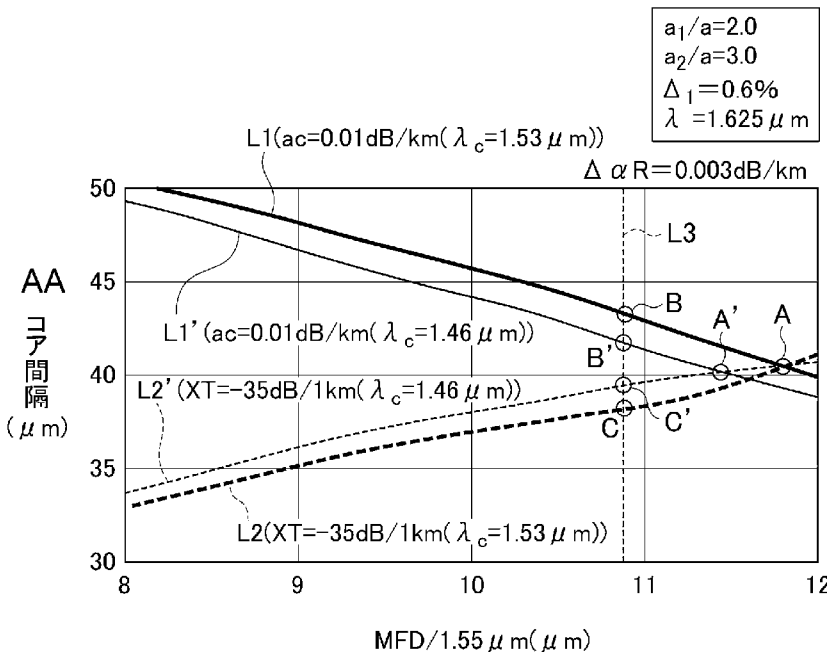
WO 2024/189897 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/010317
- (22) 国際出願日: 2023年3月16日(16.03.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 松井 隆 (MATSUI Takashi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 中島 和秀 (NAKAJIMA Kazuhide); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 寒河江 悠途 (SAGAE Yuto); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT 知的財産センタ内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 三好 秀和, 外 (MIYOSHI Hidekazu et al.); 〒1050001 東京都港区虎ノ門1丁目2番8号 虎ノ門琴平タワー 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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,

(54) Title: MULTICORE OPTICAL FIBER AND MULTICORE OPTICAL FIBER DESIGN METHOD

(54) 発明の名称: マルチコア光ファイバ、及び、マルチコア光ファイバの設計方法

[図6]



AA ... Core spacing

(57) Abstract: This multicore optical fiber comprises: a plurality of cores (10) that are arranged in a square lattice shape or in a row along the longitudinal direction of a multicore optical fiber (1); a plurality of first cladding regions (11) that surround each of the plurality of cores (10) and have a refractive index lower than that of the surrounding cores (10); a plurality of second cladding regions (12) that surround each of the plurality of first cladding regions (11) and have a refractive index lower than that of the surrounding first cladding regions (11); and a third cladding region (13) that



WO 2024/189897 A1

KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU,
 LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, 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))

surrounds the plurality of second cladding regions (12) and has a refractive index lower than that of the plurality of cores (10). In a graph that shows the relationship between mode field diameter and core spacing, the mode field diameter and core spacing of the plurality of cores (10) are a mode field diameter and core spacing corresponding to within the region encompassed by the intersection of: a first line that represents the upper limit on the core spacing for which the core excess loss is not greater than a prescribed value; a second line that represents the lower limit for the core spacing for which crosstalk between the cores is not greater than a prescribed value; and a third line that represents the lower limit for the mode field diameter at which the increment in Rayleigh scattering loss of the cores is not greater than a prescribed value.

(57) 要約：マルチコア光ファイバ(1)の長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコア(10)と、複数のコア(10)をそれぞれ取り囲み、取り囲むコア(10)よりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域(11)と、複数の第1クラッド領域(11)をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域(11)よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域(12)と、複数の第2クラッド領域(12)を取り囲み、複数のコア(10)よりも屈折率が低い第3クラッド領域(13)と、を備え、複数のコア(10)のモードフィールド直径とコア間隔は、モードフィールド直径とコア間隔との関係を表すグラフにおいて、コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱損失の増加量を所定以下とするモードフィールド直径の下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔である。

明 細 書

発明の名称：

マルチコア光ファイバ、及び、マルチコア光ファイバの設計方法

技術分野

[0001] 本開示は、マルチコア光ファイバ、及び、マルチコア光ファイバの設計方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、光ファイバの量産性や既存の標準技術との互換性が高い標準クラッド径のマルチコア光ファイバ（MCF：Multi Core optical Fiber）が注目されている。例えば、特許文献1及び非特許文献1には、光の閉じ込め効果が強いトレンチ型屈折率分布を採用したMCFが開示されている。特許文献2には、量産性に適したステップインデックス型屈折率分布を採用したMCFが開示されている。

[0003] 標準クラッド径のMCFでは、従来のシングルモード光ファイバと同様に全通信波長帯でのシングルモード動作が保証されているが、コア間で光信号が干渉し合うクロストークが発生する。そこで、特許文献3には、各コアのシングルモード動作領域の伝送波長バンドを、C、Lバンドの $1.53\mu\text{m}$ ～ $1.625\mu\text{m}$ 又はS、C、Lバンドの $1.46\mu\text{m}$ ～ $1.625\mu\text{m}$ に限定することで、クロストークを低減した長距離伝送用のMCFが開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開第2022/034662号公報

特許文献2：特許第7172634号公報

特許文献3：特許第6560806号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：Takashi Matsui、外6名、“Design of 125 μm cladding multi

-core fiber with full-band compatibility to conventional single-mode fiber”、Date of Conference: 27 September 2015 - 01 October 2015、DOI : 10.1109/ECOC.2015.7341966、<URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7341966>>

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、標準クラッド径のMCFの設計では、クロストーク及び設計上の過剰損失を抑制するため、光信号の断面での光強度分布の広がりを表すモードフィールド直径(MFD: Mode Field Diameter)の大きさが制限される。そのため、既存の単一コアのシングルモードと比較してMFDの拡大が極めて困難であり、かつ、損失も増加する傾向にあるという課題があった。例えば、4コア構造のMCFの場合、MFDは $9\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 程度と小さく、損失係数は $0.155\text{dB}/\text{km}\sim 0.18\text{dB}/\text{km}$ と大きい。

[0007] 本開示は、上記事情に鑑みてなされたものであり、本開示の目的は、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を担保しつつ、モードフィールド直径を拡大可能な、マルチコア光ファイバ、及び、マルチコア光ファイバの設計方法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0008] 本開示の一態様のマルチコア光ファイバは、マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、前記複数のコアのモードフィールド直径とコア間隔は、モードフィールド直径とコア間隔との関係を表すグラフにおいて、コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱

損失の増加量を所定以下とするモードフィールド直径の下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔である。

[0009] 本開示の一態様のマルチコア光ファイバは、マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、前記第3クラッド領域の直径は、 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であり、カットオフ波長は、 $1.53 \mu\text{m}$ 以下であり、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における前記複数のコアのモードフィールド直径は、 $9.5 \mu\text{m} \sim 15.0 \mu\text{m}$ であり、前記複数のコアのコア間隔は、 $33 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ である。

[0010] 本開示の一態様のマルチコア光ファイバの設計方法は、マルチコア光ファイバの設計方法において、前記マルチコア光ファイバは、前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、コンピュータが、モードフィールド直径とコア間隔との関係を表すグラフにおいて、コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱損失の増加量を所定以下とするモードフィールド直径の下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔を、前記複数のコアのモードフィールド直径とコア間隔として計算する。

発明の効果

[0011] 本開示によれば、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を担保しつつ、モードフィールド直径を拡大可能な技術を提供できる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図1は、第1実施形態に係るMCFの断面構造を示す図である。

[図2]図2は、コア近傍領域の屈折率分布を示す図である。

[図3]図3は、MFDとレイリー散乱損失の増加量との関係を示す図である。

[図4]図4は、同方向クロストークと双方向クロストークとの関係を示す図である。

[図5]図5は、同方向クロストークと波長との関係を示す図である。

[図6]図6は、MFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図7A]図7Aは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図7B]図7Bは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図8A]図8Aは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図8B]図8Bは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図9A]図9Aは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図9B]図9Bは、 Δ_1 に対するMFDとコア間隔との関係を示す図である。

[図10]図10は、MCF設計装置の機能ブロック構成を示す図である。

[図11]図11は、MCFの設計方法を示す図である。

[図12]図12は、第2実施形態に係るMCFの断面構造を示す図である。

[図13]図13は、MCF設計装置のハードウェア構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下、図面を参照して、本開示の実施形態を説明する。図面の記載において同一部分には同一符号を付し説明を省略する。

[0014] [第1実施形態]

(MCF1の構造)

図1は、第1実施形態に係るMCFの断面構造を示す図である。MCF1は、約 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ の標準クラッド径を備えたMCFである。MCF1は、紙面奥行きの手方向（延在方向）に沿って正方格子状に配置された4つ

のコア10と、4つのコア10をそれぞれ取り囲む4つの第1クラッド領域11と、4つの第1クラッド領域11をそれぞれ取り囲む4つの第2クラッド領域12と、全ての第2クラッド領域12を取り囲む1つの第3クラッド領域13と、を備える。第3クラッド領域13の直径は、約 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ である。

[0015] 図2は、コア近傍領域の屈折率分布を示す図である。横軸はMCF1の短手方向（コア10の中心を通る動径方向）であり、縦軸は比屈折率差である。第1クラッド領域11の屈折率は、コア10よりも低い。第2クラッド領域12の屈折率は、第1クラッド領域11よりも低い。第3クラッド領域13の屈折率は、4つのコア10よりも低い。各コア10は、このようなトレンチ型屈折率分布又はこれと同等の屈折率分布を備える。各コア10の屈折率分布は、互いに略同一である。

[0016] 以降、コア10の半径を a とする。第2クラッド領域12の内径の半径を a_1 とする。第2クラッド領域12の外径の半径を a_2 とする。コア10と第1クラッド領域11との比屈折率差の絶対値を Δ とする。コア10と第2クラッド領域12との比屈折率差の絶対値を Δ_1 とする。コア10と第3クラッド領域13との比屈折率差は、 Δ と同等でもよいし、 Δ と異なってもよい。

[0017] また、伝送波長バンドは、C、Lバンドの $1.53 \mu\text{m} \sim 1.625 \mu\text{m}$ 又はS、C、Lバンドの $1.46 \mu\text{m} \sim 1.625 \mu\text{m}$ とする。コア10の材質は、純石英ガラスとする。

[0018] （レイリー散乱損失）

単一コアの損失であるレイリー散乱損失について説明する。

[0019] 上記構造及び屈折率分布を備えるMCF1において、波長 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $a_1/a = 2.0$ 、 $a_2/a = 3.0$ 、 $\Delta_1 = 0.6\%$ とし、カットオフ波長 λ_c が $1.53 \mu\text{m}$ になるように、 a 及び Δ を調整することでMFDを変化させた。

[0020] 図3は、このときのMFD (μm) とレイリー散乱損失の増加量 (dB/km) との関係を示す図である。MFDの拡大に伴い、レイリー散乱損失の

増加量が低減することが確認できる。これは、MFDの拡大に伴って、純石英ガラスであるコア10に含まれる電界成分が増加したためと考えられる。また、コア10から第1クラッド領域11又はその外側に漏れ出る電界成分が減少し、コアとクラッドとの界面における散乱損失や構造不正損失も低減したためとも考えられる。

[0021] 図3より、例えば、レイリー散乱損失の増加量を1kmあたり0.003dB以下に低減したい場合、MFDを約10.8 μ m以上にすればよいことが分かる。つまり、MFD=10.8 μ mは、レイリー散乱損失の増加量を0.003dB/km以下とするMFDの下限値として用いることができる。

[0022] (クロストーク)

コア間の損失であるクロストークについて説明する。

[0023] 図4は、隣り合うコア間で光信号を同方向に伝送させる同方向伝送と逆方向に伝送させる双方向伝送との互いのクロストーク関係を示す特性図である。横軸は1km伝送後の同方向クロストーク(dB/1km)であり、縦軸は80km伝送後の双方向クロストーク(dB/80km)である。

[0024] 一般に双方向伝送は、同方向伝送よりもクロストークを小さくできるという特性がある。そのため、図4に示す通り、双方向伝送での80kmあたりのクロストークと同方向伝送での1kmあたりのクロストークとは、互いに概ね同等となる。なお、同方向伝送と双方向伝送とのクロストーク関係は、波長に依存しない。

[0025] ここで、クロストークの低減を考える。例えば、双方向伝送時におけるクロストークの受信信号への影響を十分小さくするため、双方向伝送時の受信端でのクロストークを-25dB程度に低減する場合を考える。

[0026] この場合、例えば、1,000kmや10,000kmの各伝送距離に対しては、それぞれ双方向クロストークを80kmあたり-35dB、-45dB程度とする必要がある。このとき、それぞれに対応する同方向クロストークは、図4より、1kmあたり-35dB、-45dB程度とする必要が

ある。

[0027] 図5は、MCF1における同方向クロストークの例を示す図である。横軸は波長 (μm) であり、縦軸は1 km伝送後の同方向クロストーク ($\text{dB}/1\text{ km}$) である。 a_1/a 、 a_2/a 、 Δ_1 の各値は上記各値と同値とし、 $a = 5.5\ \mu\text{m}$ 、 $\Delta = 0.3\%$ とした。

[0028] 図5より、MCF1の同方向クロストークは、波長が大きくなるに従い概ね線形で増加することが確認できる。上記「1 kmあたり-35 dB」程度の同方向クロストークに対応する波長は、約1.625 μm である。その波長以下の約1.55 μm でのクロストークは、約10 dB程度低減されることを把握できる。

[0029] なお、1,000 km程度までの陸上中継系では、Cバンドに加えLバンドも用いる大容量伝送が利用される。数千~10,000 kmの海底中継系では、送信電力等の制限により、一般的にはCバンドのみが利用される。

[0030] 図4及び図5より、利用するバンドも踏まえると、同方向クロストークを $\lambda = 1.625\ \mu\text{m}$ で1 kmあたり-35 dB程度又はそれ以下とすることで、1,000 km級ではC、Lバンドにおいて、数千~10,000 km級ではCバンドにおいて、双方向伝送時に上記「受信端でのクロストークを-25 dB」以下の十分小さいクロストーク特性を得ることができる。

[0031] また、同方向伝送時におけるクロストークの受信信号への影響を小さくする場合も同様である。波長に対する双方向クロストークを取得し、図4に示した同方向伝送と双方向伝送との互いのクロストーク関係を基に、同方向伝送時の受信端でのクロストークを所定以下に低減することができる。

[0032] (MCFの設計方法(MFD及びコア間隔の計算方法))

次に、MCF1において、損失の抑制を担保しつつ、MFDを拡大可能となるような、MFD及びコア間隔の計算方法を説明する。

[0033] まず、レイリー散乱損失の増加量を所定以下とするMFDの下限、クロストークを所定以下とするコア間隔の下限を計算する。これらの計算方法は、上記説明の通りである。また、公知手法より、設計上の過剰損失を所定以下

とするコア間隔の上限を計算する。

- [0034] 次に、それらの計算結果を、MFDとコア間隔との関係を表す図6のグラフに入力する。横軸は波長 $1.55\mu\text{m}$ でのMFD (μm) であり、縦軸はコア間隔 (μm) である。ここでは、 $a_1/a=2.0$ 、 $a_2/a=3.0$ 、 $\Delta_1=0.6\%$ 、 $\lambda=1.625\mu\text{m}$ とした。
- [0035] 例えば、設計上の过剩損失 α_c を 0.01dB/km 以下とするコア間隔の上限は、 $\lambda_c=1.53\mu\text{m}$ であれば第1線L1となり、 $\lambda_c=1.46\mu\text{m}$ であれば第1線L1'となる。同方向クロストークXTを 1km あたり 35dB 以下とするコア間隔の下限は、 $\lambda_c=1.53\mu\text{m}$ であれば第2線L2となり、 $\lambda_c=1.46\mu\text{m}$ であれば第2線L2'となる。レイリー散乱損失の増加量 $\Delta\alpha_R$ を純石英ガラスのコア10に対して 0.003dB/km 以下とするMFDの下限は、第3線L3となる。なお、レイリー散乱損失の増加量 $\Delta\alpha_R$ のカットオフ波長 λ_c に対する依存性は、十分小さい。
- [0036] 図6より、設計上の过剩損失、同方向クロストーク、レイリー散乱損失の低減条件を満たすMCF1の構造は、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下に対しては、第1線L1と第2線L2との交点Aと、第1線L1と第3線L3との交点Bと、第2線L2と第3線L3との交点Cと、で囲まれる領域となる。カットオフ波長が $1.46\mu\text{m}$ 以下に対しては、第1線L1'と第2線L2'との交点A'と、第1線L1'と第3線L3との交点B'と、第2線L2'と第3線L3との交点C'と、で囲まれる領域となる。そこで、交点A、B、C、A'、B'、C'をMCF1の構造条件とする。
- [0037] そして、構造条件A、B、Cで囲まれた領域内に対応するMFD及びコア間隔を、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下でのMCF1のMFD及びコア間隔として計算(設定)する。また、構造条件A'、B'、C'で囲まれた領域内に対応するMFD及びコア間隔を、カットオフ波長が $1.46\mu\text{m}$ 以下でのMCF1のMFD及びコア間隔として計算(設定)する。
- [0038] なお、カットオフ波長が $1.46\mu\text{m}$ 以下の場合、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下の場合よりも領域の大きさが小さいのでMFD及びコア間隔は

小さくなるが、Sバンドにおいてシングルモード動作を保証し使用波長バンドの拡張やCバンドに対するラマン増幅の安定性の観点では好ましいと言える。

[0039] このように、構造条件A、B、C又は構造条件A'、B'、C'で囲まれた領域内に対応するMFD及びコア間隔を設定するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を担保しつつ、モードフィールド直径を拡大することができる。

[0040] より詳細な計算方法を説明する。

[0041] 例えば、 a_1/a 、 a_2/a 、 Δ_1 のうちいずれか1つ以上を変更する。そして、変更後の構造条件A、B、C、A'、B'、C'の各値を計算する。例えば、 $a_1/a=1.5$ 、 2.0 、 2.5 のうちいずれか、 $a_2/a=2.5$ 、 3.0 、 3.5 のうちいずれか、 $\Delta_1=0.40\% \sim 0.80\%$ のうちいずれかに変更する。

[0042] 変更後の構造条件A、B、C、A'、B'、C'の Δ_1 に対する依存性を図7A、図7B、図8A、図8B、図9A、図9Bに示す。横軸は Δ_1 であり、左側の縦軸は波長 $1.55 \mu\text{m}$ でのMFD (μm)であり、右側の縦軸はコア間隔 (μm)である。図7A、図7Bは、 $a_1/a=1.5$ 、 $a_2/a=2.5$ とした場合である。図8A、図8Bは、 $a_1/a=2.0$ 、 $a_2/a=3.0$ とした場合である。図9A、図9Bは、 $a_1/a=2.5$ 、 $a_2/a=3.5$ とした場合である。図7A、図8A、図9Aは、構造条件A、A'のMFD及びコア間隔である。図7B、図8B、図9Bは、構造条件B、B'及び構造条件C、C'のMFD及びコア間隔である。

[0043] $\Delta_1=0.40\% \sim 0.80\%$ の範囲内において、変更後の構造条件A、B、C、A'、B'、C'の各値の中の最高値及び最低値を用いて、MFD及びコア間隔を計算（設定）する。図7A、図7B、図8A、図8B、図9A、図9Bより、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下の場合、波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるMFDは約 $9.5 \mu\text{m} \sim 15.0 \mu\text{m}$ となり、コア間隔は約 $3.3 \mu\text{m} \sim 5.0 \mu\text{m}$ となる。

[0044] MFD及びコア間隔をそれらの値に設定することにより、波長 $1.625\mu\text{m}$ におけるコア間の同方向クロストークを、全コアで同一方向に光信号を 1km 伝搬するとき、 -35dB 以下に低減することができる。当該MFDの設定値は、シングルモード光ファイバに関する国際標準「ITU-T G.654 (Category D)」で規定されている $9.5\mu\text{m}\sim 15.0\mu\text{m}$ の範囲内にある。

[0045] このように、 a_1/a 、 a_2/a 、 Δ_1 のうちいずれか1つ以上を変更し、変更後のそれぞれに対応する構造条件A、B、C又は構造条件A'、B'、C'で囲まれた領域内に対応するMFD及びコア間隔を設定するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を適切に担保しつつ、モードフィールド直径を適切に拡大することができる。

[0046] (MCFの設計手段及び設計フロー (MFD及びコア間隔の計算フロー))

図10は、MCF設計装置2の機能ブロック構成を示す図である。MCF設計装置2は、MCF1を設計するためのコンピュータであり、MFD及びコア間隔を計算する演算部21と、計算したMFD及びコア間隔を出力する出力部22と、MFD及びコア間隔の計算に必要な各種データを記憶する記憶部23と、を備える。

[0047] 図11は、MFD及びコア間隔の計算フローを示す図である。

[0048] まず、演算部21は、レイリー散乱損失の増加量を所定以下とするMFDの下限、クロストークを所定以下とするコア間隔の下限、設計上の過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を計算する(ステップS1)。

[0049] 次に、演算部21は、ステップS1で計算したコア間隔の上限、コア間隔の下限、MFDの下限を、MFDとコア間隔との関係を表すグラフに入力する(ステップS2)。

[0050] 次に、演算部21は、カットオフ波長毎に、コア間隔の上限を示す第1線L1とコア間隔の下限を示す第2線L2との交点A(A')と、第1線L1とMFDの下限を示す第3線L3との交点B(B')と、第2線L2と第3

線L3との交点C (C') と、を計算する (ステップS3)。

[0051] 次に、演算部21は、上記グラフにおいて、交点A、B、C (A'、B'、C') で囲まれる領域内に対応するMFD及びコア間隔をMCF1のMFD及びコア間隔として計算する (ステップS4)。このとき、演算部21は、 a_1/a 、 a_2/a 、 Δ_1 のうちいずれか1つ以上を変更し、変更後の交点A、B、Cの各値の中の最高値及び最低値を用いて、MCF1のMFD及びコア間隔を計算する。

[0052] 最後に、出力部22は、MCF1のMFD及びコア間隔を出力する (ステップS5)。

[0053] (MFD及びコア間隔の計算式)

上記結果より、構造条件A、B、CのMFD及びコア間隔は、式(1)のように近似できる。 A_w 、 B_w 、 C_w は、それぞれ構造条件A、B、CのMFDである。 A_Λ 、 B_Λ 、 C_Λ は、それぞれ構造条件A、B、Cのコア間隔である。

[0054] [数1]

$$\left. \begin{aligned} A_w &= K_{\Delta 1, A w} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2, A w} \Delta_1 + K_{\Delta 3, A w} \\ A_\Lambda &= K_{\Delta 1, A \Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2, A \Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3, A \Lambda} \\ B_w &= C_w = K_{\Delta 1, B w} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2, B w} \Delta_1 + K_{\Delta 3, B w} \\ B_\Lambda &= K_{\Delta 1, B \Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2, B \Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3, B \Lambda} \\ C_\Lambda &= K_{\Delta 1, C \Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2, C \Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3, C \Lambda} \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

[0055] B_w と C_w は、図6に示した通り互いに等しい。 $K_{\Delta 1} \sim K_{\Delta 3}$ は、比例定数である。構造条件A、B、Cの $K_{\Delta 1} \sim K_{\Delta 3}$ は、表1に示す通りである。

[0056]

[表1]

	a_1/a	A_W	A_Λ	B_W, C_W	B_Λ	C_Λ
$K_{\Delta 1}$	1.5	-21319	-176402	60621	-278742	231356
	2.0	222075	-515232	31189	-175856	158811
	2.5	331576	-504470	12115	-117701	133194
$K_{\Delta 2}$	1.5	674	515	-1033	5532	-4952
	2.0	-1559	4343	-486	3802	-3927
	2.5	-2573	4195	-179	3001	-3651
$K_{\Delta 3}$	1.5	8.2	42.4	13.9	23.0	58.2
	2.0	13.4	32.3	12.6	27.1	56.1
	2.5	15.6	32.8	11.9	28.4	56.2

[0057] MFD及びコア間隔と Δ_1 との関係は、図7A、図7B、図8A、図8B、図9A、図9Bに示したように a_1/a に依存するので、構造条件A、B、Cの $K_{\Delta 1} \sim K_{\Delta 3}$ は、それぞれ式(2)のように近似できる。

[0058] [数2]

$$\left. \begin{aligned} K_{\Delta 1} &= K_{1a} \left(\frac{a_1}{a}\right)^2 + K_{1b} \left(\frac{a_1}{a}\right) + K_{1c} \\ K_{\Delta 2} &= K_{2a} \left(\frac{a_1}{a}\right)^2 + K_{2b} \left(\frac{a_1}{a}\right) + K_{2c} \\ K_{\Delta 3} &= K_{3a} \left(\frac{a_1}{a}\right)^2 + K_{3b} \left(\frac{a_1}{a}\right) + K_{3c} \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

[0059] $K_{1a} \sim K_{1c}$ 、 $K_{2a} \sim K_{2c}$ 、 $K_{3a} \sim K_{3c}$ は、比例定数である。構造条件A、B、Cの $K_{1a} \sim K_{1c}$ 、 $K_{2a} \sim K_{2c}$ 、 $K_{3a} \sim K_{3c}$ は、表2に示す通りである。

[0060]

[表2]

	A _W	A _Λ	B _W ,C _W	B _Λ	C _Λ
K _{1a}	-267786	699182	20715	-89461	93858
K _{1b}	1424041	-3124798	-131365	518887	-473595
K _{1c}	-1554861	2937634	211061	-855785	730568
K _{2a}	2440	-7950	-480	1856	-1499
K _{2b}	-13009	35480	2775	-9953	7296
K _{2c}	14698	-34816	-4115	16287	-12524
K _{3a}	-6.0	21.3	1.4	-5.8	4.4
K _{3b}	31.2	-94.7	-7.5	28.8	-19.7
K _{3c}	-25.2	136.6	22.1	-7.0	77.8

[0061] また、構造条件A'、B'、C'のMFD及びコア間隔は、式(3)のように近似できる。A'_W、B'_W、C'_Wは、それぞれ構造条件A'、B'、C'のMFDである。A'_Λ、B'_Λ、C'_Λは、それぞれ構造条件A'、B'、C'のコア間隔である。

[0062] [数3]

$$\left. \begin{aligned}
 A'_W &= K_{\Delta 1,AW} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2,AW} \Delta_1 + K_{\Delta 3,AW} \\
 A'_\Lambda &= K_{\Delta 1,A\Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2,A\Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3,A\Lambda} \\
 B'_W = C'_W &= K_{\Delta 1,BW} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2,BW} \Delta_1 + K_{\Delta 3,BW} \\
 B'_\Lambda &= K_{\Delta 1,B\Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2,B\Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3,B\Lambda} \\
 C'_\Lambda &= K_{\Delta 1,C\Lambda} \Delta_1^2 + K_{\Delta 2,C\Lambda} \Delta_1 + K_{\Delta 3,C\Lambda}
 \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

[0063] B'_WとC'_Wは、図6に示した通り互いに等しい。構造条件A'、B'、C'のK_{Δ1}~K_{Δ3}を表3に示す。構造条件A'、B'、C'のK_{Δ1}~K_{Δ3}は、それぞれ式(2)と同じである。構造条件A'、B'、C'のK_{1a}~K_{1c}、K_{2a}~K_{2c}、K_{3a}~K_{3c}を表4に示す。

[0064]

[表3]

	a_1/a	A'_W	A'_Λ	B'_W, C'_W	B'_Λ	C'_Λ
$K_{\Delta 1}$	1.5	17179	-372339	54376	-233317	220093
	2.0	191655	-465854	25666	-162803	156996
	2.5	349125	-537714	3573	-107511	146816
$K_{\Delta 2}$	1.5	404	2793	-955	4954	-4848
	2.0	-1175	4173	-420	3698	-4044
	2.5	-2852	4981	-69	2988	-4032
$K_{\Delta 3}$	1.5	8.1	36.3	13.7	23.0	59.2
	2.0	11.7	31.9	12.6	25.1	58.2
	2.5	16.0	29.7	11.9	25.6	59.4

[0065] [表4]

	A'_W	A'_Λ	B'_W, C'_W	B'_Λ	C'_Λ
K_{1a}	-34012	43309	13234	-30443	105834
K_{1b}	467994	-338612	-103738	247577	-496611
K_{1c}	-608285	38133	180207	-536187	726884
K_{2a}	-194	-1144	-371	1093	-1583
K_{2b}	-2478	6763	2369	-6337	7150
K_{2c}	4558	-4778	-3675	12001	-12010
K_{3a}	1.5	4.4	0.9	-3.3	4.2
K_{3b}	1.7	-24.4	-5.4	15.8	-16.8
K_{3c}	2.1	62.9	19.9	6.7	74.8

[0066] (効果)

第1実施形態によれば、MFDとコア間隔との関係を表すグラフにおいて、コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱損失の増加量を所定以下とするMFDの下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するMFDとコア間隔を、コアのMFDとコア間隔として計算するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を担保しつつ、MFDを拡大可能な技術を提供できる。MFDを拡大できるので、

光ファイバ伝送路における非線形効果の抑制の観点でも好ましい。

[0067] すなわち、標準クラッド径を有するMCFにおいて、1,000km以上の長距離・双方向伝送に必要なクロストーク特性及びLバンドまで含めた過剰損失低減を担保すると同時に、MFDの拡張によるレイリー散乱等の損失要因の低減及び非線形効果の抑制を実現することができる。

[0068] また、第1実施形態によれば、コアの半径に対する第2クラッド領域の内径の半径の比と、コアの半径に対する第2クラッド領域の外径の半径の比と、コアと第2クラッド領域との比屈折率差と、のうちいずれか1つ以上を変更した後の領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔を、コアのMFDとコア間隔として計算するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制を適切に担保しつつ、MFDを適切に拡大可能な技術を提供できる。

[0069] また、第1実施形態によれば、式(1)又は式(3)の近似式を用いてMFD及びコア間隔を計算するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制をより適切、簡便に担保しつつ、MFDをより適切、簡便に拡大可能な技術を提供できる。

[0070] また、第1実施形態によれば、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下において、波長 $1.55\mu\text{m}$ における前記モードフィールド直径は $9.5\mu\text{m}\sim 15.0\mu\text{m}$ とし、コア間隔は $33\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ とするので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制をより更に適切、簡便に担保しつつ、MFDをより更に適切、簡便に拡大可能な技術を提供できる。

[0071] [第2実施形態]

図12は、第2実施形態に係るMCF1の断面構造を示す図である。MCF1は、第1実施形態と同様に、約 $125\pm 1\mu\text{m}$ の標準クラッド径を備えるMCFである。コア10は、長手方向に沿って一列に配置された2つである。2つのコア10は、図2に示したトレンチ型屈折率分布又はこれと同等の屈折率分布を備える。各コア10の屈折率分布は、互いに略同一である。

[0072] 2コア構造のMCF1において、図6と同様に、設計上の過剰損失、クロストーク、レイリー散乱損失を同時に抑制する構造を考える。この場合、隣

接するコア間の損失であるクロストーク及び各コアの損失であるレイリー散乱損失の増加量は、コア数によらず一定なので、4コア構造のMCF1と同様に、3つの交点A、B、Cに囲まれる領域又は3つの交点A'、B'、C'で囲まれる領域が得られる。

[0073] 一方、設計上の過剰損失については、各コアの中心からクラッド端までの最短距離で定義されるクラッド厚により、標準クラッド径のMCF1においてクラッド厚をOCT、コア間隔を Λ 、クラッド直径をDとすると、式(4)の関係がある。

[0074] [数4]

$$\left. \begin{array}{l} 2 \text{ コアの場合} : \Lambda_2 + 2OCT = D \\ 4 \text{ コアの場合} : \sqrt{2}\Lambda_4 + 2OCT = D \end{array} \right\} \dots(4)$$

[0075] Λ_2 の2は、2コア構造の識別子である。 Λ_4 の4は、4コア構造の識別子である。

[0076] OCT及びDは、2コア構造と4コア構造とで同一なので、過剰損失を抑制する2コア構造でのコア間隔の上限は、式(4)より、4コア構造に対して $\sqrt{2}$ 倍であることがわかる。故に、2コア構造の場合、図6において、交点Aと交点Bとを結ぶ直線及び交点A'とB'とを結ぶ直線が縦軸の上方向に $\sqrt{2}$ 倍シフトすることとなる。

[0077] 従い、2コア構造において、設計上の過剰損失 α_c が0.01 dB/km以下($\lambda = 1.625 \mu\text{m}$)、同方向クロストークXTが1 kmあたり-35 dB以下($\lambda = 1.625 \mu\text{m}$)、レイリー散乱損失の増加量 $\Delta\alpha_R$ が純石英ガラスのコア10に対して0.003 dB/km以下となる領域の構造条件 A_{W-2} 、 B_{W-2} 、 C_{W-2} 、 $A_{\Lambda-2}$ 、 $B_{\Lambda-2}$ 、 $C_{\Lambda-2}$ は、式(1)を用いて式(5)で近似できる。

[0078]

[数5]

$$\left. \begin{aligned}
 A_{W-2} &= A_W + \frac{(\sqrt{2}-1)A_\Lambda}{K_C - \sqrt{2}K_B} \\
 A_{\Lambda-2} &= \frac{\sqrt{2}(K_C - K_B)}{K_C - \sqrt{2}K_B} A_\Lambda \\
 B_{W-2} &= C_{W-2} = B_W = C_W \\
 B_{\Lambda-2} &= \sqrt{2}B_\Lambda \\
 C_{\Lambda-2} &= C_\Lambda \\
 \text{但し、} \\
 K_B &= \frac{B_\Lambda - A_\Lambda}{B_W - A_W} \\
 K_C &= \frac{C_\Lambda - A_\Lambda}{C_W - A_W}
 \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

[0079] また、構造条件 A'_{W-2} 、 B'_{W-2} 、 C'_{W-2} 、 $A'_{\Lambda-2}$ 、 $B'_{\Lambda-2}$ 、 $C'_{\Lambda-2}$ は、式 (3) を用いて式 (6) で近似できる。

[0080] [数6]

$$\left. \begin{aligned}
 A'_{W-2} &= A'_W + \frac{(\sqrt{2}-1)A'_\Lambda}{K_C - \sqrt{2}K_B} \\
 A'_{\Lambda-2} &= \frac{\sqrt{2}(K_C - K_B)}{K_C - \sqrt{2}K_B} A'_\Lambda \\
 B'_{W-2} &= C'_{W-2} = B'_W = C'_W \\
 B'_{\Lambda-2} &= \sqrt{2}B'_\Lambda \\
 C'_{\Lambda-2} &= C'_\Lambda \\
 \text{但し、} \\
 K_B &= \frac{B'_\Lambda - A'_\Lambda}{B'_W - A'_W} \\
 K_C &= \frac{C'_\Lambda - A'_\Lambda}{C'_W - A'_W}
 \end{aligned} \right\} \dots(6)$$

[0081] 第2実施形態によれば、式 (5) 又は式 (6) の近似式を用いてMFD及びコア間隔を計算するので、クロストーク及び設計上の過剰損失の抑制をより適切、簡便に担保しつつ、MFDをより適切、簡便に拡大可能な技術を提供できる。

[0082] [第3実施形態]

(被覆層)

光ファイバを保護するため、標準的な光ファイバは、 $125\mu\text{m}$ のクラッド径を備えたクラッドに対し、直径 $250\pm 15\mu\text{m}$ 程度となるようにUV

樹脂等の被覆層で被覆される。そこで、第1実施形態及び第2実施形態のMCF1においても、同等の直径サイズとなるように被覆層で被覆してもよい。これにより、同等の直径サイズを備えた既存の光ケーブルやコネクタインターフェイス等に対してサイズの適合するので、好ましいと言える。

[0083] また、シングルモード光ファイバに関する国際標準「IEC 60793-2-50」の規定値に合うように被覆してもよい。つまり、直径 $200 \pm 20 \mu\text{m}$ 程度となるように被覆してもよい。これにより、全体のコア数、密度、伝送容量を飛躍的に拡張できるので、好ましいと言える。

[0084] (曲げ損失)

既存の光通信システムへの実装を考慮すると、MCF1は、波長 $1.625 \mu\text{m}$ において、曲げ半径 30mm における曲げ損失は、シングルモード光ファイバに関する国際標準「ITU-T G. 652」「ITU-T G. 654 (Category E)」で規定された曲げ損失条件に合うこと、具体的には $0.1 \text{dB}/100 \text{turn}$ 以下であることが好ましい。

[0085] 第3実施形態によれば、被覆層で被覆したMCF1の直径を $250 \pm 15 \mu\text{m}$ 程度又は $200 \pm 20 \mu\text{m}$ 程度とするので、国際標準等に適したMCF1を提供できる。

[0086] [その他]

本開示は、上記実施形態に限定されない。第1実施形態～第3実施形態を組み合わせることも可能である。本開示は、本開示の要旨の範囲内で数々の変形が可能である。例えば、コア10は、マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアであればよい。 3×3 の正方格子状に配置された計9つのコアでもよいし、一列に配置された3つのコアでもよい。

[0087] 上記説明したMCF設計装置2は、例えば、図13に示すように、CPU 901と、メモリ902と、ストレージ903と、通信装置904と、入力装置905と、出力装置906と、を備えた汎用的なコンピュータシステムを用いて実現できる。メモリ902及びストレージ903は、記憶装置であ

る。当該コンピュータシステムにおいて、CPU 901がメモリ902上にロードされた所定のプログラムを実行することにより、MCF設計装置2の各機能が実現される。

[0088] MCF設計装置2は、1つのコンピュータで実装されてもよい。MCF設計装置2は、複数のコンピュータで実装されてもよい。MCF設計装置2は、コンピュータに実装される仮想マシンであってもよい。

[0089] MCF設計装置2用のプログラムは、HDD、SSD、USBメモリ、CD、DVD等のコンピュータ読取り可能な記録媒体に記憶できる。コンピュータ読取り可能な記録媒体は、例えば、非一時的な記録媒体である。MCF設計装置2用のプログラムは、通信ネットワークを介して配信することもできる。

符号の説明

- [0090] 1 MCF
- 10 コア
 - 11 第1クラッド領域
 - 12 第2クラッド領域
 - 13 第3クラッド領域
- 2 MCF設計装置
- 21 演算部
 - 22 出力部
 - 23 記憶部
- 901 CPU
- 902 メモリ
- 903 ストレージ
- 904 通信装置
- 905 入力装置
- 906 出力装置

請求の範囲

- [請求項1] マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、
- 前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、
- 前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、
- 前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、
- 前記複数のコアのモードフィールド直径とコア間隔は、
- モードフィールド直径とコア間隔との関係を表すグラフにおいて、コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱損失の増加量を所定以下とするモードフィールド直径の下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔であるマルチコア光ファイバ。
- [請求項2] 前記複数のコアは、前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状に配置された4つのコアであり、
- 前記第3クラッド領域の直径は、 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であり、
- カットオフ波長は、 $1.53 \mu\text{m}$ 以下であり、
- 波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるモードフィールド直径の識別子を W 、コア間隔の識別子を Λ 、前記コアの半径を a 、前記第2クラッド領域の内径の半径を a_1 とすると、前記第1線と前記第2線との交点 A に対応するモードフィールド直径 A_w 及びコア間隔 A_Λ 、前記第1線と前記第3線との交点 B に対応するモードフィールド直径 B_w 及びコア間隔 B_Λ 、前記第2線と前記第3線との交点 C に対応するモードフィールド直径 C_w 及びコア間隔 C_Λ は、

[数7]

$$\begin{aligned}
A_W &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
&\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
A_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
&\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
B_W = C_W &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
&\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
B_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
&\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
C_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
&\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})
\end{aligned}$$

[表5]

	A_W	A_Λ	B_W, C_W	B_Λ	C_Λ
K_{1a}	-267786	699182	20715	-89461	93858
K_{1b}	1424041	-3124798	-131365	518887	-473595
K_{1c}	-1554861	2937634	211061	-855785	730568
K_{2a}	2440	-7950	-480	1856	-1499
K_{2b}	-13009	35480	2775	-9953	7296
K_{2c}	14698	-34816	-4115	16287	-12524
K_{3a}	-6.0	21.3	1.4	-5.8	4.4
K_{3b}	31.2	-94.7	-7.5	28.8	-19.7
K_{3c}	-25.2	136.6	22.1	-7.0	77.8

である請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項3]

前記複数のコアは、前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って
 正方格子状に配置された4つのコアであり、

前記第3クラッド領域の直径は、 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であり、

カットオフ波長は、 $1.46 \mu\text{m}$ 以下であり、

波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるモードフィールド直径の識別子を W 、コア
 間隔の識別子を Λ 、前記コアの半径を a 、前記第2クラッド領域の
 内径の半径を a_1 とすると、前記第1線と前記第2線の交点 A' に
 対応するモードフィールド直径 A'_W 及びコア間隔 A'_Λ 、前記第1

線と前記第3線との交点B' に対応するモードフィールド直径B' _w 及びコア間隔B' _Λ、前記第2線と前記第3線との交点C' に対応するモードフィールド直径C' _w及びコア間隔C' _Λは、

[数8]

$$\begin{aligned}
 A'_w &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
 &\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
 A'_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
 &\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
 B'_w = C'_w &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
 &\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
 B'_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
 &\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c}) \\
 C'_\Lambda &= (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 \\
 &\quad + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})
 \end{aligned}$$

[表6]

	A' _w	A' _Λ	B' _w , C' _w	B' _Λ	C' _Λ
K _{1a}	-34012	43309	13234	-30443	105834
K _{1b}	467994	-338612	-103738	247577	-496611
K _{1c}	-608285	38133	180207	-536187	726884
K _{2a}	-194	-1144	-371	1093	-1583
K _{2b}	-2478	6763	2369	-6337	7150
K _{2c}	4558	-4778	-3675	12001	-12010
K _{3a}	1.5	4.4	0.9	-3.3	4.2
K _{3b}	1.7	-24.4	-5.4	15.8	-16.8
K _{3c}	2.1	62.9	19.9	6.7	74.8

である請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項4]

前記複数のコアは、前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って一列に配置された2つのコアであり、

前記第3クラッド領域の直径は、125 ± 1 μmであり、

カットオフ波長は、1.53 μm以下であり、

波長1.55 μmにおけるモードフィールド直径の識別子をW-2

、コア間隔の識別子を $\Lambda - 2$ 、前記コアの半径を a 、前記第2クラッド領域の内径の半径を a_1 とし、

前記複数のコアが4つのコアであるときの波長 $1.55\ \mu\text{m}$ におけるモードフィールド直径の識別子を W 、コア間隔の識別子を Λ 、前記第1線と前記第2線との交点 A に対応するモードフィールド直径を A_W 及びコア間隔を A_Λ 、前記第1線と前記第3線との交点 B に対応するモードフィールド直径を B_W 及びコア間隔を B_Λ 、前記第2線と前記第3線との交点 C に対応するモードフィールド直径を C_W 及びコア間隔を C_Λ とするとき、

前記交点 A に対応するモードフィールド直径 A_{W-2} 及びコア間隔 $A_{\Lambda-2}$ 、前記交点 B に対応するモードフィールド直径 B_{W-2} 及びコア間隔 $B_{\Lambda-2}$ 、前記交点 C に対応するモードフィールド直径 C_{W-2} 及びコア間隔 $C_{\Lambda-2}$ は、

[数9]

$$A_{W-2} = A_W + \frac{(\sqrt{2} - 1)A_\Lambda}{K_C - \sqrt{2}K_B}$$

$$A_{\Lambda-2} = \frac{\sqrt{2}(K_C - K_B)}{K_C - \sqrt{2}K_B} A_\Lambda$$

$$B_{W-2} = C_{W-2} = B_W = C_W$$

$$B_{\Lambda-2} = \sqrt{2}B_\Lambda$$

$$C_{\Lambda-2} = C_\Lambda$$

但し、

$$A_W = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$A_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$B_W = C_W = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$B_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$C_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$K_B = \frac{B_\Lambda - A_\Lambda}{B_W - A_W}$$

$$K_C = \frac{C_\Lambda - A_\Lambda}{C_W - A_W}$$

[表7]

	A_W	A_Λ	B_W, C_W	B_Λ	C_Λ
K_{1a}	-267786	699182	20715	-89461	93858
K_{1b}	1424041	-3124798	-131365	518887	-473595
K_{1c}	-1554861	2937634	211061	-855785	730568
K_{2a}	2440	-7950	-480	1856	-1499
K_{2b}	-13009	35480	2775	-9953	7296
K_{2c}	14698	-34816	-4115	16287	-12524
K_{3a}	-6.0	21.3	1.4	-5.8	4.4
K_{3b}	31.2	-94.7	-7.5	28.8	-19.7
K_{3c}	-25.2	136.6	22.1	-7.0	77.8

である請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項5]

前記複数のコアは、前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って

一列に配置された2つのコアであり、

前記第3クラッド領域の直径は、 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であり、

カットオフ波長は、 $1.46 \mu\text{m}$ 以下であり、

波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるモードフィールド直径の識別子を $W-2$ 、コア間隔の識別子を $\Lambda-2$ 、前記コアの半径を a 、前記第2クラッド領域の内径の半径を a_1 とし、

前記複数のコアが4つのコアであるときの波長 $1.55 \mu\text{m}$ におけるモードフィールド直径の識別子を W 、コア間隔の識別子を Λ 、前記第1線と前記第2線との交点 A' に対応するモードフィールド直径を A'_W 及びコア間隔を A'_Λ 、前記第1線と前記第3線との交点 B' に対応するモードフィールド直径を B'_W 及びコア間隔を B'_Λ 、前記第2線と前記第3線との交点 C' に対応するモードフィールド直径を C'_W 及びコア間隔を C'_Λ とするとき、

前記交点 A' に対応するモードフィールド直径 A'_{W-2} 及びコア間隔 $A'_{\Lambda-2}$ 、前記交点 B' に対応するモードフィールド直径 B'_{W-2} 及びコア間隔 $B'_{\Lambda-2}$ 、前記交点 C' に対応するモードフィールド直径 C'_{W-2} 及びコア間隔 $C'_{\Lambda-2}$ は、

[数10]

$$A'_{W-2} = A'_W + \frac{(\sqrt{2}-1)A'_\Lambda}{K_C - \sqrt{2}K_B}$$

$$A'_{\Lambda-2} = \frac{\sqrt{2}(K_C - K_B)}{K_C - \sqrt{2}K_B} A'_\Lambda$$

$$B'_{W-2} = C'_{W-2} = B'_W = C'_W$$

$$B'_{\Lambda-2} = \sqrt{2}B'_\Lambda$$

$$C'_{\Lambda-2} = C'_\Lambda$$

但し、

$$A'_W = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$A'_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$B'_W = C'_W = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$B'_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$C'_\Lambda = (K_{1a}(a_1/a)^2 + K_{1b}(a_1/a) + K_{1c})\Delta_1^2 + (K_{2a}(a_1/a)^2 + K_{2b}(a_1/a) + K_{2c})\Delta_1 + (K_{3a}(a_1/a)^2 + K_{3b}(a_1/a) + K_{3c})$$

$$K_B = \frac{B'_\Lambda - A'_\Lambda}{B'_W - A'_W}$$

$$K_C = \frac{C'_\Lambda - A'_\Lambda}{C'_W - A'_W}$$

[表8]

	A' W	A' Λ	B' W, C' W	B' Λ	C' Λ
K _{1a}	-34012	43309	13234	-30443	105834
K _{1b}	467994	-338612	-103738	247577	-496611
K _{1c}	-608285	38133	180207	-536187	726884
K _{2a}	-194	-1144	-371	1093	-1583
K _{2b}	-2478	6763	2369	-6337	7150
K _{2c}	4558	-4778	-3675	12001	-12010
K _{3a}	1.5	4.4	0.9	-3.3	4.2
K _{3b}	1.7	-24.4	-5.4	15.8	-16.8
K _{3c}	2.1	62.9	19.9	6.7	74.8

である請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項6]

前記第3クラッド領域の直径は、125 ± 1 μmであり、

被覆層に取り囲まれた前記マルチコア光ファイバの直径は、 $200 \pm 20 \mu\text{m}$ である請求項1に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項7]

マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、

前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、

前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、

前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、

前記第3クラッド領域の直径は、 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であり、

カットオフ波長は、 $1.53 \mu\text{m}$ 以下であり、

波長 $1.55 \mu\text{m}$ における前記複数のコアのモードフィールド直径は、 $9.5 \mu\text{m} \sim 15.0 \mu\text{m}$ であり、

前記複数のコアのコア間隔は、 $33 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ であるマルチコア光ファイバ。

[請求項8]

マルチコア光ファイバの設計方法において、

前記マルチコア光ファイバは、

前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って正方格子状又は一列に配置された複数のコアと、

前記複数のコアをそれぞれ取り囲み、取り囲むコアよりも屈折率が低い複数の第1クラッド領域と、

前記複数の第1クラッド領域をそれぞれ取り囲み、取り囲む第1クラッド領域よりも屈折率が低い複数の第2クラッド領域と、

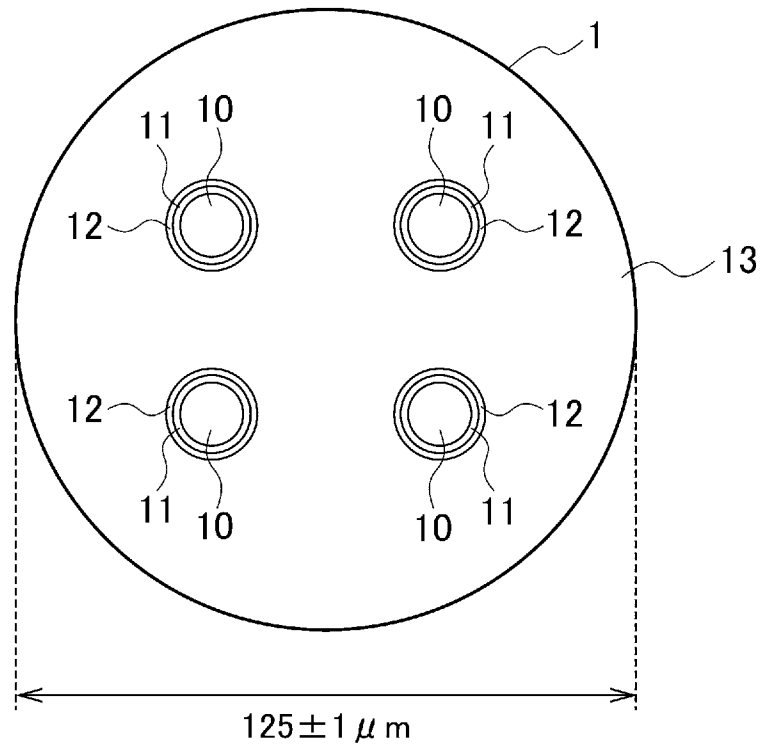
前記複数の第2クラッド領域を取り囲み、前記複数のコアよりも屈折率が低い第3クラッド領域と、を備え、

コンピュータが、

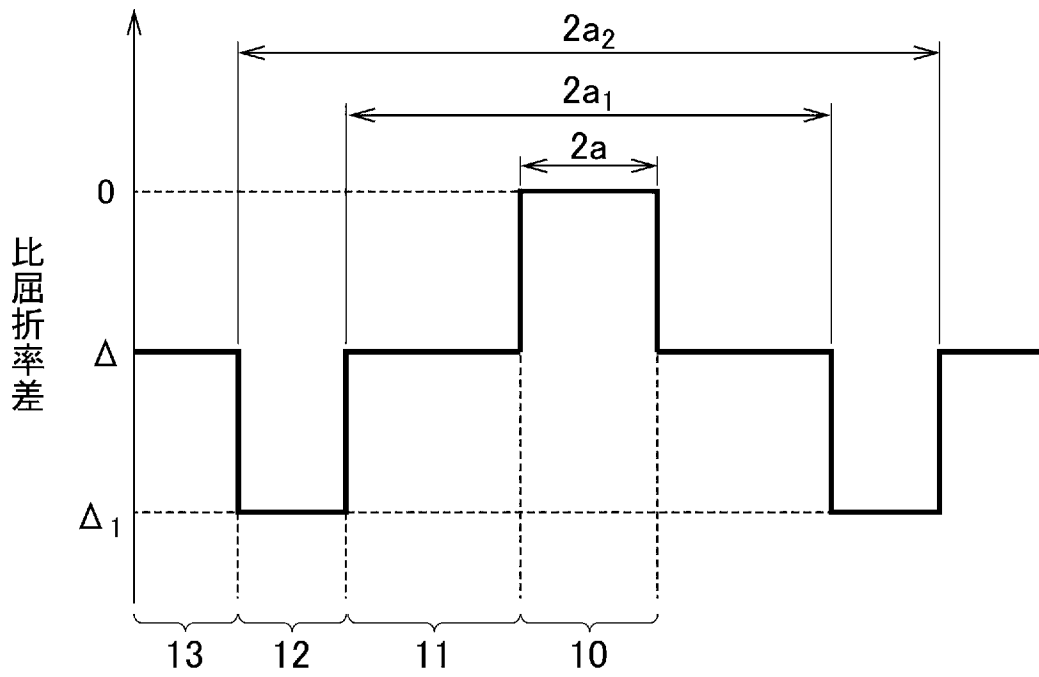
モードフィールド直径とコア間隔との関係を表すグラフにおいて、

コアの過剰損失を所定以下とするコア間隔の上限を示す第1線と、コア間のクロストークを所定以下とするコア間隔の下限を示す第2線と、コアのレイリー散乱損失の増加量を所定以下とするモードフィールド直径の下限を示す第3線と、の交点で囲まれる領域内に対応するモードフィールド直径とコア間隔を、前記複数のコアのモードフィールド直径とコア間隔として計算するマルチコア光ファイバの設計方法。

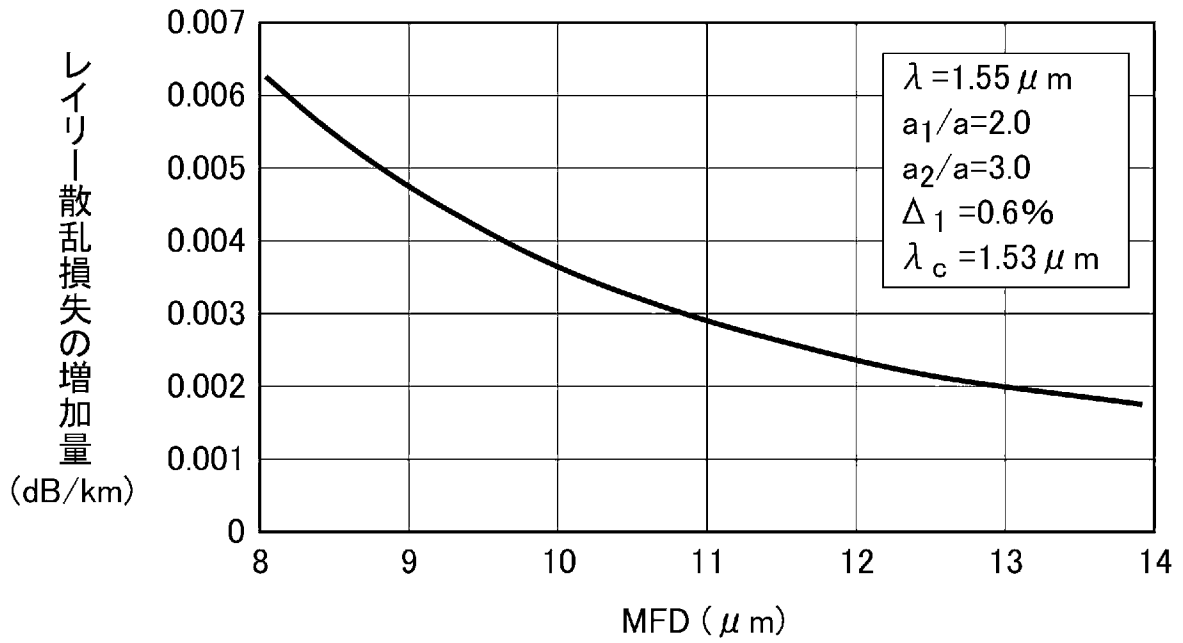
[図1]



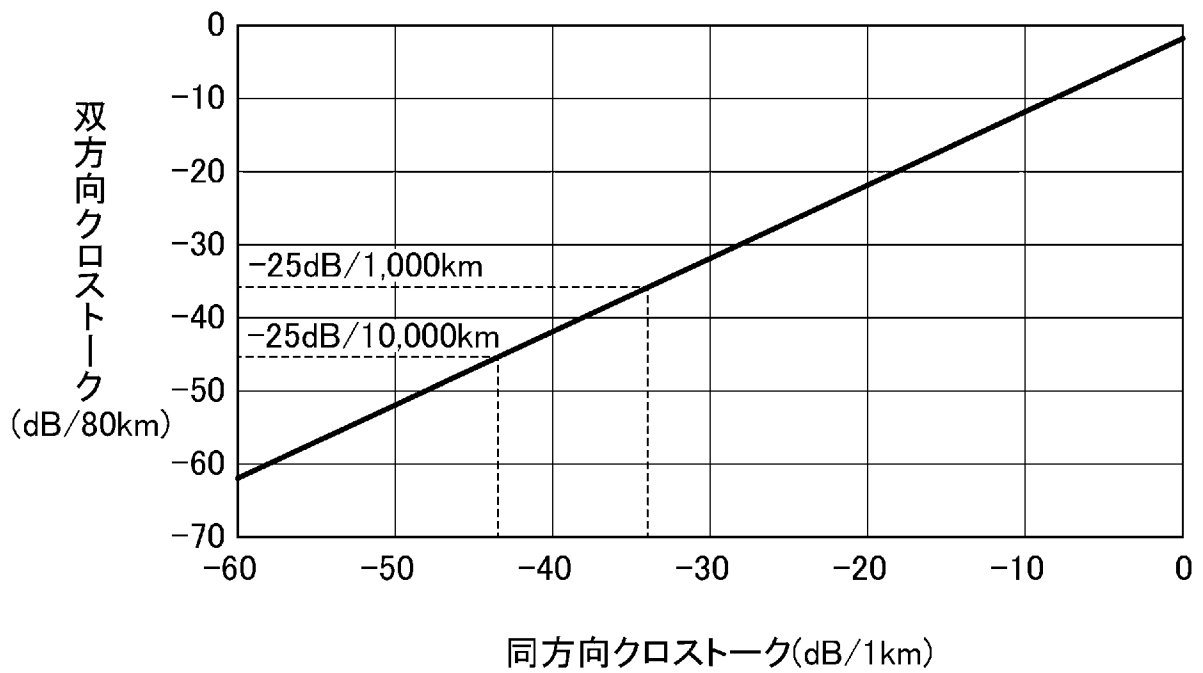
[図2]



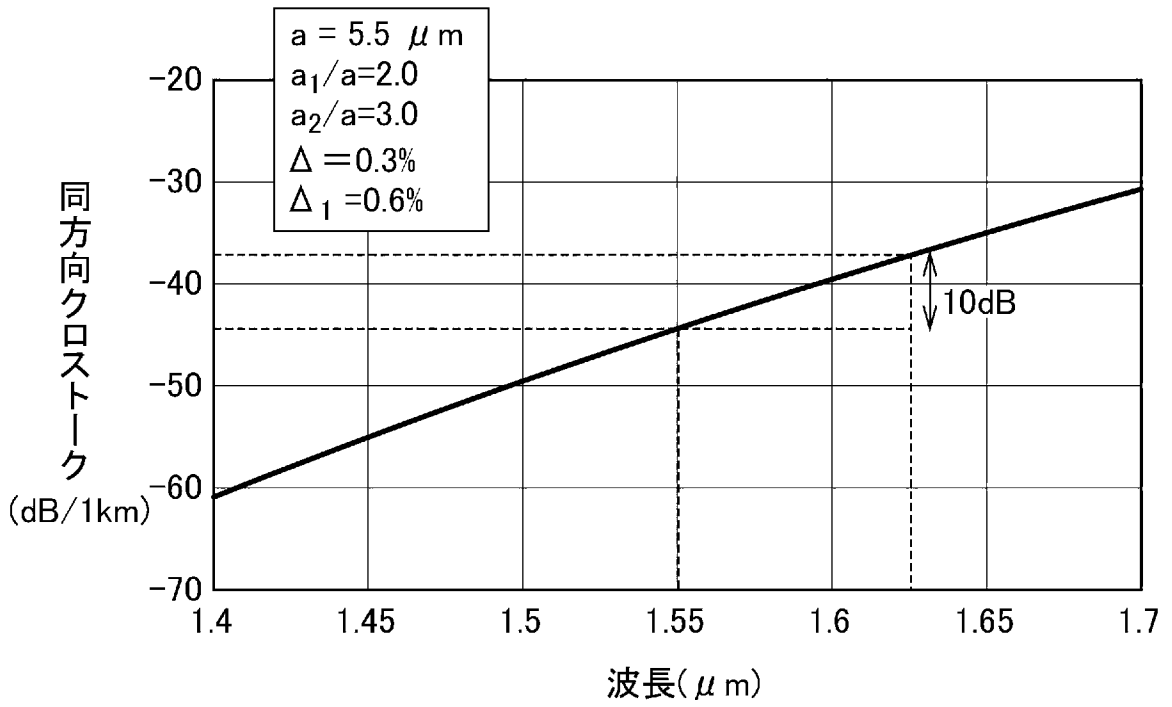
[図3]



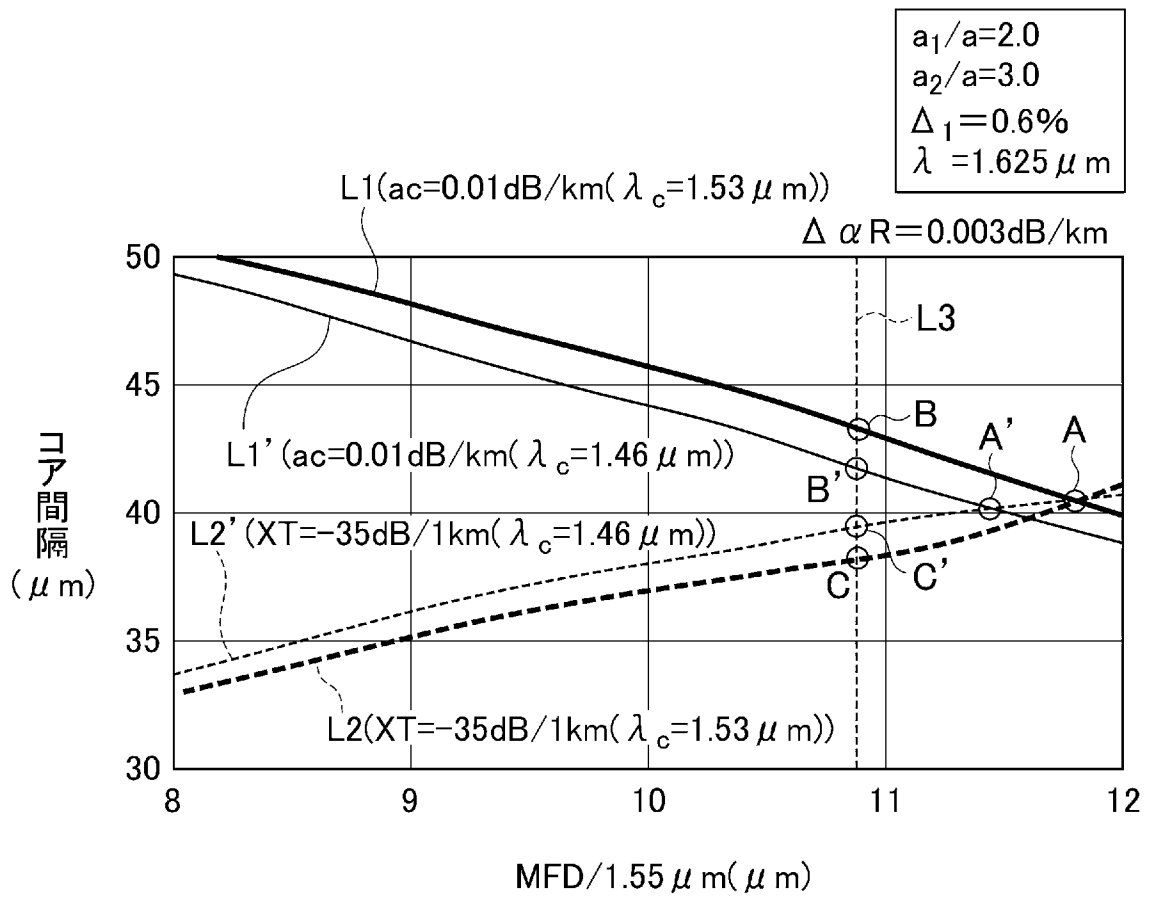
[図4]



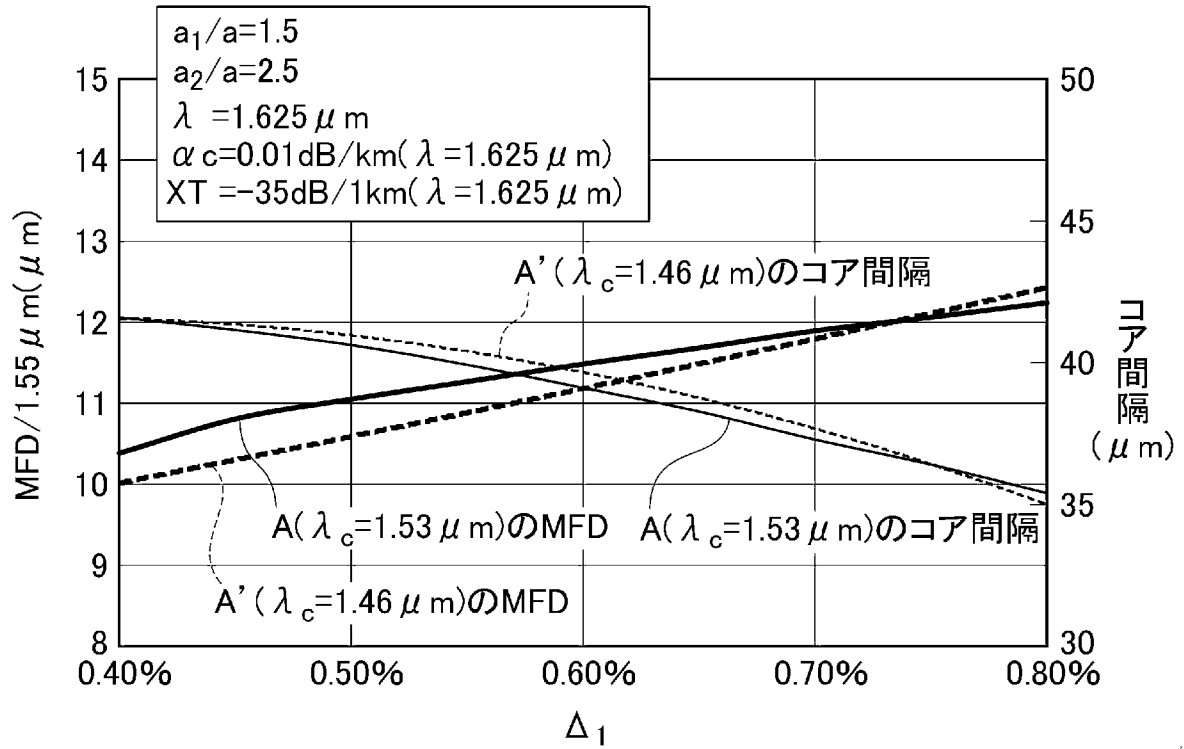
[図5]



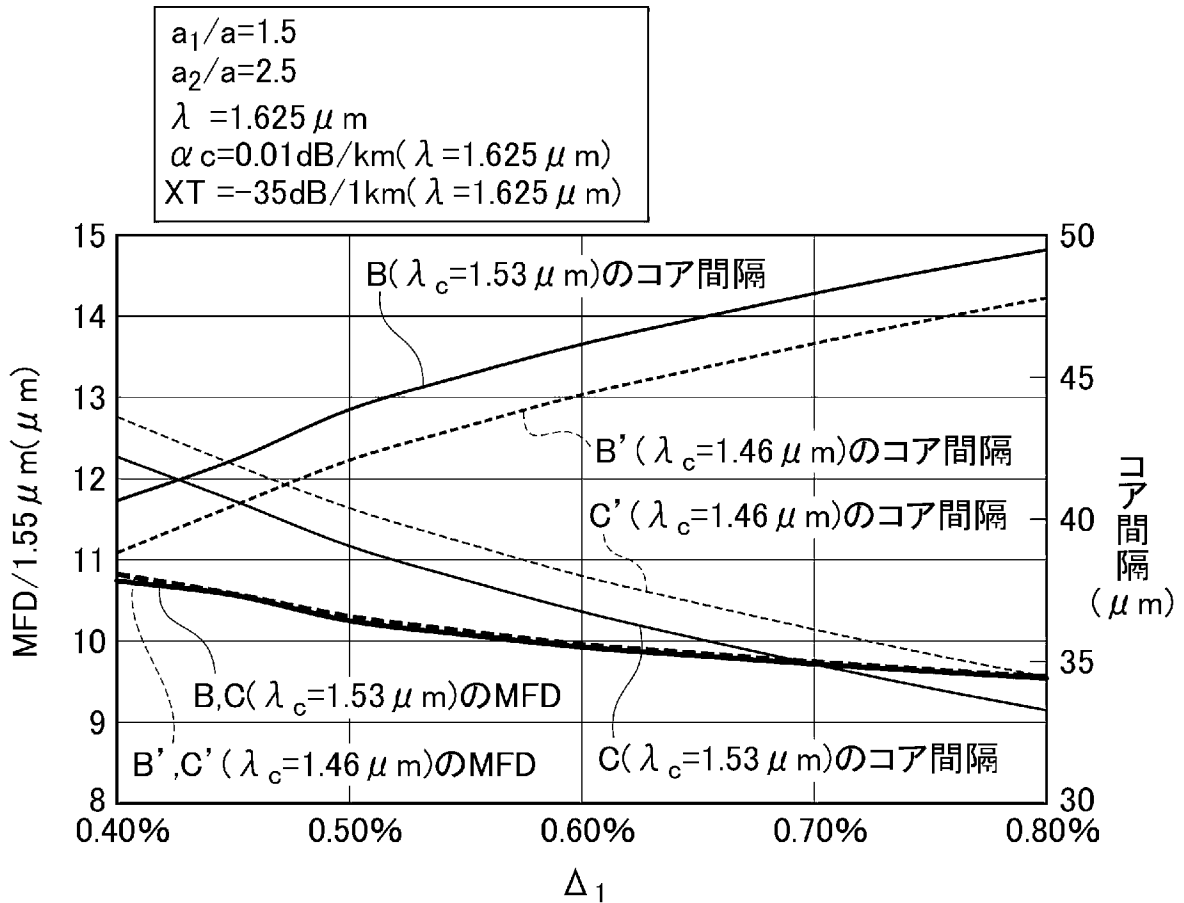
[図6]



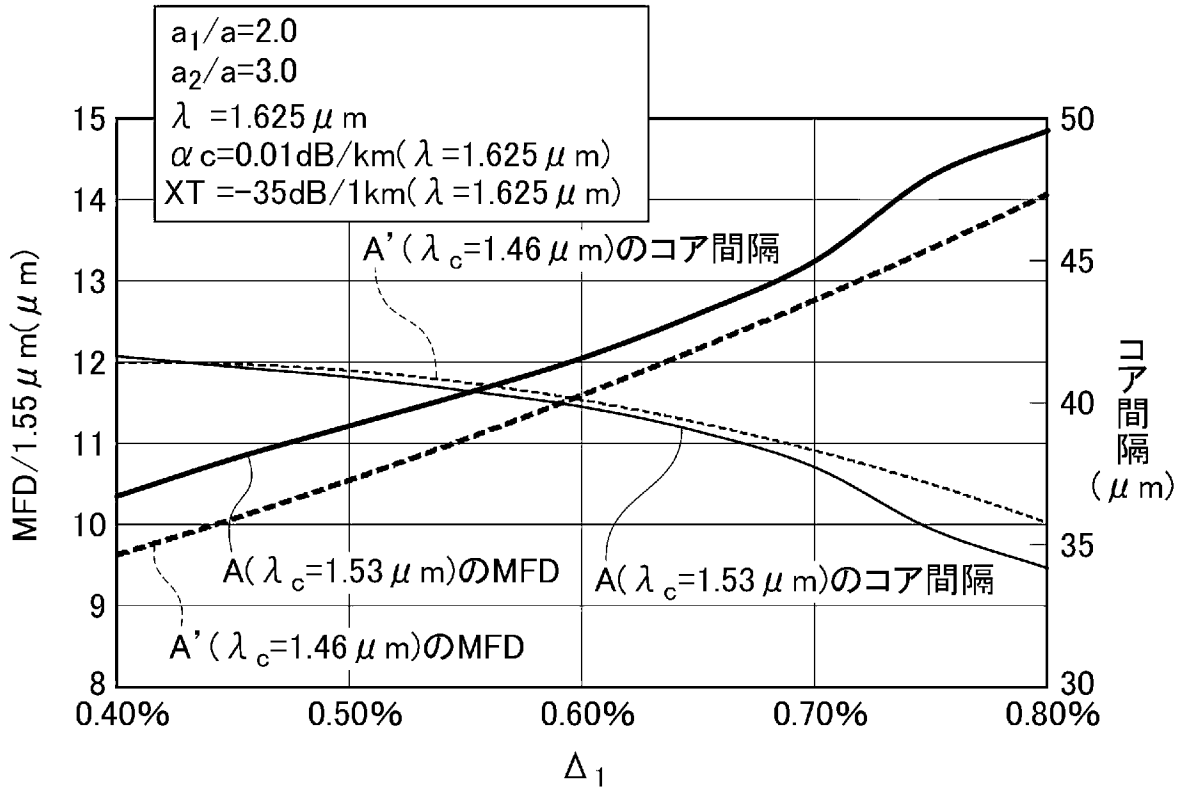
[図7A]



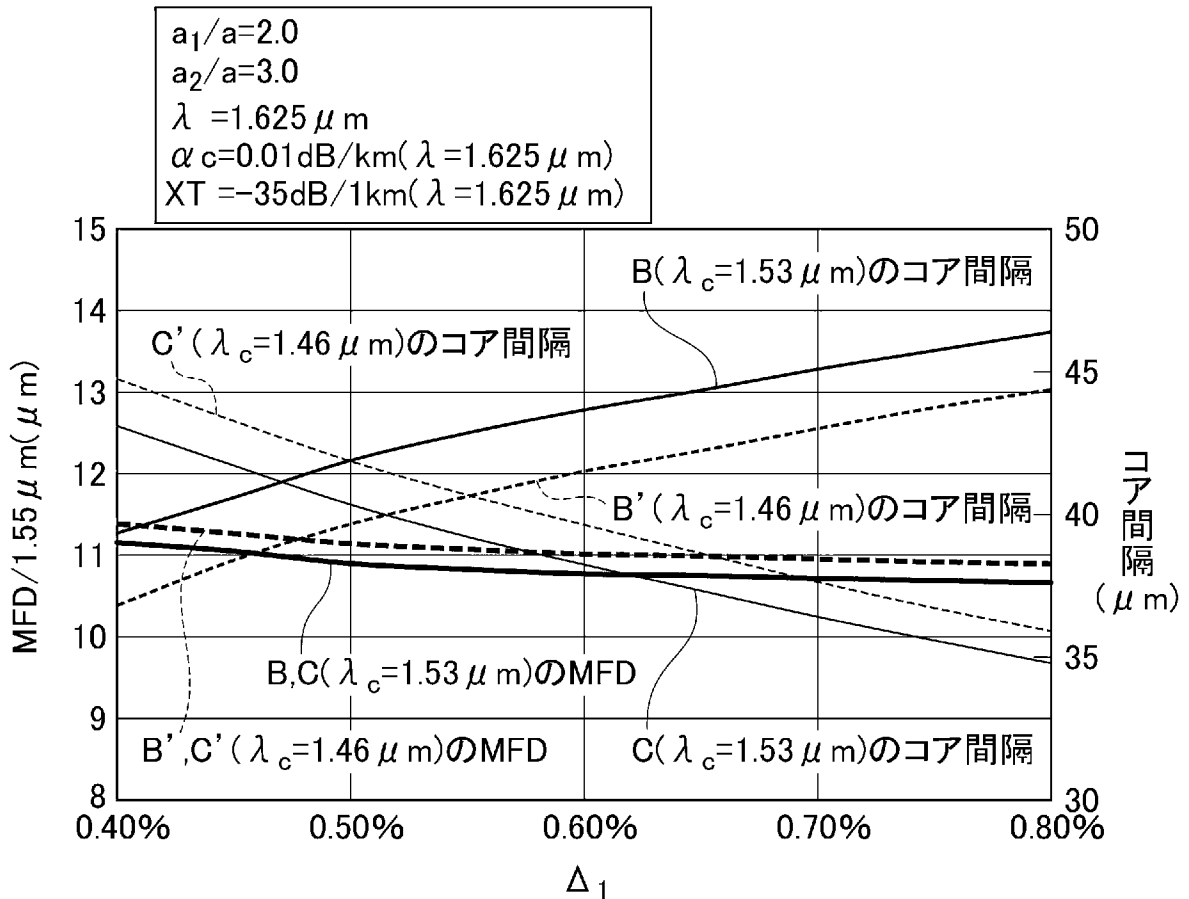
[図7B]



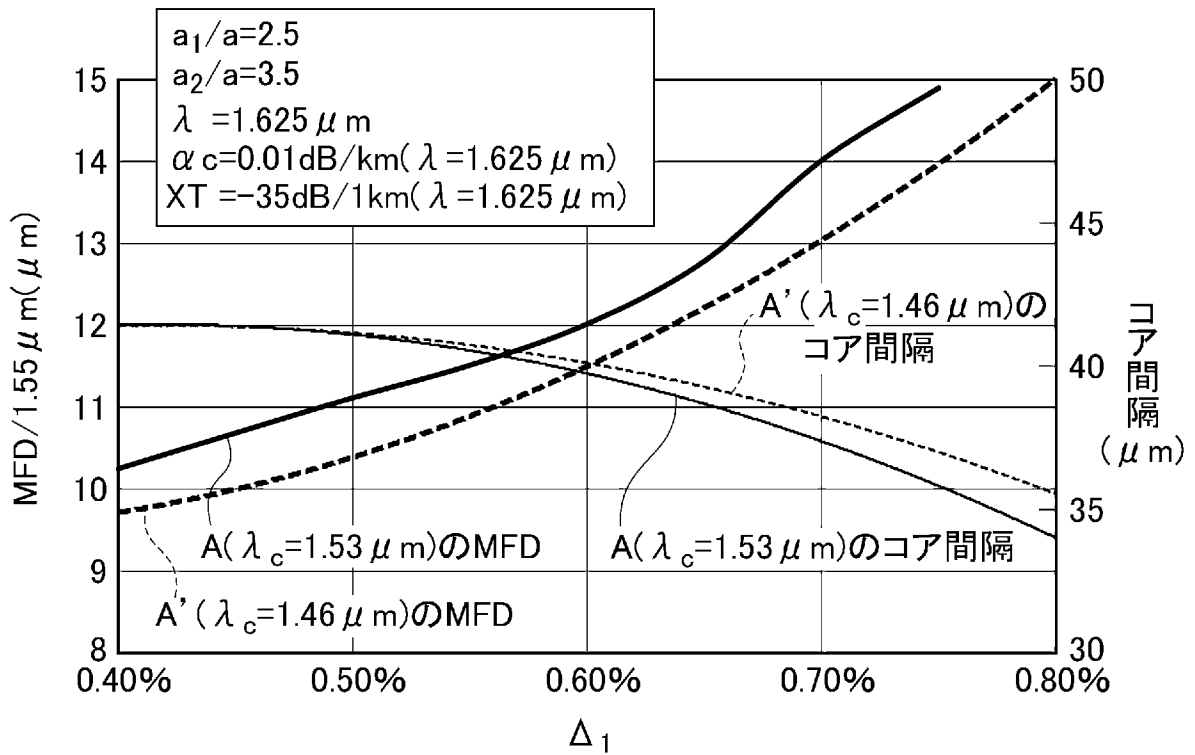
[図8A]



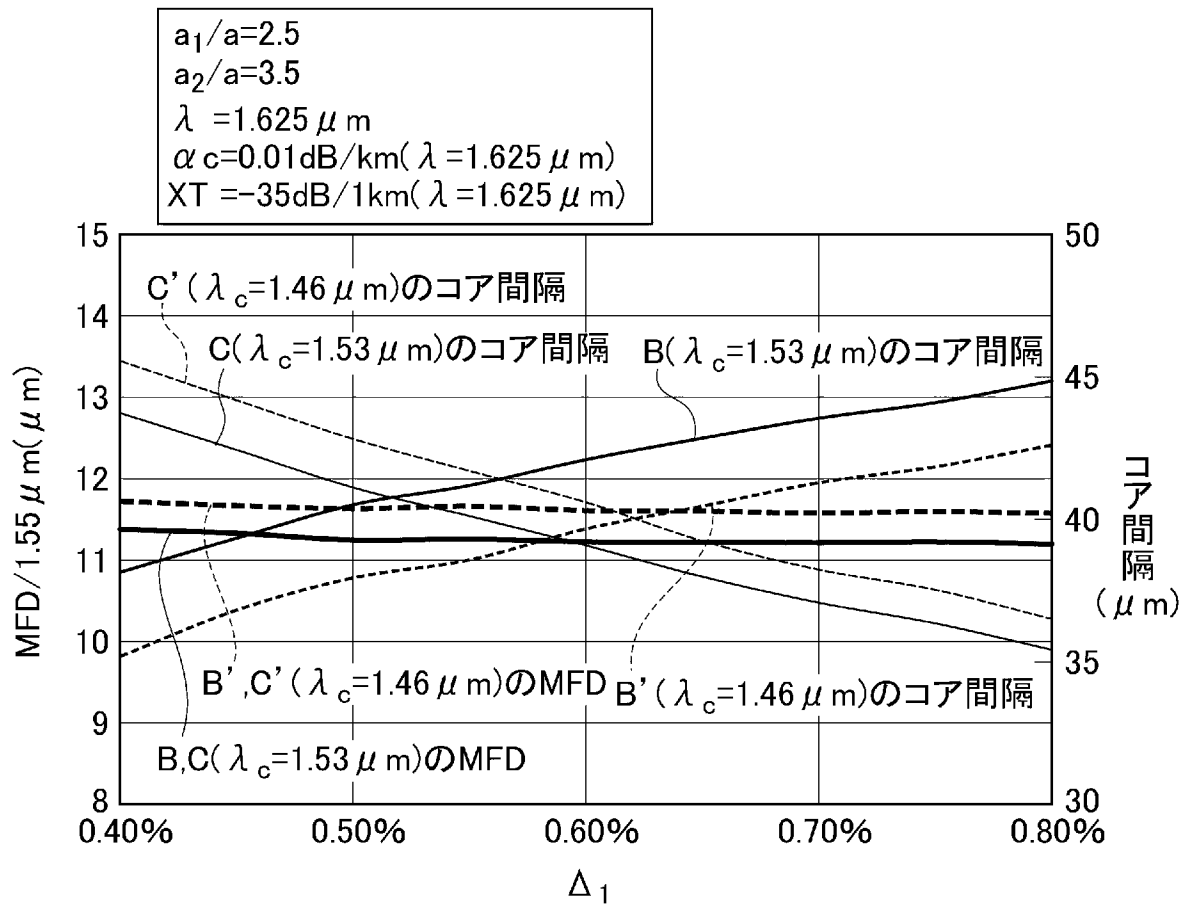
[図8B]



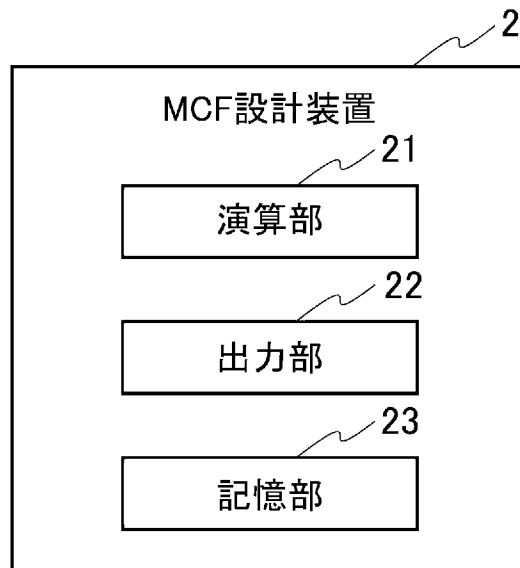
[図9A]



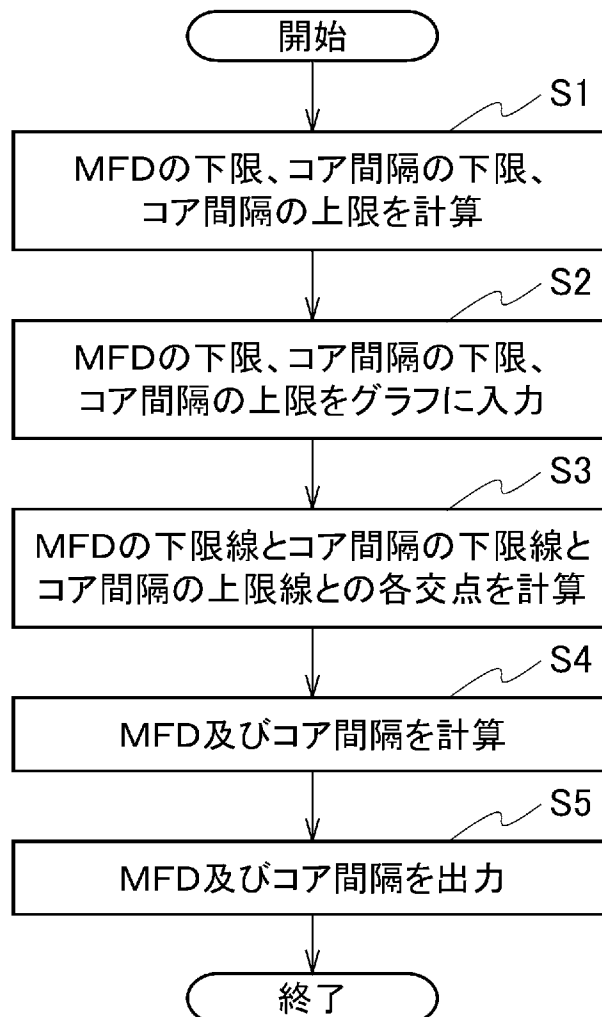
[図9B]



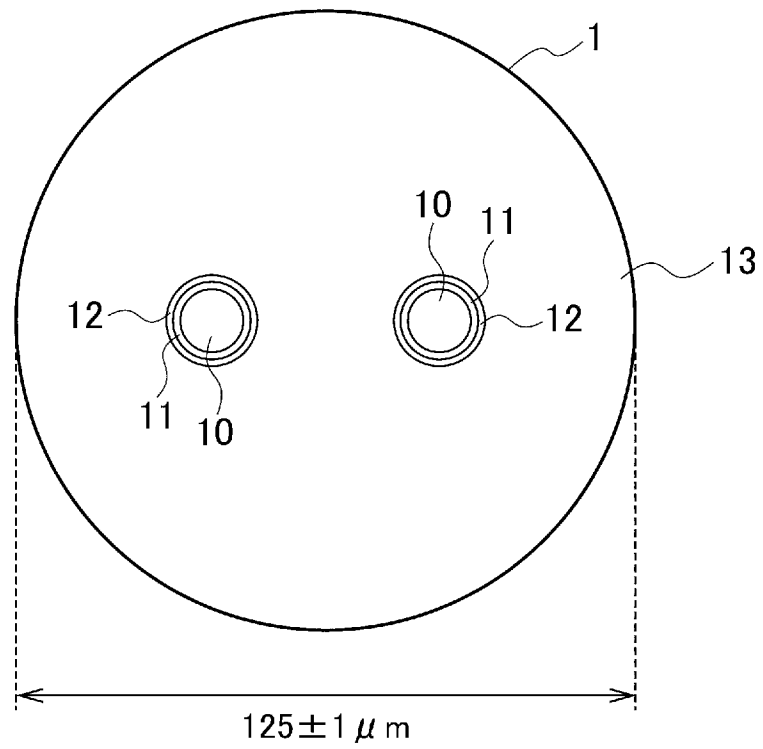
[図10]



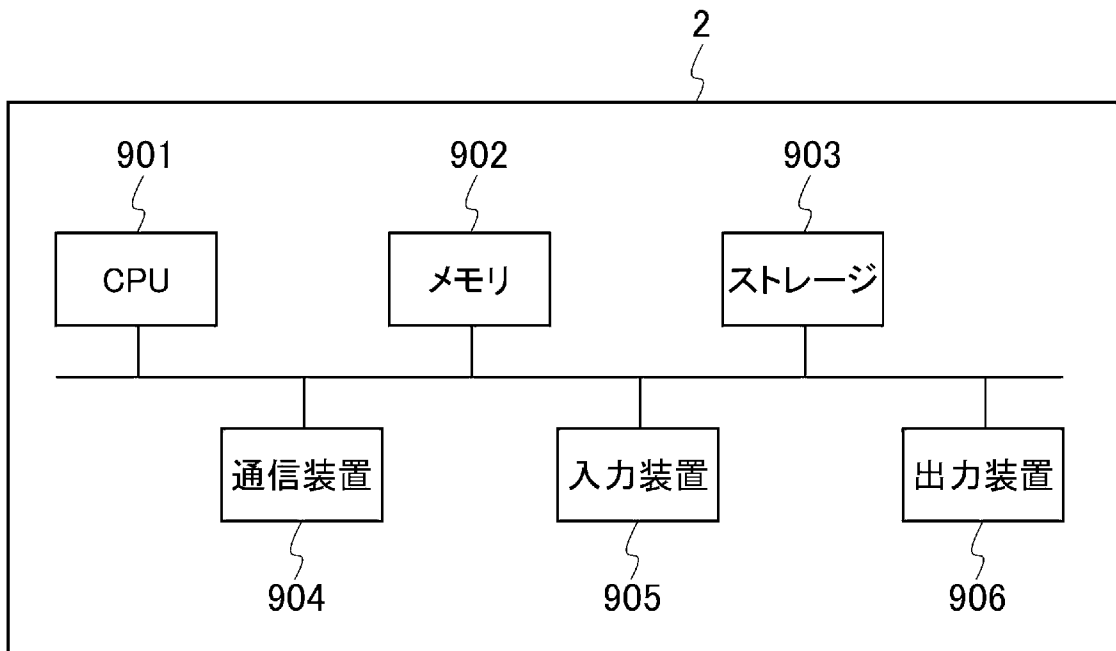
[図11]



[図12]



[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/010317

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G02B 6/02(2006.01)i FI: G02B6/02 461		
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) G02B6/02-6/10; G02B6/44		
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 1971-2023 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023		
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	WO 2022/034662 A1 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 17 February 2022 (2022-02-17) paragraphs [0020]-[0054], fig. 2-3, 5-14	1-3, 6-7
Y		4-5
A		8
Y	JP 2013-088458 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 13 May 2013 (2013-05-13) paragraphs [0014]-[0030], fig. 1-6	4-5
A		8
A	JP 2021-012226 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 04 February 2021 (2021-02-04) entire text, all drawings	1-8
A	JP 2022-015746 A (THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.) 21 January 2022 (2022-01-21) entire text, all drawings	1-8
<input checked="" 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 19 May 2023		Date of mailing of the international search report 06 June 2023
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

International application No.

PCT/JP2023/010317

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2021/0294024 A1 (CORNING INC.) 23 September 2021 (2021-09-23) entire text, all drawings	1-8
A	JP 2023-036400 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 14 March 2023 (2023-03-14) entire text, all drawings	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/JP2023/010317

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO 2022/034662 A1	17 February 2022	(Family: none)	
JP 2013-088458 A	13 May 2013	(Family: none)	
JP 2021-012226 A	04 February 2021	US 2021/0003773 A1 entire text, all drawings EP 3761088 A1 CN 112180498 A	
JP 2022-015746 A	21 January 2022	(Family: none)	
US 2021/0294024 A1	23 September 2021	WO 2021/188290 A1 JP 2023-518466 A	
JP 2023-036400 A	14 March 2023	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02B 6/02(2006.01)i FI: G02B6/02 461		
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）） G02B6/02-6/10; G02B6/44 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 1971-2023年 日本国実用新案登録公報 1996-2023年 日本国登録実用新案公報 1994-2023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 Y A	WO 2022/034662 A1（日本電信電話株式会社）17.02.2022（2022-02-17） 段落[0020]-[0054], 図2-3, 5-14	1-3, 6-7 4-5 8
Y A	JP 2013-088458 A（日本電信電話株式会社）13.05.2013（2013-05-13） 段落[0014]-[0030], 図1-6	4-5 8
A	JP 2021-012226 A（住友電気工業株式会社）04.02.2021（2021-02-04） 全文, 全図	1-8
A	JP 2022-015746 A（古河電気工業株式会社）21.01.2022（2022-01-21） 全文, 全図	1-8
A	US 2021/0294024 A1（CORNING INCORPORATED）23.09.2021（2021-09-23） 全文, 全図	1-8
A	JP 2023-036400 A（日本電信電話株式会社）14.03.2023（2023-03-14） 全文, 全図	1-8
<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 19.05.2023	国際調査報告の発送日 06.06.2023	
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） 大西 孝宣 2L 6006 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/JP2023/010317

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2022/034662 A1	17.02.2022	(ファミリーなし)	
JP 2013-088458 A	13.05.2013	(ファミリーなし)	
JP 2021-012226 A	04.02.2021	US 2021/0003773 A1 全文, 全図 EP 3761088 A1 CN 112180498 A	
JP 2022-015746 A	21.01.2022	(ファミリーなし)	
US 2021/0294024 A1	23.09.2021	WO 2021/188290 A1 JP 2023-518466 A	
JP 2023-036400 A	14.03.2023	(ファミリーなし)	