

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7501640号
(P7501640)

(45)発行日 令和6年6月18日(2024.6.18)

(24)登録日 令和6年6月10日(2024.6.10)

(51)国際特許分類

F I

G 0 2 B 6/02 (2006.01) G 0 2 B 6/02 4 6 1

G 0 2 B 6/036(2006.01) G 0 2 B 6/036

G 0 2 B 6/44 (2006.01) G 0 2 B 6/44 3 0 1 Z

請求項の数 3 (全22頁)

(21)出願番号	特願2022-542544(P2022-542544)	(73)特許権者	000004226
(86)(22)出願日	令和2年8月12日(2020.8.12)		日本電信電話株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/030731		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(87)国際公開番号	WO2022/034662	(74)代理人	100119677
(87)国際公開日	令和4年2月17日(2022.2.17)		弁理士 岡田 賢治
審査請求日	令和5年1月20日(2023.1.20)	(74)代理人	100160495
			弁理士 畑 雅明
		(74)代理人	100115794
			弁理士 今下 勝博
		(72)発明者	松井 隆
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			日本電信電話株式会社内
		(72)発明者	中島 和秀
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			日本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 マルチコア光ファイバ及び設計方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

長手方向に沿って正方格子状に配置された4個のコアを有するマルチコア光ファイバであって、

前記各コアのそれぞれを取り囲む第1クラッド領域と、4つの第1クラッド領域全てを取り囲む第2クラッド領域とを有し、屈折率が前記コア、前記第2クラッド領域、前記第1クラッド領域の順に高く、前記コアと前記第1クラッド領域の比屈折率差が0.8%以下であり、前記コアの直径と前記第1クラッド領域の直径との比が2.0~3.0の範囲内であり、

前記第1クラッド領域と前記第2クラッド領域を含むクラッド領域の直径は125±1μmであり、

カットオフ波長が1.45μm以下であり、
波長1.55μmにおけるモードフィールド径MFDが9.5~11.4μmであり、
波長1.625μm、曲げ半径30mmにおける曲げ損失が0.1dB/100turn以下であり、

波長1.625μmにおけるコア間クロストークが-54dB/km以下であり、
前記コアの半径a[μm]、前記コアと前記第1クラッド領域の比屈折率差Δ、前記コアと前記第2クラッド領域の比屈折率差Δ2が、数C2から数C4の条件を満たすことを特徴とする、マルチコア光ファイバ。

【数C2】

$$0.0003a^2 - 0.0024a + 0.0079 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094 \quad (C2)$$

【数 C 3】

$$\begin{aligned} & (0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a) \\ & + (0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388) \leq \Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223 \quad (C3) \end{aligned}$$

10

【数 C 4】

$$\begin{aligned} & (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\ & + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488) \\ & \leq \Delta_2 \leq \\ & \quad (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\ & \quad + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\ & \quad + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312) \quad (C4) \end{aligned}$$

20

ここで、 a_2 は前記第 1 クラッド領域の半径 (μm)、 MFD は所望のモードフィールド径 (μm) である。

【請求項 2】

前記第 1 クラッド領域内に、前記第 2 クラッド領域と略同一の屈折率であり、前記コアを取り囲む第 3 クラッド領域をさらに有す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。

30

【請求項 3】

前記クラッド領域を取り囲む被覆層をさらに有し、前記被覆層を含む直径が $200 \pm 20 \mu m$ であることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のマルチコア光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、マルチコア光ファイバ及びその設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

40

複数のコア領域を有するマルチコアファイバ (MCF) が、空間分割多重技術による飛躍的な伝送容量拡大に向け活発に検討されている。特に近年では、ファイバの製造性や既存の標準技術との互換性が高い標準クラッド径を採用した MCF が注目されており、光の閉じ込めが強いトレンチ型屈折率分布を用いて同じコアを 4 つ配置できることが非特許文献 2 で示されている。また量産性に適したステップインデックス (SI) 型屈折率分布を採用した標準クラッド径 MCF も特許文献 2 および非特許文献 1 にて提案されている。またこれらの MCF は従来の SMF と同様に全通信波長帯でのシングルモード動作を保証しているが、各コアのシングルモード動作領域を $1.530 \sim 1.625 \mu m$ に限定することでクロストークを低減し長距離伝送を可能とする MCF も特許文献 1 で開示されている。

【0003】

50

一方、伝送システムの大容量化に向けて、シングルモード動作帯域の拡張が議論されており、国際標準化の議論でも波長 $1.53\ \mu\text{m}$ 以下の波長領域を伝送波長帯として含めることが検討されているほか、更なる大容量化に向けて S バンド ($1460 \sim 1530\ \text{nm}$) の活用についても高い関心が集められている。加えて長距離伝送では分布ラマン増幅が利用されているが、安定した増幅特性を得るために、信号波長に加えてラマン励起光の波長におけるシングルモード動作が得られることが好ましい。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特許 6560806 号

10

【非特許文献】

【0005】

【文献】T. Matsui, et al., "Applicability of Step-Index Type Standard Cladding Multi-core Fiber to Full-Band Transmission" in Proc. ECOC, Dublin, Ireland, Sep, 2019, M.1.D.3.

【文献】T. Matsui, et al., "Design of multi-core fiber in $125\ \mu\text{m}$ cladding diameter with full compliance to conventional SMF," in Proc. ECOC, Valencia, Spain, Sep. 2015, We.4.3.

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかし、これまで検討されている標準クラッド径 MCF のうち、全通信波長帯でシングルモード動作を得られるタイプはクロストークの制限により伝送距離の延伸が困難であるという課題があった。また、特許文献 1 の MCF には、シングルモード動作領域が限定されており、波長 $1.53\ \mu\text{m}$ 以下でのシングルモード動作を保証できず、前述の伝送波長帯の拡大 (S バンドへの拡大) が困難であるという課題があった。

30

【0007】

そこで、本発明は、前記課題を解決するために、伝送波長帯の拡大とともにクロストークを低減して伝送距離を延伸できるマルチコア光ファイバ及びその設計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】

【0008】

上記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、次の条件を満たす構造とした。

【0009】

具体的には、本発明に係る第 1 のマルチコア光ファイバは、長手方向に沿って正方格子状に配置された 4 個のコアを有するマルチコア光ファイバであって、

40

前記コアの外周部に、前記コアとの比屈折率差の絶対値が Δ となる、前記コアより屈折率が低いクラッド領域を有し、

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

カットオフ波長が $1.45\ \mu\text{m}$ 以下であり、

波長 $1.55\ \mu\text{m}$ におけるモードフィールド径 MFD が $9.5 \sim 10.0\ \mu\text{m}$ であり、

波長 $1.625\ \mu\text{m}$ 、曲げ半径 $30\ \text{mm}$ における曲げ損失が $0.1\ \text{dB} / 100\ \text{turn}$ 以下であり、

波長 $1.625\ \mu\text{m}$ におけるコア間クロストークが $-47\ \text{dB} / \text{km}$ 以下であることを特徴とする。

50

【 0 0 1 0 】

前記第 1 のマルチコア光ファイバは、前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最短距離が $33\ \mu\text{m}$ 以上であり、前記コアの半径 a 、及び前記コアと前記クラッド領域との間の比屈折率差 Δ が数 C 1 の範囲内であることを特徴とする。

【数 C 1】

$$0.0004a^2 - 0.003a + 0.0091 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094,$$

$$\Delta \leq 0.0874a^{-2}, \text{ 且つ}$$

(C 1)

$$\Delta \geq 0.0101a^{-758}$$

10

【 0 0 1 1 】

また、本発明に係る第 2 のマルチコア光ファイバは、長手方向に沿って正方格子状に配置された 4 個のコアを有するマルチコア光ファイバであって、

前記各コアのそれぞれを取り囲む第 1 クラッド領域と、4 つの第 1 クラッド領域全てを取り囲む第 2 クラッド領域とを有し、屈折率が前記コア、前記第 2 クラッド領域、前記第 1 クラッド領域の順に高く、前記コアと前記第 1 クラッド領域の比屈折率差が 0.8% 以下であり、前記コアの直径と前記第 1 クラッド領域の直径との比が $2.0 \sim 3.0$ の範囲内であり、

前記第 1 クラッド領域と前記第 2 クラッド領域を含むクラッド領域の直径は $125 \pm 1\ \mu\text{m}$ であり、

20

カットオフ波長が $1.45\ \mu\text{m}$ 以下であり、

波長 $1.55\ \mu\text{m}$ におけるモードフィールド径 MFD が $9.5 \sim 11.4\ \mu\text{m}$ であり、

波長 $1.625\ \mu\text{m}$ 、曲げ半径 $30\ \text{mm}$ における曲げ損失が $0.1\ \text{dB} / 100\ \text{turn}$ 以下であり、

波長 $1.625\ \mu\text{m}$ におけるコア間クロストークが $-54\ \text{dB} / \text{km}$ 以下であることを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

前記第 2 のマルチコア光ファイバは、前記コアの半径 a 、前記コアと前記第 1 クラッド領域の比屈折率差 Δ 、前記コアと前記第 2 クラッド領域の比屈折率差 Δ_2 が、数 C 2 から数 C 4 の条件を満たすことを特徴とする。

30

【数 C 2】

$$0.0003a^2 - 0.0024a + 0.0079 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094 \quad (\text{C } 2)$$

【数 C 3】

$$(0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2$$

$$+(-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a)$$

$$+(0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388) \leq \Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223 \quad (\text{C } 3)$$

40

【数 C 4】

$$\begin{aligned}
& (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\
& + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\
& + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488) \\
& \leq \Delta_2 \leq \\
& (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\
& + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\
& + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312) \quad (C4)
\end{aligned}$$

10

ここで、 a_2 は前記第1クラッドの半径(μm)、 MFD は所望のモードフィールド径(μm)である。

【0013】

さらに、本発明に係る第3のマルチコア光ファイバは、前記第1クラッド領域内に、前記第2クラッド領域と略同一の屈折率であり、前記コアを取り囲む第3クラッド領域をさらに有することを特徴とする。

20

【0014】

ここで、本発明に係る第1から第3のマルチコア光ファイバは、前記クラッド領域を取り囲む被覆層をさらに有し、前記被覆層を含む直径が $200 \pm 20 \mu m$ であることを特徴とする。

【0015】

そのマルチコア光ファイバの設計方法は、長手方向に沿って正方格子状に配置された4個のコアを有するマルチコア光ファイバの設計方法であって、

有限要素法を用いた光ファイバの光学特性解析で、前記コアの半径 a と前記コアとクラッド領域との比屈折率差の絶対値 Δ を変えながらモードフィールド径 MFD 、カットオフ波長 λ_c 、及び曲げ損失 α_b を算出すること、

30

前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ とのグラフに所望のモードフィールド径 MFD 、所望のカットオフ波長 λ_c 、及び所望の曲げ損失 α_b の曲線を記載すること、及び前記曲線に囲まれた領域に含まれる前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ を前記マルチコア光ファイバの設計値とすることを行う。

【0016】

なお、上記各発明は、可能な限り組み合わせることができる。

【発明の効果】

【0017】

本発明は、伝送波長帯の拡大とともにクロストークを低減して伝送距離を延伸できるマルチコア光ファイバ及びその設計方法を提供することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造を説明する図である。

【図2】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造パラメータと光学特性との関係を説明する図である。

【図3】本発明に係るマルチコア光ファイバにおけるモードフィールド径(MFD)、必要なクラッド厚(最小 OC T)、及びクロストーク(XT)の関係を説明する図である。

【図4】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造を説明する図である。

【図5】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

50

【図 6】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 7】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 8】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 9】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 10】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 11】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 12】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 13】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造条件を説明する図である。

【図 14】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造を説明する図である。

【図 15】本発明に係るマルチコア光ファイバの構造を説明する図である。

10

【図 16】本発明に係る設計方法を説明するフローチャートである。

【図 17】本発明に係る設計方法を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0019】

添付の図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下に説明する実施形態は本発明の実施例であり、本発明は、以下の実施形態に制限されるものではない。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。

【0020】

(実施形態 1)

図 1 は、本実施形態のマルチコア光ファイバ 301 の構造を説明する図である。図 1 (a) はマルチコア光ファイバ 301 の断面図、図 1 (b) はマルチコア光ファイバ 301 のコア近傍の屈折率分布を説明する図である。マルチコア光ファイバ 301 は、クラッド 11 の直径が $125 \pm 1 \mu\text{m}$ で 4 つのコア 12 を有する MCF である。ここで 4 つのコア 12 は略同一の屈折率分布を有し、ここではステップインデックス (SI) 型もしくはこれと同等の屈折率分布とした。ここで a はコア半径、 Δ はコア 12 とクラッド 11 の比屈折率差である。全てのコア 12 を SI 型もしくは SI 型と同等の屈折率分布とすることでマルチコア光ファイバ 301 の量産性と歩留まりを大幅に改善できる。

20

【0021】

図 2 は、MCF の構造パラメータと光学特性の関係を表す特性図である。本特性図は、横軸をコア半径 a、縦軸を比屈折率差 Δ としている。

30

実線は、所定のモードフィールド径 (MFD) を得るためのコア構造を示す。本図では、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における MFD が $9.5 \mu\text{m}$ 、 $10.0 \mu\text{m}$ 、及び $11.4 \mu\text{m}$ である構造を記載している。

破線は、所定のカットオフ波長 λ_c を得るためのコア構造を示す。本図では、カットオフ波長 λ_c が $1.45 \mu\text{m}$ 、 $1.48 \mu\text{m}$ 、 $1.51 \mu\text{m}$ 、及び $1.53 \mu\text{m}$ である構造を記載している。

点線は、所定の曲げ損失 (α_b) を得るためのコア構造を示す。本図では、波長 $1.625 \mu\text{m}$ 且つ曲げ半径 30 mm での曲げ損失 λ_c が $0.1 \text{ dB} / 100 \text{ turn}$ となる構造を記載している。

【0022】

40

なお、図 2 は、数値計算 (有限要素法を用いた光ファイバの光学特性解析) により得た特性図である。具体的には、本図は、MCF のコア半径 a と比屈折率差 Δ を変えながら MFD、カットオフ波長 λ_c 、及び曲げ損失 α_b を数値計算し、同じ値 (例えば、 $\text{MFD} = 9.5 \mu\text{m}$) となる構造をグラフ内にプロットして作成する。

【0023】

SI 型ではコア構造を決めれば光学特性を一意に定めることができ、例えば SMF と同等の MFD ($= 9.5 \mu\text{m}$ [波長 $1.55 \mu\text{m}$]) および曲げ損失 α_b ($= 0.1 \text{ dB} / 100 \text{ turn}$) と、 $1.45 \mu\text{m}$ 以下のカットオフ波長 λ_c の MCF を得るためには、図 2 のそれぞれの数値の実線、破線、及び点線で囲まれる領域内にあるコア半径 a と比屈折率差 Δ のコア構造とすればよい。

50

【 0 0 2 4 】

具体的には、波長 $1.55 \mu\text{m}$ で $\text{MFD} 9.5 \mu\text{m}$ 以上を得るためには、

【数 1】

$$\Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094 \quad (1)$$

の実線とする。また、カットオフ波長 λ_c を $1.45 \mu\text{m}$ 以下とするには、

【数 2】

$$\Delta \leq 0.0874a^{-2} \quad (2)$$

10

の破線とする。さらに、波長 $1.625 \mu\text{m}$ 且つ曲げ半径 30mm での曲げ損失を $0.1 \text{dB} / 100 \text{turn}$ 以下とするには、

【数 3】

$$\Delta \geq 0.0101a^{-758} \quad (3)$$

の点線とする。

【 0 0 2 5 】

次に、 MFD の上限と必要なクラッド厚（最小 OCT ）を検出する手法を説明する。最小 OCT とは、波長 $1.625 \mu\text{m}$ で過剰損失が $0.01 \text{dB} / \text{km}$ 以下となる最外コアの中心とクラッド外周との最短距離を意味する。図 3 は、マルチコア光ファイバ 301 における、カットオフ波長 λ_c と MFD 、最小 OCT 、及びクロストーク XT との関係を説明する図である。ここでクロストーク XT は波長 $1.625 \mu\text{m}$ の値、 MFD は波長 $1.55 \mu\text{m}$ である。図 3 は、数値計算（有限要素法を用いた光ファイバの光学特性解析）により得た特性図である。具体的には、本図は、 MCF の MFD を変えながらクロストーク XT 、最小 OCT 及びカットオフ波長 λ_c を数値計算し、同じカットオフ波長 λ_c の値（例えば、 $\lambda_c = 1.45 \mu\text{m}$ ）となる構造をグラフ内にプロットして作成する。

20

【 0 0 2 6 】

図 3 の実線より、 MFD が大きくなると最小 OCT が大きくなる。図 3 の破線より、 F D が大きくなると XT が大きくなることが分かる。一方、カットオフ波長 λ_c を短波長化すると最小 OCT は大きくなる（実線）が、 XT はほぼ一定（破線）であることがわかる。ここで QPSK 信号で 1000km 以上の伝送を想定すると、必要な XT は $-47 \text{dB} / \text{km}$ となる。図 3 の破線より、 $\text{XT} = -47 \text{dB} / \text{km}$ でカットオフ波長 λ_c を $1.45 \mu\text{m}$ 以下とするには、 MFD を $10 \mu\text{m}$ 以下とする必要があることがわかる（上限 $\text{MFD} = 10 \mu\text{m}$ ）。さらに、図 3 の実線より、 MFD を $10 \mu\text{m}$ でカットオフ波長 λ_c を $1.45 \mu\text{m}$ 以下とするには、最小 OCT を $33 \mu\text{m}$ 以上とする必要がある（コア 12 の中心から MCF の外周までのクラッド 11 の厚みが $33 \mu\text{m}$ 以上あること）。

30

【 0 0 2 7 】

図 2 には、図 3 より求めた上限 $\text{MFD} = 10 \mu\text{m}$ の曲線（数 4）も描かれている。

40

【数 4】

$$\Delta \geq 0.0004a^2 - 0.003a + 0.0091 \quad (4)$$

【 0 0 2 8 】

図 2 において、 $\text{MFD} = 9.5 \mu\text{m}$ の曲線、 $\text{MFD} = 10 \mu\text{m}$ の曲線、カットオフ波長 $\lambda_c = 1.45 \mu\text{m}$ の曲線、及び曲げ損失 $\alpha_b = 0.1 \text{dB} / 100 \text{turn}$ の曲線に囲まれる領域に含まれるコア半径 a と比屈折率差 Δ 、及び図 3 より求めた最小 $\text{OCT} = 33 \mu\text{m}$ がマルチコア光ファイバ 301 の設計値となる。

【 0 0 2 9 】

50

すなわち、マルチコア光ファイバ 301 は、
断面における直径が $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であるクラッド 11 と、
前記断面において前記クラッドの中に正方格子状に配置された 4 個のコア 12 と、
を備え、
前記断面においてコア 12 の中心からクラッド 11 の外周までの最短距離（最小 OTC）が $33 \mu\text{m}$ 以上であること、及び
コア 12 の半径 a と、コア 12 とクラッド 11 との比屈折率差の絶対値 Δ との関係が数 1 から数 4 を満たすこと、
を特徴とする。

【0030】

また、マルチコア光ファイバ 301 の設計方法は図 16 の通りである。すなわち、当該設計方法は、

前記マルチコア光ファイバのカットオフ波長、クロストークの上限値、モードフィールド径、及び曲げ損失を仕様値として決定すること（ステップ S11）、

前記仕様値のカットオフ波長におけるモードフィールド径とクロストークとの関係図（図 3 の第 2 縦軸）から前記仕様値のクロストークの上限値に対応する対応モードフィールド径を検出すること（ステップ S12）、

前記仕様値のカットオフ波長におけるモードフィールド径と前記マルチコア光ファイバの断面における前記コアの中心から前記クラッドの外周までの最短距離（最小 OTC）との関係図（図 3 の第 1 縦軸）から前記対応モードフィールド径に対応する前記最小 OTC を検出すること（ステップ S13）、

前記コアの半径 a と、前記コアと前記クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との光学特性図（図 2）に、前記仕様値のモードフィールド径を満たす第 1 曲線、前記仕様値のカットオフ波長を満たす第 2 曲線、前記仕様値の曲げ損失を満たす第 3 曲線、及び前記対応モードフィールド径を満たす第 4 曲線を描くこと（ステップ S14）、

前記光学特性図の中の、前記第 1 曲線、前記第 2 曲線、前記第 3 曲線、及び前記第 4 曲線で囲まれた領域に含まれる前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ を検出すること（ステップ S15）、

検出された、前記最小 OTC、前記コアの半径 a 、及び前記比屈折率差の絶対値 Δ を前記マルチコア光ファイバの設計値とすること（ステップ S16）、
を行う。

【0031】

（実施形態 2）

図 4 は、本実施形態のマルチコア光ファイバ 302 の構造を説明する図である。図 4（a）はマルチコア光ファイバ 302 の断面図、図 4（b）はマルチコア光ファイバ 302 のコア近傍の屈折率分布を説明する図である。マルチコア光ファイバ 302 のクラッド径やコア数は、図 1 のマルチコア光ファイバ 301 と同様に $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 、4 コアであり、各コアは略同一の屈折率分布を有する。

【0032】

マルチコア光ファイバ 302 は、コア 12 とコア 12 を取り囲む第 1 クラッド領域 11-1 と第 1 クラッド領域 11-1 を取り囲む第 2 クラッド領域 11-2 を有し、屈折率がコア 12、第 2 クラッド領域 11-2、第 1 クラッド領域 11-1 の順に低くなる。このような構造とすることで、光の閉じ込めの制御性を高めることができ、図 3 で示した MFD の範囲や伝送距離を改善することができる。

【0033】

図 5 は、マルチコア光ファイバ 302 における、所定の MFD、カットオフ波長、XT を得るための構造条件の一例である。図 5 は、数値計算（有限要素法を用いた光ファイバの光学特性解析）により得た特性図である。具体的には、本図は、MFD 毎に、MCF の比屈折率差 Δ を変えながら比屈折率差 Δ_2 、クロストーク XT 及びカットオフ波長 λ_c を数値計算し、同じカットオフ波長（ $\lambda_c = 1.45 \mu\text{m}$ ）となる構造及び同じクロストー

10

20

30

40

50

ク ($X T = -54 \text{ dB/km}$) をグラフ内にプロットして作成する。図 5 (a) ~ (c) は、それぞれ波長 $1.55 \mu\text{m}$ における MFD を $10.1 \mu\text{m}$ 、 $10.7 \mu\text{m}$ 、 $11.3 \mu\text{m}$ とし、いずれも a_2/a を 3.0 として計算している。

【0034】

図 5 の破線より原点側の領域でカットオフ波長 λ_c を $1.45 \mu\text{m}$ 以下とすることができ。またコア位置 (MCF の中心から半径方向の位置) は波長 $1.625 \mu\text{m}$ で過剰損失が 0.01 dB/km 以下になるようにしている。図 5 の実線より原点の反対側の領域で波長 $1.625 \mu\text{m}$ における $X T$ が -54 dB/km 以下となる。このクロストーク $X T$ 条件で 1000 km の伝送距離で信号フォーマットを 16 QAM まで拡張できるほか、 $QPSK$ 信号で約 5000 km まで伝送距離を拡張できる。

10

【0035】

図 5 (a) から図 5 (c) より、 $1.45 \mu\text{m}$ 以下のカットオフ波長を得るための構造条件は MFD 毎に比屈折率差 Δ の上限値 Δ_{max} (破線の横軸に対する最大値) を有し、MFD の拡大に伴って上限値 Δ_{max} が減少することがわかる。

また、クロストーク $X T$ が -54 dB/km 以下を実現できる比屈折率差 Δ の下限値 Δ_{min} 、および比屈折率差 Δ_2 の範囲 ($\Delta_{2\text{max}} - \Delta_{2\text{min}}$) は、実線と破線の交点から定められる。

【0036】

つまり、図 5 は、カットオフ波長 λ_c が $1.45 \mu\text{m}$ 以下、且つクロストーク $X T$ が -54 dB/km 以下を実現できる比屈折率差 Δ と Δ_2 の範囲を MFD 毎に説明する図といえる。

20

【0037】

図 6 も、マルチコア光ファイバ 302 における、所定の MFD、カットオフ波長、 $X T$ を得るための構造条件の一例を示す。図 6 も、数値計算 (有限要素法を用いた光ファイバの光学特性解析) により得た特性図である。具体的には、本図は、MFD 毎に、MCF の比屈折率差 Δ を変えながら比屈折率差 Δ_2 、クロストーク $X T$ 及びカットオフ波長 λ_c を数値計算し、同じカットオフ波長 ($\lambda_c = 1.45 \mu\text{m}$) となる構造及び同じクロストーク ($X T = -54 \text{ dB/km}$) をグラフ内にプロットして作成する。図 6 (a) ~ (c) は、それぞれ a_2/a を 3.0 、 2.5 、 2.0 とし、いずれも波長 $1.55 \mu\text{m}$ の MFD を $10.1 \mu\text{m}$ として計算している。なお、図 6 (a) は図 5 (a) と同じ内容である。

30

【0038】

ここで、横軸の比屈折率差 Δ の最大値が 0.8% であるが、これは、コアを純石英ガラスとする場合、一般的にコアの屈折率に対してクラッドの屈折率を 0.8% 以上下げるとは困難であるからである。ここで図 6 (b) や (c) のように a_2/a が 2 や 2.5 のときの Δ_{max} が 0.8% 以上となるが、上記理由により 0.8% 以上の Δ を訴求することにあまり意味がなく、本図では割愛している。

【0039】

図 6 (a) から図 6 (c) に示されるように、 a_2/a を小さくしていくと、 Δ_{min} は大きくなる。一方、比屈折率差 Δ_2 の範囲 ($\Delta_{2\text{max}} - \Delta_{2\text{min}}$) は減少することが分かる。

40

【0040】

図 5 及び図 6 より、次のことがわかる。

(1) Δ_{max} は、 $a_2/a = 3.0$ の構造条件から定められる ($a_2/a = 2.5$ や 2.0 では 0.8% を越えるため無意味)。

(2) Δ_{min} と Δ_2 の範囲は a_2/a と MFD の関数として定めることができる。

【0041】

図 7 は、マルチコア光ファイバ 302 の MFD と Δ の範囲の関係を説明する図である。ここで、上記 (1) を考慮し、 $a_2/a = 3.0$ としている。図 5 で示した Δ の上限 (Δ_{max}) と下限 (Δ_{min}) を、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の MFD の関数で表している。図 7 より、 Δ_{max} は MFD に対して次式のように線形に減少する。

50

【数 5】

$$\Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223$$

(5)

【0042】

また λ_c が $1.45 \mu m$ 以下、且つ XT が $-54 dB/km$ 以下（図 5 で説明した条件）を満たす最大の MFD は、 Δ_{max} と Δ_{min} の交点である $MFD = 11.4 \mu m$ である。図 2 には、この最大 MFD の曲線（数 6）も記載されている。

【数 6】

$$\Delta \geq 0.0003a^2 - 0.0024a + 0.0079$$

(6)

10

【0043】

図 4 の MCF 構造では、電界分布（MDF）の形状がコア 12 の半径 a と、コア 12 と第 1 クラッド 11-1 との比屈折率差 Δ によって支配的に決定される。このため、図 2 を用いてコア 12 の半径 a と比屈折率差 Δ の条件を見出すことができる。

つまり、 $a_2/a = 3.0$ の場合、図 2 において、 $MFD = 9.5 \mu m$ の曲線、及び $MFD = 11.4 \mu m$ の曲線に囲まれる領域に含まれるコア半径 a と比屈折率差 Δ が、MDF から求められるマルチコア光ファイバ 302 の設計値となる。なお、図 4 の MCF 構造では、カットオフ波長 λ_c と曲げ損失 α_b が比屈折率差 Δ_2 に依存して変化するため、図 2 の破線と点線は考慮しない。

20

【0044】

ここから、図 2 より求めたコア半径 a と比屈折率差 Δ の範囲を次のようにして限定していく。

(a) 比屈折率差 Δ の上限値 Δ_{max} について

数 5 は、 $a_2/a = 3.0$ のときの MFD に対する Δ_{max} の変動を表しており、 a_2/a が異なる値の場合は他の数式となる。しかし、図 5 と図 6 から判断できるように、 a_2/a が 3.0 より小さくなれば、 Δ_{max} は大きくなり 0.8% を超えるようになる。前述したように、 Δ が 0.8% を超える構造は現実的でない。このため、 Δ の上限値として $a_2/a = 3.0$ のときの数 5（図 7 の直線）を規定しておけば、 a_2/a が他の値でも数 5 の結果を流用できる。

30

【0045】

(b) 比屈折率差 Δ の下限値 Δ_{min} について

図 6 に示されるように、 a_2/a が 3.0 より小さくなれば Δ_{min} は大きくなる。つまり、 Δ_{min} については、 a_2/a が 3.0 より小さくなれば図 7 に示される曲線が上昇するため、 a_2/a が他の値に対して数 5 の結果を流用できない（ a_2/a 毎に Δ_{min} の曲線が変動する。）。

図 8 は、 a_2/a 毎に Δ_{min} の曲線（図 7 の曲線）が変動することを説明する図である。詳細には、図 8 は、マルチコア光ファイバ 302 の a_2/a に対する Δ_{min} の変動を波長 $1.55 \mu m$ における MFD 毎に示した図である。図 5 および図 6 に示したように、 Δ_{min} は a_2/a と MFD によって変化する。ここで、図 8 から Δ_{min} の変動を a_2/a と MFD の関数で表すことを考える。

40

図 9 は、図 8 で示す a_2/a と Δ_{min} の関係を 2 次関数（ $k_1 x^2 + k_2 x + k_3$ ； x は a_2/a ）で近似したときの、各係数（ k_1 、 k_2 、 k_3 ）を MFD の関数で表したものである。これらの結果より Δ の下限 Δ_{min} は次式で与えられる。

【数 7】

50

$$\begin{aligned}\Delta \geq & (0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a) \\ & + (0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388)\end{aligned}\quad (7)$$

つまり、図7の Δ_{min} の曲線は a_2/a によって変動する。そして、MFDの最大値($a_2/a = 3.0$ のときに 11.4)も a_2/a によって変化する。

【0046】

10

さらに、マルチコア光ファイバ302には、 Δ_2 のパラメータもある。

(c) 比屈折率差 Δ_2 の上限値 Δ_{2max} について

図10は、 a_2/a 毎に Δ_{2max} が変動する(図6(a)~(c)において Δ_{2max} が変動している)ことを説明する図である。詳細には、図10はマルチコア光ファイバ302の a_2/a に対する Δ_{2max} の変動を波長 $1.55\mu m$ におけるMFD毎に示した図である。図5および図6に示したように、 Δ_{2max} は a_2/a とMFDによって変化する。ここで、図10から Δ_{2max} の変動を a_2/a とMFDの関数で表すことを考える。

図11は、図10で示す a_2/a と Δ_{2max} の関係を2次関数($k_1x^2 + k_2x + k_3$; x は a_2/a)で近似したときの、各係数(k_1 、 k_2 、 k_3)をMFDの関数で表したものである。これらの結果より Δ_2 の上限 Δ_{2max} は次式で与えられる。

20

【数8】

$$\begin{aligned}\Delta_2 \leq & (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\ & + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312)\end{aligned}\quad (8)$$

【0047】

30

(d) 比屈折率差 Δ_2 の下限値 Δ_{2min} について

図12は、 a_2/a 毎に Δ_{2min} が変動する(図6(a)~(c)において Δ_{2min} が変動している)ことを説明する図である。詳細には、図12はマルチコア光ファイバ302の a_2/a に対する Δ_{2min} の変動を波長 $1.55\mu m$ におけるMFD毎に示した図である。図5および図6に示したように、 Δ_{2min} は a_2/a とMFDによって変化する。ここで、図12から Δ_{2min} の変動を a_2/a とMFDの関数で表すことを考える。

図13は、図12で示す a_2/a と Δ_{2min} の関係を2次関数($k_1x^2 + k_2x + k_3$; x は a_2/a)で近似したときの、各係数(k_1 、 k_2 、 k_3)をMFDの関数で表したものである。これらの結果より Δ_2 の下限 Δ_{2min} は次式で与えられる。

40

【数9】

$$\begin{aligned}\Delta_2 \leq & (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\ & + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488)\end{aligned}\quad (9)$$

【0048】

前述のように、マルチコア光ファイバ302の構造では、図2においてカットオフ波長 c (破線)と曲げ損失 αb (点線)を考慮しないが、数8と数9から比屈折率差 Δ_2 の範

50

囲が制限され、カットオフ波長 λ_c は $1.45 \mu m$ 以下となる。

【 0 0 4 9 】

すなわち、マルチコア光ファイバ 3 0 2 は、
断面における直径が $125 \pm 1 \mu m$ であるクラッド 1 1 と、
前記断面においてクラッド 1 1 の中に正方格子状に配置された 4 個のコア 1 2 と、
を備え、

クラッド 1 1 は、それぞれのコア 1 2 を取り囲む第 1 クラッド 1 1 - 1 と全ての第 1 クラッド 1 1 - 1 を包含する第 2 クラッド 1 1 - 2 からなり、

屈折率は、コア 1 2 が最も高く、第 1 クラッド 1 1 - 1 が最も低く、

コア 1 2 の半径 a (μm) と、コア 1 2 と第 1 クラッド 1 1 - 1 との比屈折率差の絶対値 Δ との関係が数 C 2 を満たすこと、

前記比屈折率差の絶対値 Δ が数 C 3 を満たすこと、及び

第 2 クラッド 1 1 - 2 とコア 1 2 との比屈折率差の絶対値 Δ_2 が数 C 4 を満たすことを特徴とする。

【数 C 2】

$$0.0003a^2 - 0.0024a + 0.0079 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094 \quad (C 2)$$

【数 C 3】

$$\begin{aligned} & (0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a) \\ & + (0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388) \leq \Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223 \quad (C 3) \end{aligned}$$

【数 C 4】

$$\begin{aligned} & (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\ & + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488) \\ & \leq \Delta_2 \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\ & + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312) \quad (C 4) \end{aligned}$$

ここで、 a_2 は第 1 クラッド 1 1 - 1 の半径 (μm)、MFD は所望のモードフィールド径 (μm) である。

【 0 0 5 0 】

また、マルチコア光ファイバ 3 0 2 の設計方法は図 1 7 の通りである。すなわち、当該設計方法は、

マルチコア光ファイバ 3 0 2 のカットオフ波長 λ_c 、クロストーク X T の上限値、モードフィールド径 MFD、及び曲げ損失 α_b を仕様値として決定すること (ステップ S 2 1)、

前記コアと前記第 1 クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ 、前記コアと前記第 2 クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 、モードフィールド径 MFD、及び前記コアの半径 a と前記

第1クラッドの半径 a_2 との比率 (a_2/a) の関係図 (図5及び図6) に、前記仕様値のカットオフ波長より短い波長且つ前記仕様値のクロストークの上限値以下である領域を描くこと (ステップS22)、

仮決めした任意の前記コアの半径と前記第1クラッドの半径との比率 (a_2/a) の前記領域に含まれる前記コアと前記第1クラッドとの比屈折率差の絶対値の最大値 Δ_{max} と最小値 Δ_{min} を検出すること (ステップS23、S24、 Δ_{min} について、MFDと a_2/a との関係式は数7で表すことができる。)、

MFDと Δ とのグラフにMFDの変化に対する Δ_{max} と Δ_{min} の変動曲線を記載し、前記変動曲線が交差するときの対応MFDを検出すること (ステップS25)、

前記コアの半径 a と、前記コアと前記クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との光学特性図に、前記仕様値のモードフィールド径を満たす第1曲線、及び前記対応モードフィールド径を満たす第2曲線を描くこと (ステップS26)、

前記光学特性図の中の、前記第1曲線及び前記第2曲線で囲まれた領域に含まれる前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ を検出すること (ステップS27)、

前記第1曲線及び前記第2曲線で囲まれた領域に含まれる前記比屈折率差の絶対値 Δ のうち、数C3を満たす前記比屈折率差の絶対値 Δ の範囲を計算すること (ステップS28)、

前記第1曲線及び前記第2曲線で囲まれた領域に含まれる前記比屈折率差の絶対値 Δ と前記任意の比率 (a_2/a) を数C4に代入して前記第2クラッドと前記コアとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 の範囲を計算すること (ステップS29)、及び

検出された、前記コアの半径 a 、前記比率 (a_2/a)、前記比屈折率差の絶対値 Δ の範囲、及び前記第2クラッドと前記コアとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 の範囲を前記マルチコア光ファイバの設計値とすること (ステップS30)、
を行う。

なお、ステップS30で設計値が得られない場合、 a_2/a を変えてステップS23から作業を繰り返す。

【0051】

(実施形態3)

図14は、本実施形態のマルチコア光ファイバ303の構造を説明する図である。図14(a)はマルチコア光ファイバ303の断面図、図14(b)はマルチコア光ファイバ303のコア近傍の屈折率分布を説明する図である。マルチコア光ファイバ303のクラッド径やコア数は、図1のマルチコア光ファイバ301と同様に $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 、4コアであり、各コアは略同一の屈折率分布を有する。

【0052】

マルチコア光ファイバ303は、コア12とコア12を取り囲む第3クラッド領域11-3、第3クラッド領域11-3を取り囲む第1クラッド領域11-1、及び第1クラッド領域11-1を取り囲む第2クラッド領域11-2を有する。屈折率はコア12、第2クラッド領域11-2、第1クラッド領域11-1の順に低くなる。第3クラッド領域11-3の屈折率は、第2クラッド領域11-2の屈折率と同じである。

【0053】

マルチコア光ファイバ303は、クラッドの屈折率がマルチコア光ファイバ302より多く、パラメータが増える。このため、マルチコア光ファイバ303は、マルチコア光ファイバ302よりMFDの拡大およびXTの低減が可能となる。このとき、実施形態2で説明した a 、 a_2 、 Δ 、 Δ_2 の範囲に設計すると、同等の光学特性が得られ、好ましい。

【0054】

(実施形態4)

図15は、マルチコア光ファイバの断面構造を比較する図である。一般的に光ファイバは機械的信頼性の担保の観点でガラス(クラッド)の周囲に樹脂等による被覆層を有する。図15(a)は、その被覆層を含む直径が $250 \pm 15 \mu\text{m}$ である標準的なマルチコア光ファイバを説明する図である。図15(b)は、その被覆層を含む直径が 200 ± 20

10

20

30

40

50

μm であるマルチコア光ファイバを説明する図である。被覆層を含む直径が $200 \pm 20 \mu\text{m}$ でも機械的信頼性や損失特性を維持できることが知られている。上述したマルチコア光ファイバ(301~303)において、被覆層を含む直径を $200 \pm 20 \mu\text{m}$ とすることで、より細径のマルチコア光ファイバを光ケーブルに実装することができ、高密度かつ多心の光ケーブルを実現でき、好ましい。

【0055】

[付記]

本発明のポイントは、標準クラッド径のMCFにおいて、屈折率分布及びコア位置を所定の条件とすることで、シングルモード帯域の拡張とクロストークXTの低減を両立したことである。本発明の具体的なマルチコア光ファイバは次の通りである。

10

【0056】

第1のマルチコア光ファイバは図1の構造であって、
断面における直径が $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であるクラッドと、
前記断面において前記クラッドの中に正方格子状に配置された4個のコアと、
を備え、
前記断面において前記コアの中心から前記クラッドの外周までの最短距離が $33 \mu\text{m}$ 以上であること、及び
前記コアの半径 $a (\mu\text{m})$ と、前記コアと前記クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との関係が数C1を満たすこと、
を特徴とするマルチコア光ファイバである。

20

【数C1】

$$0.0004a^2 - 0.003a + 0.0091 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094,$$

$$\Delta \leq 0.0874a^{-2}, \text{ 且つ}$$

(C1)

$$\Delta \geq 0.0101a^{-758}$$

【0057】

そして、第1のマルチコア光ファイバの設計方法は、
前記マルチコア光ファイバのカットオフ波長、クロストークの上限値、モードフィールド径、及び曲げ損失を仕様値として決定すること、
前記仕様値のカットオフ波長におけるモードフィールド径とクロストークとの関係図(図3の第2縦軸)から前記仕様値のクロストークの上限値に対応する対応モードフィールド径を検出すること、
前記仕様値のカットオフ波長におけるモードフィールド径と前記マルチコア光ファイバの断面における前記コアの中心から前記クラッドの外周までの最短距離(最小OTC)との関係図(図3の第1縦軸)から前記対応モードフィールド径に対応する前記最小OTCを検出すること、
前記コアの半径 a と、前記コアと前記クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との光学特性図(図2のグラフ)に、前記仕様値のモードフィールド径を満たす第1曲線、前記仕様値のカットオフ波長を満たす第2曲線、前記仕様値の曲げ損失を満たす第3曲線、及び前記対応モードフィールド径を満たす第4曲線を描くこと、
前記光学特性図の中の、前記第1曲線、前記第2曲線、前記第3曲線、及び前記第4曲線で囲まれた領域に含まれる前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ を検出すること、
検出された、前記最小OTC、前記コアの半径 a 、及び前記比屈折率差の絶対値 Δ を前記マルチコア光ファイバの設計値とすること、
を行う。

30

40

【0058】

また、第2のマルチコア光ファイバは図4の構造であって、

50

断面における直径が $125 \pm 1 \mu\text{m}$ であるクラッドと、
 前記断面において前記クラッドの中に正方格子状に配置された 4 個のコアと、
 を備え、
 前記クラッドは、それぞれの前記コアを取り囲む第 1 クラッドと全ての前記第 1 クラッドを包含する第 2 クラッドからなり、
 屈折率は、前記コアが最も高く、前記第 1 クラッドが最も低く、
 前記コアの半径 a (μm) と、前記コアと前記第 1 クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との関係が数 C 2 を満たすこと、
 前記比屈折率差の絶対値 Δ が数 C 3 を満たすこと、及び
 前記第 2 クラッドと前記コアとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 が数 C 4 を満たすこと
 を特徴とするマルチコア光ファイバである。

10

【数 C 2】

$$0.0003a^2 - 0.0024a + 0.0079 \leq \Delta \leq 0.0005a^2 - 0.0032a + 0.0094 \quad (\text{C } 2)$$

【数 C 3】

$$\begin{aligned} & (0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a) \\ & + (0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388) \leq \Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223 \quad (\text{C } 3) \end{aligned}$$

20

【数 C 4】

$$\begin{aligned} & (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\ & + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488) \\ & \leq \Delta_2 \leq \\ & (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\ & + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312) \quad (\text{C } 4) \end{aligned}$$

30

ここで、 a_2 は前記第 1 クラッドの半径 (μm)、 MFD は所望のモードフィールド径 (μm) である。

【0059】

40

そして、第 2 のマルチコア光ファイバの設計方法は、
 前記マルチコア光ファイバのカットオフ波長、クロストークの上限値、モードフィールド径、及び曲げ損失を仕様値として決定すること、
 前記コアと前記第 1 クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ 、前記コアと前記第 2 クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 、モードフィールド径 MFD 、及び前記コアの半径 a と前記第 1 クラッドの半径 a_2 との比率 (a_2/a) の関係図 (図 5 及び図 6) に、前記仕様値のカットオフ波長より短い波長且つ前記仕様値のクロストークの上限値以下である領域を描くこと、

仮決めした任意の前記コアの半径と前記第 1 クラッドの半径との比率 (a_2/a) の前記領域に含まれる前記コアと前記第 1 クラッドとの比屈折率差の絶対値の最大値 Δ_{max}

50

と最小値 $\Delta_{\min}$ を検出すること ($\Delta_{\min}$ について、 MFD と a_2/a との関係式は数 7 で表すことができる。)、

MFD と Δ とのグラフに MFD の変化に対する $\Delta_{\max}$ と $\Delta_{\min}$ の変動曲線を記載し、前記変動曲線が交差するときの対応 MFD を検出すること、

前記コアの半径 a と、前記コアと前記クラッドとの比屈折率差の絶対値 Δ との光学特性図に、前記仕様値のモードフィールド径を満たす第 1 曲線、及び前記対応モードフィールド径を満たす第 2 曲線を描くこと、

前記光学特性図の中の、前記第 1 曲線及び前記第 2 曲線で囲まれた領域に含まれる前記コアの半径 a と前記比屈折率差の絶対値 Δ を検出すること、

前記第 1 曲線及び前記第 2 曲線で囲まれた領域に含まれる前記比屈折率差の絶対値 Δ のうち、数 C 3 を満たす前記比屈折率差の絶対値 Δ の範囲を計算すること、

前記第 1 曲線及び前記第 2 曲線で囲まれた領域に含まれる前記比屈折率差の絶対値 Δ と前記任意の比率 (a_2/a) を数 9 に代入して前記第 2 クラッドと前記コアとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 の範囲を計算すること、及び

検出された、前記コアの半径 a 、前記比率 (a_2/a)、前記比屈折率差の絶対値 Δ の範囲、及び前記第 2 クラッドと前記コアとの比屈折率差の絶対値 Δ_2 の範囲を前記マルチコア光ファイバの設計値とすること、

を行う。

【数 C 3】

$$\begin{aligned} & (0.0013MFD^2 - 0.0296MFD + 0.1735)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0129MFD^2 + 0.2885MFD - 1.6141)(a_2/a) \\ & + (0.0419MFD^2 - 0.9096MFD + 4.9388) \leq \Delta \leq -0.0015MFD + 0.0223 \quad (C3) \end{aligned}$$

【数 C 4】

$$\begin{aligned} & (0.0026MFD^2 - 0.0573MFD + 0.31)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0124MFD^2 + 0.2683MFD - 1.4515)(a_2/a) \\ & + (0.0141MFD^2 - 0.3045MFD + 1.6488) \\ & \leq \Delta_2 \leq \\ & (0.002MFD^2 - 0.0422MFD + 0.2215)(a_2/a)^2 \\ & + (-0.0098MFD^2 + 0.205MFD - 1.0734)(a_2/a) \\ & + (0.012MFD^2 - 0.2533MFD + 1.3312) \quad (C4) \end{aligned}$$

ここで、 a_2 は前記第 1 クラッドの半径 (μm)、 MFD は所望のモードフィールド径 (μm) である。

【0060】

(効果)

本発明は、標準クラッド径を有する MCF について、シングルモード波長帯域を S バンドまで拡張しながら低い XT を実現することができる。

【符号の説明】

【0061】

11 : クラッド

11-1 : 第 1 クラッド

10

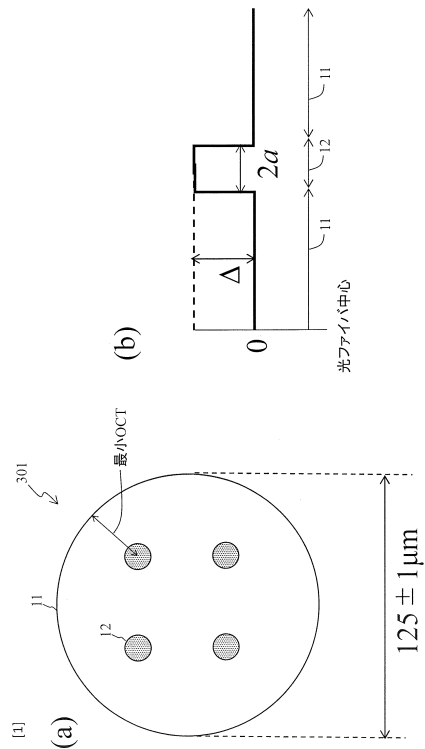
20

30

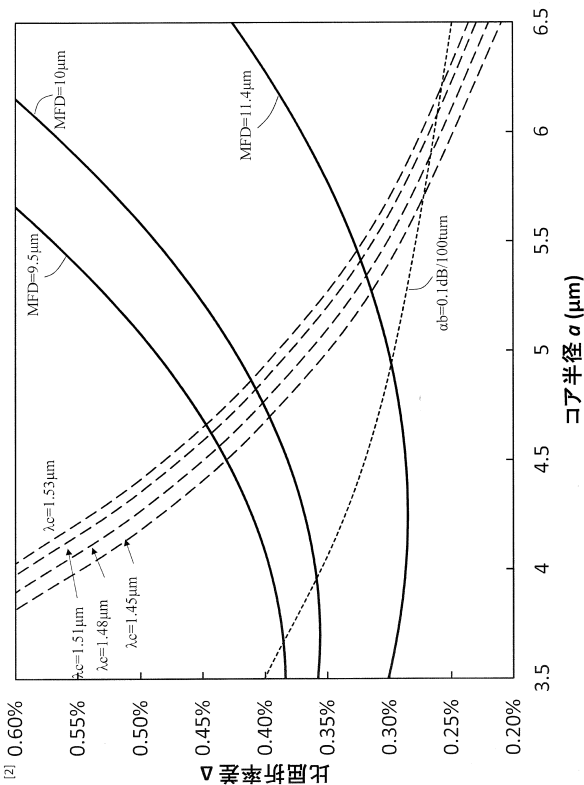
40

50

1 1 - 2 : 第 2 クラッド
1 1 - 3 : 第 3 クラッド
1 2 : コア
3 0 1 ~ 3 0 3 : マルチコア光ファイバ
【図面】
【図 1】



【図 2】



10

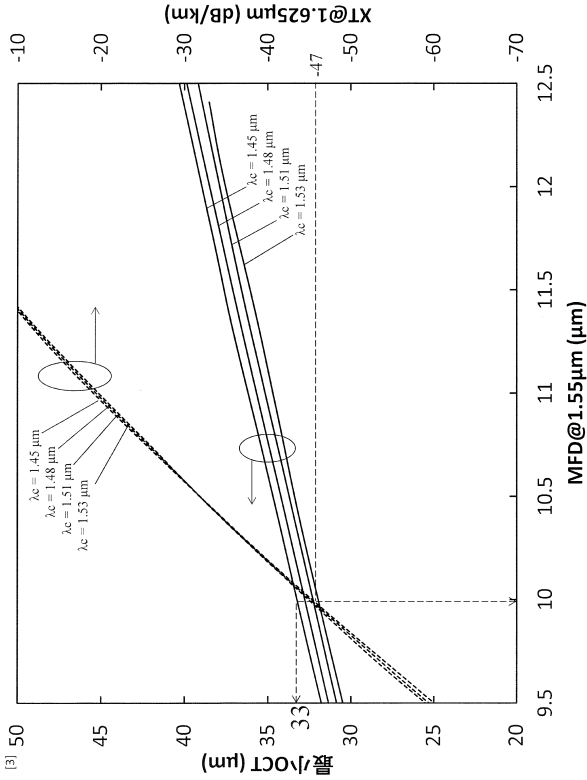
20

30

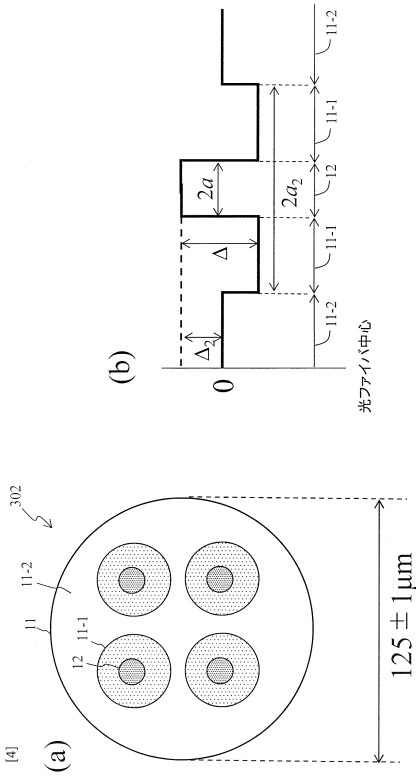
40

50

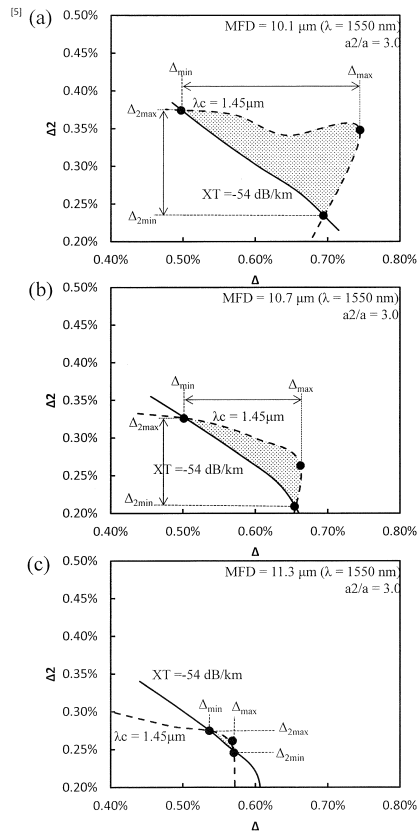
【図 3】



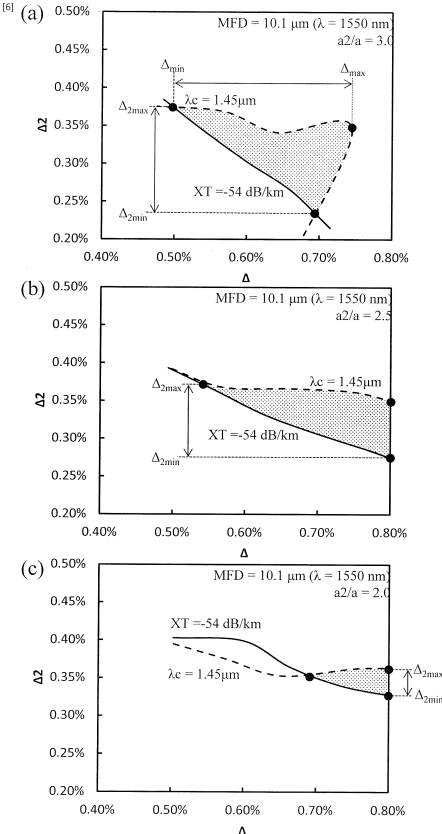
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

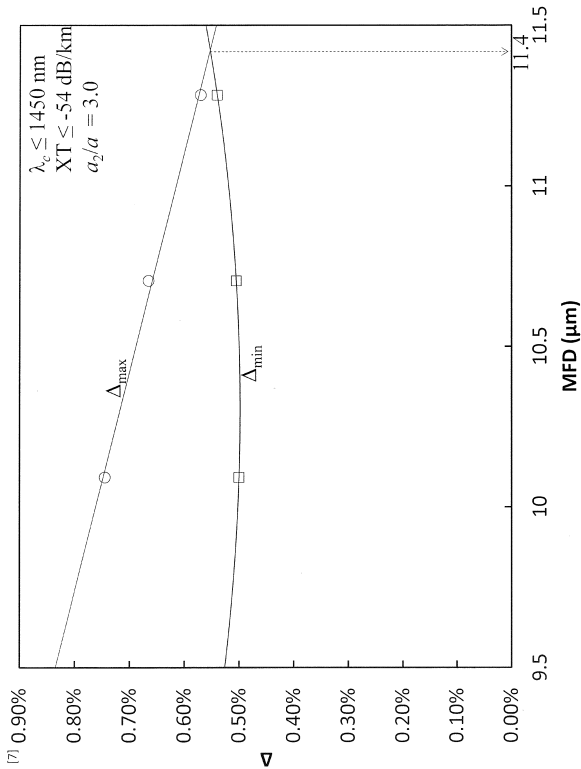
20

30

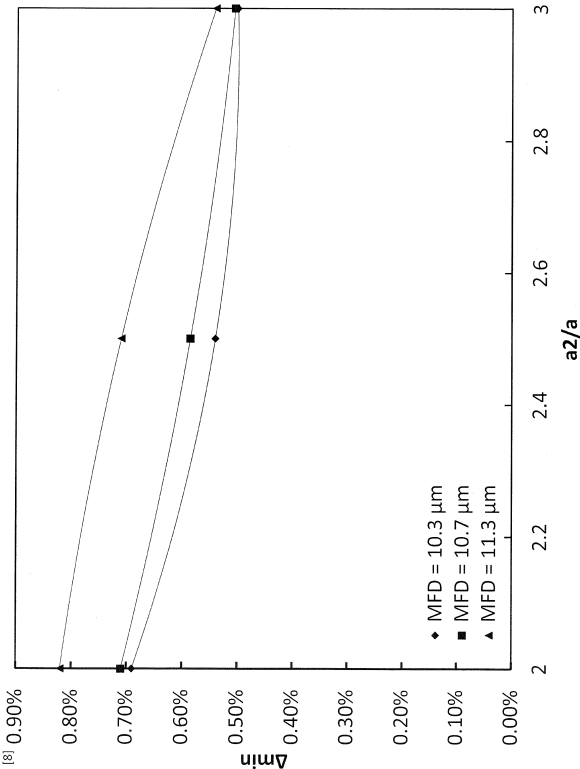
40

50

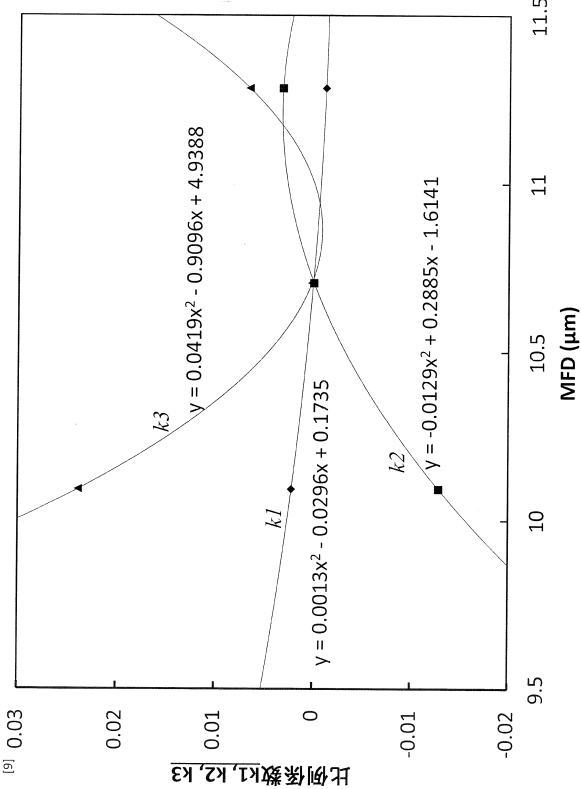
【図 7】



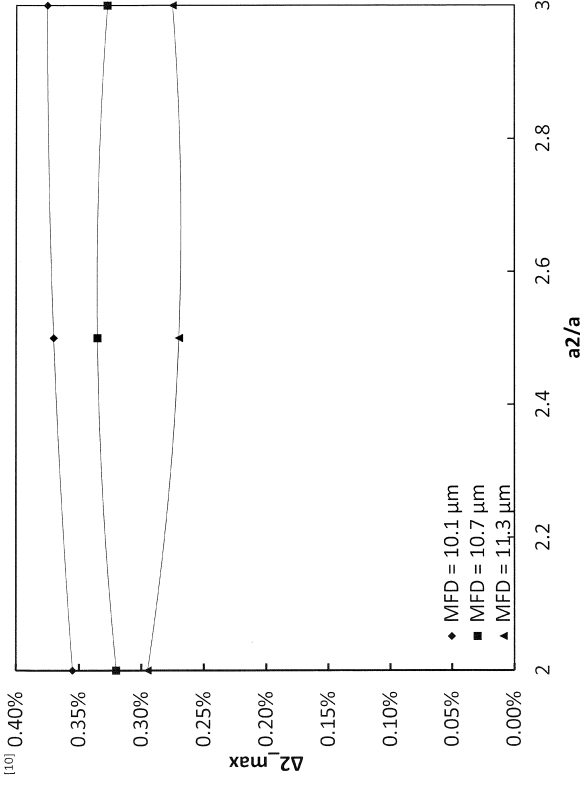
【図 8】



【図 9】



【図 10】



10

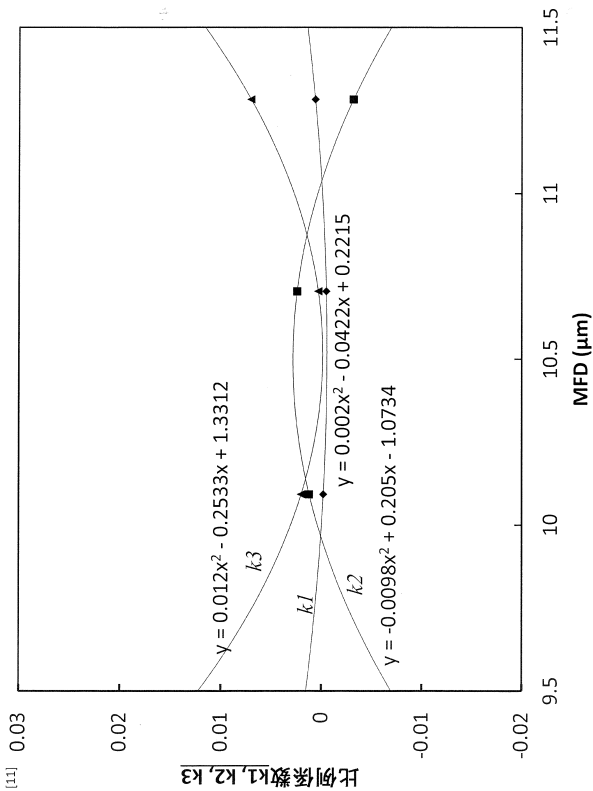
20

30

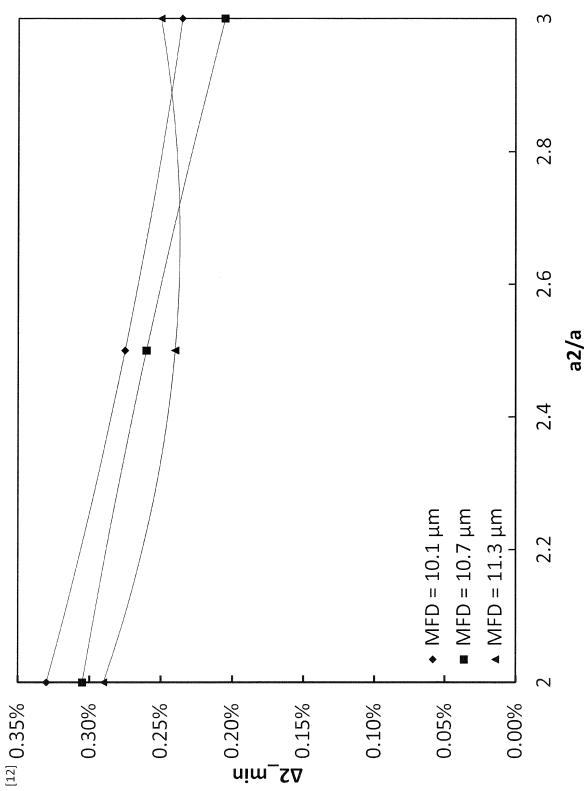
40

50

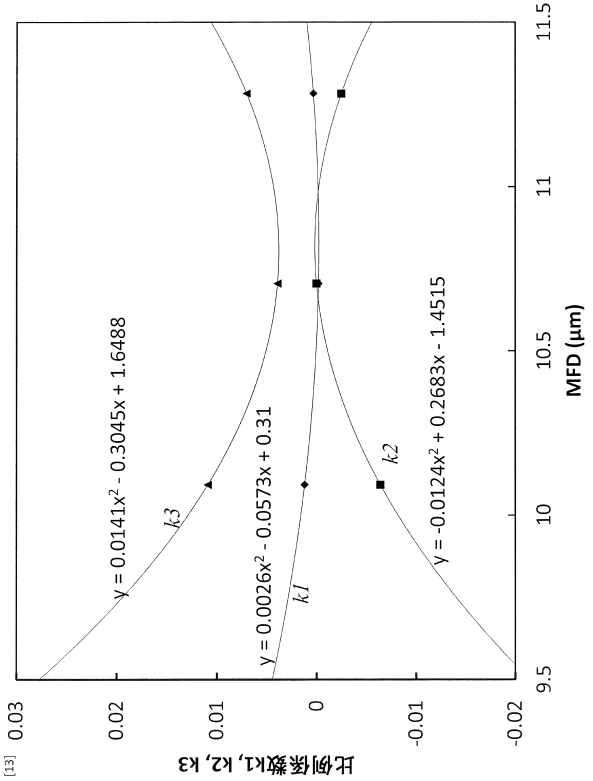
【図 1 1】



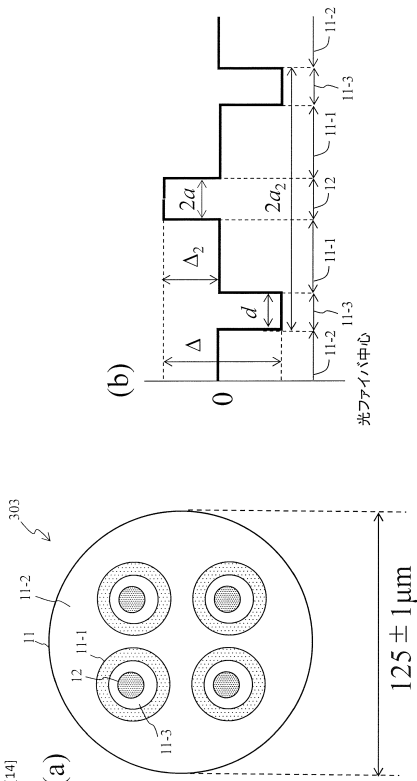
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



10

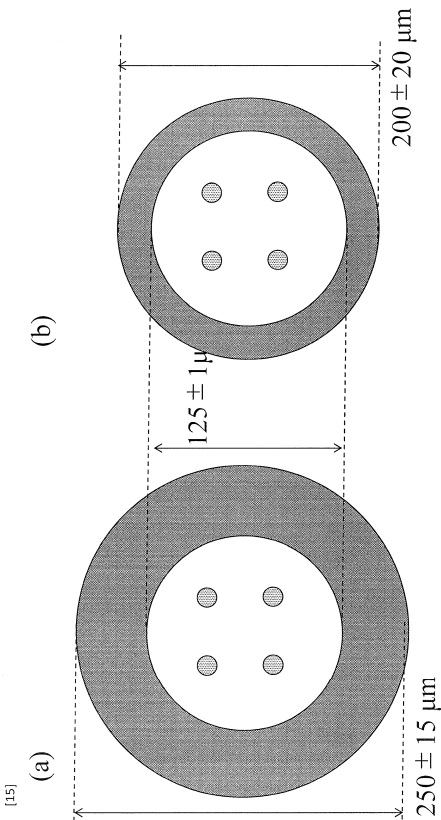
20

30

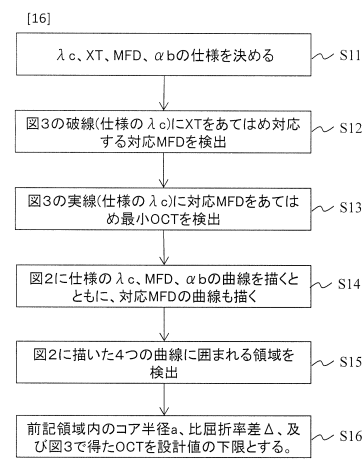
40

50

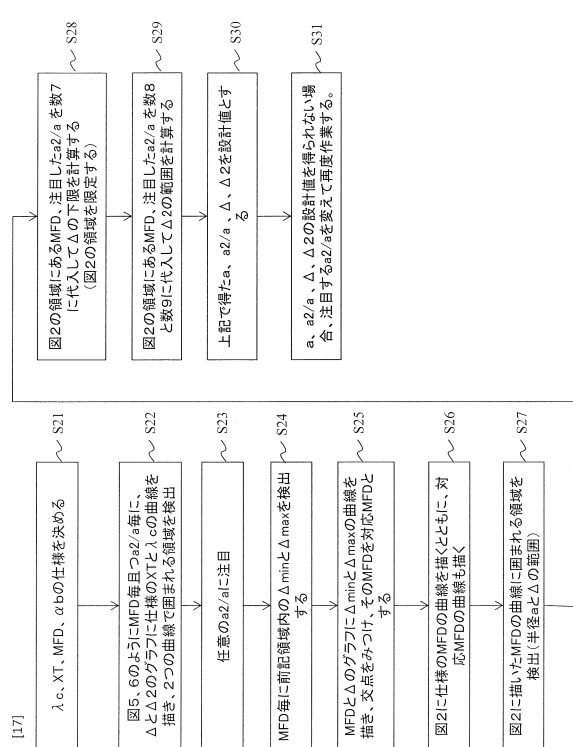
【図 15】



【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

(72)発明者 坂本 泰志
東京都千代田区大手町一丁目 5 番 1 号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 寒河江 悠途
東京都千代田区大手町一丁目 5 番 1 号 日本電信電話株式会社内

審査官 堀部 修平

(56)参考文献 特開 2 0 2 0 - 1 1 5 1 9 1 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 5 / 1 3 3 4 0 7 (W O , A 1)
特開 2 0 1 3 - 0 8 8 4 5 8 (J P , A)
特開 2 0 1 3 - 0 9 7 1 7 3 (J P , A)
米国特許第 0 9 1 5 1 8 8 7 (U S , B 2)
特開 2 0 2 2 - 0 1 5 7 4 6 (J P , A)
MATSUI, T. et al. , Step-index profile multi-core fibre with standard 125 micro M cladding t
o full-band application , ECOC 2019 , IET , 2019年09月26日

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
G 0 2 B 6 / 0 2 - 6 / 0 3 6
G 0 2 B 6 / 0 3 6
G 0 2 B 6 / 4 4
S c o p u s