

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7172634号  
(P7172634)

(45)発行日 令和4年11月16日(2022.11.16)

(24)登録日 令和4年11月8日(2022.11.8)

(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

請求項の数 1 (全14頁)

(21)出願番号	特願2019-6491(P2019-6491)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(22)出願日	平成31年1月18日(2019.1.18)	(74)代理人	100119677 弁理士 岡田 賢治
(65)公開番号	特開2020-115191(P2020-115191 A)	(74)代理人	100115794 弁理士 今下 勝博
(43)公開日	令和2年7月30日(2020.7.30)	(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
審査請求日	令和3年4月15日(2021.4.15)	(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
		審査官	山本 貴一

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半径aの単峰型屈折率分布の4個のコアと、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 となる、前記コアより屈折率が低く、直径が  $125 \pm 1 \mu\text{m}$  であるクラッド領域と、を有するマルチコア光ファイバであって、

波長  $1550 \text{ nm}$  におけるモードフィールド径  $MFD$  が  $9 \sim 12 \mu\text{m}$  であり、波長  $1625 \text{ nm}$ 、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、

カットオフ波長が  $1530 \text{ nm}$  以下であり、前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離  $OCT$ 、前記コアの間隔の最小値、及び波長  $1550 \text{ nm}$  における  $MFD$  の関係が数  $C4$  を満たすように、4個の前記コアが配置され、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比屈折率差が設定されていることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

【数 C 4】

$$OCT \geq 2.82MFD + 3.7$$

$$A \leq -3.99MFD + 83.15$$

(C 4)

ただし、前記半径 $a$ 、前記最小距離 $OCT$ 、前記モードフィールド径 $MFD$ 、及び前記コア間隔の最小値 の単位は $\mu m$ である。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、複数のコア領域を有するマルチコア光ファイバ(MCF)及びその設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

MCFが、空間分割多重技術を用いること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。MCFによる大容量の空間分割多重伝送は、例えば非特許文献1、2など数多く報告されているが、非特許文献1、2を含む多くの報告で示されているMCFは、クロストーク(XT)低減のために十分広いコア間隔 を設定するため、クラッド径が $150 \sim 230 \mu m$ と従来の光ファイバに比べて大きくなっている。しかしながら、1つの光ファイバ母材から製造される光ファイバの長さはクラッド径の2乗に反比例して短くなるため、クラッド径の拡大は光ファイバの生産性を著しく劣化させる。また既存の光ファイバ部品等は従来の $125 \mu m$ のクラッド径に対応して設計されているため、クラッド径を拡大したMCFの活用には周辺部品の再設計が必要となり、実用化に多くの研究開発を要する。

10

【0003】

そこで近年、従来と同等の $125 \mu m$ であるクラッド径を有するMCFが開発されている。クラッド径が標準的な $125 \mu m$ であることによって、光ファイバの量産性を従来と同等以上に維持できるとともに、標準的な接続部品や光ケーブルなど既存の周辺物品を活用することができる。さらにMCFの各コアが既存の光ファイバと同等の光学特性を有することで、既存の光インターフェイスとの互換性を担保できる事ができるため、既存の設備から容易にMCFへアップグレードすることができる。

20

【0004】

非特許文献3および4では $100 km$ で $-30 dB$ 以下のXTを有し、光学特性が既存の単一モード光ファイバ(SMF)と同等である4つのコアを有するMCFが報告されている。非特許文献3によれば同種のコア構造を用いる場合4つのコアが配置可能であり、また非特許文献5によれば複数のコア構造を用いることで5個のコアが配置可能であることが示されている。

30

【0005】

しかしながら、これらのMCFはコア構造としてトレンチ型の複雑な屈折率分布形状を用いているため、屈折率分布を形成するためのプロセスの複雑化や歩留りが問題となり、量産化や経済性が課題が残る。汎用的なSMFは単峰型の簡易な屈折率分布が採用されており、高い量産性と良好な品質を有する。非特許文献6では、単峰型を採用し、クラッド径が $125 \mu m$ である2コアファイバが報告されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

40

【0006】

【文献】H. Takahashi et al., "First Demonstration of MC-EDFA-Repeatered SDM Transmission of  $40 \times 128$ -Gbit/s PDM-QPSK Signals per Core over 6,160-km 7-core MCF", ECOC2012, Th3C3, Sep. 2012.

T. Hayashi et al., "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber", Opt. Express, vol. 19, pp. 16576-16592, Aug. 2011.

50

T. Matsui et al., "Design of multi-core fiber in 125  $\mu\text{m}$  cladding diameter with full compliance to conventional SMF", ECOC2015, We.1.4.5, Sep. 2015.

T. Matsui et al., "118.5 Tbit/s Transmission over 316 km-Long Multi-Core Fiber with Standard Cladding Diameter" OECC2017, PDP2, Aug. 2017.

T. Gonda et al., "125  $\mu\text{m}$  5-core fibre with heterogeneous design suitable for migration from single-core system to multi-core system" ECOC2016, W2B1, Sep. 2016. 10

Y. Geng, et al., "High speed, bidirectional dual-core fiber transmission system for high density, short-reach optical interconnects", Photonics West, 9380-8, Feb. 2015.

P. J. Winzer et al., "Penalties from In-Band Crosstalk for Advanced Optical Modulation Formats", ECOC2011, Tu5B7, Sep. 2011.

D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices", Bell System Tech. J., vol. 565, no. 5, May-June, 1977. 20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、単峰型コアを標準的な125  $\mu\text{m}$ のクラッド直径で3個以上配置することは非特許文献6には記載されない。つまり、従来のMCF設計では、単峰型コアを標準的な125  $\mu\text{m}$ のクラッド直径で3個以上配置することは困難であるという課題がある。そこで、本発明は、上記課題を解決するために、標準的なクラッド径で単峰型の4つのコアを配置し、所望の仕様を満たしつつ、量産性、品質、及び歩留りに優れた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。 30

【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、所定の関係式に基づいて直径125  $\pm$  1  $\mu\text{m}$ のクラッド内に4つのコアを配置することとした。

【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半径aの単峰型屈折率分布の4つのコアと、  
 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  $\Delta n$  となる、前記コアより屈折率が低く、直径が125  $\pm$  1  $\mu\text{m}$ であるクラッド領域と、  
 を有するマルチコア光ファイバであって、 40

波長1310 nmにおけるモードフィールド径(MFD)が8.2 ~ 9.6  $\mu\text{m}$ であり、  
 波長1625 nmにおける曲げ半径30 mmでの曲げ損失が0.1 dB / 100 turn以下であり、

カットオフ波長が1260 nm以下であり、

前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)、前記コアの間隔の最小値、及び波長1310 nmにおけるMFDの関係が数C1を満たすように、4個の前記コアが配置され、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比屈折率差  $\Delta n$  が設定されていることを特徴とする。

【数C1】

$$OCT \geq 3.73MFD + 3.43$$

$$A \leq -5.28MFD + 83.54$$

(C 1)

## 【0010】

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半径aの単峰型屈折率分布の4個のコアと、  
 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  $\Delta n$  となる、前記コアより屈折  
 率が低く、直径が  $125 \pm 1 \mu\text{m}$  であるクラッド領域と、  
 を有するマルチコア光ファイバであって、

10

波長  $1550 \text{ nm}$  におけるモードフィールド径MFDが  $9 \sim 12 \mu\text{m}$  であり、  
 波長  $1625 \text{ nm}$ 、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、

カットオフ波長が  $1530 \text{ nm}$  以下であり、

前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)、前記コアの間  
 隔の最小値、及び波長  $1550 \text{ nm}$  におけるMFDの関係が数C4を満たすように、4  
 個の前記コアが配置され、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比屈折  
 率差  $\Delta n$  が設定されていることを特徴とする。

## 【数C4】

$$OCT \geq 2.82MFD + 3.7$$

20

$$A \leq -3.99MFD + 83.15$$

(C 4)

## 【0011】

マルチコア光ファイバに要求される単位長当たりのクロストークから得られるMFDに  
 基づいてOCT及び  $\Delta n$  が得られる。また、当該MFDはコア半径aと比屈折率差  $\Delta n$  で実現  
 できる。本マルチコア光ファイバは単峰型であるので量産性、品質、及び歩留りに優れる  
 。従って、本発明は、標準的なクラッド径で単峰型の4つのコアを配置し、所望の仕様を  
 満たしつつ、量産性、品質、及び歩留りに優れたマルチコア光ファイバを提供することが  
 できる。

30

## 【0012】

単位長当たりのクロストークとMFDとの関係は次の通りである。

第1のマルチコア光ファイバの場合、

前記コアの任意のコアが他のコアから受ける波長  $1625 \text{ nm}$  における単位長のクロスト  
 ークの合計値XTと波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDとの関係が数C2を満たすこと、又  
 は、前記コアの任意のコアが他のコアから受ける波長  $1360 \text{ nm}$  における単位長のクロ  
 ストークの合計値XTと波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDとの関係が数C3を満たすこと  
 を特徴とする。

## 【数C2】

$$XT \geq 27.0MFD - 251.8$$

(C 2)

40

## 【数C3】

$$XT \geq 33.7MFD - 342.3$$

(C 3)

## 【0013】

第2のマルチコア光ファイバの場合、

前記コアの任意のコアが他のコアから受ける波長  $1625 \text{ nm}$  における単位長のクロスト  
 ークの合計値XTと波長  $1550 \text{ nm}$  におけるMFDとの関係が数C5を満たすこと、又  
 は、前記コアの任意のコアが他のコアから受ける波長  $1565 \text{ nm}$  における単位長のクロ  
 ストークの合計値XTと波長  $1550 \text{ nm}$  におけるMFDとの関係が数C6を満たすこと

50

を特徴とする。

【数 C 5】

$$XT \geq 24.6MFD - 294.8$$

(C 5)

【数 C 6】

$$XT \geq 26.0MFD - 315.8$$

(C 6)

【0014】

また、第1のマルチコア光ファイバや第2のマルチコア光ファイバは次のように設計する。

10

本発明に係る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に要求されるカットオフ波長、及び前記コアの任意のコアが他のコアから受ける単位長のクロストークの合計値XTを決定する仕様決定手順と、

前記仕様決定手順で決定したカットオフ波長が1260nm以下、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1625nmにおける値である場合、数C2で、

前記仕様決定手順で決定したカットオフ波長が1260nm以下、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1360nmにおける値である場合、数C3で、波長1310nmにおけるモードフィールド径(MFD)を計算する第1MFD算出手順と、

前記第1MFD算出手順で計算したMFDを数C1に代入して前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)及び前記コアの間隔の最小値を計算する第1構造算出手順と、

20

前記仕様決定手順で決定したカットオフ波長が1530nm以下、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1625nmにおける値である場合、数C5で、

前記仕様決定手順で決定したカットオフ波長が1530nm以下、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1565nmにおける値である場合、数C6で、波長1550nmにおけるモードフィールド径(MFD)を計算する第2MFD算出手順と、

前記第2MFD算出手順で計算したMFDを数C4に代入して前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)及び前記コアの間隔の最小値を計算する第2構造算出手順と、

30

を行う。

【発明の効果】

【0015】

本発明は、標準的なクラッド径で単峰型の4つのコアを配置し、所望の仕様を満たしつつ、量産性、品質、及び歩留りに優れた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。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】(a)は、本発明に係るマルチコア光ファイバの断面構造を説明する図である。

40

(b)は、本発明に係るマルチコア光ファイバの屈折率分布の一例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コア半径と比屈折率差の関係の一例を示す構造図である。

【図3】本発明に係るマルチコア光ファイバの波長1310nmにおけるMFDとOCTおよびの関係を表す特性図である。

【図4】本発明に係るマルチコア光ファイバの波長1310nmにおけるMFDとXTとの関係の一例を表す特性図である。

【図5】本発明に係るマルチコア光ファイバの波長1550nmにおけるMFDとOCTおよびの関係を表す特性図である。

【図6】本発明に係るマルチコア光ファイバの波長1550nmにおけるMFDとXTと

50

の関係の一例を表す特性図である。

【図 7】本発明に係るマルチコア光ファイバの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】

【0017】

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。

【0018】

図 1 に本実施形態のマルチコア光ファイバ (MCF) の構造の一例を示す。図 1 (a) は MCF の断面構造であり、図 1 (b) は各コアの屈折率分布を説明する図である。本 MCF は 1 心の光ファイバ中に 4 つのコア 11 を有し、クラッド領域 12 の径が標準的な  $125 \pm 1 \mu\text{m}$  である。各コアの屈折率分布は図 1 (b) に示されるように、コアの周囲にコア 11 よりも低い屈折率を有するクラッド領域 12 を有する。ここではクラッド領域の屈折率を基準として比屈折率差を定義しているが、コア及びクラッド領域の材料はそれぞれ純石英およびフッ素添加ガラス、もしくはそれぞれ  $\text{GeO}_2$  添加ガラス、純石英ガラスとフッ素添加ガラスの組合せ等、図 1 に示す屈折率分布を構成できるガラス材料の組合せで材料を選定することができる。

【0019】

図 2 に本発明のマルチコア光ファイバについて、所定の光学特性を得るためのコアパラメータの設計範囲を示す。横軸はコア半径、縦軸はコア - クラッドの比屈折率差である。実線より上の領域で、波長  $1625 \text{ nm}$ 、曲げ半径  $30 \text{ mm}$  における曲げ損失を  $0.1 \text{ dB} / 100 \text{ turn}$  以下に抑制することができる。

【0020】

図中の破線および点線は、それぞれカットオフ波長が  $1260 \text{ nm}$  および  $1530 \text{ nm}$  となるコア半径と比屈折率差の関係を表す。ここで、破線および点線の左側で、それぞれ  $1260 \text{ nm}$  および  $1530 \text{ nm}$  以下のカットオフ波長を実現することができる。更に、図中の一点鎖線は波長  $1550 \text{ nm}$  における MFD が  $10 \mu\text{m}$  となるコア半径と比屈折率差の関係を表す。一点鎖線より下側の領域で  $10 \mu\text{m}$  以上の MFD を実現することができる。

【0021】

従って、図中の実線、点線（もしくは破線）、一点鎖線で囲まれる領域でコア半径および比屈折率差を設定することで、所望の曲げ損失、カットオフ波長、および MFD 特性を同時に満たすことが可能となる。ここで、図 2 では一例として波長  $1550 \text{ nm}$  における MFD が  $10 \mu\text{m}$  となる場合を図示したが、単峰型光ファイバにおけるコア半径、比屈折率差、および MFD の関係は下記の経験式で記述できることが知られている（例えば、非特許文献 8 を参照。）。

(式 1)

$$\text{MFD} / 2a = 0.65 + 1.619V^{-1} \cdot 5 + 2.879V^{-6} \quad (1)$$

ここで、 $V$  は規格化周波数で、コア半径  $a$ 、コアの屈折率  $n_1$ 、クラッドの屈折率  $n_2$ 、波長  $\lambda$  を用いて、

$$V = 2\pi a / \lambda \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^{0.5}}$$

で定義される。

【0022】

従って、図 2 は任意の波長における所望の MFD 特性に対して導出することができる。

【0023】

なお、ここではカットオフ波長として  $1260 \text{ nm}$  と  $1530 \text{ nm}$  について示したが、これらは複数の国際標準で規定される単一モード伝送波長帯域の下限を示すものである（例えばそれぞれ、ITU-T 勧告 G.652、G.654）。また曲げ損失や MFD についても同様に、ケーブル化後の損失特性や相互接続性を表すもので、ITU-T 等の国際標準で定められる。

10

20

30

40

50

## 【0024】

(実施形態1)

実施形態1として第1のマルチコア光ファイバについて説明する。

MCFではコア中心からクラッド外周までの最小距離(OCT)を適切に設定し、過剰損失  $c$  を十分に抑制する必要がある。 $c$  は長波長側で増加する傾向があり、一般に、使用する上限波長で  $0.01 \text{ dB/km}$  以下であることが好ましい。図3に波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDとOCTの関係を示す。ここでは、一例として使用波長帯域を  $1260 \text{ nm} \sim 1625 \text{ nm}$  とした。即ち、カットオフ波長を  $1260 \text{ nm}$ 、波長  $1625 \text{ nm}$  における  $c$  を  $0.01 \text{ dB/km}$  以下とすることとした。また、曲げ損失は既存のSMFと同等とし、波長  $1625 \text{ nm}$  の曲げ半径  $30 \text{ mm}$  における値が  $0.1 \text{ dB/100 turn}$  以下となるようにした。

10

## 【0025】

この時、図2で説明したように、カットオフ波長、曲げ損失、MFDの要求条件を満たすコア半径と比屈折率差の関係を導出することができる。図3では、上記の関係を満たすコア半径と比屈折率差の条件から、 $c$  を  $0.01 \text{ dB/km}$  以下とするのに必要なOCTの最小値を実線で示している。図3より、OCTはMFDと共に増加し、その関係は以下の関係式で近似できることがわかる。

(式2)

$$\text{OCT} = 3.73 \text{ MFD} + 3.43 \quad (2)$$

## 【0026】

ここで、図3の破線はクラッド直径を  $125 \mu\text{m}$  とした時、正方格子状に配置した4個のコアの中心間距離  $a$  の上限を表す。図3より、MFDと  $a$  の関係は以下の関係式で近似できることがわかる。

(式3)

$$a = 5.28 \text{ MFD} + 83.54 \quad (3)$$

## 【0027】

従って、本出願のMCFにおいて使用波長帯の下限を  $1260 \text{ nm}$ 、MFDの規定波長を  $1310 \text{ nm}$ 、波長  $1625 \text{ nm}$  における  $c$  を  $0.01 \text{ dB/km}$  以下とした場合、OCTと  $a$  の設定条件は、MFDの設計中心値より式(2)および(3)で決定できることがわかる。

30

## 【0028】

つまり、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半径  $a$  の単峰型屈折率分布の4個のコアと、

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  $\Delta n$  となる、前記コアより屈折率が低く、直径が  $125 \pm 1 \mu\text{m}$  であるクラッド領域と、を有するマルチコア光ファイバであって、

波長  $1310 \text{ nm}$  におけるモードフィールド径(MFD)が  $8.2 \sim 9.6 \mu\text{m}$  であり、波長  $1625 \text{ nm}$  における曲げ半径  $30 \text{ mm}$  での曲げ損失が  $0.1 \text{ dB/100 turn}$  以下であり、

カットオフ波長が  $1260 \text{ nm}$  以下であり、

40

前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)、前記コアの間隔の最小値  $a$ 、及び波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDの関係が数(2)及び式(3)を満たすように、4個の前記コアが配置され、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比屈折率差  $\Delta n$  が設定されていることを特徴とする。

## 【0029】

図4に本発明のMCFにおいて、図3に示した要求条件を満たす、波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDと最大XTの関係を示す。尚、現在最も汎用的に使用されているSMFの波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDは、国際標準により  $8.2 \sim 9.6 \mu\text{m}$  の範囲内とするよう定められている。一般に、接続する光ファイバ間のMFDの不整合は接続損失の増大を招くため、本MCFの波長  $1310 \text{ nm}$  におけるMFDも  $8.2 \sim 9.6 \mu\text{m}$  の範囲内で

50

設定されることが好ましい。

【 0 0 3 0 】

図中の実線は、使用波長帯域の上限を波長 1 6 2 5 n mとした場合の計算結果を示す。図 4 より X Tは M F Dと伴に増加し、両者の関係は式 ( 4 )で近似できることがわかる。尚、X Tは 0 d B / k m以上の領域では飽和状態となる。

( 式 4 )

$$X T = 27.0 M F D - 251.8 \quad ( 4 )$$

【 0 0 3 1 】

ここで、M C F中の X Tによる伝送特例劣化は伝送方式に依存し、非特許文献 7では Q P S K、1 6 Q A M、6 4 Q A Mの伝送方式に対して、それぞれ - 1 6 d B、- 2 4 d B、- 3 2 d B以下のクロストークが必要となることが示されている。マルチコア光ファイバの場合、コア間のクロストークは任意のコアに対する他のコアからのクロストーク成分の総和となり、単位距離当たりのクロストーク ( d B / k m )と距離 L ( k m )に対して、任意の距離でのクロストークは、

$$X T + 10 \log ( L )$$

で与えられる。

【 0 0 3 2 】

例えば、1 6 Q A Mの信号フォーマットを用いて 1 0 0 0 ~ 1 0 0 0 0 k mの伝送を行うためには、マルチコアファイバのクロストークは - 5 4 ~ - 6 4 d B / k m以下である必要がある。つまり、図 4 から、第 1のマルチコア光ファイバは、波長 1 3 1 0 n mにおける M F Dがいずれであっても波長 1 6 2 5 n mで 1 6 Q A Mの信号フォーマットを用いる 1 0 0 0 ~ 1 0 0 0 0 k mの伝送を行うことはできない。

【 0 0 3 3 】

一方、図 4 から、第 1のマルチコア光ファイバは、Q P S K信号を用いた L = 1 k m伝送用の M C Fを実現する場合、波長 1 3 1 0 n mにおける M F Dを 8 . 7 5 μ m以下の範囲で設定できることがわかる。

【 0 0 3 4 】

また、波長 1 3 1 0 n mにおける M F Dを 9 μ mとし、Q P S K信号を用いた伝送実現したい場合、当該 M F Dにおける波長 1 6 2 5 n mにおける X Tは - 9 d B / k mなので、Q P S K信号の伝送に必要な - 1 6 d B / k mの X T特性を実現するためには、最大伝送距離を 0 . 2 k m以下とすれば良いことが分かる。

【 0 0 3 5 】

更に図 4 中の破線は、使用波長帯域の上限波長を 1 3 6 0 n mとした場合の計算結果を示す。波長 1 3 1 0 n mにおける M F Dと波長 1 3 6 0 n mにおける X Tの関係は式 ( 5 )で記述できることがわかる。

( 式 5 )

$$X T = 33.7 M F D - 342.3 \quad ( 5 )$$

【 0 0 3 6 】

上述のように、図 4 より、既存 S M F標準と整合した 8 . 2 ~ 9 . 6 μ mの M F D特性を用い、伝送距離を適切に設定することで、Q P S K、1 6 Q A M、6 4 Q A Mの何れにも対応可能な伝送システムが実現できることが分かる。従って、上述の関係式 ( 4 )もしくは ( 5 )を用い、それぞれ使用波長帯域の上限を 1 6 2 5 n mもしくは 1 3 6 0 n mとした時に、所望の伝送システムを実現する X Tと M F Dの関係を導くことができる。

【 0 0 3 7 】

以上述べたように、既存 S M Fと同等のカットオフ波長、曲げ損失、および M F D特性を有し、波長 1 6 2 5 n mにおける過剰損失を 0 . 0 1 d B / k m以下とし、1 2 6 0 n m ~ 1 6 2 5 n mの波長範囲で所望の X T特性を実現する M C Fにおける O C T、および M F Dの関係は関係式 ( 2 )、( 3 )、( 4 )を用いて規定できる。

【 0 0 3 8 】

同様に、既存 S M Fと同等のカットオフ波長、曲げ損失、および M F D特性を有し、波

10

20

30

40

50

長 1 6 2 5 n m における過剰損失を 0 . 0 1 d B / k m 以下とし、1 2 6 0 n m ~ 1 3 6 0 n m の波長範囲で所望の X T 特性を実現する本出願の M C F における O C T、および M F D の関係は関係式 ( 2 )、( 3 )、( 5 ) を用いて規定できる。

【 0 0 3 9 】

( 実施形態 2 )

実施形態 2 として第 2 のマルチコア光ファイバについて説明する。

本 M C F は、カットオフ波長を 1 5 3 0 n m とした場合である。図 5 に波長 1 5 5 0 n m における M F D と O C T の関係を示す。ここで、一例として使用波長帯域を 1 5 3 0 n m ~ 1 6 2 5 n m とした。即ち、カットオフ波長を 1 5 3 0 n m、波長 1 6 2 5 n m における  $\alpha$  を 0 . 0 1 d B / k m 以下とすることとした。また、曲げ損失は既存の S M F と同等とし、波長 1 6 2 5 n m の曲げ半径 3 0 m m における値が 0 . 1 d B / 1 0 0 t u r n 以下となるようにした。

10

【 0 0 4 0 】

この時、図 2 で説明したように、カットオフ波長、曲げ損失、M F D の要求条件を満たすコア半径と比屈折率差の関係を導出することができる。図 5 では、上記の関係を満たすコア半径と比屈折率差の条件から、 $\alpha$  を 0 . 0 1 d B / k m 以下とするのに必要な O C T の最小値を実線で示している。図 5 より、O C T は M F D と共に増加し、その関係は以下の関係式で近似できることがわかる。

( 式 6 )

$$O C T = 2 . 8 2 M F D + 3 . 7$$

( 6 )

20

【 0 0 4 1 】

ここで、図 5 の破線はクラッド直径を 1 2 5  $\mu$  m とした時、正方格子状に配置した 4 個のコアの中心間距離  $\Delta$  の上限を表す。図 5 より、M F D と  $\Delta$  の関係は以下の関係式で近似できることがわかる。

( 式 7 )

$$\Delta = 3 . 9 9 M F D + 8 3 . 1 5$$

( 7 )

【 0 0 4 2 】

従って、本出願の M C F において使用波長帯の下限を 1 5 3 0 n m、M F D の規定波長を 1 5 5 0 n m、波長 1 6 2 5 n m における  $\alpha$  を 0 . 0 1 d B / k m 以下とした場合、O C T と  $\Delta$  の設定条件は、M F D の設計中心値より式 ( 6 ) および ( 7 ) で決定できることがわかる。

30

【 0 0 4 3 】

つまり、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半径 a の単峰型屈折率分布の 4 個のコアと、

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  $\Delta n$  となる、前記コアより屈折率が低く、直径が 1 2 5  $\pm$  1  $\mu$  m であるクラッド領域と、

を有するマルチコア光ファイバであって、

波長 1 5 5 0 n m におけるモードフィールド径 M F D が 9 ~ 1 2  $\mu$  m であり、

波長 1 6 2 5 n m、曲げ半径 3 0 m m における曲げ損失が 0 . 1 d B / 1 0 0 t u r n 以下であり、

40

カットオフ波長が 1 5 3 0 n m 以下であり、

前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離 ( O C T )、前記コアの間隔の最小値  $\Delta$ 、及び波長 1 5 5 0 n m における M F D の関係が数 ( 6 ) 及び式 ( 7 ) を満たすように、4 個の前記コアが配置され、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比屈折率差  $\Delta n$  が設定されていることを特徴とする。

【 0 0 4 4 】

図 6 に本発明の M C F において、図 5 に示した要求条件を満たす、波長 1 5 5 0 n m における M F D と最大 X T の関係を示す。尚、現在一般的に使用されている高速伝送用 S M F の波長 1 5 5 0 n m における M F D は、概ね 9 ~ 1 2  $\mu$  m の範囲である。一般に、接続する光ファイバ間の M F D の不整合は接続損失の増大を招くため、本 M C F の波長 1 5 5

50

0 nmにおけるMFDも9 ~ 12 μmの範囲内で設定されることが好ましい。

【0045】

図中の実線は、使用波長帯域の上限を波長1625 nmとした場合の計算結果を示す。図6よりXTはMFDと共に増加し、両者の関係は式(8)で近似できることがわかる。尚、XTは0 dB/km以上の領域では飽和状態となる。

(式8)

$$X T = 24.6 M F D - 294.4 \quad (8)$$

【0046】

また、図6中の破線は、使用波長帯域の上限波長を1565 nmとした場合の関係を示し、波長1550 nmにおけるMFDと波長1565 nmにおけるXTの関係は式(9)で記述できることがわかる。

(式9)

$$X T = 26.0 M F D - 315.8 \quad (9)$$

【0047】

本MCFも実施形態1で説明したMCFと同様に、図6より、既存の高速伝送用SMFと整合性の高い9 ~ 12 μmのMFD特性を用い、伝送距離を適切に設定することで、QPSK、16QAM、64QAMの何れにも対応可能な伝送システムが実現できることが分かる。従って、上述の関係式(8)もしくは(9)を用い、それぞれ使用波長帯域の上限を1625 nmもしくは1565 nmとした時に、所望の伝送システムを実現するXTとMFDの関係を導くことができる。

【0048】

以上述べたように、既存の高速伝送用SMFと同等のカットオフ波長、曲げ損失、およびMFD特性を有し、波長1625 nmにおける過剰損失を0.01 dB/km以下とし、1530 nm ~ 1625 nmの波長範囲で所望のXT特性を実現するMCFにおけるOCT、およびMFDの関係は関係式(6)、(7)、(8)を用いて規定できる。

【0049】

同様に、既存SMFと同等のカットオフ波長、曲げ損失、およびMFD特性を有し、波長1625 nmにおける過剰損失を0.01 dB/km以下とし、1530 nm ~ 1565 nmの波長範囲で所望のXT特性を実現するMCFにおけるOCT、およびMFDの関係は関係式(6)、(7)、(9)を用いて規定できる。

【0050】

(光ファイバの設計方法)

図7は、実施形態1と2で説明したMCFの設計方法を説明するフローチャートである。本設計方法は、

前記マルチコア光ファイバに要求されるカットオフ波長、及び前記コアの任意のコアが他のコアから受ける単位長のクロストークの合計値XTを決定する仕様決定手順S01と、仕様決定手順S01で決定したカットオフ波長が1260 nm以下(ステップS02で1260 nm以下)、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1625 nmにおける値である場合、式(4)で、

仕様決定手順S01で決定したカットオフ波長が1260 nm以下(ステップS02で1260 nm以下)、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1360 nmにおける値である場合、式(5)で、

波長1310 nmにおけるモードフィールド径(MFD)を計算する第1MFD算出手順S03と、

第1MFD算出手順S03で計算したMFDを式(2)と式(3)に代入して前記コアの中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離(OCT)及び前記コアの間隔の最小値を計算する第1構造算出手順S04と、

仕様決定手順S01で決定したカットオフ波長が1530 nm以下(ステップS02で1530 nm以下)、且つ前記単位長のクロストークの合計値XTが波長1625 nmにおける値である場合、式(8)で、

10

20

30

40

50

仕様決定手順 S 0 1 で決定したカットオフ波長が 1 5 3 0 n m 以下 (ステップ S 0 2 で 1 5 3 0 n m 以下)、且つ前記単位長のクロストークの合計値 X T が波長 1 5 6 5 n m に おける値である場合、式 ( 9 ) で、  
波長 1 5 5 0 n m におけるモードフィールド径 ( M F D ) を計算する第 2 M F D 算出手順 S 0 6 と、

第 2 M F D 算出手順 S 0 6 で計算した M F D を式 ( 6 ) と式 ( 7 ) に代入して前記コア の中心から前記クラッド領域の外周までの最小距離 ( O C T ) 及び前記コアの間隔の最小 値 を計算する第 2 構造算出手順 S 0 7 と、  
を行うことを特徴とする。

本設計方法は、さらに、第 1 M F D 算出手順 S 0 3 もしくは第 2 M F D 算出手順 S 0 6 で計算した M F D を式 ( 1 ) に代入してコア半径 a と比屈折率差 を計算する (ステップ S 0 5、S 0 8)。

【 0 0 5 1 】

本設計方法で算出したコア半径 a、比屈折率差、コアの間隔の最小値 及び O C T の ようにコアを配置することで、標準的なクラッド径で単峰型の 4 つのコアを配置し、所望 の仕様を満たしつつ、量産性、品質、及び歩留りに優れた M C F とすることができる。

【産業上の利用可能性】

【 0 0 5 2 】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、光通信システムにおける光ファイバに利用できる。

【符号の説明】

【 0 0 5 3 】

1 1 : コア

1 2 : クラッド領域

10

20

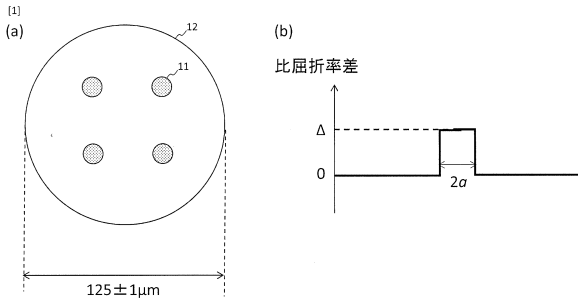
30

40

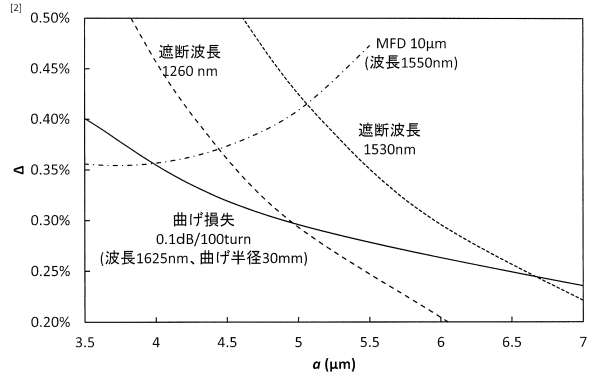
50

【図面】

【図 1】

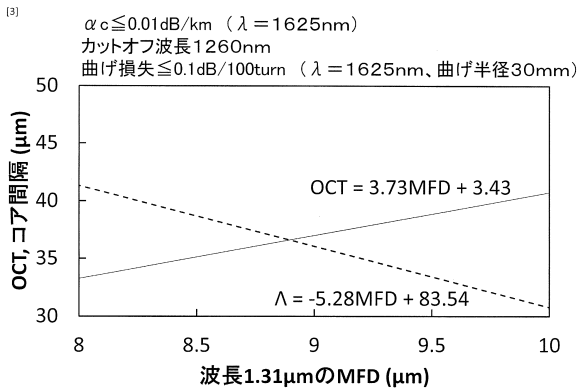


【図 2】

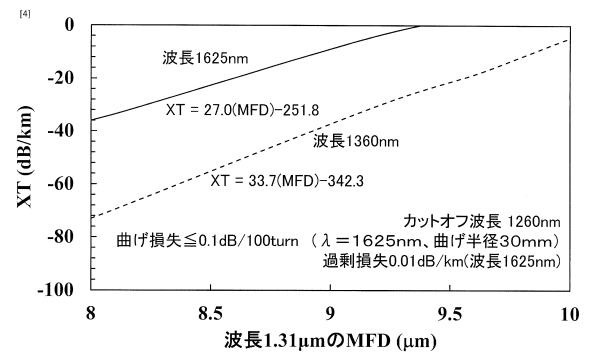


10

【図 3】

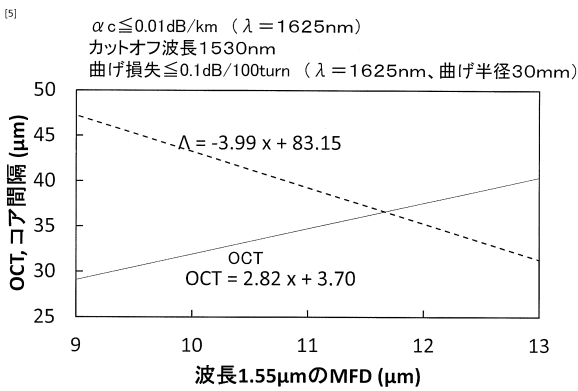


【図 4】

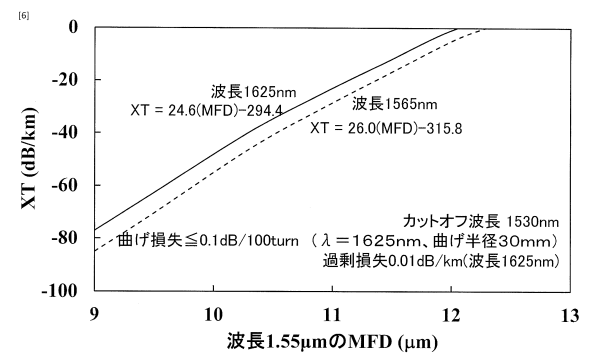


20

【図 5】



【図 6】



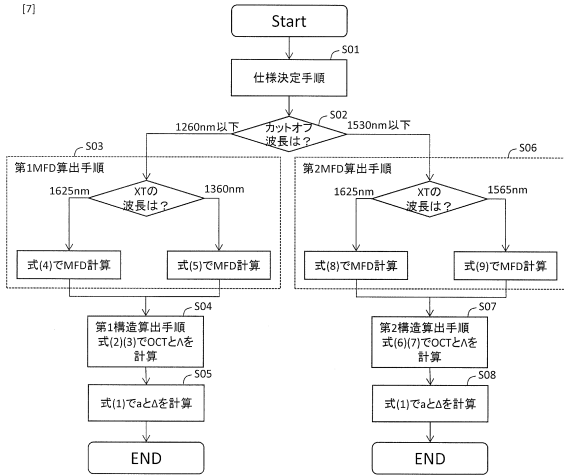
30

40

50

【 図 7 】

[7]



10

20

30

40

50

---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2013-088458(JP,A)  
特開2013-088457(JP,A)  
特開2013-167861(JP,A)  
国際公開第2017/150481(WO,A1)  
米国特許出願公開第2015/0160408(US,A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G02B 6/02  
IEEE Explore