

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-167196

(P2017-167196A)

(43) 公開日 平成29年9月21日(2017.9.21)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
G 0 2 B 6/02 (2006.01) G 0 2 B 6/02 4 8 1 2 H 1 5 O
 G 0 2 B 6/02 4 1 1

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2016-49617(P2016-49617)
 (22) 出願日 平成28年3月14日(2016.3.14)

(71) 出願人 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
 (74) 代理人 100119677
 弁理士 岡田 賢治
 (74) 代理人 100115794
 弁理士 今下 勝博
 (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 山本 貴司
 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

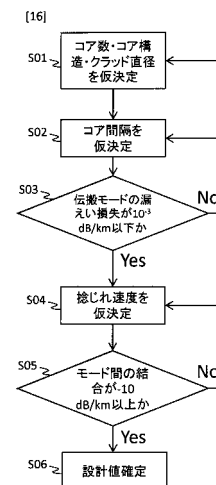
(54) 【発明の名称】 マルチコア光ファイバ及びマルチコア光ファイバの設計方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 コア数やコア配置に応じた捻じれを有し、モード間結合を積極的に発生させるマルチコア光ファイバ及びその設計方法を提供する。

【解決手段】 マルチコア光ファイバの設計方法は、構造仮決定手順S01でコア数、コア構造、クラッド直径を変えて再計算を実施し、コア間隔仮決定手順S02でコア間隔を変えて再計算を実施し、あるいは捻じれ速度仮決定手順S04で捻じれ速度を変えて再計算を実施する。これら手順を繰り返し、所望の漏洩損失と結合量を満たすコア数、コア構造、クラッド直径、コア間隔、捻じれ速度を見いだせたとき、当該構造をマルチコア光ファイバの設計値に確定する。

【選択図】 図16



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバであって、

各コアからの漏洩損失が 10^{-3} dB/km 以下となるコア間隔、及び

全てのコア間での結合量が -10 dB/km 以上となる長手方向の軸を中心とする捻じれを有することを特徴とするマルチコア光ファイバ。

【請求項 2】

クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、

断面において 7 個のコアが三角格子状に配置されるコア配置を持ち、

10

前記コア間隔が $26\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項 3】

クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、

断面において 8 個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、

前記コア間隔が $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項 4】

クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、

断面において 10 個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、

20

前記コア間隔が $16\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $10\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項 5】

クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、

断面において 12 個のコアが正方格子状に配置されるコア配置を持ち、

前記コア間隔が $16.4\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $3\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

【請求項 6】

遮断波長が 1530 nm 以下となるコア半径を有することを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載のマルチコア光ファイバ。

30

【請求項 7】

伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバの設計方法であって、

前記マルチコア光ファイバのコア数、コア配置及びクラッド直径のファイバ構造を仮決定する構造仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造で定まるコア間隔上限値以下のコア間隔を仮決定するコア間隔仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造及び前記コア間隔仮決定手順で仮決定したコア間隔において、各コアからの漏洩損失と所定損失値とを比較し、前記漏洩損失が前記所定損失値より大きい場合に前記構造仮決定手順又は前記コア間隔仮決定手順を再度行う漏洩損失比較手順と、

40

前記漏洩損失比較手順で前記漏洩損失が前記所定損失値以下の場合にファイバ捻じれ速度を仮決定する捻じれ速度仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造、前記コア間隔仮決定手順で仮決定したコア間隔、及び前記捻じれ速度仮決定手順で仮決定した前記ファイバ捻じれ速度における全てのコア間での結合量と所定結合値とを比較し、前記結合量が前記所定結合値未満である場合に前記構造仮決定手順、前記コア間隔仮決定手順、又は前記捻じれ速度仮決定手順を再度行う結合量比較手順と、

前記結合量比較手順で前記結合量が前記所定結合以上である場合に前記構造仮決定手順で仮決定したファイバ構造、前記コア間隔仮決定手順で決定したコア間隔、及び前記捻じ

50

れ速度仮決定手順で仮決定した捻じれ速度を前記マルチコア光ファイバの設計値として確定する設計値確定手順と、

を行うことを特徴とするマルチコア光ファイバ設計方法。

【請求項 8】

前記所定損失値が 10^{-3} dB/km 以下、且つ前記所定結合値が -10 dB/km 以上であることを特徴とする請求項 7 に記載のマルチコア光ファイバ設計方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、マルチコア光ファイバとその設計方法に関する。

10

【背景技術】

【0002】

光ファイバ通信システムでは、光ファイバ中で発生する非線形効果やファイバヒューズにより伝送容量が制限される。これらの制限を緩和するために 1 本の光ファイバ中に複数のコアを有するマルチコア光ファイバを用いた並列伝送や、コア内に複数の伝搬モードが存在するマルチモードファイバを用いたモード多重伝送といった空間多重技術が検討されている（例えば、非特許文献 1～3 を参照。）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

20

【非特許文献 1】H. Takara et al., “1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency”, in ECOC2012, paper Th. 3. C. 1 (2012)

【非特許文献 2】T. Sakamoto et al., “Differential Mode Delay Managed Transmission Line for WDM-MIMO System Using Multi-Step Index Fiber”, J. Lightwave Technol. vol. 30, pp. 2783-2787 (2012).

30

【非特許文献 3】Y. Sasaki et al., “Large-effective-area uncoupled few-mode multi-core fiber”, ECOC2012, paper Tu. 1. F. 3 (2012).

【非特許文献 4】T. Ohara et al., “Over-1000-Channel Ultradense WDM Transmission With Supercontinuum Multicarrier Source”, IEEE J. Lightw. Technol., vol. 24, pp. 2311-2317 (2006)

【非特許文献 5】T. Sakamoto, T. Mori, M. Wada, T. Yamamoto, F. Yamamoto, “Coupled Multicore Fiber Design With Low Intercore Differential Mode Delay for High-Density Space Division Multiplexing”, J. Lightw. Technol., vol. 33, no. 6, pp. 1175, 1181, (2015)

40

【非特許文献 6】T. Sakamoto, T. Mori, M. Wada, T. Yamamoto, and F. Yamamoto, “Fiber twisting and bending induced mode conversion characteristics in coupled multi-core fibre”, ECOC, paper P. 1.02 (2015).

50

【非特許文献7】T. matsui et al., “Design of 125 μ m cladding multi-core fiber with fullband compatibility to conventional single-mode fiber”, ECOC paper We. 1. 4. 5 (2015)

【非特許文献8】ITU-T Recommendation G. 652

【非特許文献9】ITU-T Recommendation G. 654

【非特許文献10】Y. Katsuyama, M. Tokuda, N. Uchida, and M. Nakahara, “New method for measuring the V-value of a single-mode optical fiber”, Electron. Lett., vol. 12, pp. 669–670, Dec. 1976. 10

【非特許文献11】H. Chen N. K. Fontaine, R. Ryf, R. -J. Essiambre, L. Wang, Y. Messaddeq, S. LaRochele, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Sasaki “Transmission over coupled six-core fiber with two in-line cladding-pumped six-core EDFAs”, ECOC2015, paper We. 1. 4. 2 (2015)

【非特許文献12】L. Cherbi and B. Abderrahmane, “Spun Fibres for Compensation of PMD: Theory and Characterization”, INTECH Open Access Publisher, 2012. 20

【非特許文献13】佐藤他、“単心分岐型テープ心線を用いたSZケーブルの低PM特性” 信学技報 OFT2006-45 (2006)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

マルチコア光ファイバを用いた伝送においては、コア間のクロストークが生じると信号品質が劣化するため、クロストークを抑圧するためにコア間を一定以上離さなければならない。一般には、光通信システムで十分な伝送品質を担保するためには、パワーペナルティを1dB以下にすることが望ましく、そのためには文献1または4に記載の通りクロストークは-26dB以下としなければならない。 30

【0005】

一方で、MIMO技術を用いると受信端においてクロストークを補償することが可能であり、コア間距離を小さくし、クロストークが-26dB以上であっても信号処理によりパワーペナルティを1dB未満とすることができ、空間利用効率を向上させることができる。しかしながら、MIMO技術を適用する場合、伝送路中で発生する複数の信号光間の群遅延差(DMD)が大きいと、伝送路のインパルス応答幅が大きくなり、信号処理の増大を招く。

【0006】

一般に、非特許文献2に記載の通り、同一コアを伝搬する複数のモード間のDMDは光ファイバの屈折率分布を制御することで低減することが可能である。 40

【0007】

一方で、マルチコア光ファイバにおいても、異なるコアを伝搬するモードを異なるモードとしてとらえることができ、同様にDMDを定義することができる。コア間のクロストーク量とDMDの関係については、非特許文献5により明らかになっており、コア間距離の減少によりDMDが増加することがわかっている。つまり、コア間クロストークを許容したとしても、DMDを増加させないようにするためにはコア間距離の下限が存在し、空間利用効率の向上には限界があることがわかっている。

【0008】

一方、非特許文献5において述べられているとおり、マルチコア光ファイバでは、光ファイバのインパルス応答幅がDMDより小さくなる場合がある。これは、伝搬するモード間が伝搬方向に分布的に結合し、群速度の平均化効果が得られたためである。

【0009】

このように、モード間が強く結合することで、受信端における信号処理負荷を低減することができることは非特許文献6で述べられており、ファイバの曲りとねじれが結合に大きく影響することがわかっている。

【0010】

通信用の空間多重用マルチコア光ファイバとしてはコア数が4以上のものが多く（例えば非特許文献1, 3, 7）、限られた光ファイバ断面積により多数のコアを配置することが望ましい。しかし、非特許文献6はコア数が2である場合の例であって、コア数やコア配置によってモード間結合量が増加するため、現在のところ通信用ファイバとしてどのように結合型マルチコア光ファイバを設計してよいか不明という課題がある。

【0011】

そこで、本発明は、上記課題を解決すべく、コア数やコア配置に応じた捻じれを有し、モード間結合を積極的に発生させ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】

【0012】

上記目的を達成するために、本発明のマルチコア光ファイバは、次のような構造を備えることとした。

【0013】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバであって、

各コアからの漏洩損失が 10^{-3} dB/km以下となるコア間隔、及び

全てのコア間での結合量が -10 dB/km以上となる長手方向の軸を中心とする捻じれを有することを特徴とする。

【0014】

非特許文献1, 3で述べられているマルチコア光ファイバは、クラッド外径が現在の標準的な光ファイバの外径である $125\text{ }\mu\text{m}$ 以上であるため、好ましくない。そこで、クラッド外径を $125\text{ }\mu\text{m}$ としたときのコア配置、コア間隔及び捻じれの具体例を述べる。

【0015】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、断面において7個のコアが三角格子状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $26\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする。

【0016】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、断面において8個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする。

【0017】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、断面において10個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $16\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $10\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする。

【0018】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、クラッドの直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ であり、断面において12個のコアが正方格子状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $16.4\text{ }\mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $3\pi\text{ rad/m}$ 以上であることを特徴とする。

【0019】

本発明に係るマルチコア光ファイバは、遮断波長が 1530 nm 以下となるコア半径を有することを特徴とする。C帯波長の光信号でDMD低減でき、受信端における信号処理

10

20

30

40

50

負荷を低減させることができる。

【0020】

一方、上記マルチコア光ファイバは、次のように設計される。つまり、本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法は、伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバの設計方法であって、

前記マルチコア光ファイバのコア数、コア配置及びクラッド直径のファイバ構造を仮決定する構造仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造で定まるコア間隔上限値以下のコア間隔を仮決定するコア間隔仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造及び前記コア間隔仮決定手順で仮決定したコア間隔において、各コアからの漏洩損失と所定損失値とを比較し、前記漏洩損失が前記所定損失値より大きい場合に前記構造仮決定手順又は前記コア間隔仮決定手順を再度行う漏洩損失比較手順と、

前記漏洩損失比較手順で前記漏洩損失が前記所定損失値以下の場合にファイバ捻じれ速度を仮決定する捻じれ速度仮決定手順と、

前記構造仮決定手順で仮決定した前記ファイバ構造、前記コア間隔仮決定手順で仮決定したコア間隔、及び前記捻じれ速度仮決定手順で仮決定した前記ファイバ捻じれ速度における全てのコア間での結合量と所定結合値とを比較し、前記結合量が前記所定結合値未満である場合に前記構造仮決定手順、前記コア間隔仮決定手順、又は前記捻じれ速度仮決定手順を再度行う結合量比較手順と、

前記結合量比較手順で前記結合量が前記所定結合以上である場合に前記構造仮決定手順で仮決定したファイバ構造、前記コア間隔仮決定手順で決定したコア間隔、及び前記捻じれ速度仮決定手順で仮決定した捻じれ速度を前記マルチコア光ファイバの設計値として確定する設計値確定手順と、

を行うことを特徴とする。

【0021】

ここで、本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法は、前記所定損失値が 10^{-3} dB/km以下、且つ前記所定結合値が -10 dB/km以上であることが好ましい。

【発明の効果】

【0022】

本発明は、コア数やコア配置に応じた捻じれを有し、モード間結合を積極的に発生させ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。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】マルチコア光ファイバの断面構造を示す概略図である。

【図2】コア半径と遮断波長の関係を示した図である。

【図3】マルチコア光ファイバにおけるコア配置を示したものである。

【図4】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、7コアファイバにおける漏えい損失設計に関わる図である。

【図5】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、8コアファイバにおける漏えい損失設計に関わる図である。

【図6】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、10コアファイバにおける漏えい損失設計に関わる図である。

【図7】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、12コアファイバにおける漏えい損失設計に関わる図である。

【図8】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、19コアファイバにおける漏えい損失設計に関わる図である。

【図9】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、捻じれ速度に対する基本モードと第一高次モードとの間の結合量の計算結果である。

【図10】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、捻じれ速度に対する基本モ

10

20

30

40

50

ードと最高次モードとの間の結合量の計算結果である。

【図 1 1】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、7 コアファイバのコア間隔に対する基本モードと第一高次モードとの間の結合量の計算結果である。

【図 1 2】本発明に係るマルチコア光ファイバの設計方法で、7 コアファイバのコア間隔に対する基本モードと最高次モードとの間の結合量の計算結果である。

【図 1 3】40 km の伝送後のインパルス応答波形の計算結果である。

【図 1 4】インパルス応答波形をガウス波形近似した際の相関係数の計算結果である。

【図 1 5】インパルス応答波形の標準偏差である。

【図 1 6】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。

10

【発明を実施するための形態】

【0024】

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。

【0025】

図 1 6 は、本実施形態で説明するマルチコア光ファイバ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、伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバの設計方法であって、

前記マルチコア光ファイバのコア数、コア配置及びクラッド直径のファイバ構造を仮決定する構造仮決定手順 S 0 1 と、

20

構造仮決定手順 S 0 1 で仮決定した前記ファイバ構造で定まるコア間隔上限値以下のコア間隔を仮決定するコア間隔仮決定手順 S 0 2 と、

構造仮決定手順 S 0 1 で仮決定した前記ファイバ構造及びコア間隔仮決定手順 S 0 2 で仮決定したコア間隔において、各コアからの漏洩損失と所定損失値とを比較し、前記漏洩損失が前記所定損失値より大きい場合に構造仮決定手順 S 0 1 又はコア間隔仮決定手順 S 0 2 を再度行う漏洩損失比較手順 S 0 3 と、

漏洩損失比較手順 S 0 3 で前記漏洩損失が前記所定損失値以下の場合にファイバ捻じれ速度を仮決定する捻じれ速度仮決定手順 S 0 4 と、

構造仮決定手順 S 0 1 で仮決定した前記ファイバ構造、コア間隔仮決定手順 S 0 2 で仮決定したコア間隔、及び捻じれ速度仮決定手順 S 0 4 で仮決定した前記ファイバ捻じれ速度における全てのコア間での結合量と所定結合値とを比較し、前記結合量が前記所定結合値未満である場合に構造仮決定手順 S 0 1、コア間隔仮決定手順 S 0 2、又は捻じれ速度仮決定手順 S 0 4 を再度行う結合量比較手順 S 0 5 と、

30

結合量比較手順 S 0 5 で前記結合量が前記所定結合以上である場合に構造仮決定手順 S 0 1 で仮決定したファイバ構造、コア間隔仮決定手順 S 0 2 で決定したコア間隔、及び捻じれ速度仮決定手順 S 0 4 で仮決定した捻じれ速度を前記マルチコア光ファイバの設計値として確定する設計値確定手順 S 0 6 と、
を行うことを特徴とする。

【0026】

40

[構造仮決定手順 S 0 1]

図 1 はコアが 2 コアであるマルチコア光ファイバの断面図である。屈折率が n_1 であるコア領域と、 n_2 のクラッド領域が存在し $n_1 > n_2$ である。

【0027】

図 1 の構造において $n_1 > n_2$ の条件は、各領域の材料を純石英ガラス、またはゲルマニウム (Ge) やアルミニウム (Al)、リン (P) などの屈折率を増加させる不純物や、フッ素 (F)、ボロン (B) などの屈折率を低減させる不純物を添加した石英ガラスを用いることで実現できる。また、コア間距離を D とする。

【0028】

図 2 に、コアの比屈折率 $\Delta = 0.35\%$ とした時の、コア半径に対する遮断波長を計算

50

したものを示す。ITU-Tにおける光ファイバ標準勧告では、遮断波長は1260 nmもしくは1530 nmである（非特許文献8，9を参照。）。

【0029】

一般に長距離伝送では1550 nm帯であるC帯を用いる場合が主であるため、遮断波長を1530 nm以下とすることが望ましく、コア半径aは4.8 μm 以下としなければならないことがわかる。

【0030】

一般に、遮断波長はコア半径及びコアの比屈折率 Δ に依存して変化するが、遮断波長の設計は光ファイバ設計において基本的な事項であるため、ここでは詳しく説明しない。なお、遮断波長より波長が長い光はその光ファイバを基本モードのみ（シングルモード）で伝搬し、遮断波長より波長が短い光は基本モードの他に高次モードでも伝搬（マルチモード）する。

【0031】

マルチコア光ファイバにおいてコアを配置する際には、図3に示す配置が考えられる。大きく分けて、三角格子状、円環状、正方格子状があり、それぞれ、7コア、19コア、4・6・8・10コア、12コアが検討されているが、図3では7、8、10、12、19コアを図示している。

【0032】

[コア間隔仮決定手順S02及び漏洩損失比較手順S03]

マルチコア光ファイバを設計する際には、そのクラッド外径を125 μm とすることは大きなメリット（製造容易性、接続性、及び機械的信頼性）がある。そこで、クラッド外径を125 μm と仮定した時に、7、8、10、12、19コアファイバにおけるコア間隔の上限を算出した。

【0033】

コア間隔の上限を算出するときに制限となるのは漏えい損失である。一般に、コアとクラッド外面との距離であるクラッド厚が小さくなると、伝搬するモードがクラッド外側に漏えいして損失が増加する。これは漏えい損失と呼ばれ、光ファイバの設計の際には、十分小さい値としなければならない。

【0034】

図4は、三角格子状にコアを7個配置し、クラッド直径を125 μm とした時の、ファイバ中心からコア中心までの距離の最大値と漏えい損失の関係を示したものである。コア中心からの距離が大きくなると、損失が増加していることがわかる。図4においてはコア半径a = 4.8 μm である場合を図示しており、光ファイバの損失は一般的に0.2 dB/kmである。本設計方法では、その二桁小さい値に漏えい損失を抑える、つまり0.001 dB/km以下を目標とする。三角格子状に7コアの場合、中心からの距離は26 μm 以下でなければならないことがわかる。

【0035】

図4の第二横軸に、ファイバ中心からの距離をコア間隔に変換した値を記載している。三角格子状に7個コアを配置した構造では、中心から外側コアの距離はコア間隔と等しくなるため、漏えい損失を抑えるためには、コア間隔についても26 μm 以下としなければならないことがわかる。

【0036】

図5は、円環状に8個のコアを配置した場合の計算結果である。図4と同様に第二横軸に、中心から外側コアの距離をコア間隔に変換したものを記載しており、0.001 dB/km以下に漏えい損失を抑えるためには、コア間隔を20 μm 以下としなければならない。図6は、円環状に10個のコアを配置した場合の計算結果である。0.001 dB/km以下に漏えい損失を抑えるためには、コア間隔を16 μm 以下としなければならない。

【0037】

図7は、正方格子状に12個のコアを配置した場合の計算結果である。中心からコアま

10

20

30

40

50

での距離については、12個のコアの中で最もファイバ中心から離れたコアで算出を行っている。0.001 dB/km以下に漏えい損失を抑えるためには、コア間隔を16.4 μm 以下としなければならない。

【0038】

図8は、三角格子状に19個のコアを配置した場合の計算結果である。19コア構造の場合、ファイバ中心から最外コアまでの距離の半分がコア間隔に相当する。0.001 dB/km以下に漏えい損失を抑えるためには、コア間隔を13 μm 以下としなければならない。

【0039】

[捻じれ速度仮決定手順S04及び結合量比較手順S05]

上記のコア間隔の上限を満たしつつ、モード間で結合するためのファイバの捻じれを計算した。計算に用いたマルチコア光ファイバのコア数は7、8、10、12とし、コア配置は図3で示した通りである。コア間隔は図4～図7で得られた上限値としており、それぞれ26、20、16、16.4 μm としている。計算ではビーム伝搬法を用いており、曲げ半径140 mmとし、捻じれ速度 γ rad/mを変化させて、入力したモードが伝搬後にどの程度他のモードに結合したか、つまり、あるコアに入力した光が伝搬後にどの程度他のコアに結合したかを算出している。ここで、捻じれ速度とは、単位長(m)あたりにファイバがどれだけ捻じれているかを示しており、ファイバの断面を見た時の周方向に対する捻じれを意味している。なお、曲げ半径を140 mmとしたのは、非特許文献10に記載の通り、遮断波長の測定に曲げ半径140 mmが用いられていることに基づいて

10

20

【0040】

図9と図10は、マルチコア光ファイバの捻じれ速度に対するモード間結合量の計算結果である。縦軸はモード間の結合量をdB/mで表し、横軸は捻じれ速度を示している。光ファイバを伝搬するモードはコア数と同じである。たとえば7コアファイバでは伝搬モードは7つ存在することになる。以下では、1つのコアを伝搬する光を1つのモード、コア間で光が結合することをモード間結合と説明することがある。

【0041】

図9の計算は、基準モードを最も実効屈折率が高い基本モードとし、結合先としては、第一高次モードの結合量としている。一般に、実効屈折率が近接しているモード間が主な結合を生じるモードの組み合わせであり、基本モードからは第一高次モードとの結合を計算すれば十分である。なお、ファイバが所定の曲げ半径で曲がっているマルチコアファイバにおいては、曲げに対して外側のコアの実効的な屈折率が上昇し、内側のコアの実効的な屈折率が減少する。モードの次数の定義は、実効屈折率順で定義されるため、実効屈折率の降順に基本モード～最高次モードと定義される。図9より、それぞれのコア数とコア配置において、ある一定の捻じれ速度において結合量が飽和することがわかる。

30

【0042】

さて、マルチコア光ファイバのインパルス応答幅を低減するためには、所定の距離で全てのモード間(コア間)で強く結合する必要がある。

【0043】

図10は、基本モードから実効屈折率が最も異なる最高次のモードへの結合量を計算したものを示す。結合量(縦軸)の単位はdB/kmとしている。図10での結合量の計算においては、近接したコアへ図9で計算された結合量で結合するとし、これを繰り返すことで最高次のモードに至るまでの総結合量を算出している。基本モードから最高次のモードへの結合では、曲げに対して最も外側にあるコアから最も内側にあるコアへ、複数のコアを経由して結合することを意味している。実効屈折率が近接しているモード間の結合量は全て等しいとしている。本計算においても図9の結果と同様に、コア数やコア配置に応じて一定の捻じれ速度でモード間結合量が飽和している。

40

【0044】

図9及び図10の計算結果より、7コアでは0.5 π rad/m以上、8コアでは0.

50

$5\pi \text{ rad/m}$ 以上、10コアでは $10\pi \text{ rad/m}$ 以上、12コアでは $3\pi \text{ rad/m}$ 以上とすることでモード間結合量が飽和し、捻じれ速度として望ましいことがわかる。後述するように、モード間結合量を -10 dB/km 以上とすれば、必要な捻じれ速度は、7コアでは $0.2\pi \text{ rad/m}$ 以上、8コアでは $0.45\pi \text{ rad/m}$ 以上、10コアでは $0.8\pi \text{ rad/m}$ 以上、12コアでは $2.7\pi \text{ rad/m}$ 以上となる。

【0045】

一方、捻じれ速度には、装置の物理上の制約があると考えられている。具体的には、ファイバ製造時に付与できる捻じれ速度を $20\pi \text{ rad/m}$ 以上とすることは現実的でない。例えば、図3に記載の三角格子状に19個コアをコア間隔 $13\mu\text{m}$ で配置したマルチコア光ファイバは、 -10 dB/km 以上のモード間結合を得るために $60\pi \text{ rad/m}$ 以上の捻じれ速度が必要であり、現実的でない。

10

【0046】

一方、モード間結合量は、捻じり速度だけでなくコア間隔にも影響される。このため、捻じれ速度が $20\pi \text{ rad/m}$ 以上になってしまうようなコア配列の場合、コア間隔を見直すことで捻じり速度を低減することができる。

【0047】

図11は、三角格子状にコアが7つ配置されたファイバにおいて、捻じれ速度を $20\pi \text{ rad/m}$ とした時のコア間隔と結合量（基本モードから第1高次モード）の計算結果である。曲げ半径については同様に 140mm としている。図11よりコア間隔が小さくなるとモード間結合量が低下していることがわかる。

20

【0048】

図12は、三角格子状にコアが7つ配置されたファイバにおいて、捻じれ速度を $20\pi \text{ rad/m}$ とした時のコア間隔と結合量（基本モードから最高次の導波モード）の計算結果である。基本モードから最高次の導波モードへの結合量の計算手法は図9の説明と同様である。図11及び図12よりコア間隔が小さくなるとモード間結合量が低下していることがわかる。

【0049】

図11と図12の結果から、結合量が -10 dB/km 以上となるためには、コア間隔の下限があると考えられる。具体的には、三角格子状7コアのマルチコア光ファイバの場合、コア間隔の下限は $15.5\mu\text{m}$ となる。つまり、図4で述べたコア間隔の最大値（三角格子状7コアの場合 $26\mu\text{m}$ ）のおよそ半分程度より短いコア間隔とすることができない。これは、8、10、12コア構造においても同様である。

30

【0050】

[設計値確定手順S06]

上記手順にて漏洩損失と結合量が所望量を満たさない（漏洩損失比較手順S03や結合量比較手順S05で“N o”）場合、構造仮決定手順S01でコア数、コア構造、クラッド直径を変えて再計算を実施し、コア間隔仮決定手順S02でコア間隔を変えて再計算を実施し、あるいは捻じれ速度仮決定手順S04で捻じれ速度を変えて再計算を実施する。これら手順を繰り返し、所望の漏洩損失と結合量を満たすコア数、コア構造、クラッド直径、コア間隔、捻じれ速度を見いだせたとき、当該構造をマルチコア光ファイバの設計値に確定する。

40

【0051】

[マルチコア光ファイバの例]

本設計方法で設計されたマルチコア光ファイバの例を説明する。

つまり、ここで紹介するマルチコア光ファイバは、伝搬する光の波長帯において単一の伝搬モードとなるコアを複数備えるマルチコア光ファイバであって、

各コアからの漏洩損失が 10^{-3} dB/km 以下となるコア間隔、及び

全てのコア間での結合量が -10 dB/km 以上となる長手方向の軸を中心とする捻じれを有する。

具体的な構造を紹介すると、

50

(1) クラッドの直径が $125\ \mu\text{m}$ であり、断面において7個のコアが三角格子状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $26\ \mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上であることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(2) クラッドの直径が $125\ \mu\text{m}$ であり、断面において8個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $20\ \mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $0.5\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上であることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(3) クラッドの直径が $125\ \mu\text{m}$ であり、断面において10個のコアが同心円状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $16\ \mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $10\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上であることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(4) クラッドの直径が $125\ \mu\text{m}$ であり、断面において12個のコアが正方格子状に配置されるコア配置を持ち、前記コア間隔が $16.4\ \mu\text{m}$ 以下、及び前記捻じれが $3\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上であることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

【0052】

これらのマルチコア光ファイバは、遮断波長が $1530\ \text{nm}$ 以下となるコア半径を有することを特徴とする。これらのマルチコア光ファイバを長距離伝送用のC帯波長を使用する伝送システムに適用することができる。

【0053】

本実施形態では、図3のようなコア構造のマルチコア光ファイバを設計したが、コア数2や4のマルチコア光ファイバの場合も同様の手順でコア構造及び捻じれ速度を設計することができる。

【0054】

[モード間結合量を $-10\ \text{dB}/\text{km}$ 以上とする理由]

必要なモード間結合量はインパルス応答幅で決定する。光増幅器で挟まれた中継区間が一般に $40\ \text{km}$ 以上であることを鑑み、マルチコア光ファイバの伝送距離を $40\ \text{km}$ とする。図13は、インパルス応答形状の結合量依存性を計算した結果である。モード間のDMDは $1\ \text{ns}/\text{km}$ としている。

【0055】

モード間結合量が $-20\ \text{dB}/\text{km}$ では、両端に大きな強度を示すパルスが存在し、その幅は $40\ \text{ns}$ と、累積DMD ($1\ \text{ns}/\text{km} \times 40\ \text{km}$) と同じ値となっている。モード間結合量が $-10\ \text{dB}/\text{km}$ とした場合は、両端のパルス強度が低下しているものの、インパルス応答幅は累積DMDと同じである。

【0056】

一方で、モード間結合量が $-5\ \text{dB}/\text{km}$ 以上の結合量では、インパルス応答形状がガウシアン形状となっている。モード間結合が強い場合はインパルス応答形状がガウス形状となることはよく知られている。 $-3\ \text{dB}/\text{km}$ の場合は同様にガウス形状であるが、その幅がさらに小さくなっていることわかる。

【0057】

非特許文献11によるとインパルス応答形状がガウス形状となると、そのインパルス応答幅は距離の平方根に比例し、距離に比例する比結合型のファイバと比較すると、特に長距離伝送においてインパルス応答幅を低減できることが利点である。よって、結合量に対してインパルス応答幅がガウシアンとなる結合量を計算した。

【0058】

図14は、結合量とインパルス応答形状をガウス波形でフィッティングした場合の相関係数を算出した結果である。図14より、 $-10\ \text{dB}/\text{km}$ 以上の結合量でインパルス応答は理想的なガウス波形と相関係数が95%以上の形状となる。図15は、結合量とインパルス応答波形のガウスフィッティングにより得られる標準偏差との関係を示す。結合量が多いほどインパルス応答幅が小さくなることがわかる。

【0059】

つまり、図14と図15の結果から、全モード間で $-10\ \text{dB}/\text{km}$ 以上の結合が得られるとインパルス応答幅を大きく低減することが可能ということがわかる。従って、本設

10

20

30

40

50

計方法では -10 dB/km 以上の結合量を得られるコア構造、コア間隔、捻じれ速度を見出すこととしている。

【0060】

[捻じれ付与手段]

ファイバを捻じる手段としては、一般的に、従来のシングルモードファイバにおいても、偏波モード分散の低減を目的として、ファイバの作製時にファイバを捻じることが行われている。よって、本願のコア間距離が従来の非結合型マルチコア光ファイバと比較して小さい結合型マルチコア光ファイバの製造において、ファイバの捻じりながら製造を行うことで、よりコア間距離が小さなファイバを実現することができる。ファイバ製造時にファイバを捻じる方法については、非特許文献12に記載の方法を用いることができる。

10

【0061】

上記のファイバの製造時に捻じれを与える手法の他に、光ファイバーを収容するケーブルが、ファイバを捻じる構造を備えることで同様の効果を得ることができる。例えば、非特許文献13に記載のテープ心線をSZケーブルに収容することで発生するねじれは、同様に本発明のファイバに適用することで捻じれを生じさせることができる。

【0062】

[付記]

以下は、本実施形態のマルチコア光ファイバを説明したものである。

(課題)

マルチコア光ファイバとして、限られた光ファイバ断面積により多数のコアを配置することが望ましいが、コア数やコア配置によってモード間結合量が変わるため、通信用ファイバとしてどのように結合型マルチコア光ファイバを設計してよいか不明である。

20

(解決手段)

本発明では、上記の課題を解決するための発明であり、モード間が強く結合するクラッド外径が $125\text{ }\mu\text{m}$ である結合型マルチコア光ファイバであって、コア数及びコア配置によってファイバの捻じれ周期に応じて適切に設計し、モード間の結合を積極的に引き起こすことで、ファイバのインパルス応答幅を低減し、課題を解決する。

【0063】

具体的には次の通りである。

(1) :

コア領域が、最小コア間隔Dで前記コアの屈折率より小さい屈折率を有するクラッド領域に2個以上配置された光ファイバであって、
前記コアは各々単一の伝搬モードを有する構造であって、
コア間隔がコアを伝搬する基本モードの漏えい損失が 10^{-3} dB/km 以下となるよう設定され、
モード間の結合が -10 dB/km 以上となるようマルチコア光ファイバが所定の速度 $\gamma\text{ rad/m}$ 以上で捻じられていることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

30

(2) :

コア領域が、最小コア間隔Dで前記コアの屈折率より小さい屈折率を有するクラッド領域に三角格子状に7個配置された光ファイバであって、
前記コアは各々単一の伝搬モードを有する構造であって、
コア間隔が $26\text{ }\mu\text{m}$ 以下であって、
 $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上の捻じれが生じていること
を満たすことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

40

(3) :

コア領域が、最小コア間隔Dで前記コアの屈折率より小さい屈折率を有するクラッド領域に同心円状に8個配置された光ファイバであって、
前記コアは各々単一の伝搬モードを有する構造であって、
コア間隔が $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下であって、
 $0.5\pi\text{ rad/m}$ 以上の捻じれが生じていること

50

を満たすことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(4) :

コア領域が、最小コア間隔 D で前記コアの屈折率より小さい屈折率を有するクラッド領域に同心円状に 10 個配置された光ファイバであって、
前記コアは各々単一の伝搬モードを有する構造であって、
コア間隔が $16\ \mu\text{m}$ 以下であって、
 $10\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上の捻じれが生じていること
を満たすことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(5) :

コア領域が、最小コア間隔 D で前記コアの屈折率より小さい屈折率を有するクラッド領域に正方格子状に 12 個配置された光ファイバであって、
前記コアは各々単一の伝搬モードを有する構造であって、
コア間隔が $16.4\ \mu\text{m}$ 以下であって、
 $3\ \pi\ \text{rad}/\text{m}$ 以上の捻じれが生じていること
を満たすことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

(6) :

クラッド直径が $125\ \mu\text{m}$ である上記 (1) ~ (5) に記載のマルチコア光ファイバ。

(7) :

前記各コアが、遮断波長が $1530\ \text{nm}$ 以下であることを特徴とする上記 (1) ~ (6) に記載のマルチコア光ファイバ。

【0064】

(効果)

本発明の光ファイバによって、より小さな面積で多くのコアを配置することができることから、コアの多重度が向上し、伝送容量を拡大する効果を奏する。

また、伝搬するモードの群遅延差が小さいことから、受信端でモード間クロストークを補償する MIMO 処理における計算負荷が小さくなるという効果を奏する。

さらに、コア間距離を、従来のマルチコア光ファイバより小さくできるため、同じクラッド径のファイバで比較すると、コアからクラッド端までのクラッド厚を大きくすることができ、損失を低減できる効果を奏する。

そして、クラッド外径が $125\ \mu\text{m}$ であるため、既存の光ファイバと同様な製造技術・接続技術・機械信頼性設計を流用することができるという効果を奏する。

【産業上の利用可能性】

【0065】

本発明は、光伝送システムにおける伝送媒体として利用できる。

【符号の説明】

【0066】

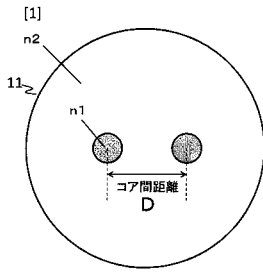
11 : マルチコア光ファイバ

10

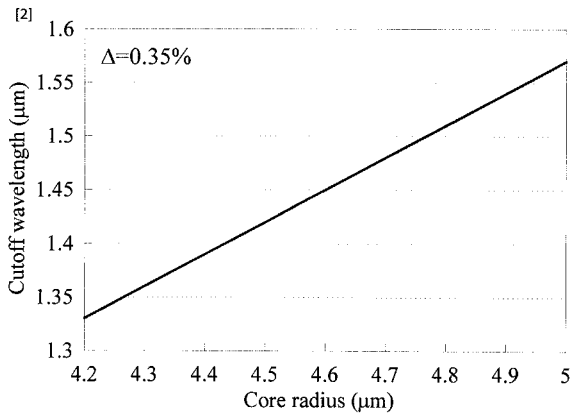
20

30

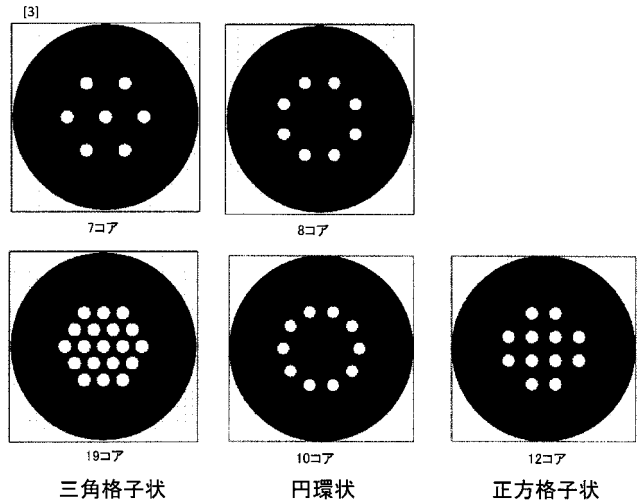
【図 1】



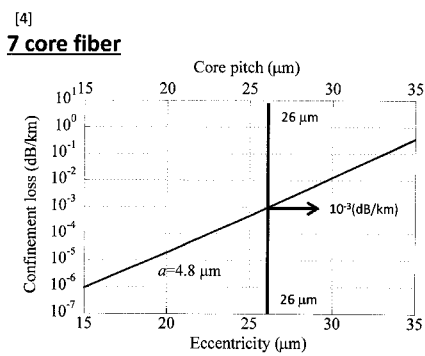
【図 2】



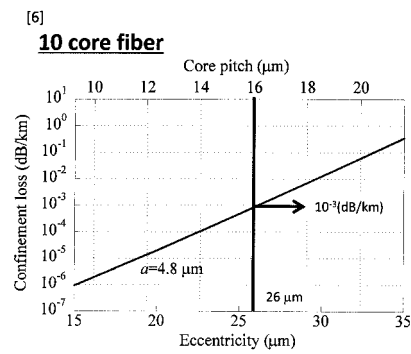
【図 3】



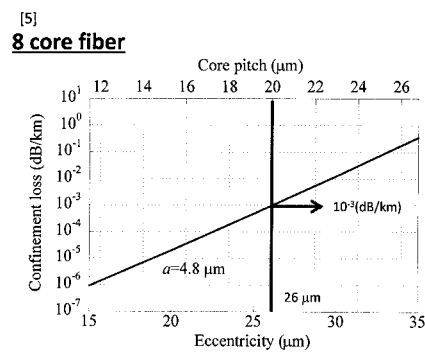
【図 4】



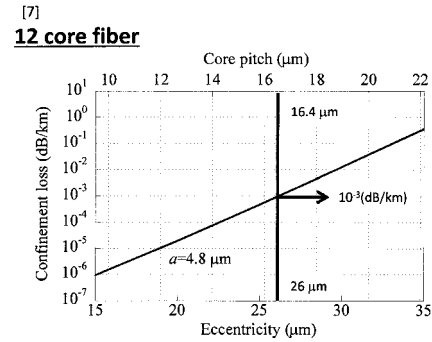
【図 6】



【図 5】

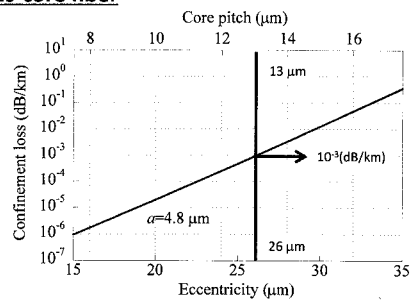


【図 7】



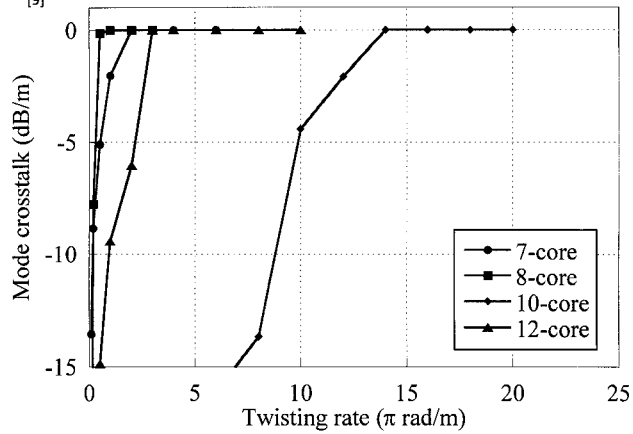
【図 8】

[8]

19 core fiber

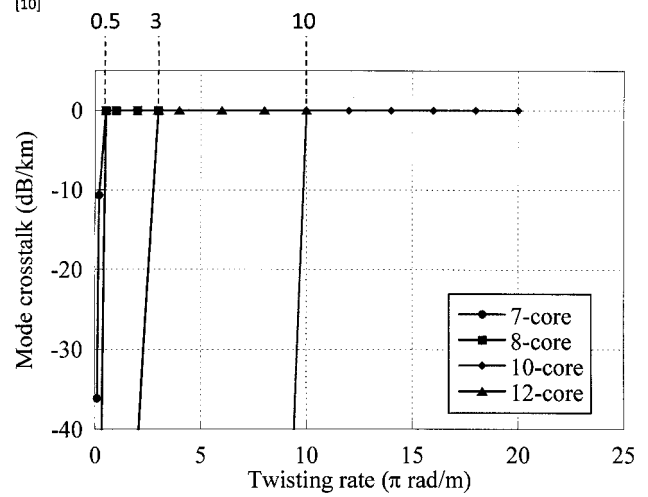
【図 9】

[9]



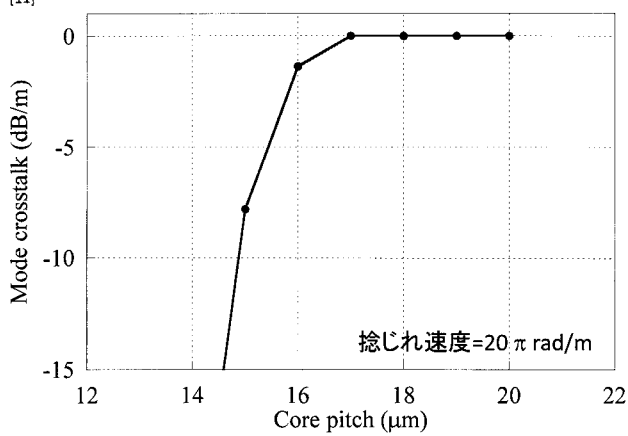
【図 10】

[10]



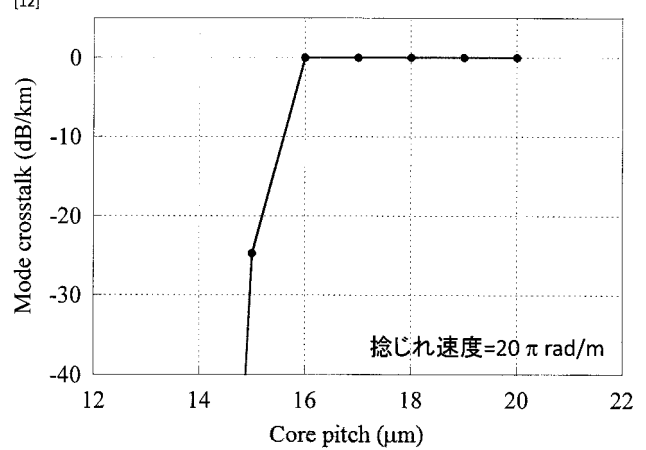
【図 11】

[11]



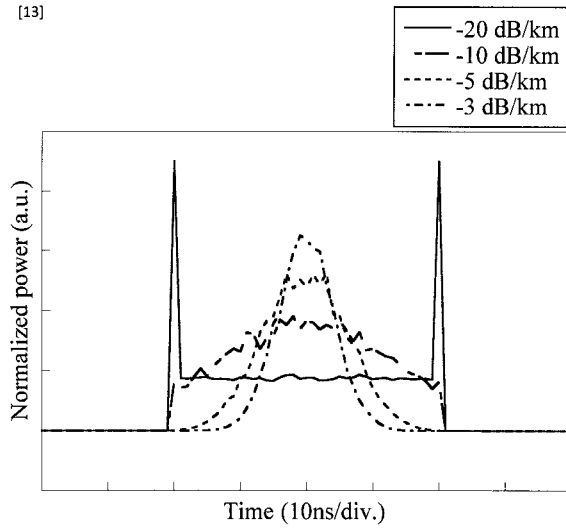
【図 12】

[12]



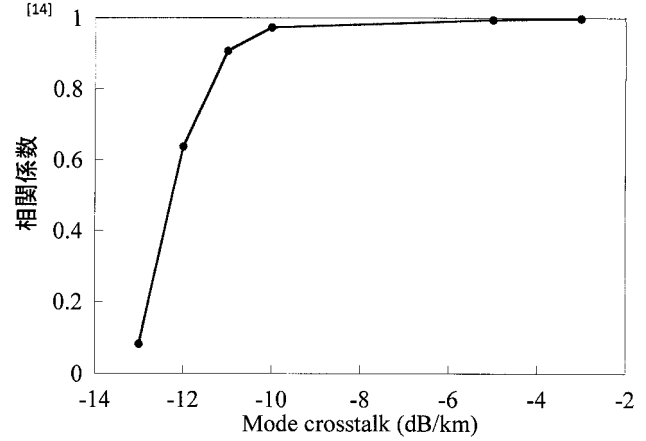
【図 13】

[13]



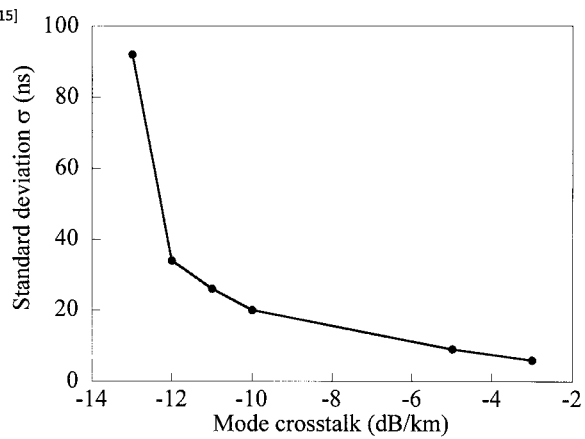
【図 14】

[14]



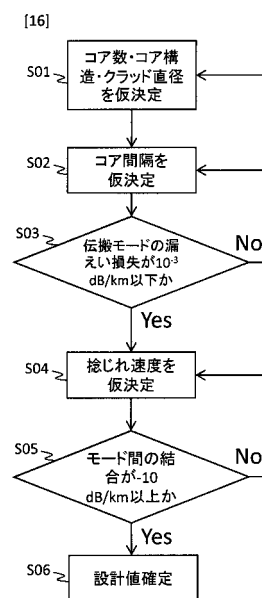
【図 15】

[15]



【図 16】

[16]



フロントページの続き

(72)発明者 森 崇嘉

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 和田 雅樹

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

Fターム(参考) 2H150 AB04 AB05 AB07 AB08 AB09 AB10 AC31 AC57 AD22 AE15
AE28 AE29