

明 細 書

発明の名称：マルチコアファイバ及び光ケーブル

技術分野

[0001] 本発明は、マルチコアファイバ及びこれを用いた光ケーブルに関する。

本願は、2015年2月18日に、日本に出願された特願2015-030082号に基づき優先権を主張し、これらの内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 近年の通信トラフィックの増大に対処するため、更なる通信（伝送）容量の増大が求められている。しかし、従来の光通信に用いられるシングルモードファイバ（SMF）を用いた光通信システムでは、容量の増大に対する限界が予想されている。その限界を超えるための技術として、空間多重の研究開発が盛んに行われている。

[0003] 空間多重を実現する光ファイバとして、1つのコア内に複数のモードを伝搬させ、それぞれのモードに信号を載せることで容量の増大を図った数モードファイバ（FMF）と、複数のコアのそれぞれに信号を載せることで容量の増大を図ったマルチコアファイバ（MCF）とがある（MCFについては特許文献1～6参照）。

[0004] また、MCFには、大きく分けて、各コアが独立して情報を伝送させる非結合型MCFと、各コア（のモード）が結合することによってスーパーモードを形成し、それぞれのスーパーモードに情報を伝送させる結合型MCF（C-MCF：Coupled Multicore fiber）との2種類がある（C-MCFについては非特許文献1～3参照）。

[0005] 特に、数モード伝送においては、各モード間の群遅延時間差（DMGD：Differential mode group delay）を低減することが、MIMO（Multiple-input and Multiple-output）等の信号処理の負荷の削減のために重要である。C-MCFでは、スーパーモード同士の結合を強めることによってDMGDの低減を目指す検討が行われており、近年注目を集めている（非特許文献2

， 3 参照）。

先行技術文献

特許文献

- [0006] 特許文献1：国際公開第2010／038861号
特許文献2：日本国特開2011－150133号公報
特許文献3：日本国特開2013－40078号公報
特許文献4：日本国特開2013－41148号公報
特許文献5：国際公開第2013／161825号
特許文献6：日本国特許第5117636号公報

非特許文献

- [0007] 非特許文献1：C.Xia, et al., “Supermodes for optical transmission,” Optics Express, Vol.19, No.17, pp.16653-16664, 2011年.
非特許文献2：R.Ryf, et al., “Impulse Response Analysis of Coupled-Core 3-Core Fibers,” ECOC2012, Mo.1.F.4, 2012年.
非特許文献3：R.Ryf, et al., “1705-km Transmission over Coupled-Core Fibre Supporting 6 Spatial Modes,” ECOC2014, PD.3.2, 2014年.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0008] C-MCFでは、スーパーモード同士が強く結合するため、すなわち、スーパーモード同士の実効屈折率（ n_{eff} ）の差（ Δn_{eff} ）が小さいため、DMGDを低減することができる（非特許文献2参照）。しかし、従来型のC-MCFにおいて Δn_{eff} を小さくするためには、コア間距離をある程度広げなければならない。例えば、非特許文献2では、3コアのC-MCFに対して、コア間距離を29 μm とした例が報告されている。コア間距離を広げることは空間多重度の低下につながるため、コア間距離をより狭くできる構造が必要である。
- [0009] 加えて、非結合型MCFのコアのひとつひとつを、C-MCF（これと同

様に、相互に結合可能な2以上のコアを含む領域）とすることを想定した場合に、非結合型MCFのコア間クロストークを低減する（すなわち、非結合型MCFのコア間距離を大きくする）ためには、C-MCFのコア間距離をより狭くすることが望ましい。

[0010] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、従来よりコア間距離を狭くしてもDMGDを抑制することが可能なマルチコアファイバ及びこれを用いた光ケーブルを提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0011] 本発明の第1態様は、マルチコアファイバであって、すべてのコアにおいてシングルモード伝送が可能な2以上のコアと、前記2以上のコアの周囲を覆う共通のクラッドと、前記クラッドよりも屈折率が低い低屈折率部とを備え、長手方向に垂直な断面において、前記2以上のコアの一部又は全部からなる2以上のコアが円環状に配置された領域を有し、前記低屈折率部の少なくとも一部は、前記領域に含まれるコアの内接円の内側に配置されている。

[0012] 本発明の第2態様は、上記第1態様のマルチコアファイバにおいて、前記マルチコアファイバが、結合型マルチコアファイバであってもよい。

本発明の第3態様は、上記第1態様のマルチコアファイバにおいて、前記2以上のコアが円環状に配置された領域を2以上有し、前記領域の少なくとも1つが前記低屈折率部を有し、前記領域内において前記2以上のコアが結合型であってもよい。

本発明の第4態様は、上記第1～第3態様のいずれか1態様のマルチコアファイバにおいて、前記低屈折率部が、空孔であってもよい。

[0013] 本発明の第5態様は、光ケーブルであって、上記第1～第4態様のいずれか1態様のマルチコアファイバを少なくとも一部に有する。

発明の効果

[0014] 上記本発明の態様によれば、スーパーモード間の実効屈折率差（ Δn_{eff} ）を小さくすることができるので、コア間距離を狭くしてもDMGDを抑制することができる。また、コア間距離が等しい条件では、DMGDをより低減す

ることができる。

図面の簡単な説明

[0015] [図1A]空孔なしのマルチコアファイバの一例を示す断面図である。

[図1B]空孔ありのマルチコアファイバの一例を示す断面図である。

[図2]同種3コアC-MCFのフィールド分布であって、(a) 1次スーパーモード、(b) 2次スーパーモード、及び(c) 3次スーパーモードを例示する模式図(図面代用写真)である。

[図3]同種3コアC-MCFにおける Δn_{eff} のコア間距離依存性の一例を示すグラフである。

[図4]同種3コアC-MCFにおけるDMGDのコア間距離依存性の一例を示すグラフである。

[図5]同種3コアC-MCFにおけるDMGD、及び Δn_{eff} のコア間距離依存性の一例を示すグラフである。

[図6]長手方向にN分割されたファイバの模式図である。

[図7A]x方向のマイクロバンドを示す模式図である。

[図7B]等価直線導波路を示す模式図である。

[図7C]等価直線導波路の屈折率分布を示す模式図である。

[図8]同種3コアC-MCF ($a_2 = 0.0 \mu\text{m}$)における1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性の一例を示すグラフである。

[図9]同種3コアC-MCF ($a_2 = 4.2 \mu\text{m}$)における1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性の一例を示すグラフである。

[図10]同種3コアC-MCF ($a_2 = 5.2 \mu\text{m}$)における1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性の一例を示すグラフである。

[図11]同種3コアC-MCF ($a_2 = 6.2 \mu\text{m}$)における1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性の一例を示すグラフである。

[図12]同種3コアC-MCFにおける1次、3次のスーパーモード間DMGDの σ 依存性の一例を示すグラフである。

[図13]同種3コアC-MCFにおける1次～3次スーパーモードのDMGD

の σ 依存性の一例を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0016] 以下、好適な実施形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。

図1 A及び図1 Bに、同種3コアC-MCFの断面図を示す。図1 Aは、空孔が無い場合のマルチコアファイバ100であり、図1 Bは空孔（低屈折率部13）を付加したマルチコアファイバ10を示す。ここで、コア11の半径を a 、コア間距離（コア中心間距離）を Λ 、コア11の屈折率を n_{core} 、クラッド12の屈折率を n_{clad} とする。コア11の屈折率 n_{core} は、クラッド12の屈折率 n_{clad} より大きい。また、図1 Bにおいて、コア11と低屈折率部13との中心間距離を r とする。

[0017] すべてのコア11は、伝送帯域においてシングルモード伝送が可能である。クラッド12は、2以上のコア11の周囲を覆う共通のクラッドである。2以上のコア11は、同種のコアから構成されている。各コア単体の実効屈折率は同程度が好ましい。低屈折率部13は、クラッド12よりも屈折率が低い媒質から構成されている。低屈折率部13を構成する媒質は、固体でも液体でも気体でもよい。低屈折率部13が固体の場合は、ロッド状の部材をクラッドに挿入することで構成することができる。低屈折率部13が流体（液体、気体）である場合は、クラッド12の空孔として構成することができる。空孔内の気体が空気でもよく、MCFの外気が空孔内に導入されてもよい。空孔内が真空であってもよい。

[0018] マルチコアファイバ10の長手方向に垂直な断面において、2以上のコア11が、円環状に配置されている。3コアC-MCFは、3つのコアを有する。図2に、同種3コアC-MCFのフィールド分布を並べて例示する。3コアC-MCFでは、各コアがシングルモード動作する場合には、3つのスーパーモードが存在する。図2（a）は1次スーパーモード（1st）を示し、図2（b）は2次スーパーモード（2nd）を示し、図2（c）は3次スーパーモード（3rd）を示す。基本（1次）スーパーモードでは、3つのコアの電界が同符号であるのに対し、高次（2次及び3次）スーパーモードでは

、コア間に電界（フィールド）の符号が反転する節が形成される。これらの中で、基本スーパーモードの実効屈折率 n_{eff} が最も高く、高次スーパーモードの n_{eff} は基本スーパーモードの n_{eff} より低い。

[0019] 基本スーパーモードは、C-MCFの中心にもパワーが広がっているのに対して、高次スーパーモードは、基本スーパーモードに比べてC-MCFの中心にはパワーが局在していない。そこで、高次スーパーモードのパワーに比べて基本スーパーモードのパワーが局在している領域に低屈折率部を設けると、高次スーパーモードの n_{eff} に比べて、基本スーパーモードの n_{eff} が大きく低下する。これにより、スーパーモード間の n_{eff} の差 Δn_{eff} が小さくなり、スーパーモード間の結合を強めることができる。その結果として、低屈折率部を有しないC-MCFと同程度のDMGDを得ようとした場合に、コア間距離をより小さくして、空間多重度を向上することができる。また、低屈折率部を有しないC-MCFと同程度のコア間距離を設けた場合には、DMGDをより低減することができる。

MCFのDMGDとしては、例えば500 ps/km以下、さらには200 ps/km以下が好ましい。

[0020] 低屈折率部の少なくとも一部が、円環状に配置された複数のコアの外接円の内側に配置されていることが好ましい。さらに、低屈折率部の少なくとも一部が、円環状に配置された複数のコアの内接円の内側に配置されていることが好ましい。図1Bの場合、外接円は半径が $r + a/2$ の円であり、内接円は半径が $r - a/2$ の円である。低屈折率部が、内接円の中心を含むことが好ましい。低屈折率部の全部が、内接円の内側に配置されてもよい。低屈折率部の中心が、内接円の中心と一致してもよい。低屈折率部は、コアに接しないことが好ましく、クラッドが低屈折率部の周囲を覆うことが好ましい。円環状に配置されたすべてのコア（外周）に内接する円が存在しない場合、これらのコアの内側で半径が最大となる円の内側に、低屈折率部の少なくとも一部が配置されていることが好ましい。

[0021] 図1Bに示す例では、MCFが、円環状に配置された複数のコアを含む領

域（結合型コア領域）を1つ有する場合を示すが、本発明はこの場合に限定されない。各コアは、同種又は異種であり得る。MCFが2以上の結合型コア領域を有してもよいし、1以上の結合型コア領域と1以上の非結合型コアを有してもよい。ここで、結合型コア領域とは、当該領域に含まれる複数のコア間に生じるスーパーモードを伝送に利用することが可能な領域をいう。また、非結合型コアとは、単一のコアを含み、他のコアとの間で伝送モードが独立しているものをいう。

[0022] 2以上の結合型コア領域を含むMCFにおいて、結合型コア領域の間は、相互に伝送モードが独立している（すなわち、各領域が非結合型である）。2以上の結合型コア領域を有するMCFでは、そのうち1以上の結合型コア領域に低屈折率部を設けることが好ましい。これにより、低屈折率部を設けた結合型コア領域において、領域内のコア間距離を小さくすることにより、領域間のコア間距離を大きくし、領域間のクロストークを低減することができる。

[0023] 以上、本発明を好適な実施形態に基づいて説明してきたが、本発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の改変が可能である。

本発明のMCFは、光伝送路、光導波路、光ケーブル等に使用される光ファイバの一部又は全部として用いることができる。光ケーブルは、本発明のMCFを少なくとも一部に有することが好ましい。

[0024] MCFのコア及びクラッドを構成する媒質としては、石英系ガラス（シリカガラス）、多成分ガラス、プラスチック等が挙げられる。石英系ガラスとしては、添加物を含まない純石英ガラスと、添加物を含む石英系ガラスがあり、添加物としては、Ge, Al, P, B, F, Cl, アルカリ金属等の1種又は2種以上が挙げられる。

[0025] C-MCFにおいてはFMFの場合と同様に、伝送路中での各種摂動（マイクロバンド、ねじれなど）により、モード間結合が発生するため、受信側では通常のMDM伝送と同様にMIMO処理が必要と考えられる。その際、

スーパーモード間のDMGDに伴う、MIMO処理の演算量増加が問題となる可能性がある。そこで、DMGDを低減した本発明のマルチコアファイバを用いることにより、MIMO等の信号処理の負荷削減を図ることができる。

[0026] MCFで伝送に使用される波長帯域は、特に限定されないが、Cバンド（1530～1565 nm）、Lバンド（1565～1625 nm）等が挙げられる。使用波長帯域でシングルモード動作する条件としては、正規化周波数 $v = 2\pi a (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2} / \lambda$ として、 $v \leq 2.405$ のシングルモード動作条件を満たすことが好ましい。比屈折率差 $\Delta = (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2) / (2n_{\text{core}}^2)$ が0.05%以上で、C+Lバンドで $v \leq 2.405$ が成り立つコア半径の上限はおおよそ13 μm である。それぞれのコア半径で $v \leq 2.405$ が成り立つ Δ は自動的に決めることができる。なお、 λ は波長であり、 $2\pi / \lambda$ は波数 k_0 である（後述の実施例を参照）。

また、 $v \geq 2.405$ となるような a あるいは Δ においては、LP₁₁モード以上の高次モードの伝送損失が α_{Loss} 以上であってもよい。このとき、 $\alpha_{\text{Loss}} > 0 \text{ dB/m}$ であり、例えば0.1 dB/m、0.5 dB/m、1.0 dB/m、2.0 dB/m等が挙げられる。ファイバのケーブルカットオフ波長 λ_{co} としては、例えば1260 nm以下、1000 nm以下等が挙げられる。

[0027] 一般的に、ファイバ型の方向性結合器の結合定数は、 a 、 Δ 及び Λ が一定の場合には、正規化周波数 v （ V でも同じ）に依存する。波長 λ をC+Lバンドの範囲で変えた場合には、 v 値の変化は最大0.15程度であり、結合定数の値はそれほど変わらない。コア径 a 及び比屈折率差 Δ が一定の場合には、ファイバ型の方向性結合器の結合定数は Λ / a が増加するに従い、おおよそ指数関数的に減少する。

[0028] 以上より、 Λ / a が小さすぎる場合には通常のFMFに近くなり、 Λ / a が大きすぎる場合には非結合型MCFに近くなると考えられる。 Λ / a の下限値としては、2.0、2.2、2.4、2.6、2.8、3.0等が挙げ

られる。また、 Λ/a の上限値としては、5.0、5.2、5.4、5.6、5.8、6.0等が挙げられる。 Λ/a の値としては、3.2、3.5、4.0、4.5、4.8等、適宜の値が挙げられる。

隣接するコア間の最短距離 ($\Lambda - 2a$) としては、 $\Lambda - 2a \geq 0 \mu\text{m}$ であり、例えば0.1 μm 、0.3 μm 、0.5 μm 、0.7 μm 、1.0 μm 等が挙げられる。

[0029] 低屈折率媒質（空孔等）の半径 a_2 は、特に限定されないが、 $a_2 > 0 \mu\text{m}$ である。 a_2 の下限値としては、例えば0.1 μm 、0.25 μm 、0.5 μm 、0.7 μm 、1.0 μm 、1.5 μm 、2.0 μm 、2.5 μm 、3.0 μm 等が挙げられる。

コアと低屈折率部との間の最短距離 ($r - a - a_2$) としては、 $r - a - a_2 \geq 0 \mu\text{m}$ であり、例えば0.1 μm 、0.3 μm 、0.5 μm 、0.7 μm 、1.0 μm 等が挙げられる。

実施例

[0030] ここでは、モード分割多重伝送のための同種3コア結合型ファイバの伝送特性を解析し、フルベクトル有限要素法解析（例えば、K. Saitoh and M. Koshiba, "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers," IEEE J. Quantum Electronics, vol. 38, no. 7, pp. 927-933, Jul. 2002参照）により、MCFのスーパーモード特性（実効屈折率、群遅延）を評価した。そして、中心に空孔を付加することにより、スーパーモード間の実効屈折率差を低減しモード間の結合を強め、モード間群遅延差を小さくすると同時に、コア間距離を小さくすることができることを示す。さらに、伝送路中のマイクロバンドによるモード間結合をフィールド結合理論によって評価し、マイクロバンドによる摂動の大きい強結合状態では、モード間実効屈折率差が小さいファイバほど、わずかな摂動でモード間の結合が生じ、モード間群遅延差がさらに小さくなることを明らかにした。

[0031] 図1Aに示すように、中心に低屈折率部を有しない同種3コアC-MCF

と、図1Bに示すように、中心に低屈折率部として空孔を設けた同種3コアC-MCFについて、次のように解析を実施した。ここで、コア11の半径を a 、コア11の屈折率を n_{core} 、クラッド12の屈折率を n_{clad} とする。図示例では、各コア11, 11, 11は、重心をファイバ中心とする正三角形の頂点上に配置されている。

[0032] コア及びクラッドの屈折率は、波長依存性を考慮し、Sellmeierの多項式により算出した。空孔を付加する場合、空孔半径を a_2 、空孔の屈折率を1.0とする。また、コア同士の中心間距離を Λ とし、空孔の中心（ここではファイバ中心）から各コアの中心までの距離を r とした。さらに、コアのクラッドに対する比屈折率差を $\Delta = (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2) / (2 n_{\text{core}}^2)$ とし、正規化周波数 V 値を $V = k_0 a (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2}$ とする。ここで、 k_0 は自由空間波数である。

[0033] 中心に低屈折率部を有しない同種3コアC-MCFのパラメータには、非特許文献2 (ECOC2012, Mo. 1.F.4) の3CF29のパラメータを用いた。すなわち、 $a = 6.2 \mu\text{m}$ 、 $V = 2.22$ 、 $\Lambda = 29 \mu\text{m}$ である。また、上述したように、3コアC-MCFにおける伝搬モードは3つであり、それぞれ1次、2次、3次スーパーモード（図8～11及び13では、それぞれmode 1、mode 2、mode 3）とよぶ。

[0034] このファイバの1次、 m 次スーパーモード間のDMGD、及び Δn_{eff} をそれぞれ、 $\text{DMGD} = \tau_{\text{mth}} - \tau_{\text{1st}}$ 、 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff mth}} - n_{\text{eff 1st}}$ と定義する。ここで、 τ_{1st} 及び τ_{mth} は、それぞれ1次及び m 次モードの群遅延時間を表し、 $n_{\text{eff 1st}}$ 及び $n_{\text{eff mth}}$ は、それぞれ1次及び m 次モードの実効屈折率を表す。3CF29においては、 $\text{DMGD} = 212 \text{ ps/km}$ 、 $\Delta n_{\text{eff}} = 8.37 \times 10^{-6}$ である。

[0035] 本ファイバに関して、図1Bに示すように、中心に空孔を付加することにより、DMGD、 Δn_{eff} を低減することでモード間結合を強くし、さらには、コア間距離 Λ を小さくし、空間多重度の向上が可能であることを示す。

[0036] 図3に、同種3コアC-MCFにおける Δn_{eff} のコア間距離依存性を示す。

コアパラメータは $a = 6.2 \mu\text{m}$ 、 $V = 2.22$ であり、実線が空孔なし、点線が空孔 (air) ありの場合を示す。空孔半径 a_2 は、 $a + a_2 + 1 = r$ を満たすように変化し、つまりコアと空孔の間の最短距離を常に $1 \mu\text{m}$ としている。図 3 より、空孔を付加した場合、空孔が無い場合ともに、 Λ を拡大することで Δn_{eff} を低減できることが分かる。これは、コア間距離が広がることでコア間の結合が弱まり、各スーパーモードがそれぞれのコアが孤立したときのモードに近づいていくためである。また、空孔を付加した場合は、空孔が無い場合よりも Δn_{eff} を低減できることが分かる。

[0037] 2 次、3 次のスーパーモードではその対称性から、図 2 (b)、図 2 (c) に示すように、空孔の有無にかかわらず、ファイバ中心で常に電界が 0 になる。一方、基本スーパーモードでは、ファイバ中心の電界が大きな値をもつことが図 2 (a) より分かる。よって、ファイバ中心に空孔を付加することで、高次スーパーモードの電界分布にはあまり影響を与えずに、基本スーパーモードのファイバ中心で電界強度を小さくすることができ、基本 (1 次) スーパーモードと高次 (2 次、3 次) スーパーモードとの間で、実効屈折率差を低減することが可能である。

[0038] 図 4 に、同種 3 コア C-MCF における DMGD のコア間距離依存性を示す。各パラメータは図 3 と同様である。図 4 より、空孔を付加した場合、空孔が無い場合ともに、図 3 の場合と同様に、 Λ を拡大することで常に DMGD を低減でき、また、空孔を付加することでさらに DMGD を低減できることが分かる。これは、 Δn_{eff} が低減したことによる効果と考えられる。

[0039] 図 5 に、同種 3 コア C-MCF における DMGD、及び Δn_{eff} のコア間距離依存性を示す。左軸が DMGD、右軸が Δn_{eff} を表す。実線、破線、一点鎖線、点線はそれぞれ空孔半径 a_2 が $0.0 \mu\text{m}$ 、 $4.2 \mu\text{m}$ 、 $5.2 \mu\text{m}$ 、 $6.2 \mu\text{m}$ の場合を表す。また各 a_2 に対し、コア間距離 Λ の最小値がそれぞれ $12.4 \mu\text{m}$ 、 $18.0 \mu\text{m}$ 、 $19.8 \mu\text{m}$ 、 $21.5 \mu\text{m}$ となることに注意する。これは、コア同士、またはコアと空孔が接するために最小値を持つためである。ここで、同種 3 コア C-MCF における Λ の最小値は、空孔無し

の場合は $2a$ であり、空孔を有する場合は $(a + a_2)$ の $\sqrt{3}$ 倍である。

[0040] 図5から、 a_2 が大きくなるにつれ、DMGDと Δn_{eff} がともに小さくなる
ことが分かる。この効果は、コア間距離 Λ が小さく、ファイバ中心のフー
ールド分布が強くなる構造で顕著となる。3CF29 ($\Lambda = 29.0 \mu\text{m}$ 、 $\text{DMGD} = 212 \text{ ps/km}$) のファイバと比較するため、 Δn_{eff} が 8.37×10^{-6} となる構造で比較すると、 $a_2 = 4.2, 5.2, 6.2 \mu\text{m}$ の各ファ
イバに対して、コア間距離はそれぞれ $\Lambda = 27.0, 26.3, 25.7 \mu\text{m}$ となる。このときDMGDは、それぞれ $179, 171, 167 \text{ ps/km}$ である。よって、空孔を付加することで、空孔無しファイバと同等の Δn_{eff}
に対して、DMGD及びコア間距離をともに小さくできる構造が存在するこ
とが分かる。

同様に、同じコア間距離に対して、 Δn_{eff} 、DMGDを小さくする構造も存
在する。以上より、3コアC-MCFの中心に空孔を付加することにより、
スーパーモード間の実効屈折率差を低減しモード間の結合を強め、モード間
群遅延差を小さくすると同時に、コア間距離を小さくすることができるこ
とが分かる。

[0041] 次に、マイクロバンドによるモード間結合を考慮した同種3コアC-MC
FのDMGDの評価について説明する。

ここではファイバ中のマイクロバンドに起因するモード間結合、及び、そ
れによって引き起こされるDMGDの変化について考察するため、次のよう
な解析モデルを設定した。

まず、ファイバ全体を図6のように、 N 個のセグメントに分割し ($i = 1, 2, \dots, N$)、各セグメントにおいて xy 平面内にマイクロバンドが存在
する状態を想定し、 x 方向、 y 方向の曲げ半径をそれぞれ R_x 、 R_y とする。
ファイバ長手方向を z 方向とし、これと垂直な2方向を x 及び y 方向とする
。

[0042] 図7Aは x 方向のマイクロバンドを想定した1セグメントの模式図、図7
Bは図7Aの等価直線導波路、図7Cは図7Bの屈折率分布を示す。図7A

では簡単のため、 xz 面のみを図示している。各セグメントには、平均値 $\mu = 0 \text{ m}^{-1}$ 、標準偏差 $\sigma = 1/R_{x,y} \text{ m}^{-1}$ の正規分布となるように曲げ半径 R_x 、 R_y をランダムに与える。 $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ のとき、マイクロベンドの影響がなく、ファイバが直線状態であることに相当する。図 7 (c) で、点線は曲げの無い場合の、また、実線は曲げのある場合の等価屈折率分布を示す。

[0043] 次に、フィールド結合理論に基づく解析について説明する。全モード数が M である結合系の電界 E 、及び磁界 H は次の式 (1)、(2) のように表される。

[0044] [数1]

$$E = \sum_{m=1}^M A_m E_m \quad (1)$$

[0045] [数2]

$$H = \sum_{m=1}^M A_m H_m \quad (2)$$

[0046] ここで、 A_m は m 次モードの振幅、 E_m 及び H_m はそれぞれ m 次モードの電界及び磁界（ベクトル）を表す。式 (1)、(2) より、一つのセグメント内での、各モードの伝搬を表す結合方程式はフィールド結合理論（例えば、A. Juarez et al., “Modeling of mode coupling in multimode fibers with respect to bandwidth and loss,” Journal of Lightwave Technology, vol.32, no.8, pp.1549-1558, Apr. 2014 参照）により、次の式 (3)、(4) のようになる。

[0047] [数3]

$$\frac{dA_m}{dz} = -j\beta_m A_m - j \sum_{m \neq n} \kappa_{mn} A_m \quad (3)$$

[0048]

[数4]

$$\kappa_{mn} = \omega \varepsilon_0 \frac{\iint (n_{bend}^2(x, y, R_x, R_y) - n_{nobend}^2(x, y)) E_m^* \cdot E_n dx dy}{\iint \vec{t}_z \cdot (E_m^* \times H_m + E_m \times H_m^*) dx dy} \quad (4)$$

[0049] ここで、 β_m はm次モードの伝搬定数、 κ_{mn} はm、n次モード間の結合係数を表す。

ω は角周波数、 ε_0 は真空誘電率を表す。 n_{bend} 、 n_{nobend} はそれぞれ曲げ状態(bend)、及び直線状態(no bend)での屈折率分布である。

[0050] 式(3)の解を、行列形式で表すと、次の式(5)、(6)のようになる。

[0051] [数5]

$$\begin{bmatrix} A_1(z) \\ \vdots \\ A_M(z) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_N \cdots \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_1 \begin{bmatrix} A_1(0) \\ \vdots \\ A_M(0) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} A_1(0) \\ \vdots \\ A_M(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0052] [数6]

$$\mathbf{T}(\omega) = \prod_{i=1}^N \mathbf{T}_i \quad (6)$$

[0053] ここで、各セグメントでの伝達行列を $\mathbf{T}_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$)、ファイバ全体の伝達行列を $\mathbf{T}$ (数式中の $\mathbf{T}$ はボード)としている。伝達行列 $\mathbf{T}$ を用いて、群遅延オペレータGDO(Group Delay Operator)を次の式(7)のように定義する。

[0054] [数7]

$$\mathbf{GDO}(\omega) = j\mathbf{T}(\omega)^{-1} \frac{\partial \mathbf{T}(\omega)}{\partial \omega} \quad (7)$$

[0055] GDOの各固有値に対する固有ベクトルは、摂動が無い場合の導波モード

の線形結合となり、プリンシパルモードと呼ばれる。各固有値はプリンシパルモードの群遅延時間となり、摂動がある場合の各モードの群遅延時間を示す。プリンシパルモードは、周波数の1次微分まで波長無依存であり、それゆえモード分散を生じないなど、ユニークな性質を有しており、最近、実験的にその存在が確認された（例えば、J.Carpenter, et al., “First demonstration of principal modes in a multimode fibre,” ECOC, PD.2.1, Sept.2014参照）。ここでは、このプリンシパルモードを通して、マイクロベンドによるモード間結合が存在する状態でのDMGDを考える。図8～12は、 Δn_{eff} を同等とした場合の比較であり、図13は、 Λ を同等とした場合の比較である。

[0056] 図8～11に、同種3コアC-MCFにおける1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性を示す。ここでは、DMGDを摂動の無い状態（ $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ ）における1次スーパーモードの群遅延時間との差と定義する。それゆえ、1次スーパーモード（mode 1）では、 $\sigma = 0 \text{ m}^{-1}$ においてDMGD = 0 psである。図8～11は、空孔半径 a_2 がそれぞれ0.0 μm 、4.2 μm 、5.2 μm 、6.2 μm である場合の結果を示す。

また、各コアパラメータは $a = 6.2 \mu\text{m}$ 、 $V = 2.22$ であり、 Λ は Δn_{eff} が約 8.37×10^{-6} となるようにそれぞれ設定している。またファイバ長は1 km、セグメントの分割数を $N = 10000$ とした。いずれの場合も、 σ が大きくなるにつれ、1次～3次スーパーモードのDMGDがある一定の値に収束していくことがわかる。つまり、3つのモードの群遅延時間差が小さくなり、 σ の大きいところでは、すべて同じ群遅延時間となっている。これはファイバ中でのモード間結合を通して、各モードの群速度が平均化されるためである。

[0057] 図12に、同種3コアC-MCFにおける1次、3次のモード間DMGDの σ 依存性を示す。ファイバ長は1 km、分割数を $N = 10000$ とした。 Δn_{eff} がすべてのファイバで同等であることから、DMGDの変化も同程度であることが分かる。ただし、空孔半径 a_2 が大きいほど、コア間距離 Λ を小さ

くすることができる。

[0058] 図13に、 $\Lambda = 29.0 \mu\text{m}$ 、 $a_2 = 0.0 \mu\text{m}$ 又は $6.2 \mu\text{m}$ の同種3コアC-MCFにおける1次～3次スーパーモードのDMGDの σ 依存性を示す。このとき、実効屈折率差はそれぞれ $\Delta n_{\text{eff}} = 8.37 \times 10^{-6}$ 、 3.26×10^{-6} である。またファイバ長は 1 km 、分割数を $N = 10000$ とした。空孔無し（ $a_2 = 0.0 \mu\text{m}$ ）の場合は図8と同様であるが、空孔を付加した場合（ $a_2 = 6.2 \mu\text{m}$ ）には、空孔無し（ $a_2 = 0.0 \mu\text{m}$ ）と比べてモード間実効屈折率差 Δn_{eff} が小さくなり、より小さな摂動でモード間結合が生じる。つまり、空孔を付加した場合（ $a_2 = 6.2 \mu\text{m}$ ）には、空孔無し（ $a_2 = 0.0 \mu\text{m}$ ）の場合と比べてより小さな摂動（ $\sigma < 0.002 \text{ m}^{-1}$ ）であっても、スーパーモード間のDMGDが収束することが分かる。

[0059] 以上より、同種3コアC-MCFにおいて、中心に空孔を付加することで、DMGD、 Δn_{eff} 、コア間距離を小さくできることを明らかにした。またフィールド結合理論を用いて、マイクロベンドを考慮したモード間結合とその群遅延に与える影響を評価し、ファイバ中の摂動が大きい場合には、モード間群遅延差がさらに低減されることを示した。

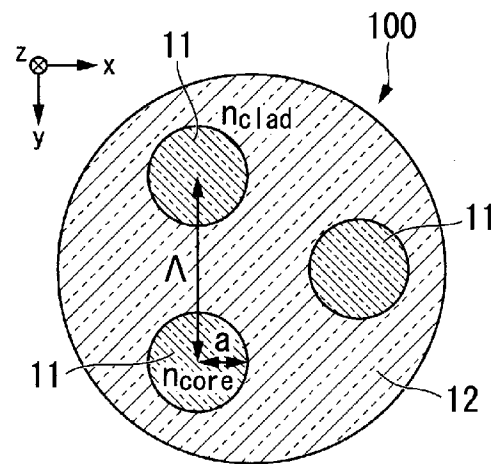
符号の説明

[0060] 10, 100…マルチコアファイバ、11…コア、12…クラッド、13…低屈折率部。

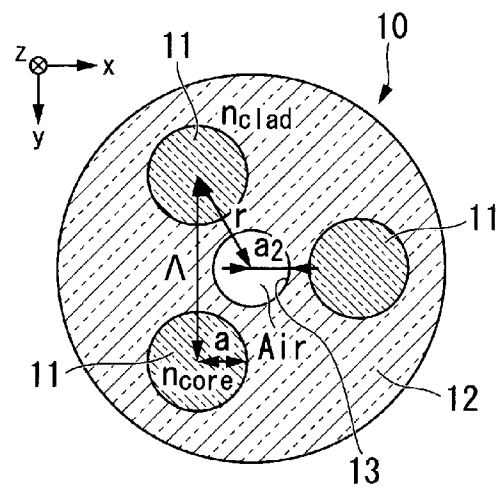
請求の範囲

- [請求項1] すべてのコアにおいてシングルモード伝送が可能な2以上のコアと、前記2以上のコアの周囲を覆う共通のクラッドと、前記クラッドよりも屈折率が低い低屈折率部とを備え、長手方向に垂直な断面において、前記2以上のコアの一部又は全部からなる2以上のコアが円環状に配置された領域を有し、前記低屈折率部の少なくとも一部は、前記領域に含まれるコアの内接円の内側に配置されている、マルチコアファイバ。
- [請求項2] 前記マルチコアファイバが、結合型マルチコアファイバである、請求項1に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項3] 前記2以上のコアが円環状に配置された領域を2以上有し、前記領域の少なくとも1つが前記低屈折率部を有し、前記領域内において前記2以上のコアが結合型である、請求項1に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項4] 前記低屈折率部が、空孔である、請求項1～3のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項5] 請求項1～4のいずれか1項に記載のマルチコアファイバを少なくとも一部に有する、光ケーブル。

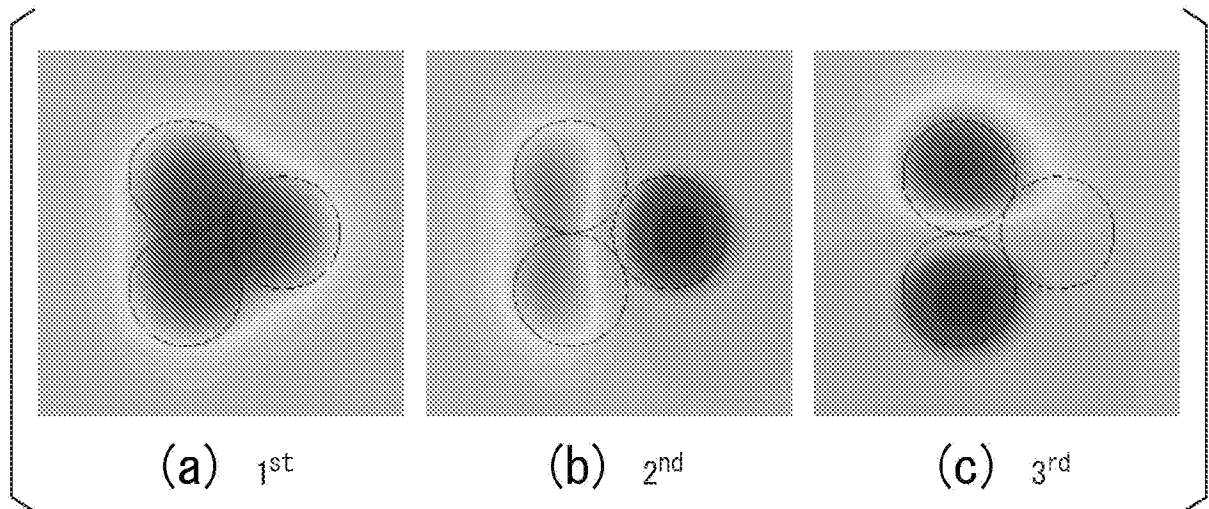
[図1A]



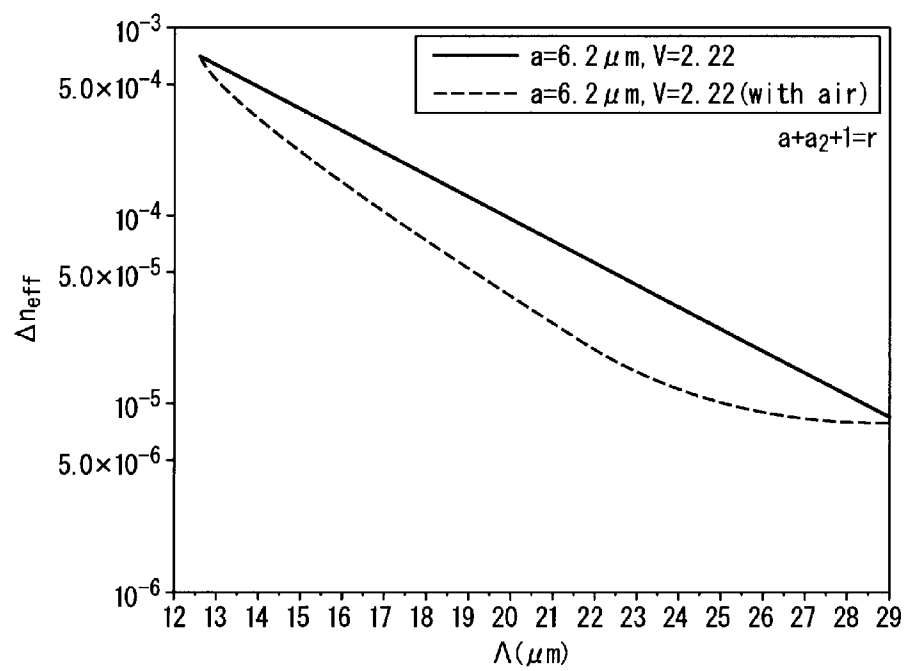
[図1B]



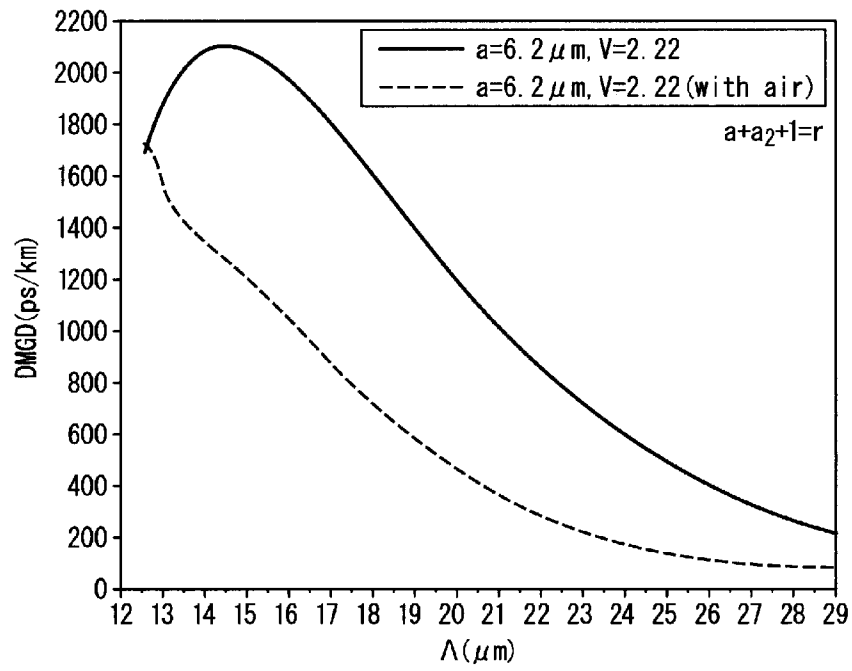
[図2]



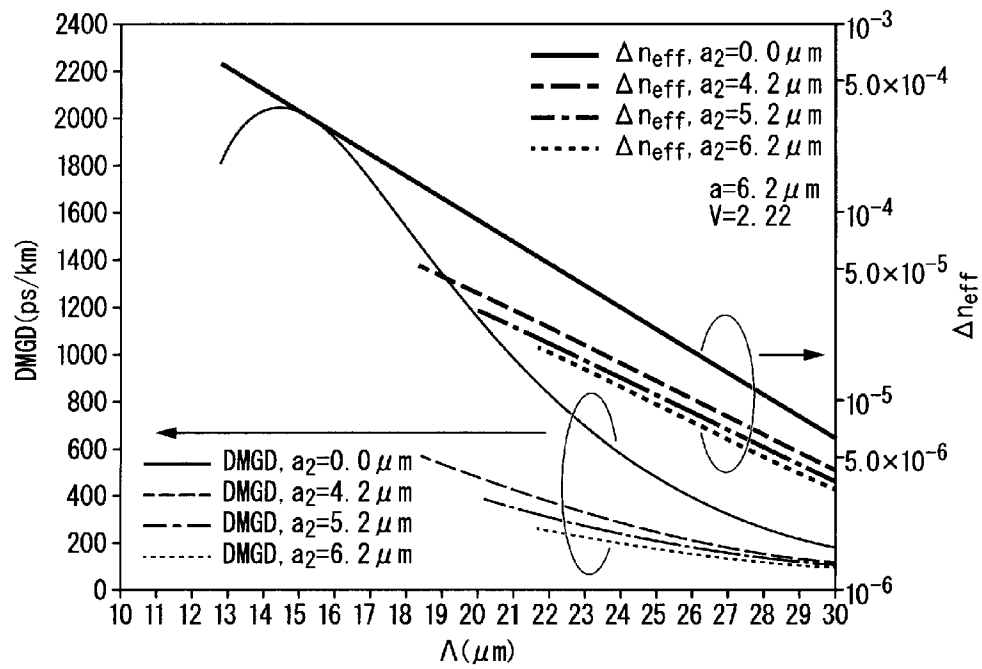
[図3]



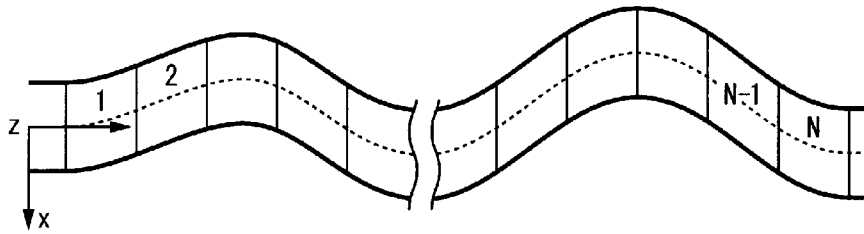
[図4]



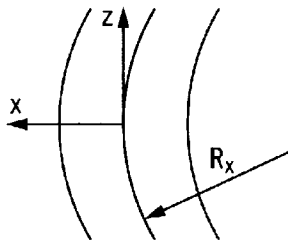
[図5]



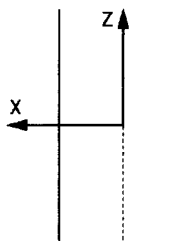
[図6]



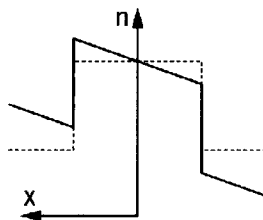
[図7A]



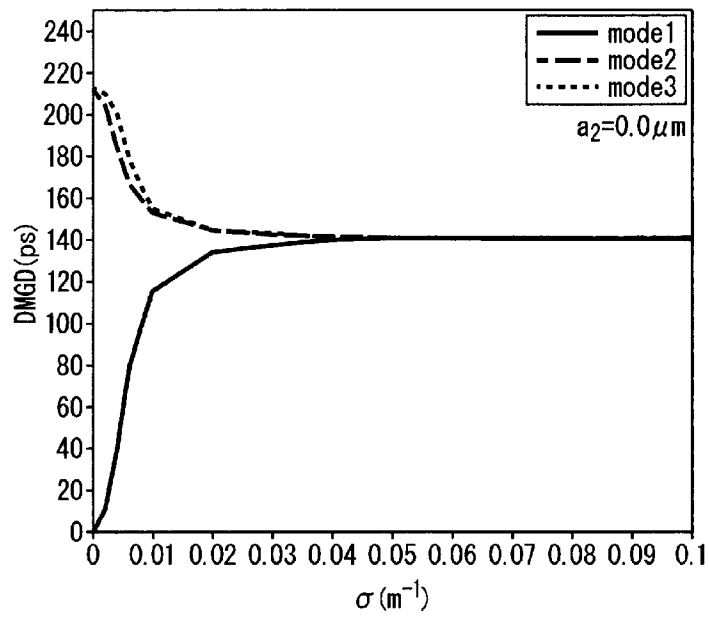
[図7B]



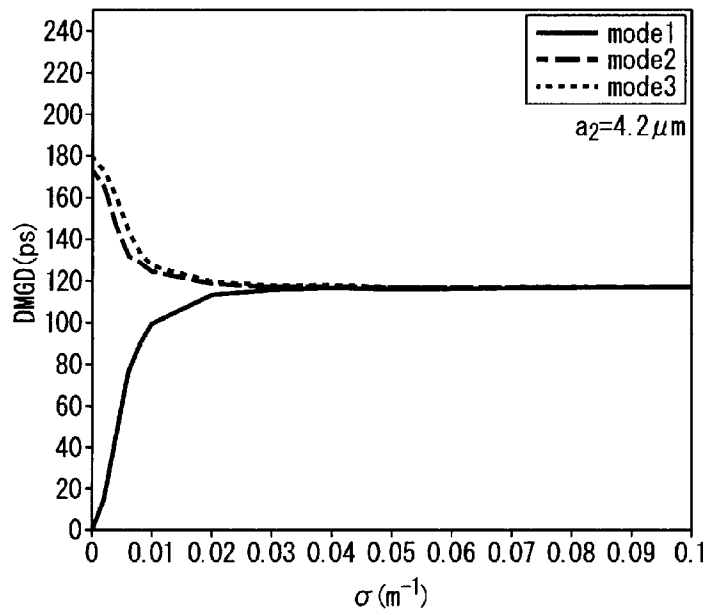
[図7C]



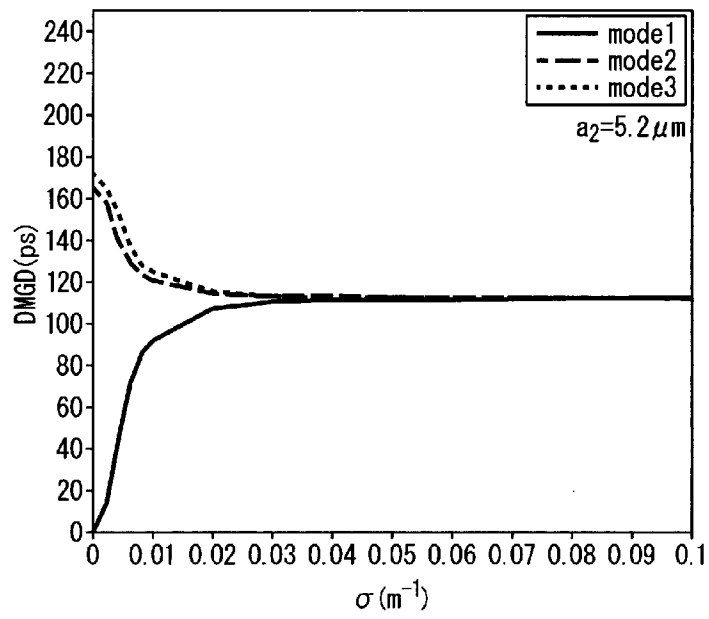
[図8]



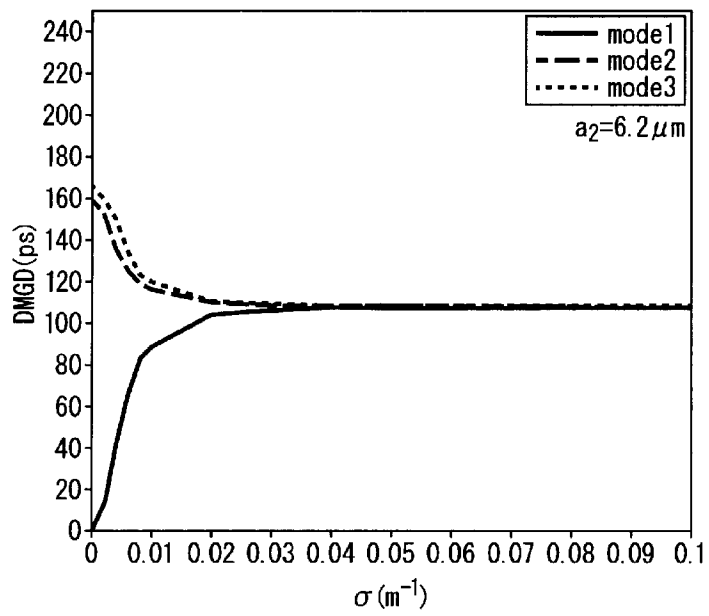
[図9]



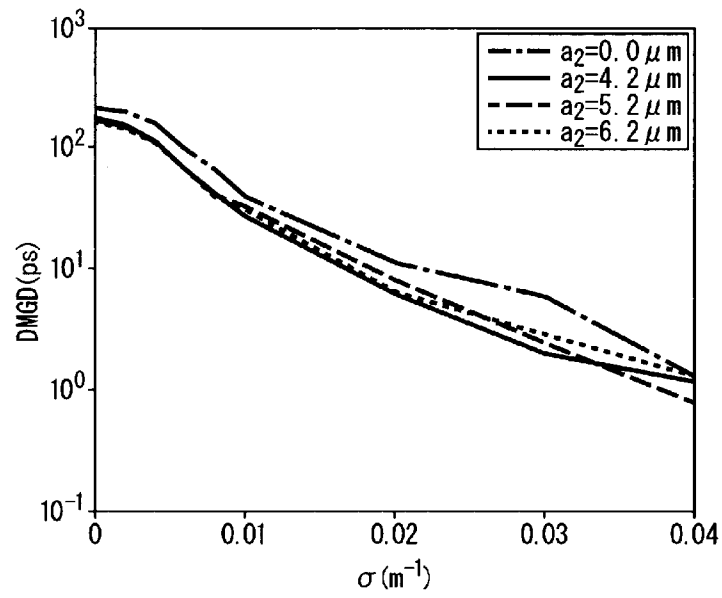
[図10]



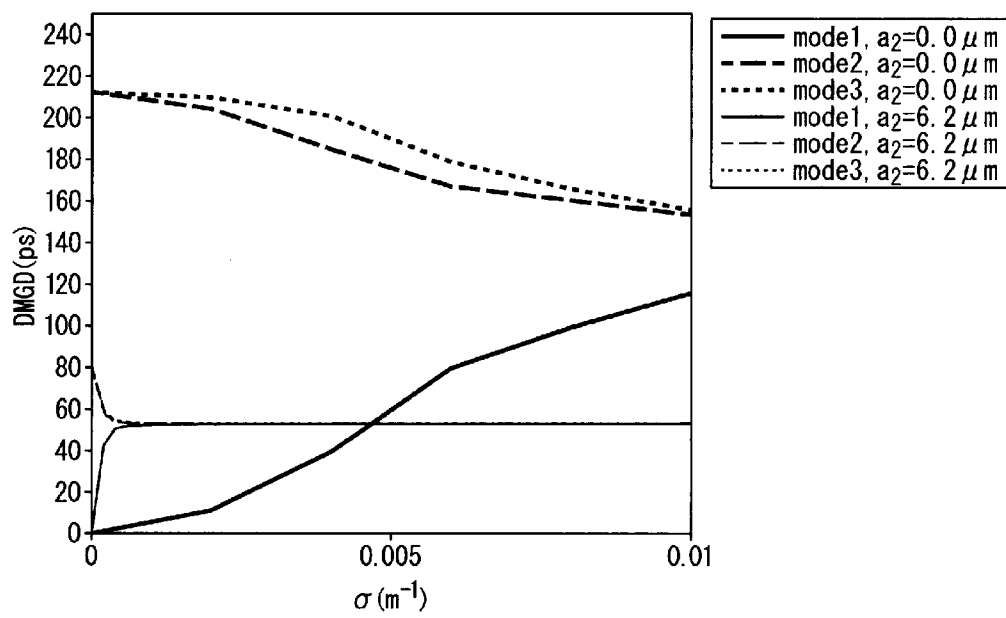
[図11]



[図12]



[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/053652

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B6/02(2006.01)i, G02B6/032(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B6/02, G02B6/032

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

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

JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	Akira IGARI, Takeshi FUJISAWA, Kunimasa SAITO, Katsuhiro TAKENAGA, Shoichiro MATSUO, "An analysis of transmission characteristics of homogeneously coupled-three-core fiber based on full-vector finite-element method and coupled field theory", IEICE Technical Report, 12 February 2015 (12.02.2015), vol.114, no.453, pages 121 to 126	1-2, 4 3, 5
Y	WO 2013/161825 A1 (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 31 October 2013 (31.10.2013), paragraphs [0044], [0072]; fig. 2, 6 & US 2013/0301998 A1 & EP 2843449 A1 paragraphs [0044], [0073]; fig. 2, 6 & CN 104321673 A	3, 5

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
17 February 2016 (17.02.16)

Date of mailing of the international search report
01 March 2016 (01.03.16)

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

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02B6/02(2006.01)i, G02B6/032(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02B6/02, G02B6/032

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	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016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)

JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

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	猪狩章、藤澤剛、齊藤晋聖、竹永勝宏、松尾昌一郎、ベクトル有限要素法とフィールド結合理論による同種3コア結合型ファイバの伝送特性解析, 電子情報通信学会技術研究報告, 2015.02.12, Vol. 114, No. 453, pp. 121 - 126	1-2, 4 3, 5
Y	W0 2013/161825 A1 (住友電気工業株式会社) 2013.10.31, 段落 [0044], [0072], [図2], [図6] & US 2013/0301998 A1 & EP 2843449 A1, 段落 [0044], [0073], Fig. 2, 6 & CN 104321673 A	3, 5

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

17.02.2016

国際調査報告の発送日

01.03.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

吉田 英一

2 X

9124

電話番号 03-3581-1101 内線 3294