

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5684109号
(P5684109)

(45) 発行日 平成27年3月11日(2015.3.11)

(24) 登録日 平成27年1月23日(2015.1.23)

(51) Int.Cl. F 1
G 0 2 B 6 / 0 2 (2006.01) G 0 2 B 6 / 0 2 4 6 1

請求項の数 3 (全 22 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2011-509353 (P2011-509353) (86) (22) 出願日 平成22年4月15日 (2010.4.15) (86) 国際出願番号 PCT/JP2010/056789 (87) 国際公開番号 W02010/119930 (87) 国際公開日 平成22年10月21日 (2010.10.21) 審査請求日 平成25年3月1日 (2013.3.1) (31) 優先権主張番号 特願2009-100114 (P2009-100114) (32) 優先日 平成21年4月16日 (2009.4.16) (33) 優先権主張国 日本国(JP) (31) 優先権主張番号 特願2010-59954 (P2010-59954) (32) 優先日 平成22年3月16日 (2010.3.16) (33) 優先権主張国 日本国(JP)</p>	<p>(73) 特許権者 000005290 古河電気工業株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 (74) 代理人 100089118 弁理士 酒井 宏明 (74) 代理人 100142712 弁理士 田代 至男 (72) 発明者 今村 勝徳 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 古 河電気工業株式会社内 審査官 奥村 政人</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マルチコア光ファイバ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数のコア部と、

前記各コア部の外周に位置し、前記各コア部の屈折率よりも低い屈折率を有するクラッド部とを備え、

前記各コア部の直径は $8 \mu\text{m}$ 以下であり、前記各コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差は 0.500% 以上 0.950% 以下であり、前記各コア部の隣接するコア部との離隔距離は $40 \mu\text{m}$ 以下であり、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下であり、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における直径 20mm で巻いた場合の曲げ損失が 10dB/m 以下であり、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における有効コア断面積が $30 \mu\text{m}^2$ 以上であり、

前記離隔距離は、全長における該コア部間での光のクロストークが波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35dB 以下となるように設定されており、

前記コア部および前記クラッド部は、石英系ガラスからなり、

前記コア部の数は7であり、

前記クラッド部の外径は $125 \mu\text{m}$ であることを特徴とするマルチコア光ファイバ。

【請求項2】

前記全長は 1m 以上であり、前記離隔距離は $30 \mu\text{m}$ 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】

前記クラッド部の外周に最も近接している前記コア部の中心と、前記クラッド部の外周

との最短距離が30 μm以上であることを特徴とする請求項1または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】

本発明は、マルチコア光ファイバに関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年ネットワーク需要は増大し続けており、その需要に応え続けるため、将来にわたって大容量光通信ネットワークを構成可能な伝送路技術が求められている。

10

【0003】

ネットワーク容量を拡大する技術のひとつにマルチコア光ファイバがある。このマルチコア光ファイバとは、1本の光ファイバ中に複数のコア部を備えたものである。非特許文献1では、マルチコア光ファイバの各コア部において個別に光信号の伝送を行うことで、伝送容量を拡大可能であることが示されている。ここで、非特許文献1において開示されたマルチコア光ファイバは、近年注目を集めている空孔構造光ファイバである。この空孔構造光ファイバにおいては、クラッド部に形成した多数の空孔によって、コア部への強い光閉じ込めが実現される。その結果、コア部間の距離を小さくできるので、狭い断面積内にコア部を多数配置でき、コア部の高密度化が実現される。

【0004】

20

また、伝送容量の拡大のためには、より広い波長帯域においてシングルモードで動作するマルチコア光ファイバであることが好ましい。たとえば、カットオフ波長が1.53 μmのマルチコア光ファイバであれば、1.53 μm以上の波長帯域においてシングルモード伝送が可能である。また、カットオフ波長をさらに短い1 μm、0.85 μmとすれば、より広帯域でシングルモード伝送が可能となるので、さらなる伝送容量の拡大が可能となる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】D. M. Taylor, C. R. Bennett, T. J. Shepherd, L. F. Michaille, M. D. Nielsen and H. R. Simonsen, "Demonstration of multi-core photonic crystal fibre in an optical interconnect", Electronics Letters, vol. 42, no. 6, pp. 331-332 (2006)

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、空孔構造を用いたマルチコア光ファイバは、コア部への光閉じ込めを実現するために多数の空孔を有している。したがって、所望の光学特性を有するマルチコア光ファイバを製造するためには、光ファイバの長手方向において空孔径を所定の値に維持する必要があるため、線引き時において空孔径を安定して制御する必要がある。この安定制御を実現するためには、空孔径を所定値に維持するために空孔にガスを所定の圧力で流通させる必要があるとともに、そのガス圧力についての緻密な制御が必要となる。したがって、製造性の向上が困難であるという問題があった。

40

【0007】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、製造性が高く、大容量光伝送に適するマルチコア光ファイバ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】

上述した課題を解決し、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、複数のコア部と、前記各コア部の外周に位置し、前記各コア部の屈折率よりも低い屈折

50

率を有するクラッド部とを備え、前記各コア部の直径は $12\ \mu\text{m}$ 以下であり、前記各コア部の前記クラッド部に対する比屈折率差は 0.2% 以上であり、カットオフ波長が $1.53\ \mu\text{m}$ 以下であり、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における直径 $20\ \text{mm}$ で巻いた場合の曲げ損失が $10\ \text{dB/m}$ 以下であり、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における有効コア断面積が $30\ \mu\text{m}^2$ 以上であり、前記各コア部の隣接するコア部との離隔距離は、全長における該コア部間での光のクロストークが波長 $1.55\ \mu\text{m}$ において $-35\ \text{dB}$ 以下となるように設定されていることを特徴とする。

【0009】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記コア部の数は2であり、前記全長は $1\ \text{m}$ 以上であり、前記離隔距離は $27\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

10

【0010】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記各直径は $9.5\ \mu\text{m}$ 以上であり、前記各比屈折率差は 0.3% 以下であり、前記離隔距離は $44\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

【0011】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記各直径は $8.5\ \mu\text{m}$ 以下であり、前記各比屈折率差は 0.4% 以上であり、前記離隔距離は $40\ \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする。

【0012】

20

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記コア部の数は7であり、前記全長は $1\ \text{m}$ 以上であり、前記離隔距離は $30\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

【0013】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記各直径は $9.5\ \mu\text{m}$ 以上であり、前記各比屈折率差は 0.3% 以下であり、前記離隔距離は $49\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

【0014】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記各直径は $8\ \mu\text{m}$ 以下であり、前記各比屈折率差は 0.5% 以上であり、前記離隔距離は $40\ \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする。

30

【0015】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記クラッド部の外周に最も近接している前記コア部の中心と、前記クラッド部の外周との最短距離が $30\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

【0016】

また、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記の発明において、前記クラッド部の外周に最も近接している前記コア部の中心と、前記クラッド部の外周との最短距離が $50\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする。

【発明の効果】

40

【0017】

本発明によれば、製造性が高く、大容量光伝送に適するマルチコア光ファイバを実現できるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】図1は、実施の形態1に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

【図2】図2は、図1に示すマルチコア光ファイバの製造方法の一例を説明する説明図である。

【図3】図3は、コア径と比屈折率差との組み合わせに対する有効コア断面積を示す図である。

50

【図4】図4は、コア径と比屈折率差との組み合わせに対するカットオフ波長と曲げ損失とを示す図である。

【図5】図5は、図3と図4をもとにして、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下、波長 $1.55\mu\text{m}$ における曲げ損失が 10dB/m 以下、波長 $1.55\mu\text{m}$ における有効コア断面積が $30\mu\text{m}^2$ 以上となる領域を示す図である。

【図6】図6は、計算例1～15として、図5に示す領域内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択した場合の、コア部が2つのマルチコア光ファイバの各種光学特性と、所定の全長に対するコアピッチとを示す図である。

【図7】図7は、実施の形態2に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。

【図8】図8は、図7に示すマルチコア光ファイバの製造方法の一例を説明する説明図である。

10

【図9】図9は、計算例16～30として、図5に示す領域内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択した場合の、コア部が7つのマルチコア光ファイバの各種光学特性と、所定の全長に対するコアピッチとを示す図である。

【図10】図10は、クラッド部外径が $147\mu\text{m}$ 、 $125\mu\text{m}$ 、 $107\mu\text{m}$ 、 $91\mu\text{m}$ 、 $76\mu\text{m}$ のシングルコアSMFのマイクロバンド損失スペクトルを示す図である。

【図11】図11は、波長 1550nm における、クラッド部外径とマイクロバンド損失との関係を示す図である。

【図12】図12は、図9に示した計算例26のマルチコア光ファイバと同様の特性のコア部を有するシングルコアSMFについて、波長 1550nm における、クラッド部外径とマイクロバンド損失との関係を見積もった結果を示す図である。

20

【図13】図13は、マルチコア光ファイバにおいて、コア部の離隔距離と、波長 1550nm における、全長が 100km の場合のクロストークおよび規格化コア数との関係を示す図である。

【図14】図14は、実施例1に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。

【図15】図15は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部の光学特性を示す図である。

【図16】図16は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部の伝送損失スペクトルを示す図である。

【図17】図17は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのマイクロバンド損失スペクトルを示す図である。

30

【図18】図18は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバの波長 $1.55\mu\text{m}$ におけるクロストークの条長依存性を示す図である。

【図19】図19は、参考例1に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。

【図20】図20は、参考例2に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。

【図21】図21は、参考例1、2に係るマルチコア光ファイバの各コア部のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性を示す図である。

【図22】図22は、参考例1、2に係るマルチコア光ファイバの各コア部の伝送損失スペクトルを示す図である。

【図23】図23は、参考例3として製造したマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。

40

【図24】図24は、参考例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性を示す図である。

【図25】図25は、参考例3に係るマルチコア光ファイバのコア部の伝送損失スペクトルおよびシングルコアSMFの伝送損失スペクトルを示す図である。

【図26】図26は、参考例3に係るマルチコア光ファイバのコア部と、これらのコア部の周囲のコア部とのクロストークの、マルチコア光ファイバの長さ依存性を示す図である。

。

【発明を実施するための形態】

【0019】

50

以下に、図面を参照して本発明に係るマルチコア光ファイバの実施の形態を詳細に説明する。なお、この実施の形態によりこの発明が限定されるものではない。また、本明細書においては、カットオフ波長()とは、ITU-T(国際電気通信連合)G.650.1で定義するファイバカットオフ波長をいう。また、その他、本明細書で特に定義しない用語についてはITU-T G.650.1における定義、測定方法に従うものとする。

【0020】

(実施の形態1)

図1は、本発明の実施の形態1に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図1に示すように、このマルチコア光ファイバ100は、2つのコア部1、2と、各コア部1、2の外周に位置するクラッド部3と、クラッド部3の外周に形成された被覆部4とを備えている。

10

【0021】

各コア部1、2とクラッド部3とは、いずれもたとえば石英系ガラスからなる。また、クラッド部3は、各コア部1、2の屈折率よりも低い屈折率を有する。たとえば、コア部1、2は、屈折率を高めるドーパントであるGeが添加された石英ガラスからなる。一方、クラッド部3は、屈折率調整用のドーパントを含まない純石英ガラスからなる。各コア部1、2の屈折率プロファイルとしては、ステップインデックス型を採用した。

【0022】

また、各コア部1、2の直径(コア径)は、いずれも $3.55\mu\text{m}$ であり、各コア部1、2のクラッド部3に対する比屈折率差は、いずれも 0.783% である。また、コア部1の中心軸とコア部2の中心軸との距離(離隔距離)は、 $78.4\mu\text{m}$ である。また、クラッド部3の外径は、コア部1、2を上記離隔距離で配置できるように適宜設定され、たとえば $125\sim 200\mu\text{m}$ である。また、被覆部4の外径は、クラッド部3を保護できるように適宜設定され、たとえば $250\sim 400\mu\text{m}$ である。

20

【0023】

ここで、比屈折率差は、コア部の最大屈折率を n_1 、クラッド部の屈折率を n_c とすると、下記式(1)で定義される。

$$=\{(n_1 - n_c) / n_c\} \times 100 \quad [\%] \cdots \cdots (1)$$

また、コア径 $2a$ は、コア部とクラッド部との境界領域での $1/2$ の比屈折率差を有する位置における径として定義される。

30

【0024】

このマルチコア光ファイバ100は、各コア部1、2のコア径と比屈折率差とを、上記値に設定したことによって、各コア部1、2について、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下の $0.85\mu\text{m}$ となり、波長 $1.55\mu\text{m}$ における直径 20mm で巻いた場合の曲げ損失が 10dB/m となり、波長 $1.55\mu\text{m}$ における有効コア断面積が $30\mu\text{m}^2$ 以上の $43.2\mu\text{m}^2$ となる。その結果、このマルチコア光ファイバ100は、 $0.85\mu\text{m}$ 以上の広い波長帯域にわたって、この帯域内の波長の光信号をシングルモードで伝送することができる上、光伝送路として用いるためにケーブル構造にした場合においても発生する曲げ損失が実用的な値となる。また、光伝送の際に障害となる光学非線形性が十分に低い光ファイバとなり、大容量光伝送に適するものとなる。なお、以下では、直径 20mm で巻いた場合の曲げ損失を単に曲げ損失と記載する。

40

【0025】

さらには、このマルチコア光ファイバ100は、コア部1とコア部2との離隔距離を、上記値に設定したことによって、全長を 10km 以上とした場合のコア部間での光のクロストークが波長 $1.55\mu\text{m}$ において -35dB 以下となるので、各コア部1、2において個別に伝送する光信号のクロストークが十分に低いものとなる。

【0026】

以下、このマルチコア光ファイバ100のクロストークについて具体的に説明する。マルチコア光ファイバ100の2つのコア部1、2が平行に存在するような導波路構造にお

50

ける、コア部間の光の干渉の大きさは、モード結合理論によって表される。すなわち、一方のコア部 1 に入射した光のうち、このコア部 1 を伝送する間にモード結合によって他方のコア部 2 に乗り移る光のパワー P は、伝送距離 z と、2 つのコア部間のモード結合定数 κ を用いて、 $P = f \sin^2(\kappa z)$ で計算することができる。ここで、コア部 1 とコア部 2 とで、コア径および比屈折率差が同一の場合は、 $f = 1$ である。したがって、 $z = \pi / (2\kappa)$ のときに、 $P = 1$ となり、光のパワーの 100% が一方のコア部から他方のコア部に乗り移ることとなる。このように光のパワーの 100% が乗り移るまでの伝送距離は結合長 L と呼ばれる。すなわち、 $L = \pi / (2\kappa)$ である。なお、このモード結合定数 κ は、各コア部 1、2 のコア径、比屈折率差およびコア部 1、2 の離隔距離により定まる。

10

【0027】

ここで、このマルチコア光ファイバ 100 においては、設定された各コア部 1、2 のコア径および比屈折率差と、所望の全長とに対して、上記 P が 0.03% 以下になるように、コア部 1 とコア部 2 との離隔距離を設定している。その結果、上記所望の全長において、コア部間のクロストークが -35 dB 以下となり、2 つのコア部を伝送する光信号のクロストークが十分に低いものとなっているのである。

【0028】

また、このマルチコア光ファイバ 100 は、コア部 1、2 とクラッド部 3 との屈折率差によって、コア部 1、2 に光信号を閉じ込めて伝送するものである。したがって、このマルチコア光ファイバ 100 は、空孔構造光ファイバのような緻密な圧力制御を必要とせず製造できるものであり、製造性が高いものである。

20

【0029】

すなわち、このマルチコア光ファイバ 100 は、たとえば以下のようにして製造できる。図 2 は、図 1 に示すマルチコア光ファイバ 100 の製造方法の一例を説明する説明図である。図 2 に示すように、この製造方法においては、まず、2 つのキャピラリー 5 を、クラッド部 3 と同じ材料からなるガラス管 6 内に配置する。このキャピラリー 5 は、コア部 1 または 2 を形成するためのコア領域 5a と、クラッド部 3 を形成するためのクラッド領域 5b とを有するものである。なお、このキャピラリー 5 としては、従来の光ファイバを製造するための光ファイバ母材を延伸したものをを用いることができる。その後、ガラス管 6 内の隙間に、クラッド部 3 と同じ材料からなる充填用キャピラリー 7 ~ 10 を充填し、光ファイバ母材 200 を作製する。なお、充填用キャピラリー 7 ~ 10 の代わりにガラスの粉を充填してもよい。

30

【0030】

つぎに、この光ファイバ母材 200 を、所望のコア径ならびにコア部間の離隔距離を実現するように計算された外径を保ちつつ線引きすることで、緻密な圧力制御を行うこと無しに、図 1 に示すマルチコア光ファイバ 100 を製造できる。なお、充填用キャピラリー 7 ~ 10 の存在によって、線引き中に光ファイバの断面が円形から変形してしまうことが妨げられるので、光ファイバの外径の歪みを防ぐことができる。

【0031】

また、キャピラリー 5 として、ITU-T G.652.C もしくは G.652.D において定義される、波長 1383 nm 近傍における OH 基の光吸収による伝送損失が小さい光ファイバを製造するための光ファイバ母材を延伸したものをを用いることもできる。これによって、E バンド (約 1360 ~ 1460 nm) の波長帯域を用いた光信号伝送にも好適なマルチコア光ファイバを製造することができる。

40

【0032】

以上説明したように、本実施の形態 1 に係るマルチコア光ファイバ 100 は、製造性が高く、大容量光伝送に適するマルチコア光ファイバとなる。

【0033】

なお、本発明に係るマルチコア光ファイバは、上記実施の形態 1 に限られない。すなわち、各コア部の直径が 12 μm 以下であり、比屈折率差が 0.2% 以上であり、カットオ

50

フ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下であり、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において曲げ損失が 10 dB/m 以下かつ有効コア断面積が $30 \mu\text{m}^2$ 以上であり、コア部間での光のクロストークが波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35 dB 以下となるように設定されているマルチコア光ファイバであれば、特に限定されない。以下、コア部の数が2の場合において、本発明に係るマルチコア光ファイバについて、FEM (Finite Element Method) シミュレーションを用いた計算によってより具体的に説明する。

【0034】

はじめに、コア部のコア径と比屈折率差とを設定した場合の有効コア断面積について説明する。図3は、コア径と比屈折率差との組み合わせに対する、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における有効コア断面積を示す図である。図3において、横軸の「 $2a$ 」はコア径を示し、縦軸の「 n 」は比屈折率差を示している。

10

図3において、たとえばコア径が $4 \mu\text{m}$ 、比屈折率差が 1% であるデータ点は、有効コア断面積が $20 \sim 30 \mu\text{m}^2$ の領域に位置している。この領域から、図上で右下の領域に行くにつれて、すなわちコア径を大きくし、比屈折率差を小さくするにつれて、有効コア断面積が大きくなる傾向にある。

【0035】

つぎに、コア径と比屈折率差とを設定した場合のカットオフ波長と曲げ損失とについて説明する。図4は、コア径と比屈折率差との組み合わせに対するカットオフ波長と波長 $1.55 \mu\text{m}$ における曲げ損失とを示す図である。図4において、たとえば「 $c: 1.53 \mu\text{m}$ 」の実線は、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ となるコア径と比屈折率差との組み合わせを示している。また、たとえば「曲げ損失: 10 dB/m 」の実線は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における曲げ損失が 10 dB/m となるコア径と比屈折率差との組み合わせを示している。なお、カットオフ波長については、光ファイバ伝送で用いる代表的な波長である $1.53 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $0.85 \mu\text{m}$ について示しており、曲げ損失については、ケーブル構造にする場合に実用上十分と考えられている 10 dB/m と、さらに好適な値である 0.5 dB/m とについて示している。図4に示すように、図上で左下の領域に行くにつれて、すなわちコア径を小さくし、比屈折率差を小さくするにつれて、カットオフ波長が短くなる傾向にある。また、図上で右上の領域に行くにつれて、すなわちコア径を大きくし、比屈折率差を大きくするにつれて、曲げ損失が小さくなる傾向にある。

20

30

【0036】

つぎに、図5は、図3と図4をもとにして、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における曲げ損失が 10 dB/m 以下、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における有効コア断面積が $30 \mu\text{m}^2$ 以上となる領域Aを示す図である。すなわち、図5に示す領域A内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択すれば、上記カットオフ波長、曲げ損失、有効コア断面積の範囲を実現することができる。また、コア径と比屈折率差との組み合わせの選択により、カットオフ波長を $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $0.85 \mu\text{m}$ とすることができ、また、曲げ損失をより小さい 0.5 dB/m 以下とすることができる。

【0037】

なお、図5の領域Aは、数式で表すと、おおよそ、 1.05 、かつ、 0.09
 $6134 \times (2a)^2 - 0.86034 \times (2a) + 2.8176$ 、かつ、 0.00
 $049736 \times (2a)^4 - 0.021060 \times (2a)^3 + 0.34024 \times (2a)^2$
 $- 2.5446 \times (2a) + 7.8409$ 、かつ、 $1.6505 \times 10^{-5} \times (2a)$
 $^6 - 0.00081767 \times (2a)^5 + 0.016634 \times (2a)^4 - 0.17873$
 $\times (2a)^3 + 1.0822 \times (2a)^2 - 3.6021 \times (2a) + 5.7132$ となる。
 したがって、上記数式を満たすコア径 $2a$ と比屈折率差 n との組み合わせを選択すれば、上記カットオフ波長、曲げ損失、有効コア断面積の範囲を実現することができる。

40

【0038】

つぎに、上記のように選択したコア径と比屈折率差との組み合わせを有する2つのコア部について、マルチコア光ファイバの全長を設定した場合に、コア部間での光のクロスト

50

ークが波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35 dB となるようなコア部間の離隔距離を計算した。以下、このようなコア部間での光のクロストークが波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35 dB となるようなコア部間の離隔距離をコアピッチと記載する。

【0039】

図6は、計算例1～15として、図5に示す領域A内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択した場合の、コア部が2つのマルチコア光ファイバの各種光学特性と、所定の全長に対するコアピッチとを示す図である。なお、図6において、「 λ_c 」はカットオフ波長を示し、「 A_{eff} 」は波長 $1.55 \mu\text{m}$ での有効コア断面積を示し、波長分散、分散スロープは波長 $1.55 \mu\text{m}$ での値を示している。また、マルチコア光ファイバの全長の例として 1 m 、 10 m 、 100 m 、 1 km 、 10 km 、 100 km を示している。

10

【0040】

図6に示す計算例1～15は、いずれも、コア径 $2a$ が $12 \mu\text{m}$ 以下であり、比屈折率差が 0.2% 以上であるので、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において曲げ損失が 10 dB/m 以下かつ有効コア断面積が $30 \mu\text{m}^2$ 以上という特性が実現されている。

【0041】

また、所定の全長に対して、コア部間の離隔距離をコアピッチ以上の値にすることで、コア部間での光のクロストークを波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35 dB 以下とすることができる。たとえば、計算例1の場合は、全長が 1 m の場合には、コアピッチは $46.5 \mu\text{m}$ であるから、コア部間の離隔距離を $46.5 \mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。また、全長が 100 km の場合には、コアピッチは $86.4 \mu\text{m}$ であるから、コア部間の離隔距離を $86.4 \mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。

20

【0042】

また、コア径 $2a$ を $9.5 \mu\text{m}$ 以上とし、比屈折率差を 0.3% とすれば、有効コア断面積 A_{eff} を $100 \mu\text{m}^2$ 以上とでき、光学非線形性をさらに低減できる。なお、この場合は、コア部間の離隔距離を、その全長に応じて $44 \mu\text{m}$ 以上にすることにより、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。

【0043】

たとえば、計算例4の場合は、コア径 $2a$ が $9.5 \mu\text{m}$ 以上の $11.72 \mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.238% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100 \mu\text{m}^2$ 以上の $129.8 \mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1 m 以上の全長に応じて $44 \mu\text{m}$ 以上である $48.3 \mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。

30

【0044】

また、たとえば、計算例9の場合も、コア径 $2a$ が $9.5 \mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.280% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100 \mu\text{m}^2$ 以上の $100.9 \mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1 m 以上の全長に応じて $44 \mu\text{m}$ 以上である $47.3 \mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。

40

【0045】

また、計算例11の場合は、有効コア断面積 A_{eff} は $30 \mu\text{m}^2$ 以上の $31.0 \mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1 m 以上の全長に応じて $27 \mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB 以下となる。このように、本発明に係るマルチコア光ファイバでは、 1 m 以上の全長に応じてコア部間の離隔距離を $27 \mu\text{m}$ 以上にすることがある。

【0046】

また、計算例12の場合は、コア径 $2a$ が $9.5 \mu\text{m}$ 以上の $10.5 \mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.296% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100 \mu\text{m}^2$ 以上の $104.3 \mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1 m 以上の全長に応じて

50

44 μm 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35 dB以下となる。

【0047】

また、計算例10、11、13、14の場合は、コア径2aが8.5 μm 以下、比屈折率差が0.4%以上である。この場合、所定の全長に対してはコアピッチが40 μm 以下となるため、コア部間の離隔距離を40 μm 以下と小さくできるので、コア部の高密度化が可能となる。

【0048】

また、計算例15の場合は、コア径2aを3 μm 、比屈折率差を0.980%以下として、所望のカットオフ波長、有効コア断面積、および曲げ損失を実現している。

【0049】

なお、波長分散および分散スロープの値については、計算例1~15のいずれも、実用上問題のない範囲の値となっている。

【0050】

以上の計算例1~15が示すように、本発明に係るマルチコア光ファイバにおいて、コア部の数を2とした場合に、カットオフ波長が1.53 μm 以下、波長1.55 μm において曲げ損失が10 dB/m以下かつ有効コア断面積が30 μm^2 以上、所定の全長におけるコア部間での光のクロストークが波長1.55 μm において-35 dB以下、という特性を実現できる。

【0051】

(実施の形態2)

つぎに、本発明の実施の形態2について説明する。本実施の形態2に係るマルチコア光ファイバは、コア部の数が7のものである。

【0052】

図7は、本実施の形態2に係るマルチコア光ファイバの模式的な断面図である。図7に示すように、このマルチコア光ファイバ300は、7つのコア部11~17と、各コア部11~17の外周に位置するクラッド部18と、クラッド部18の外周に形成された被覆部19とを備えている。コア部11は、マルチコア光ファイバ300の中心軸の近傍に位置し、その他のコア部12~17は、ほぼ正六角形の頂点に位置するように配置しており、かつコア部11と各コア部12~17との離隔距離は同一の84.6 μm となっている。この離隔距離については後で詳述する。

【0053】

また、実施の形態1に係るマルチコア光ファイバ100の場合と同様に、各コア部11~17とクラッド部18とは、いずれもたとえば石英系ガラスからなる。また、クラッド部18は、各コア部11~17の屈折率よりも低い屈折率を有する。各コア部11~17の屈折率プロファイルとしては、ステップインデックス型を採用した。

【0054】

また、マルチコア光ファイバ100の場合と同様に、各コア部11~17のコア径は、いずれも3.55 μm であり、各コア部11~17の比屈折率差は、いずれも0.783%である。なお、比屈折率差およびコア径は、実施の形態1に係るマルチコア光ファイバ100と同様に定義される。その結果、このマルチコア光ファイバ300は、各コア部11~17について、カットオフ波長が1.53 μm 以下の0.85 μm となり、波長1.55 μm における曲げ損失が10 dB/mとなり、波長1.55 μm における有効コア断面積が43.2 μm^2 となる。したがって、このマルチコア光ファイバ300は、0.85 μm 以上の広い波長帯域にわたって、この帯域内の波長の光信号をシングルモードで伝送することができる上、ケーブル構造にした場合に発生する曲げ損失が実用的な値となる。また、光学非線形性が十分に低い光ファイバとなり、大容量光伝送に適するものとなる。

【0055】

なお、このマルチコア光ファイバ300は、各コア部11~17のコア径および比屈折率差が、マルチコア光ファイバ100の場合と同様の値にしているため、各コア部11~

10

20

30

40

50

17 についてのカットオフ波長、曲げ損失、有効コア断面積も、マルチコア光ファイバ 100 の場合と同様の値になっている。その理由は、これらの光学特性が、各コア部 11 ~ 17 のコア径および比屈折率差によって決まるからである。

【0056】

一方、このマルチコア光ファイバ 300 は、マルチコア光ファイバ 100 の場合と比較して、或るコア部に隣接するコア部の数が多い。たとえば、コア部 11 に関しては、隣接するコア部はコア部 12 ~ 17 であり、その数は 6 である。一方、各コア部 12 ~ 17 に関しては、隣接するコア部の数は 3 であり、残りの 3 つのコア部は、隣接する 3 つのコア部よりも大きく離隔している。ここで、コア部間のクロストークは、離隔距離が大きくなるにつれて急激に減少するので、隣接するコア部とのクロストークのみを考慮すればよい。

10

【0057】

そこで、このマルチコア光ファイバ 300 においては、隣接するコア部の数が最も多く、クロストークが最も大きくなるコア部 11 におけるクロストークを勘案して、隣接するコア部間の離隔距離を設定している。具体的には、このマルチコア光ファイバ 300 においては、コア部 11 と各コア部 12 ~ 17 との離隔距離を、上述した 84.6 μm に設定したことによって、全長を 10 km 以上とした場合のコア部間での光のクロストークが波長 1.55 μm において -35 dB 以下となるので、各コア部 11 ~ 17 において個別に伝送する光信号の、コア部 11 におけるクロストークが十分に低いものとなる。また、他のコア部 12 ~ 17 におけるクロストークについては、コア部 11 のクロストークよりも

20

【0058】

このマルチコア光ファイバ 300 も、空孔構造光ファイバのような緻密な圧力制御を必要とせず製造できるものであり、製造性が高いものである。図 8 は、図 7 に示すマルチコア光ファイバ 300 の製造方法の一例を説明する説明図である。図 8 に示すように、この製造方法においては、まず、7 つのキャピラリー 20 を、クラッド部 18 と同じ材料からなるガラス管 21 内に配置する。このキャピラリー 20 は、コア部 11 ~ 17 のいずれかを形成するためのコア領域 20a と、クラッド部 18 を形成するためのクラッド領域 20b とを有するものである。その後、ガラス管 21 内の隙間に、クラッド部 18 と同じ材料からなる充填用キャピラリー 22、23 を充填し、光ファイバ母材 400 を作製する。なお、充填用キャピラリー 22、23 の代わりにガラスの粉を充填してもよい。つぎに、この光ファイバ母材 400 を、所望のコア径ならびにコア部間の離隔距離を実現するように計算された外径を保ちつつ線引きすることで、緻密な圧力制御を行うこと無しに、図 7 に示すマルチコア光ファイバ 300 を製造できる。

30

【0059】

以上説明したように、本実施の形態 2 に係るマルチコア光ファイバ 300 は、製造性が高く、大容量光伝送に適するマルチコア光ファイバとなる。

【0060】

つぎに、上述したコア部の数が 2 のマルチコア光ファイバの場合と同様に、図 7 に示すマルチコア光ファイバ 300 と同様に 7 つのコア部が配置された本発明に係るマルチコア光ファイバについて、FEMシミュレーションを用いた計算によってより具体的に説明する。

40

【0061】

まず、各コア部のコア径と比屈折率差との組み合わせについては、コア部の数が 2 の場合と同様に、図 5 に示す領域 A 内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択すれば、カットオフ波長が 1.53 μm 以下、波長 1.55 μm における曲げ損失が 10 dB/m 以下、波長 1.55 μm における有効コア断面積が 30 μm^2 以上とすることができる。

【0062】

つぎに、上記のように選択したコア径と比屈折率差との組み合わせを有する 7 つのコア

50

部について、マルチコア光ファイバの全長を設定した場合に、図7のコア部11に対応するコア部における光のクロストークが波長 $1.55\mu\text{m}$ において -35dB となるようなコア部間の離隔距離(コアピッチ)を計算した。

【0063】

図9は、計算例16~30として、図5に示す領域A内に存在するコア径と比屈折率差との組み合わせを選択した場合の、コア部が7つのマルチコア光ファイバの各種光学特性と、所定の全長に対するコアピッチとを示す図である。なお、計算例16~30のコア径 $2a$ および比屈折率差の値は、それぞれ図6における計算例1~15の場合と同じである。したがって、カットオフ波長 c 、有効コア断面積 A_{eff} 、波長分散、分散スロープの値も計算例1~15の場合と同じであり、コアピッチのみが計算例1~15とは異なる。

10

【0064】

すなわち、図9に示す計算例16~30は、いずれも、コア径 $2a$ が $12\mu\text{m}$ 以下であり、比屈折率差が 0.2% 以上であるので、カットオフ波長が $1.53\mu\text{m}$ 以下、波長 $1.55\mu\text{m}$ において曲げ損失が 10dB/m 以下かつ有効コア断面積が $30\mu\text{m}^2$ 以上という特性が実現されている。

【0065】

また、たとえば、計算例16の場合は、全長が 1m の場合には、コアピッチは $52.7\mu\text{m}$ であるから、コア部間の離隔距離を $52.7\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。また、全長が 100km の場合には、コアピッチは $92.6\mu\text{m}$ であるから、コア部間の離隔距離を $92.6\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。

20

【0066】

また、コア径 $2a$ を $9.5\mu\text{m}$ 以上とし、比屈折率差を 0.3% とすれば、有効コア断面積 A_{eff} を $100\mu\text{m}^2$ 以上とでき、光学非線形性をさらに低減できる。なお、この場合は、コア部間の離隔距離を、その全長に応じて $49\mu\text{m}$ 以上にすることにより、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。

【0067】

たとえば、計算例19の場合は、コア径 $2a$ が $9.5\mu\text{m}$ 以上の $11.72\mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.238% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100\mu\text{m}^2$ 以上の $129.8\mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1m 以上の全長に応じて $49\mu\text{m}$ 以上である $54.3\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。

30

【0068】

また、たとえば、計算例24の場合も、コア径 $2a$ が $9.5\mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.280% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100\mu\text{m}^2$ 以上の $100.9\mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1m 以上の全長に応じて $49\mu\text{m}$ 以上である $53.2\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。

【0069】

また、計算例26の場合は、有効コア断面積 A_{eff} は $30\mu\text{m}^2$ 以上の $31.0\mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1m 以上の全長に応じて $30\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。このように、本発明に係るマルチコア光ファイバでは、コア部の数が7の場合は、 1m 以上の全長に応じてコア部間の離隔距離を $30\mu\text{m}$ 以上にする必要がある。

40

【0070】

また、計算例27の場合は、コア径 $2a$ が $9.5\mu\text{m}$ 以上の $10.5\mu\text{m}$ であり、比屈折率差が 0.3% 以下の 0.296% であるので、有効コア断面積 A_{eff} は $100\mu\text{m}^2$ 以上の $104.3\mu\text{m}^2$ となる。また、コア部間の離隔距離を、 1m 以上の全長に応じて $49\mu\text{m}$ 以上とすれば、コア部間のクロストークは -35dB 以下となる。

50

【 0 0 7 1 】

また、計算例 25、26、28、29 の場合は、コア径 $2a$ が $8.5 \mu\text{m}$ 以下、比屈折率差 が 0.4% 以上である。この場合、所定の全長に対してはコアピッチが $40 \mu\text{m}$ 以下となるため、コア部間の離隔距離を $40 \mu\text{m}$ 以下と小さくできるので、よりコア部の高密度化が可能となる。さらには、コア部間の離隔距離が $40 \mu\text{m}$ 以下であれば、クラッド部の外径を標準のシングルモード光ファイバと同一の $125 \mu\text{m}$ としても、7つのコア部を収容することができるので、標準のシングルモード光ファイバとの互換性の点で好ましい。

【 0 0 7 2 】

また、計算例 30 の場合は、コア径 $2a$ を $3 \mu\text{m}$ 、比屈折率差 を 0.980% 以下として、所望のカットオフ波長、有効コア断面積、および曲げ損失を実現している。

10

【 0 0 7 3 】

以上の計算例 16 ~ 30 が示すように、本発明に係るマルチコア光ファイバにおいて、コア部の数を 7 とした場合に、カットオフ波長が $1.53 \mu\text{m}$ 以下、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において曲げ損失が 10 dB/m 以下かつ有効コア断面積が $30 \mu\text{m}^2$ 以上、所定の全長におけるコア部間での光のクロストークが波長 $1.55 \mu\text{m}$ において -35 dB 以下、という特性を実現できる。

【 0 0 7 4 】

つぎに、コア径が約 $10 \mu\text{m}$ 、コア部のクラッド部に対する比屈折率差が約 0.3% であり、単一のコア部を備えるシングルモード光ファイバ（以下、シングルコア SMF と称する）であって、クラッド部の外径が異なる 5 種類のシングルコア SMF を製造し、そのマイクロバンド損失特性を測定した。なお、全ての光ファイバについて、被覆は従来のシングルコア SMF と同じく、 $62.5 \mu\text{m}$ の厚さとしている。また、マイクロバンド損失は、番手が 1000 のサンドペーパーが表面に巻かれたボビンに各光ファイバを巻きつけたときの伝送損失と、ボビンから解いて巻き束の状態とした各光ファイバの伝送損失とを測定し、これらの伝送損失の差として定義した（IEC（国際電気標準会議）TR 62 221 Method B 参照）。

20

【 0 0 7 5 】

図 10 は、クラッド部外径が $147 \mu\text{m}$ 、 $125 \mu\text{m}$ 、 $107 \mu\text{m}$ 、 $91 \mu\text{m}$ 、 $76 \mu\text{m}$ のシングルコア SMF のマイクロバンド損失スペクトルを示す図である。また、図 11 は、波長 1550 nm における、クラッド部外径とマイクロバンド損失との関係を示す図である。図 10、11 に示すように、クラッド部外径が小さくなるに従って、マイクロバンド損失は指数関数的に増大し、特に $100 \mu\text{m}$ 以下の場合に急激に増大している。したがって、マイクロバンド損失を抑制するためには、シングルコア SMF の場合は、クラッド部外径が $100 \mu\text{m}$ 、すなわち外半径が $50 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。また、このシングルコア SMF と同様の特性（コア径および比屈折率差）のコア部を有するマルチコア光ファイバの場合は、クラッド部の外周に最も近接しているコア部の中心と、クラッド部の外周との最短距離が $50 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。

30

【 0 0 7 6 】

図 12 は、図 9 に示した計算例 26 のマルチコア光ファイバと同様の特性のコア部を有するシングルコア光ファイバについて、波長 1550 nm における、クラッド部外径とマイクロバンド損失との関係を見積もった結果を示す図である。図 12 に示すように、マイクロバンド損失は、特にクラッド部外径が $60 \mu\text{m}$ 以下の場合に急激に増大している。したがって、計算例 26 のマルチコア光ファイバと同様の特性のコア部を有するマルチコア光ファイバの場合は、マイクロバンド損失を抑制するためには、クラッド部の外周に最も近接しているコア部の中心と、クラッド部の外周との最短距離が $30 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。

40

【 0 0 7 7 】

なお、図 13 は、マルチコア光ファイバにおいて、コア部間の離隔距離と、波長 1550 nm における、全長が 100 km の場合のクロストークおよび規格化コア数との関係を

50

示す図である。各コア部のコア径は $10.4\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差は 0.31% としている。規格化コア数は、クラッド部外径が $125\ \mu\text{m}$ のシングルコアSMFの場合に規格化コア数の値が1になるように規格化をしている。図13に示すように、例えば、コア部間の離隔距離を $40\ \mu\text{m}$ から $45\ \mu\text{m}$ に拡大することにより、クロストークは $-15\ \text{dB}$ から $-40\ \text{dB}$ へと大幅に低減するのに対し、規格化コア数は 3.98 から 3.74 へとわずかな変化に留まる。すなわち、コア部の高密度化の効果の低下を考慮したとしても、クロストークを低減するために、離隔距離を大きくすることは好ましい。

【0078】

(実施例1、2)

本発明の実施例1、2として、実際に7つのコア部が配置されたマルチコア光ファイバを製造した。具体的には、はじめに、純石英系製ガラス管内に、直径が約 $10\ \text{mm}$ であり純石英に対する比屈折率差が 0.34% となるようにゲルマニウムを添加したコア部と、そのコア部の周囲にコア部の4倍程度の厚さで形成したクラッド部とを有するキャピラリーを、正六角状およびこの正六角形の中心位置に配置し、このガラス管とキャピラリーとの隙間に中実の純石英系ガラス製の充填用キャピラリーを多数充填し、ガラス母材を作製した。ガラス母材の直径(すなわち純石英系製ガラス管の直径)は、実施例1、2ともに $47\ \text{mm}$ とした。

【0079】

なお、充填用キャピラリーを充填する際に、特定の位置の充填用キャピラリーを、中空の純石英系ガラス製キャピラリー管に置き換えて、コア部の位置を識別するためのマーカを形成するようにした。その後、このガラス母材を線引きし、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバを製造した。製造したマルチコア光ファイバのクラッド部の外径については、実施例1が $204.0\ \mu\text{m}$ であり、実施例2が $209.9\ \mu\text{m}$ であり、被覆については、実施例1、2とも厚さが $62.5\ \mu\text{m}$ 程度になるように形成した。

【0080】

図14は、実施例1に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。図14において、破線で囲まれた丸い領域はコア部の位置を示している。また、符号A0は、コア部を示す符号である。また、黒丸状のものはマーカである。図14に示すように、実施例1に係るマルチコア光ファイバは、マーカによって、クラッド部の周囲の特定の方向を識別でき、各コア部の位置をより確実に識別することができる。なお、実施例2についても、実施例1とコアピッチが異なる以外は同様であり、図14と同様の断面構造とすることができる。以下、実施例2に係るマルチコア光ファイバのコア部のうち、図14に示した実施例1のコア部A0に相当する位置にあるコア部についても、コア部A0と呼ぶものとする。

【0081】

つぎに、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部A0のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性について説明する。図15は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部A0の光学特性を示す図である。ここで、伝送損失、 A_{eff} は波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における値である。なお、コア径は全て $8.3\ \mu\text{m}$ とし、クラッドに対するコア部の比屈折率差は 0.34% とした。また、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ における曲げ損失はいずれも $10\ \text{dB/m}$ 以下であった。

【0082】

また、図16は、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのコア部A0の伝送損失スペクトルを示す図である。図16において、線L1は実施例1のコア部A0のスペクトルを示し、線L2は実施例2のコア部A0のスペクトルを示している。線L1、L2に示すように、波長 $1300\ \text{nm}$ 以上 $1700\ \text{nm}$ 以下における伝送損失の顕著な増大はなかった。ただし、実施例1と実施例2を比較するとコアピッチの小さい実施例1のほうが若干伝送損失が大きくなっている。この原因はコア部間の光の干渉に伴う光パワーの減衰であると考えられ、伝送損失をより小さく抑えるためにはコアピッチは $47.5\ \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。

10

20

30

40

50

【0083】

つぎに、実施例1、2に係るマルチコア光ファイバのマイクロバンド損失特性を測定した。結果を図17に示す。図17において、線L3は実施例1のコア部A0のマイクロバンド損失を示し、線L4は実施例2のコア部A0のマイクロバンド損失を示している。図17に示すように実施例1、2のいずれにおいても小さなマイクロバンド損失が得られている。なお、比較のためクラッド径が125 μm のSMFのマイクロバンド損失を線L5として合わせて記載している。

【0084】

図18は実施例1、2に係るマルチコア光ファイバの波長1.55 μm におけるクロストークの条長依存性を示す図である。図18に示すようにいずれのデータにおいてもコア部間での光のクロストークが波長1.55 μm において-35dB以下であり、各コア部において個別に伝送する光信号のクロストークが十分に低いものとなっている。

【0085】

なお、上記実施の形態は、コア部の数が2、7のものであるが、本発明はこれに限らず、コア部の数がたとえば3以上のマルチコア光ファイバに適用できる。この場合に、各コア部の隣接するコア部との離隔距離は、隣接するコア部の数に応じて、全長における該コア部間での光のクロストークが波長1.55 μm において-35dB以下となるように設定される。

【0086】

また、上記実施の形態は、全てのコア部のコア径および比屈折率差が同一の場合である。しかしながら、本発明はこれに限定されない。たとえば、各コア部のコア径または比屈折率差を互いに少しずつ異なるものにするによって、上述した式 $P = f \sin^2(z)$ において f が1より小さくなるため、全長における各コア部間での光のクロストークを一層小さくすることができる。あるいは、各コア部間の離隔距離を小さくすることができる。

【0087】

例えば、計算例22に示されたコア部で形成される三角格子の重心位置に、さらに計算例22のコア部からコア径を0.1 μm 変化させたコア部を配置させた場合、さらに配置したコア部とその周囲のコア部との間において、上述した式における f は 1.5×10^{-5} となる。その結果、コア部間での光のクロストークは最大でも-48.2dBとなり、-35dBよりも小さくすることができる。そのため、コア部間の離隔距離を、100km伝送に必要な離隔距離である83.8 μm の1/3倍の48.4 μm としたとしても、光のクロストークを-35dB以下にすることが可能となる。

また、各コア部のコア径または比屈折率差を互いに少しずつ異なるものにする場合において、長手の揺らぎ等の影響により、コア径や比屈折率差が予想外に近づく場合もあることから、あらかじめ当初の設計よりも若干大きめの差を付けておくことも有効である。

なお、離隔距離が大きくなると、クロストークは減少するが、配置されるコア部の密度も低下する。コア部の密度の指標として、単位断面積あたりのコア部の数である規格化コア数を規定した場合に、離隔距離の増加に対するクロストークの減少と、規格化コア数の減少とを比較すると、クロストークの減少率のほうが大きい。すなわち、コア部の高密度化の効果の低下を考慮したとしても、クロストークを低減するために、離隔距離を大きくすることは好ましい。したがって、実際に得られるクロストーク値の調整のために、離隔距離を大きくすることも有効である。

【0088】

ところで、本発明に係るマルチコア光ファイバは、複数のコア部を備え、かつこれらを所定の離隔距離で配置するようにしているので、コア部の中には、クラッド部の外周との距離が近いものがある。このため、各コア部についてマイクロバンドの影響を考慮する必要がある。なお、マイクロバンド損失は、光ファイバに側圧が加えられたときに、この側圧を加えた物(たとえばポピン)の表面の微少な凹凸等によって光ファイバに微小な曲げが加えられることによる伝送損失の増加量として定義される。以下、マイクロバンドの影

10

20

30

40

50

響について、参考例 1、2 として製造したマルチコア光ファイバをもとに説明する。

【0089】

(参考例 1、2)

本発明の参考例 1、2 として、各コア部のコア径および比屈折率差を互いに少しずつ異なるマルチコア光ファイバを製造した。具体的には、はじめに、純石英系製ガラス管内に、直径が約 7 mm であり純石英に対する比屈折率差が 0.3% となるようにゲルマニウムを添加したコア部と、そのコア部の周囲にコア部の 4 倍程度の厚さで形成したクラッド部とを有するキャピラリーを、正六角状およびこの正六角形の中心位置に配置し、このガラス管とキャピラリーとの隙間に中実の純石英系ガラス製の充填用キャピラリーを多数充填し、ガラス母材を作製した。ガラス母材の直径(すなわち純石英系製ガラス管の直径)につ

10

【0090】

なお、充填用キャピラリーを充填する際に、特定の位置の充填用キャピラリーを、中空の純石英系ガラス製キャピラリー管に置き換えて、コア部の位置を識別するためのマーカを形成するようにした。その後、このガラス母材を線引きし、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバを製造した。製造したマルチコア光ファイバのクラッド部の外径については、参考例 1 が 141 μm であり、参考例 2 が 215 μm であった。また、被覆については、参考例 1、2 とも厚さが 62.5 μm 程度になるように形成した。

【0091】

図 19 は、参考例 1 に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。また、図 20 は、参考例 2 に係るマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。図 19、20 において、破線で囲まれた丸い領域はコア部の位置を示している。また、符号 A1~C1、A2~C2 は、コア部を示す符号である。また、黒丸状のものはマーカである。図 19、20 に示すように、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバは、マーカによって、クラッド部の周囲の特定の方向を識別でき、各コア部の位置をより確実に識別することができる。

20

【0092】

つぎに、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバのコア部 A1~C1、A2~C2 のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性について説明する。図 21 は、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバのコア部 A1~C1、A2~C2 のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性を示す図である。なお、図 21 における λ_c とは、ITU-T (国際電気通信連合) G.650.1 で定義するケーブルカットオフ波長を意味する。また、伝送損失、波長分散、分散スロープ、Aeff、曲げ損失は波長 155 μm における値である。

30

【0093】

また、図 22 は、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバのコア部 A1~C1、A2~C2 の伝送損失スペクトルを示す図である。図 22 において、線 L6~L8 はコア部 A1~C1 のスペクトルを示し、線 L9~L11 はコア部 A2~C2 のスペクトルを示している。線 L9~L11 に示すように、クラッド外径が 215 μm と大きい参考例 2 の場合は、波長 1600 nm 以上における伝送損失の顕著な増大はなかった。

40

【0094】

これに対して、線 L6~L8 に示すように、クラッド外径が 141 μm と小さい参考例 1 の場合は、波長 1600 nm 以上において伝送損失の顕著な増大が観測された。とくに、よりクラッド部の外周に近いコア部 B1、C1 については、より顕著な伝送損失の増大が観測された。この長波長帯域における伝送損失の顕著な増大は、コア部とクラッド部の外周との距離が近接したことによって、伝送損失の成分であるマイクロバンド損失が増大したためと考えられる。

【0095】

また、図 23 は、参考例 3 として製造したマルチコア光ファイバの断面を示す模式図である。図 23 において、破線で囲まれた丸い領域はコア部の位置を示している。また、符

50

号 A 3 ~ C 3 は、コア部を示す符号である。また、黒丸状のものはマーカである。各コア部の特性については、符号 A 3 のコア径が $10.6 \mu\text{m}$ 、符号 B 3 のコア径が $10.4 \mu\text{m}$ 、符号 C 3 のコア径が $10.2 \mu\text{m}$ であり、比屈折率差はいずれも 0.31% としている。また、コア部間の離隔距離は $46 \mu\text{m}$ である。

図 2 4 は、参考例 1、2 に係るマルチコア光ファイバのコア部 A 3 ~ C 3 のコア径、比屈折率差、およびこれらのコア部の光学特性を示す図である。なお、図 2 4 における伝送損失、波長分散、分散スロープ、 A_{eff} 、曲げ損失は波長 $1.55 \mu\text{m}$ における値である。

【0096】

また、図 2 5 は、参考例 3 に係るマルチコア光ファイバのコア部 A 3 ~ C 3 の伝送損失スペクトルおよびシングルコア SMF の伝送損失スペクトルを示す図である。なお、シングルコア SMF のコア部のコア径は $10.4 \mu\text{m}$ 、比屈折率差は 0.31% である。図 2 5 に示すように、マルチコア光ファイバの各コア部の伝送損失スペクトルは、シングルコア SMF の伝送損失スペクトルと略同様の特性となっている。

10

【0097】

また、図 2 6 は、参考例 3 に係るマルチコア光ファイバのコア部 B 3 またはコア部 C 3 と、これらのコア部の周囲のコア部とのクロストークの、マルチコア光ファイバの長さ依存性を示す図である。なお、波長は 1550nm である。また、図 2 6 中の実線は最小自乗法による近似直線である。図 2 6 に示すように、参考例 3 に係るマルチコア光ファイバは、全長が 3.5km の場合に -38dB のクロストークが得られており、全長がさらに短い場合にはさらに低いクロストークが得られている。

20

【産業上の利用可能性】

【0098】

この発明に係るマルチコア光ファイバは、たとえば光通信の用途に適している。

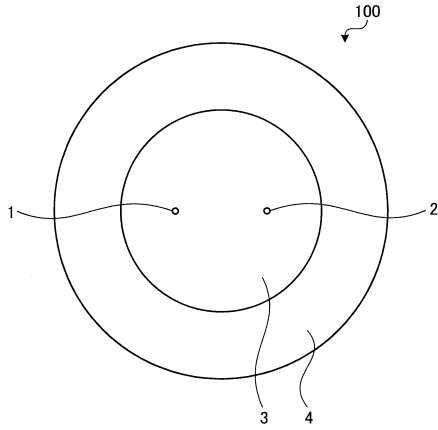
【符号の説明】

【0099】

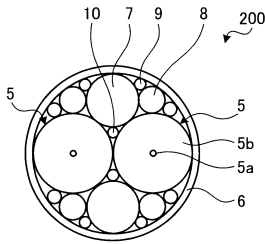
- 1、2、11 ~ 17、A0、A1 ~ C1、A3 ~ C3 コア部
- 3、18 クラッド部
- 4、19 被覆部
- 5、20 キャピラリー
- 5a、20a コア領域
- 5b、20b クラッド領域
- 6、21 ガラス管
- 7 ~ 10、22、23 充填用キャピラリー
- 100、300 マルチコア光ファイバ
- 200、400 光ファイバ母材

30

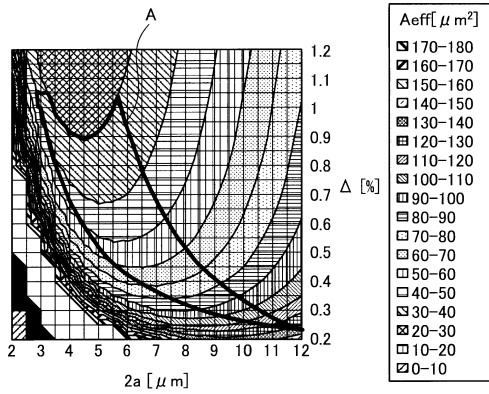
【図1】



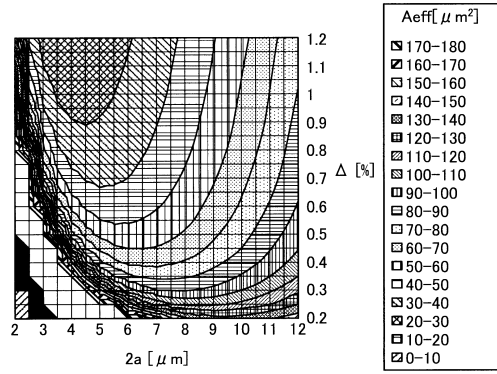
【図2】



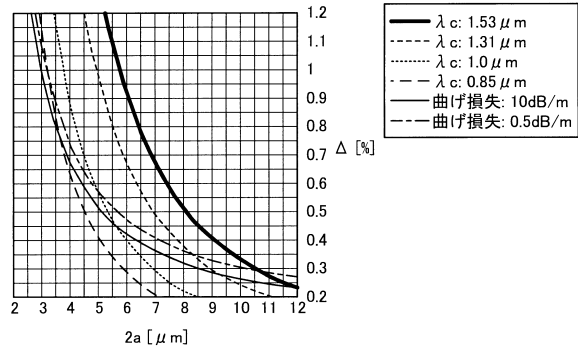
【図5】



【図3】



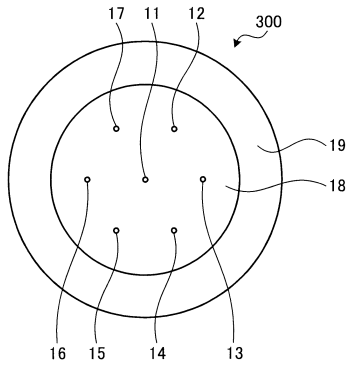
【図4】



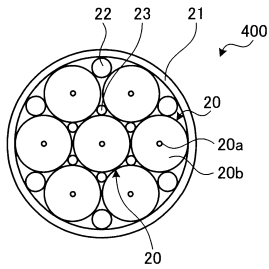
【図6】

項目	単位	2a	Δ	λc	Aeff	曲げ損失	波長分散	分散スロープ	コアピッチ					
									1m	10m	100m	1km	10km	100km
計算例1	μm	3.55	0.783	0.85	43.2	10	-9.5	0.07	46.5	54.5	62.5	70.4	78.4	86.4
計算例2	μm	5.39	0.475	1	58.7	10	7.1	0.06	46.9	54.7	62.6	70.5	78.4	86.3
計算例3	μm	9.17	0.284	1.31	98.0	10	17.3	0.06	47.7	55.4	63.2	70.9	78.6	86.4
計算例4	μm	11.72	0.238	1.53	129.8	10	19.5	0.06	48.3	56.0	63.6	71.3	78.9	86.6
計算例5	μm	3.14	0.997	0.85	34.1	0.5	-18.2	0.07	42.1	49.3	56.4	63.5	70.6	77.8
計算例6	μm	4.82	0.592	1	47.2	0.5	3.4	0.06	42.7	49.8	56.9	64.1	71.2	78.3
計算例7	μm	8.22	0.353	1.31	78.9	0.5	16.3	0.06	43.5	50.5	57.4	64.4	71.4	78.3
計算例8	μm	10.55	0.294	1.53	105.1	0.5	19.0	0.06	44.2	51.1	58.0	64.8	71.7	78.6
計算例9	μm	9.5	0.280	1.333	100.9	7.6	17.7	0.06	47.3	54.8	62.4	70.0	77.5	85.1
計算例10	μm	7	0.670	1.5259	46.2	0.0	15.8	0.06	30.9	35.5	40.1	44.8	49.4	54.0
計算例11	μm	5.5	0.950	1.4259	31.0	0.0	11.2	0.05	27.1	31.2	35.2	39.3	43.4	47.4
計算例12	μm	10.5	0.286	1.5291	104.3	0.4	19.0	0.06	44.0	50.9	57.7	64.5	71.3	78.2
計算例13	μm	8.5	0.420	1.477	71.4	0.0	17.4	0.06	36.3	44.2	50.1	56.0	61.9	67.7
計算例14	μm	8	0.500	1.5175	61.3	0.0	17.0	0.06	35.2	40.5	45.8	51.2	56.5	61.8
計算例15	μm	3	0.980	0.8054	38.7	9.3	-19.1	0.08	46.5	54.5	62.4	70.4	78.4	86.3

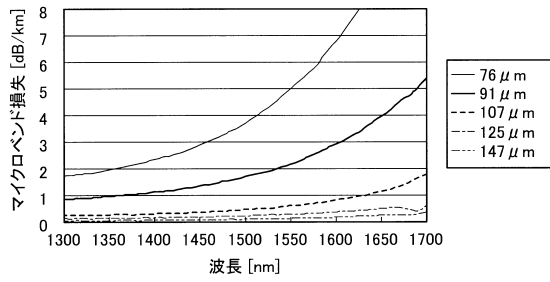
【図7】



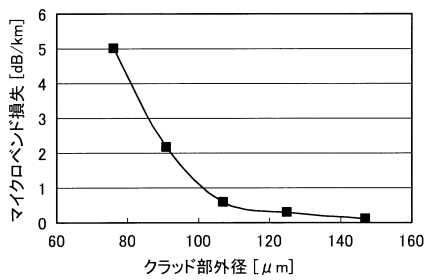
【図8】



【図10】



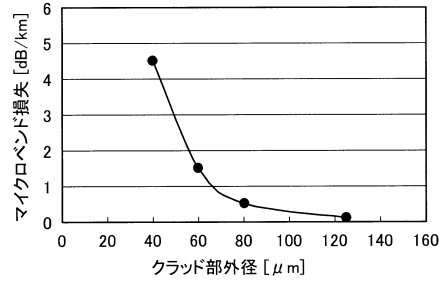
【図11】



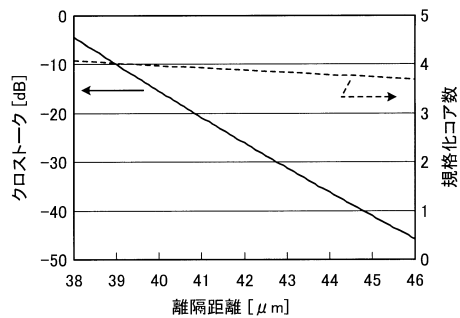
【図9】

項目	単位	2a	Δ	λc	Aeff	曲げ損失	波長分散	分散スロープ	コアピッチ					
									1m	10m	100m	1km	10km	100km
計算例16	ps/nm ² /km	3.55	0.783	0.85	43.2	10	-9.5	0.07	52.7	60.7	68.7	76.6	84.6	92.6
計算例17	ps/nm ² /km	5.39	0.475	1	58.7	10	7.1	0.06	53.0	60.9	68.8	76.6	84.5	92.4
計算例18	ps/nm ² /km	9.17	0.284	1.31	98.0	10	17.3	0.06	53.7	61.4	69.2	76.9	84.6	92.4
計算例19	ps/nm ² /km	11.72	0.238	1.53	129.8	10	19.5	0.06	54.3	61.9	69.6	77.2	84.9	92.6
計算例20	ps/nm ² /km	3.14	0.997	0.85	34.1	0.5	-18.2	0.07	47.7	54.8	61.9	69.1	76.2	83.3
計算例21	ps/nm ² /km	4.82	0.592	1	47.2	0.5	3.4	0.06	48.3	55.4	62.5	69.6	76.7	83.8
計算例22	ps/nm ² /km	8.22	0.353	1.31	78.9	0.5	16.3	0.06	48.9	55.9	62.9	69.8	76.8	83.8
計算例23	ps/nm ² /km	10.55	0.294	1.53	105.1	0.5	19.0	0.06	49.5	56.4	63.3	70.2	77.1	84.0
計算例24	ps/nm ² /km	9.5	0.280	1.333	100.9	7.6	17.7	0.06	53.2	60.7	68.3	75.8	83.4	91.0
計算例25	ps/nm ² /km	7	0.670	1.5259	46.2	0.0	15.8	0.06	34.5	39.1	43.7	48.4	53.0	57.6
計算例26	ps/nm ² /km	5.5	0.950	1.4259	31.0	0.0	11.2	0.05	30.3	34.3	38.4	42.5	46.5	50.6
計算例27	ps/nm ² /km	10.5	0.296	1.5291	104.3	0.4	19.0	0.06	49.3	56.2	63.0	69.8	76.7	83.5
計算例28	ps/nm ² /km	8.5	0.420	1.471	71.4	0.0	17.4	0.06	42.9	48.8	54.7	60.6	66.4	72.3
計算例29	ps/nm ² /km	8	0.500	1.5175	61.3	0.0	17.0	0.06	39.3	44.7	50.0	55.3	60.6	66.0
計算例30	ps/nm ² /km	3	0.980	0.8054	38.7	9.3	-19.1	0.08	52.7	60.7	68.6	76.6	84.6	92.5

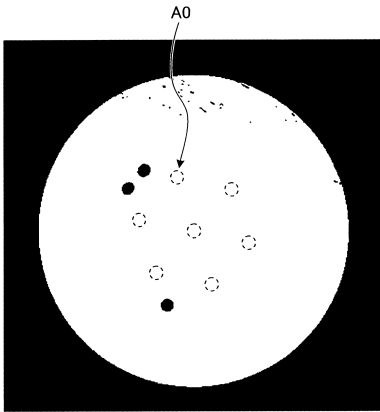
【図12】



【図13】



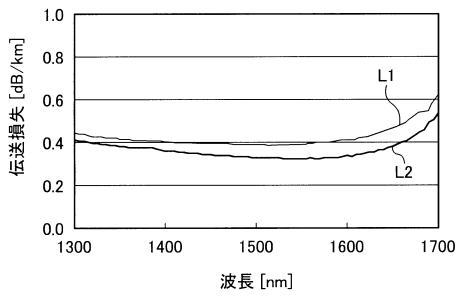
【図14】



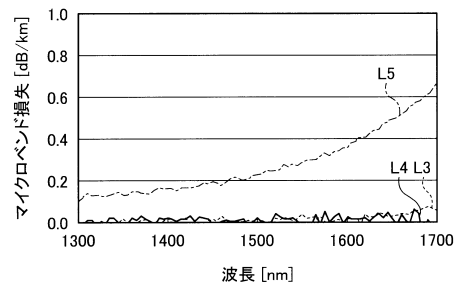
【図15】

	Δ	2a μm	クラッド径 μm	コアピッチ μm	伝送損失 dB/km	Aeff μm^2	λ_{cc}	λ_c
							nm	nm
実施例1	0.34	8.3	204.0	44.8	0.383	84	1411	1469
実施例2	0.34	8.3	209.9	47.5	0.316	84	1410	1468

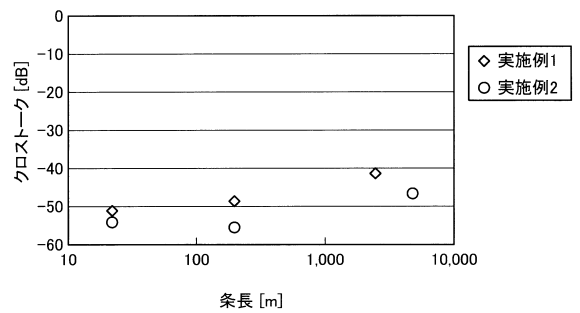
【図16】



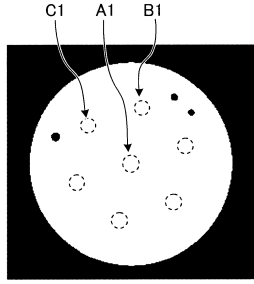
【図17】



【図18】

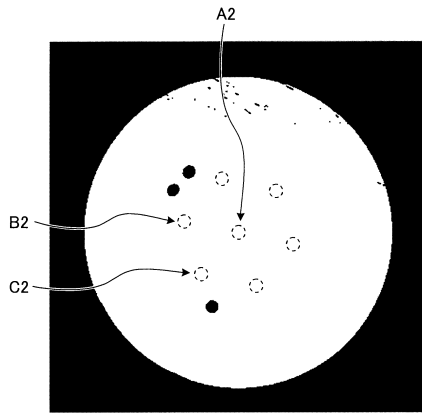


【図 19】



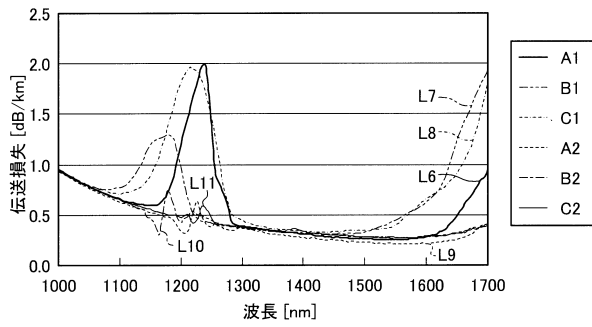
【図 21】

【図 20】



コア部 符号	Δ		2a	伝送損失		波長分散		分散 スロープ		Aeff	λ _{cc}	λ _c	曲げ 損失
	%	μm	μm	dB/km	ps/nm/km	ps/nm ² /km	ps/nm ² /km	μm ²	nm	nm	dB/m		
参考例1	A1	0.3	9.94	0.254	19	0.062	110	1367	1425	10.1			
	B1	0.3	9.74	0.444	18.1	0.06	103	1337	1395	16.7			
	C1	0.3	9.88	0.398	18.6	0.06	106	1357	1415	7.1			
参考例2	A2	0.3	10.02	0.205	19.1	0.062	101	1378	1436	4.4			
	B2	0.3	9.94	0.273	18.6	0.06	103	1367	1425	7.2			
	C2	0.3	9.88	0.27	18.4	0.061	99	1357	1415	13.3			

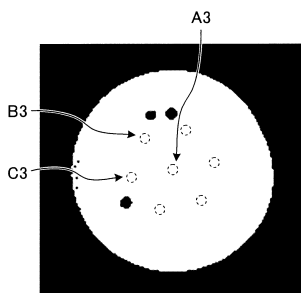
【図 22】



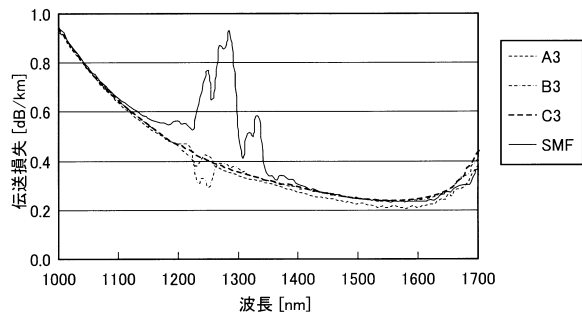
【図 24】

コア部 符号	Δ		2a	伝送損失		波長分散		分散 スロープ		Aeff	λ _c	曲げ 損失
	%	μm	μm	dB/km	ps/nm/km	ps/nm ² /km	ps/nm ² /km	μm ²	nm	dB/m		
A3	0.31	10.6	0.213	0.237	19.4	0.062	107	1528	3.9			
B3	0.31	10.4	0.237	0.237	19.0	0.061	99	1466	8.1			
C3	0.31	10.2	0.237	0.237	19.0	0.061	99	1466	8.1			

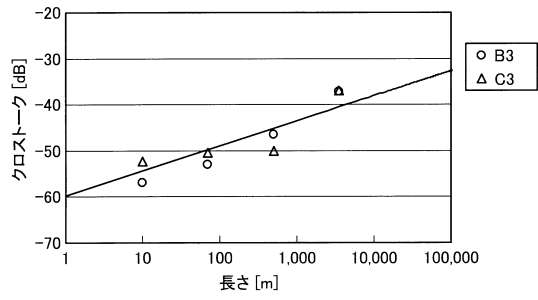
【図 23】



【 図 2 5 】



【 図 2 6 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平05 - 341147 (JP, A)
特開平09 - 205239 (JP, A)
特開平01 - 295207 (JP, A)
特開2008 - 310042 (JP, A)
特開2003 - 337241 (JP, A)
特開昭61 - 201633 (JP, A)
国際公開第01 / 014917 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/00 - 6/54
Cinii