(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4101429号
(P4101429)

(45)発行日　平成20年6月18日(2008.6.18)　(24)登録日　平成20年3月28日(2008.3.28)

(51)Int.Cl.　　F I
G02B 6/036 (2006.01)　　G02B 6/22
G02B 6/02 (2006.01)　　G02B 6/10　C

請求項の数 17　(全 30 頁)

(21)出願番号　特願2000-87598(P2000-87598)
(22)出願日　平成12年3月27日(2000.3.27)
(65)公開番号　特開2000-347057(P2000-347057A)
(43)公開日　平成12年12月15日(2000.12.15)
審査請求日　平成15年12月8日(2003.12.8)
審判番号　不服2006-10624(P2006-10624/J1)
審判請求日　平成18年5月24日(2006.5.24)
(31)優先権主張番号　特願平11-94400
(32)優先日　平成11年3月31日(1999.3.31)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

(73)特許権者　000005186
株式会社フジクラ
東京都江東区木場１丁目５番１号
(74)代理人　100064908
弁理士　志賀　正武
(74)代理人　100108578
弁理士　高橋　詔男
(74)代理人　100089037
弁理士　渡邊　隆
(74)代理人　100101465
弁理士　青山　正和
(72)発明者　山内　良三
千葉県佐倉市六崎１４４０番地　株式会社フジクラ　佐倉事業所内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、
該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、
該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、
コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、
該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、
前記中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の５～９０％であり、
入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。
【請求項２】
光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、
該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、

該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、
コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、
該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、
前記中間層が１層あるいは屈折率が異なる２層以上からなり、当該中間層を構成する層の屈折率を中心側からｎｌ１、ｎｌ２、…、ｎｌｉ（ｉ＝２、３、・・・）としたとき、ｎｌ１＞ｎｌｉであり、かつクラッドがｎｌ１よりも低い屈折率を備え、
入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項３】
光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、
該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、
該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、
コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、
該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、
前記中間層が屈折率が異なる２層以上からなり、当該中間層を構成する層のうち、最大屈折率層に隣接する層の屈折率をｎｌ１、これらの層の最大の屈折率をｎｌｍａｘとしたとき、ｎｌｍａｘ＞ｎｌ１であり、かつクラッドがｎｌｍａｘよりも低い屈折率を備え、
入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項４】
請求項１に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、高次モードとクラッドモードにおいて、隣接するモード間の正規化伝搬定数差が０．２５以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項５】
請求項１に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、クラッドの屈折率を基準としたときの最大屈折率層の相対屈折率差が０．６５～１．５％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項６】
請求項５に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、コアの外径が前記最大屈折率層の外径の３～８倍であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項７】
請求項６に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、コアの外径が最大屈折率層の外径の３～５．５倍であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項８】
請求項２に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の５～５０％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項９】

請求項３に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の１５～９０％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１０】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における実効コア断面積が５０μｍ^2 以上であり、１．５５μｍ帯における分散の絶対値が１０ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下であり、かつ石英ガラスを主成分とすることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１１】

請求項１０に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における実効コア断面積が７０μｍ^2 以上であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１２】

請求項１１に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における分散の絶対値が５ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１３】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、伝搬モードの数が３～６であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１４】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯において、最低次モードの分散が波長１．５μｍよりも長い波長でゼロとなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１５】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯における直径２０ｍｍの一様曲げ損失が３０ｄＢ／ｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１６】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯における直径２０ｍｍの一様曲げ損失が１０ｄＢ／ｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【請求項１７】

請求項１～３のいずれか一項に記載の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯において、最低次モードの分散が波長１．５μｍよりも短い波長でゼロとなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】

本発明は、比較的長距離伝送用の光ファイバであって、主として超高速伝送や高密度波長多重伝送に適する光ファイバに関するものである。

【０００２】

【従来の技術】

従来高速伝送用の光ファイバとしては、単一モードファイバが知られている。高速伝送用の単一モードファイバは通常石英系ガラスから形成されている。ここで石英系ガラスとは、二酸化硅素を主成分とするガラスとする。また、本明細書中において、光ファイバのコアを形成する石英系ガラスは、少なくとも５０重量％以上の成分が二酸化硅素であるものとする。

最も単純な構造の単一モードファイバは、ステップ型の屈折率分布を有するものである。

ステップ型の単一モードファイバは、均一な屈折率を持つコアの周囲に、このコアよりも低屈折率のクラッドが設けられた構造となっている。

【０００３】

ステップ型の単一モードファイバの電磁界は、マツクスウェル方程式を解くことによって求めることが出来る。

光ファイバ断面内においてコア半径をａ、コアの屈折率（ピーク屈折率）をｎ1、クラッドの屈折率をｎcladとし、コア－クラッド間の比屈折率差（相対屈折率差）Δを、以下の式（１）

【０００４】

【数１】

$$\Delta = (n_1^2 - n_{clad}^2) / (2 n_1^2)$$
$$\fallingdotseq (n_1 - n_{clad}) / n_1 \fallingdotseq (n_1 - n_{clad}) / n_{clad} \qquad \text{式（１）}$$

【０００５】

で表し、光の波長をλとすると、正規化周波数Ｖが以下の式（２）で表される。

【０００６】

【数２】

$$V = (2\pi / \lambda)\, a\, n_1 \quad (2\Delta) \qquad \text{式（２）}$$

【０００７】

そして、この正規化周波数Ｖが、ある一定値以下の値であれば、唯一のＬＰモードが伝搬可能な単一モード条件が保証される。

ここで、ＬＰモード（直線偏波モード：Linearly Polarized Mode）について説明する。

光ファイバのコアを伝搬するモードを伝搬モード、クラッドを伝搬するモードをクラッドモードという。クラッドモードは所定距離伝搬すると、クラッド外に放射され、減衰する。

伝搬モードは、厳密には、ＴＥ、ＴＭ、ＨＥ、ＥＨなど、電磁界のベクトルの方向として、様々な方向成分を持つモードからなる。しかし、ある近似のもと、具体的には、コア－クラッド間の非屈折率差が小さいという条件のもとでは、ファイバ断面内に直交二軸をとるとき、どちらか一方の方向の電界ベクトルしか持たないところのＬＰモードによって、光の伝搬状態を近似することができる。一般には、前記コア－クラッド間の相対屈折率差が１％以下と言われているが、若干の誤差を許せば、屈折率差３％程度までは近似が成立すると考えられる。

ＬＰｍｎモードと厳密界のモードとの対応は、以下のようになる。

ＬＰ０１モード＝ＨＥ１１モード

ＬＰ１１モード＝ＴＥ０１モード、ＴＭ０１モード、ＨＥ２１モード

ＬＰ２１モード＝ＥＨ１１モード、ＨＥ３１モード

ＬＰ０２モード＝ＨＥ１２モード

・・・

【０００８】

ステップ型の単一モードファイバにおいては、Ｖ＜＝２．４０５となるときが、いわゆる最低次モード（基本モード、すなわちＬＰ０１モード）のみがコアを伝搬する単一モード条件であること知られている。

【０００９】

このステップ型の単一モードファイバの欠点は、前記式（２）からわかるように、ある波長λに対して、単一モード条件を満たすためには、コア半径ａ（コア径でいえば２ａ）と比屈折率差の平方根$\Delta^{1/2}$の積を大きくすることが出来ず、いわゆる、モードの存在領域を示すモードフィールド径（ＭＦＤ：Ｍｏｄｅ　Ｆｉｅｌｄ　Ｄｉａｍｅｔｅｒ）が原理的に小さくなる傾向があることである。ＭＦＤが小さいと、光ファイバどうしを低損失で接続しようとする場合に、条件を満足できないことがある。

【００１０】

一方、Ｖ＜＝２．４０５を保ちながらＭＦＤを大きくしようとすると、コア径２ａを拡大し、対して比屈折率差Δを小さくすることが必要となる。

しかしながら、このような設計を行うと、屈折率差が小さく、また、モードが大きくコア中心から広がっているため、ファイバに僅かな曲がり（マイクロベンド）を与えるだけで伝搬モードのエネルギーがクラッドを経て外部に放射され、損失を生じやすくなる。

【００１１】

そこで、一つの方策として、厳密に式（２）に示したＶ＜＝２．４０５を遵守するのではなく、理論的には二次モードであるＬＰ１１モードが存在しうるようなＶを設定することが行われている。

すなわち、Ｖが３．０程度の値になることを許した設計を行うと、比較的大きなＬＰ０１モードのＭＦＤを設定しても、コア内への電磁界の閉じ込めは強い。そのため、ファイバに僅かな曲がりが加わっても曲げ損失があまり大きくならず、伝送可能となる。

【００１２】

このとき、ＬＰ１１モードはコア内に僅かしか閉じ込められていないので、長距離伝搬することはなく、数ｍ～数十ｍ伝搬すると実使用状態で受ける曲がりによって大きな放射損失を受けて速やかに減衰する。そのため、伝送に影響を与えることはない。

しかしながら、このように２つ以上のモードが伝搬する構造において、もし高次モードが速やかに減衰しない場合には、以下のような問題がある。

一般に、光ファイバに複数のモードが伝搬するとき、個々のモードの伝搬速度が一致することはない。そのため、光ファイバ通信システムにおいて、複数のモードに光信号エネルギーを分配して同時に伝搬させると、長距離伝搬した後には個々のモードの到着時刻が異なり、復調後の信号波形は歪んでしまう。したがって、結果的に高速伝送が行えないことになる。近年の光通信の伝送速度は、搬送波長１波に対して、数Ｇｂ／ｓ以上の伝送が一般的に行われており、実用レベルで１０Ｇｂ／ｓ、実験的には数十～１００Ｇｂ／ｓが報告されている。

【００１３】

ところで、光ファイバの波長分散（単に分散ともいう）は、以下の二つの要素の和で決定されている。一つは、ファイバの材質で決定されているところの材料分散で、他の一つは、光ファイバの屈折率分布構造で決定される導波路分散（構造分散）である。光ファイバ通信にとって重要な１．３～１．６μｍの波長域では、石英系光ファイバの材料分散は波長が長くなるにしたがって大きくなる傾向がある。上述の通常のステップ型の単一モードファイバにおいては、導波路分散の寄与は小さく、材料分散が支配的であるので、全分散、すなわち材料分散と導波路分散との和が１．３μｍ付近でゼロとなる。

光ファイバ、特に石英系ガラスを主成分とする光ファイバの最低損失波長は１．５５μｍ付近にある。石英系光ファイバの損失は主にレイリー散乱によるもので、１．５５μｍ帯で最小になる。よって、この波長帯ではＶが２．４～３．０のステップ型シングルモードファイバは、分散が大きく、あまり高速の伝送には向いていない。

【００１４】

分散シフトファイバは、石英系ガラスからなる単一モードファイバにおいて、分散がゼロとなる波長帯を１．５５μｍ帯にシフトさせたものである。すなわち、その屈折率分布構造を変化させることにより、構造に大きく依存する導波路分散の絶対値を大きくし、材料分散と導波路分散の和である全分散がゼロになる波長帯を１．３μｍ帯からシフトさせたものである。材料分散は材料自体によって決定されるもので、導波路構造にはほとんど依

存しない。
このように１．５５μｍ帯における分散をゼロにすることによって、１．３μｍ帯よりもさらに低損失の伝送が可能となる。
【００１５】
具体的な数値としては、例えば以下のようになる。
通常の石英系ガラスの材料分散は、波長１．５５μｍ帯において、およそ１７ｐｓ／ｋｍ／ｎｍである。よって、導波路分散が約－１７ｐｓ／ｋｍ／ｎｍであれば、材料分散をキャンセルして、分散をゼロにすることができる。
このように導波路分散の絶対値を大きくするためには、以下のような条件を満たす必要がある。
（Ａ）比較的大きな比屈折率差を持つこと。
（Ｂ）比較的小さなコア径を持ち、コアの主要部分に対して電磁界分布の相対的な広がりが大きいこと。
【００１６】
前記（Ａ）については、コア－クラッド間の比屈折率差を大きく設計することによって対応することができる。
前記（Ｂ）は、光のコア内への閉じ込めが弱いということとほとんど同義である。分散シフトファイバにおいては、例えばλ→λ＋Δλの波長変化に対して、Δ（ＭＦＤ）／Δλが大きな値を持つような領域において、導波路分散が大きくなる傾向があることが知られている。よって、分散シフトファイバにおいては、前記（Ｂ）の条件にしたがって、導波路分散を大きくするために、コアの主要な部分から電磁界が大きくしみ出すような構造設計を行うことが多い。
【００１７】
しかしながら、このように電磁界が大きい、すなわち、いわゆる大きなＭＦＤを有するものにおいては、上述のようにモードが大きくコアの中心から広がっているため、ファイバに僅かな曲がりを与えるだけで伝搬モードのエネルギーが外部に放射し、損失を生じやすくなる。
よって、１．５５μｍ帯への分散のシフトと、この曲がり損失の感受性とを同時に満たす分散シフトファイバを設計することはかなり困難であることが知られている。
【００１８】
ところで、近年、光通信技術の発達により、光増幅器によって光信号を直接的に増幅しながら長距離伝送する技術が実現されている。前記光増幅器としては、エルビウム添加光ファイバ増幅器（ＥＤＦＡ：Erbium Doped Fiber Amplfier）が用いられ、増幅された光信号のパワーは数十ｍＷ以上になることも多い。
【００１９】
また、分散シフトファイバの低損失領域である１．５５μｍ帯は、ある程度の波長幅を有する。また、ＥＤＦＡの増幅帯域幅は数十ｎｍの波長幅を有する。そこで、１．５５μｍ帯内に複数の異なる数十波長の光信号を設定し、これらの光信号をＥＤＦＡにて同時に増幅しながらひとつの分散シフトファイバにて伝送する波長多重伝送方式が実現されている。
このような技術の進歩の結果、いわゆる光ファイバ中の光の存在領域（実効コア断面積）、すなわちＭＦＤを広げて設計するということは、単にファイバ同士を簡単に低損失で接続する、分散シフトファイバの導波路分散の絶対値を大きくするなどの目的以外に、別の意義が出てきた。すなわち、非線形効果の問題である。
【００２０】
長距離伝送においては、波長多重伝送の有無に関わらず、十分に増幅した大きなパワーの光信号を長距離にわたって伝送する間に、非線形効果の影響によって光信号の信号波形が歪んでしまうという問題がある。
具体的な非線形効果の例としては、自己位相変調、四波混合（ＦＷＭ）などが挙げられる。

【００２１】
自己位相変調は、光強度に依存した物質の屈折率変化を引き起こす３次の非線形現象のひとつであって、物質内を伝搬する光パルス自信の位相が短時間に急激に変化する現象をいう。
長距離伝送においては、例えば１波の伝送であっても光信号のピークパワーが強いと、最もパワーが強い山の部位と最もパワーが弱い谷の部位とでガラスの屈折率が異なる現象が発生し、光の瞬時周波数の局所的な変化が生じる。
そして、高速変調になるほど瞬時周波数の変化は大きくなるので、それが光ファイバの分散と結びついて大きな波形ひずみとなる。よって、長距離多重伝送における自己位相変調は、分散シフトファイバの分散と自己位相変調との相互作用と呼ぶべき効果である。
【００２２】
ＦＷＭも３次の非線形現象のひとつであって、３つの入射光によって不要な第４の光が発生し、４つの周波数の波が相互作用をして波長多重通信に影響を与えるものである。波長多重数が増加すると非常に多くの４波の組合わせが考えられるので、互いに多くの相互作用をして通信品質の低下を招くことになる。
ＦＷＭによる不要な光（波）の発生効率は、近似的には、以下の式（３）で与えられる。
【００２３】
【数３】

$$\eta = (\alpha_2 \cdot n_2^2) / (D^2 \cdot A_{eff}^2) \qquad \text{式（３）}$$

【００２４】
式中、αは光ファイバの損失係数（単位は例えば、ｄＢ／ｋｍである）、n_2は光ファイバガラスの非線形屈折率、Ｄは光ファイバの分散、Ａｅｆｆは光ファイバの実効コア断面積である。
【００２５】
式（３）中のＡｅｆｆは、コアを伝搬するモードの電磁界分布がガウス型の場合は、以下の式（４）で与えられる。
【００２６】
【数４】

$$A_{eff} = \pi \cdot MFD^2 / 4 \qquad \text{式（４）}$$

【００２７】
しかしながら、実際は以下の式（５）に示すように、コア内の光の電磁界分布を積分して計算する。
【００２８】
【数５】

$$A_{eff} = \frac{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx\, dy \right\}^2}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^4 dx\, dy}$$

式（５）

【００２９】
前記式（３）からわかるように、光ファイバの分散がゼロに近づくと発生効率が非常に大きくなる。よって、高速伝送の観点からは分散はできるだけ小さい値であることが望ましいが、非線形効果の観点からはあまりに小さいと不都合である。
また、Ａｅｆｆは大きい方が好ましい。よって、上述のようにＭＦＤを大きく設計することは、非線形効果の低減に対して意義がある。
【００３０】
以上のような背景により、最近の分散シフトファイバには以下のような条件を満足することが求められている。
（Ａ）使用波長帯において、分散の絶対値が小さく、かつ完全に零ではなく、ある程度はずれた値を有していること（NON-ZERODISPERSION SHIFTED FIBERと呼ぶことがある。）。
（Ｂ）Ａｅｆｆが大きいこと。
（Ｃ）低損失であること。これは、石英系光ファイバであればある程度満たされるが、具体的には、１．５５μｍ帯での損失が０．２３ｄＢ／ｋｍ程度以下であることが望ましい。
（Ｄ）曲げ損失感受性が小さいこと。これは、しばしば、前記（２）のＡｅｆｆが大きいことと矛盾する。
【００３１】
【発明が解決しようとする課題】
本発明は前記事情に鑑みてなされたもので、（Ａ）比較的大きなＡｅｆｆを持ち、（Ｂ）低損失で、（Ｃ）分散値の絶対値は１．５５μｍ帯で数ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ程度であり、（Ｄ）光ファイバの使用環境で、比較的小さな曲がり損失感受性を有する光ファイバを提供することを課題とする。
さらに波長多重伝送用としては、（Ｅ）数ｋｍ以上の長距離伝送において、広帯域伝送が可能であると好ましい。
【００３２】
【課題を解決するための手段】
本発明は前記課題を解決するために以下のような手段を用いる。
第１の発明は光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、
該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、
該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、
コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、
該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、
前記中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の５～９０％であり、

入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第２の発明は光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、

該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、

該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、

コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、

該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、

前記中間層が１層あるいは屈折率が異なる２層以上からなり、当該中間層を構成する層の屈折率を中心側からｎｌ１、ｎｌ２、…、ｎｌｉ（ｉ＝２、３、・・・）としたとき、ｎｌ１＞ｎｌｉであり、かつクラッドがｎｌ１よりも低い屈折率を備え、

入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第３の発明は光信号入射時には少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能な多モード光ファイバであって、

該伝搬モードが最低次モードと二次モード以上の高次モードを含み、

該最低次モードと該二次モードとの伝搬定数差が、二次モード以上の高次モードにおいて、隣接するモード間の伝搬定数差の２倍以上であり、

コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、

該コアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつ当該コアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、該最大屈折率層の外周上に設けられた、該最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備え、

前記中間層が屈折率が異なる２層以上からなり、当該中間層を構成する層のうち、最大屈折率層に隣接する層の屈折率をｎｌ１、これらの層の最大の屈折率をｎｌｍａｘとしたとき、ｎｌｍａｘ＞ｎｌ１であり、かつクラッドがｎｌｍａｘよりも低い屈折率を備え、

入射した光信号が、最大４ｋｍを伝搬する間に、最低次モード以外のモードは減衰し、実質的に情報伝送に寄与しなくなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第４の発明は、第１の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、高次モードとクラッドモードにおいて、隣接するモード間の正規化伝搬定数差が０．２５以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第５の発明は、第１の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、クラッドの屈折率を基準としたときの最大屈折率層の相対屈折率差が０．６５～１．５％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第６の発明は、第５の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、コアの外径が前記最大屈折率層の外径の３～８倍であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第７の発明は、第６の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、コアの外径が最大屈折率層の外径の３～５．５倍であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第８の発明は、第２の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の５～５０％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第９の発明は、第３の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて

、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の１５～９０％であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１０の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における実効コア断面積が５０μｍ^2 以上であり、１．５５μｍ帯における分散の絶対値が１０ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下であり、かつ石英ガラスを主成分とすることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１１の発明は、第１０の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における実効コア断面積が７０μｍ^2 以上であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１２の発明は、第１１の発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、１．５５μｍ帯における分散の絶対値が５ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１３の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、伝搬モードの数が３～６であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１４の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯において、最低次モードの分散が波長１．５μｍよりも長い波長でゼロとなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１５の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯における直径２０ｍｍの一様曲げ損失が３０ｄＢ／ｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１６の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯における直径２０ｍｍの一様曲げ損失が１０ｄＢ／ｍ以下であることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

第１７の発明は、第１～３の発明のいずれかひとつの高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいて、使用波長帯において、最低次モードの分散が波長１．５μｍよりも短い波長でゼロとなることを特徴とする高次モード除去機能を有する多モード光ファイバである。

【００３３】

【発明の実施の形態】

上述のように、従来の技術において、例えばステップ型の単一モードファイバでは、せいぜいＶを３．０程度として単一モード条件をやや緩和することにより、ＬＰ０１モードの閉じこめを強くし、比較的閉じ込めの弱いＬＰ１１モードを速やかに減衰させるという手段が取られてきた。

このような光ファイバをしばしば「準単一モードファイバ」とよぶこともある。

【００３４】

本発明の多モード光ファイバにおいては、準単一モードファイバよりも多くのモードが伝搬可能な条件を設定し、かつ光ファイバの屈折率分布とモード間の伝搬定数差の関係を適切に設定することにより、実質的に単一モード伝送が可能な設計を行うものである。

【００３５】

本発明の多モード光ファイバの基本的な考え方は、光ファイバの使用環境において生じる曲がりがもたらすモード変換を利用するものである。

理想的な光ファイバの場合、その長さ方向において外径変動、コア径変動、また、屈折率の揺らぎもないと仮定している。

したがって、仮に複数のモードが光ファイバを伝搬しても、相互にモードのエネルギーを交換することはない。

【００３６】

しかし、実際の光ファイバの敷設環境においては、光ファイバには以下のような擾乱が加わる。
（Ａ）光ファイバ自身に、その長さ方向において、外径変動、コア径変動、屈折率の揺らぎなどが内在する。
（Ｂ）光ファイバは、外面保護のために、その外周上に合成樹脂からなる被覆層が設けられた光ファイバ素線などとして取り扱われるのが通常である。この被覆層は、通常軟らかい内層と硬い外層からなる二重構造とされる。そして、この被覆層においても、その長さ方向において、径変動や樹脂の硬度の変化があり、これらが光ファイバに影響する。
（Ｃ）光ファイバのケーブル化においては、光ファイバはテープ化されたり、ファイバ同士撚り合わせられたりしている。そして、これに伴って光ファイバは、曲がり、引っ張り、圧縮力などを受ける。
これらの擾乱が光ファイバに加わった結果、光ファイバを伝搬するモードは、相互のモード間でエネルギーを交換をする。これをモード変換と呼んでいる。

【００３７】
その程度は、結合に関与する二つのモードの伝搬定数βｉ、βｊの伝搬定数差Δβによって表される。Δβは、以下の式（６）で表される。

【００３８】
【数６】

$$\Delta\beta = |\beta_i - \beta_j| \qquad \text{式（6）}$$

【００３９】
そして、これらのモードの結合係数Ｃijは、以下の式（７）

【００４０】
【数７】

$$C_{ij} \propto \Delta\beta^{-2p} \qquad \text{式（7）}$$

【００４１】
に示したようにΔβ^{-2p}に比例すると言われている。ここで、ｐはゆらぎの長さ方向のスペクトルに関係した量で、２～４程度の値をとると言われている。
図１は伝搬モードの存在範囲をβダイアグラムで示したものであって、横軸は伝搬定数を示している。そして、βが正の領域のモードは光信号の進行方向のモード、βが負の領域のモードは反対の反射モードである。
定性的に説明する場合においては、図１に示したようにＬＰ０１モードの伝搬定数をβ０、それ以降の高次モードの伝搬定数を順次β１、β２・・とする。
例えば、上記において、ｐ＝４とすると、モード間の結合係数はΔβの８乗に逆比例する。ここで、３つの伝搬モード（ＬＰ０１、ＬＰ１１、ＬＰ０２モード）が存在しているとする。それぞれの伝搬定数は上述のようにβ０，β１，β２である。そして、以下の式（８）、式（９）

【００４２】
【数８】

$$\beta_0 - \beta_1 > 3 \cdot (\beta_1 - \beta_2) \qquad \text{式（8）}$$

【数９】

$$\beta_1 - \beta_2 = \beta_2 - k_o n_{clad} \qquad \text{式（９）}$$

【００４３】
に示したような条件を満足するように設計したとする。式（９）中、ｋｏは以下の式（１０）
【００４４】
【数１０】

$$k_o = 2\pi / \lambda \qquad \text{式（１０）}$$

【００４５】
で示される真空中の光の伝搬定数であるn_{clad}はクラッドの屈折率である。
前記式（７）により、これらのモード間の結合係数の関係は、以下の式（１１）、式（１２）に示したようになる。
【００４６】
【数１１】

$$C_{01} < 0.0002 C_{12} \qquad \text{式（１１）}$$

【数１２】

$$C_{12} \fallingdotseq C_{2clad} \qquad \text{式（１２）}$$

【００４７】
これらの式（１１）、式（１２）からわかるように、モード間の結合は、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの間ではほとんど生じず、高次モード間（ＬＰ１１モードとＬＰ０２モードとの間）および、最高次モード（ＬＰ０２モード）とクラッドモードとの間で生じる。
したがって、ＬＰ１１モードはＬＰ０２モードと強く結合し、さらにクラッドモードと結合し、クラッドを伝搬し、所定距離進行したところで速やかに減衰することになる。
よって複数のモードがコア内を伝搬可能な状態にありながらも、各モードが持つ伝搬定数を適切に制御するとともに、上述のような擾乱の影響によって、積極的にＬＰ１１モード以上の高次モードを除去し、適切な距離を伝搬した後は、ＬＰ０１モードのみが実質的に伝搬するようなモードの配置が可能となる。
【００４８】
モード間の結合係数は、厳密には単にΔβだけで決定されるのでなく、結合に関与する二つのモードの電磁界分布や光ファイバに摂動として与えられる擾乱の形および周期性などに大きく依存する。
光ファイバをケーブル化する当業者間においては、伝送損失増加の観点からΔβが非常に大きな意味を持つと認識されている。伝搬定数差と伝送損失増加との関係は、前記式（８）、式（９）に示したように、ｐの値によっては－４乗～－８乗に比例するという極めて強い依存性を持ち、他の因子と比べて影響力が大きいからである。
【００４９】
しかしながら、本発明においては、複数のモードがコア内を伝搬可能な多モード光ファイバにおいて、複数のＬＰモードを励振して光ファイバ中を伝搬させ、これらを伝搬するう

ちに、積極的にＬＰ１１モード以上の高次モードを除去することを目的とするため、Δβのみならず、多モード光ファイバに付与される擾乱の形および周期性なども特性に大きく影響する因子となる。このような擾乱の形や擾乱の周期性などは個々の光ファイバによって異なるため、一概に述べることはできないが、通常の光ファイバの取り扱いにおいては、光ファイバ自身に内在する要因や敷設時の外的要因などによって、本発明に適した擾乱が付与され、本発明の効果が得られる。

【００５０】

例えば擾乱の形においては、軸対称性が重要である。以下、定性的に、前記式（８）、（９）、（１１）、（１２）に示したように設計した多モード光ファイバに生じるいくつかの擾乱の形と、そのときのモード結合関係について例示する。

例えば、図２に示したようなマイクロベンドが光ファイバに生じると、もともとまっすぐだった光ファイバの軸が曲がるため、いわゆる「軸対称でない摂動」が光ファイバに与えられる。ＬＰ０１モードは軸対称モードであるため、マイクロベンドが生じていない光ファイバにおいては、光ファイバのコア径変動のような軸対称な摂動だけが存在すると、同じ軸対称モードであるＬＰ０２モードと結合する。

しかしながら、マイクロベンドのような軸対称でない摂動がある程度強く付与されることによって、ＬＰ０１モードとＬＰ０２モードとの結合よりも、非軸対称モードであるＬＰ１１モードとの結合が支配的となる。ＬＰ１１モードは、ＬＰ０１モードだけでなく、ＬＰ０２モードとも結合する。

【００５１】

上述のように図３に示したファイバ径が長さ方向に変動しているような、いわゆる「軸対称な摂動」のみが多モード光ファイバに加わっている場合、前述のマイクロベンドとは異なり、対称性が同じであるモードどうしの結合が生じると考えられる。

すなわち、ＬＰ０１モードとＬＰ０２モード、ＬＰ１１モードとＬＰ１２モードなどの結合の組み合わせが考えられる。

【００５２】

特に本発明の多モード光ファイバにおいて、好ましい擾乱を与えるためには、多モード光ファイバの表面上に内層と外層からなる合成樹脂製の被覆層を設けるにあたって、前記内層の材料のヤング率を０．５ｋｇ／ｍｍ^{2}以下、好ましくは０．０５～０．３ｋｇ／ｍｍ^{2}とし、外層の材料がヤング率３０ｋｇ／ｍｍ^{2}以上、好ましくは６０～７０ｋｇ／ｍｍ^{2}とすると好ましい。これらの範囲を満足することによって、内層と外層の硬度差や、おそらくは光ファイバの製造時の樹脂硬化に起因して光ファイバに適度な擾乱が与えられ、高次モードを除去する効果が向上する。

【００５３】

ここで、本発明の多モード光ファイバの設計については、以下のように整理することができる。

（Ａ）光信号入射時（励振時）には、少なくとも３以上の直線偏波モードが伝搬モードとして存在可能であるように屈折率分布構造を設計する。これにより、ファイバの設計の自由度が大きくなる。

【００５４】

（Ｂ）そのとき、これらの伝搬モードにおいて、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの伝搬定数差が、ＬＰ１１モード以上の高次モードと隣接する高次モードとの伝搬定数差の２倍以上、好ましくは３倍以上になるように設定する。その結果、ＬＰ１１モード以上の高次モードのみがクラッドモードに結合し、適切な距離を伝搬した後はＬＰ０１モードのみが実質的に伝搬するようなモード配置が可能となる。２倍未満の場合は高次モードのみを適切に減衰させることができず、単一モード伝送とならない場合がある。

（Ｃ）また、ＬＰ１１モード以上の高次モードおよびクラッドモードにおいては、隣接するモード間の伝搬定数差は正規化伝搬定数において、０．２５以下、好ましくは０．１以下、さらに好ましくは０．０５以下になるように設定する。このように設定することにより、高次モードはクラッドモードと速やかに結合し、システム上問題とならない距離を伝

搬後には消滅する。
【００５５】
この適切な距離は、光ファイバの種類にもよるが、４ｋｍ程度伝搬した後に高次モードが消滅すれば、十分に実用になる伝送システムを構成することができる。
このとき、４ｋｍ以上伝搬したときに、ＬＰ０１モード以外のモードが、好ましくは２０ｄＢ以上の減衰を受ければ、これらのモードは実質的に情報伝送に寄与しなくなる。
例えば海底伝送システムにおいては、必要に応じて複数の光ファイバを順次接続して構成され、１本の光ファイバの連続長は最低３～４ｋｍとされる。したがって、不要な高次モードが１本の多モード光ファイバを伝搬する間に十分に減衰すれば、次の接続点に到達する間に実質的なシングルモード伝搬状態が実現される。
しかし、前記（Ａ）、（Ｂ）、（Ｃ）に示した条件は、全ての光ファイバの屈折率分布構造で自由に取りうるわけではない。
【００５６】
図４は、ステップ型の屈折率分布を有する光ファイバにおける正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
ｂｍｎは、ＬＰｍｎモードの伝搬定数βｍｎを正規化した値であって、以下の式（１３）で近似されるものである。
【００５７】
【数１３】

$$b_{mn} = (\beta_{mn} - k_0 n_{clad}) / (k_0 n_1 - k_0 n_{clad}) \quad \text{式（１３）}$$

【００５８】
ここで、βｍｎはＬＰｍｎモードの伝搬定数（ｍとｎは整数）である。
βｍｎとｂｍｎにおいては、伝搬定数または正規化伝搬定数どうしの相対的な大きさを比較するには、いずれにおいてもほぼ同じ結果が得られる。
ここで、コアのピーク屈折率とクラッドの屈折率との相対的な差である比屈折率差Δは、以下の式（１４）で表される。
【００５９】
【数１４】

$$\Delta \fallingdotseq (n_1 - n_{clad}) / n_{clad} \quad \text{式（１４）}$$

【００６０】
これを考慮すると、βｍｎとｂｍｎとの関係は、近似的に、以下の式（１５）のように表すこともできる。
【００６１】
【数１５】

$$\beta_{mn} \fallingdotseq (1 + b_{mn})\, k_0 n_{clad} \quad \text{式（１５）}$$

【００６２】
さらに、二つの伝搬定数の差をΔβｍｎ，ｍ'ｎ'とすると、この伝搬定数の差は以下の式（１６）のように表すことができる。
【００６３】
【数１６】

$$\Delta\beta_{mn,m'n'} = (b_{mn} - b_{m'n'})\, k_0 n_{clad} \qquad \text{式（１６）}$$

【００６４】
図４に示したグラフにおいて、正規化周波数Ｖが２．４０５よりも大きくなると、二つ目のＬＰモード（ＬＰ１１モード）が発生する。したがってＬＰ１１モードの伝搬を除去できる範囲の正規化周波数の上限値VC11は２．４０５である。　さらに、Ｖが３．８をこえると次のＬＰモードが発生する。このとき発生するのは、実際はＬＰ２１モードおよびＬＰ０２モードである。
これら三つ目および四つ目のＬＰモードが発生する範囲においては、既に、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードのそれぞれのｂ０１，ｂ１１は、いずれもかなり大きな値を示している。したがって、ｂｍｎの定義式から、それぞれのβ０１，β１１の値もかなり大きな値となっていることがわかる。
表１は、ＬＰ２１モードとＬＰ０２モードが発生するぎりぎりのＶに対応する、ＬＰ０１とＬＰ１１モードのｂｍｎの値を示したものである。
【００６５】
【表１】

モード番号	ｂｍｎ
ＬＰ$_{01}$	０．７６
ＬＰ$_{11}$	０．４２
ＬＰ$_{02}$	０
ＬＰ$_{21}$	０

【００６６】
この表１からは、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの正規化伝搬定数差は０．３４であるのに対して、ＬＰ１１モードとＬＰ０２モードとの正規化伝搬定数差は０．４２であり、２．５倍であるどころか、大小関係が逆転している。
したがって、上述のようにＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの伝搬定数差を、二番目以降のモード相互間の伝搬定数差よりも２．５倍以上となるように設定することは困難である。よって、ステップ型の屈折率分布を有するものでは３つ以上のＬＰモードが伝搬可能な状態を作り出しても、目的とするような伝搬定数差の関係を作り出すことが不可能である。
このようなモード間の伝搬定数差の関係では、光ファイバにモード変換を助長するようなマイクロベンドを与えても、まず真っ先に伝搬定数差が小さいＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの間で結合が強く生じてしまうので、最終的に、不要なモードを除去してＬＰ０１モードを優先的に残すことはできない。
【００６７】
そこで、本発明者らは、他の幾つかの屈折率分布について検討を加えた。その結果、コアと、その外周上に設けられたクラッドとを有し、このコアが、同心円状に設けられた二層以上からなり、かつこのコアの中心付近に設けられた最も高い屈折率の最大屈折率層と、

この最大屈折率層の外周上に設けられた、この最大屈折率層よりも低い屈折率の中間層とを備えている屈折率分布を有する多モード光ファイバにおいて、前記（Ａ）、（Ｂ）、（Ｃ）の条件を満足し得ることがわかった。
また、このような屈折率分布において、さらに以下のような屈折率分布を備えていると好ましい。
（１）中間層が１層あるいは屈折率が異なる２層以上からなり、この中間層を構成する層の屈折率を中心側からｎｌ１、ｎｌ２、…、ｎｌｉ（ｉ＝２、３、・・・）としたとき、ｎｌ１＞ｎｌｉであり、かつクラッドがｎｌ１よりも低い屈折率を備えているもの。
この屈折率分布においては、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の５～５０％であると好ましい。
（２）中間層が屈折率が異なる２層以上からなり、当該中間層を構成する層のうち、最大屈折率層に隣接する層の屈折率をｎｌ１、これらの層の最大の屈折率をｎｌｍａｘとしたとき、ｎｌｍａｘ＞ｎ１ｌであり、かつクラッドがｎｌｍａｘよりも低い屈折率を備えているもの。
この屈折率分布においては、中間層のクラッドを基準にした相対屈折率の最大値が、最大屈折率層のクラッドを基準にした相対屈折率の１５～９０％であると好ましい。

【００６８】

図５（ａ）～図５（ｈ）は、このような屈折率分布の具体例を示したものである。この屈折率分布において、横軸はコアの中心からの位置を示し、縦軸は屈折率を示している。
図５（ａ）に示した屈折率分布は、中心部１ａと、その周囲のこの中心部１ａよりも低屈折率の階段部１ｂとからなるコア１０を有し、この階段部１ｂの周囲に、この階段部１ｂよりも低屈折率のクラッド１１が設けられているものである。
図５（ｂ）に示した屈折率分布は、中心部２ａの周囲に、順次この中心部２ａよりも低屈折率の中間部２ｂと、この中間部２ｂよりも高屈折率で、前記中心部２ａよりも低屈折率のリング部２ｃとが設けられてなるコア１０を有し、このリング部２ｃの周囲に、前記中間部２ｂとほぼ等しい屈折率を有するクラッド１１が設けられて構成されている。

【００６９】

図５（ｃ）に示した屈折率分布は、中心部３ａの周囲に、順次、この中心部３ａよりも高屈折率の第１のリング部３ｂと、前記中心部３ａとほぼ同じ屈折率の中間部３ｃと、この中間部３ｃよりも高屈折率で、かつ前記第１のリング部３ｂよりも低屈折率の第２のリング部３ｄが設けられてなるコア１０を有し、この第２のリング部３ｄの周囲に、前記中間部３ｃとほぼ同じ屈折率を有するクラッド１１が設けられて構成されている。
図５（ｄ）に示した屈折率分布は、中心部４ａの外周上に、順次、この中心部４ａよりも高屈折率の第１のリング部４ｂと、この第１のリング部４ｂよりも低屈折率で、かつ前記中心部４ａよりも高屈折率の階段部４ｃとが設けられてなるコア１０を有し、この階段部４ｃの周囲に、前記中心部４ａとほぼ等しい屈折率を有するクラッド１１が設けられて構成されている。
また、図５（ｃ’）図５（ｄ’）に示した屈折率分布は、それぞれ図５（ｃ）、図５（ｄ）に示したものにおいて、中心部３ａ，４ａの屈折率をクラッド１１の屈折率よりも－Δだけ低く設定した変形例を示したものである。

【００７０】

図５（ｅ）に示した屈折率分布は、中心部５ａの周囲に、順次、この中心部５ａよりも低屈折率の中間部５ｂと、この中間部５ｂよりも高屈折率で、かつ前記中心部５ａよりも低屈折率のリング部５ｃが設けられてなるコア１０を有し、このリング部５ｃの周囲に、前記中間部５ｂよりも低屈折率のクラッド１１が設けられて構成されている。
図５（ｆ）に示した屈折率分布は、中心部６ａの周囲に、順次、この中心部６ａよりも低屈折率の中間部６ｂと、この中間部６ｂよりも高屈折率で、かつ前記中心部６ａよりも低屈折率のリング部６ｃが設けられてなるコア１０を有し、このリング部６ｃの周囲に、前記中間部６ｂよりも高屈折率で、かつ前記リング部６ｃよりも低屈折率のクラッド１１が設けられて構成されている。

【００７１】
図５（ｇ）に示した屈折率分布は、中心部７ａの周囲に、順次、この中心部７ａよりも低屈折率の階段部７ｂと、この階段部７ｂよりも低屈折率の低屈折率部７ｃが設けられてなるコア１０を有し、この低屈折率部７ｃの周囲に、この低屈折率部７ｃよりも高屈折率で、かつ前記階段部７ｂよりも低屈折率のクラッド１１が設けられて構成されている。
図５（ｈ）に示した屈折率分布は、コア１０とクラッド１１とからなり、このコア１０は中心部８ａの周囲に、順次、この中心部８ａよりも低屈折率の中間部８ｂと、この中間部８ｂよりも高屈折率で、かつ前記中心部８ａよりも低屈折率のリング部８ｃと、クラッド１１よりも低屈折率の低屈折率部８ｄが設けられて構成されている。
【００７２】
図５（ａ）～図５（ｈ）に示した屈折率分布の各構成部分は石英ガラスを主成分とし、純石英ガラス、または屈折率を上昇させる作用を有するゲルマニウムを添加した石英ガラス、あるいは屈折率を低下させる作用を有するフッ素を添加した石英ガラスから構成されている。
【００７３】
ここで、図５（ａ）～図５（ｈ）に示した屈折率分布においては、コア１０の外周上にクラッド１１が設けられてなり、コア１０が、中心付近に配置された、この屈折率分布において最も屈折率の高い部分（最大屈折率層）と、その周囲に設けられた、この最大屈折率層よりも低い屈折率であり、この最大屈折率層とクラッド１１とに挟まれた中間層とを有している点で共通する。
また、図５（ａ）、図５（ｄ）、図５（ｇ）に示した屈折率分布は、図５（ｄ）に示した低屈折率の中心部４ａ、あるいは図５（ｇ）に示した階段部７ｂの外周上の低屈折率部７ｃを設けることが任意であるとすると、実質的に３層構造である点で共通する。
すなわちこれらの屈折率分布は、中心付近に最も高屈折率の中心部１ａ，７ａ、第１のリング部４ｂ，が設けられ（第１層：最大屈折率層）、その外周上にこれらよりも低屈折率の階段部１ｂ，４ｃ，７ｂが設けられ（第２層：中間層）、さらにこれらの周囲に、これらよりも低屈折率のクラッド１１（クラッド層）が設けられて構成されている。コア１０の中心に低屈折率の中心部４ａ、あるいはクラッド１１と接触するコア１０の外周付近に低屈折率部７ｃを設けるかどうかは、要求される特性によって設計され、任意である。
これらの屈折率分布においては、クラッド層を基準にしたときの第１層、第２層の相対屈折率の最大値をΔ１、Δ２としたときに、Δ２はΔ１の５～５０％、さらに５～１５％であることが望ましい。
【００７４】
また、図５（ｂ），図５（ｃ），図５（ｅ），図５（ｆ），図５（ｈ）に示した屈折率分布においては、図５（ｃ）に示した中心の低屈折率の中心部３ａと、図５（ｈ）に示した低屈折率部８ｄを設けることが任意であるとすると、実質的に４層構造である点で共通する。
すなわちこれらの屈折率分布は、中心に最も高屈折率の中心部２ａ，第１のリング部３ｂ，中心部５ａ，６ａ，８ａが設けられ（第１層：最大屈折率層）、その外周上にこれらよりも低屈折率の中間部２ｂ，３ｃ，５ｂ，６ｂ，８ｂが設けられ（第２層：中間層）、さらにその外周上にこれらよりも高屈折率のリング部２ｃ，第２のリング部３ｄ，リング部５ｃ，６ｃ，８ｃが設けられ（第３層：中間層）、さらにその周囲にクラッド１１が設けられている（クラッド層）。
前記中心部３ａと低屈折率部８ｄを設けるかどうかは要求される特性によって設計され、任意である。クラッド１１の屈折率を基準としたとき、低屈折率部８ｄの相対屈折率は、コア１０の中心付近の屈折率の最大値（Δ１）に対して相対的に－５～－１５％程度とされる。
同様に第３層の相対屈折率はΔ１に対して１５～９０％程度とされる。
同様に中間部５ｂの相対屈折率はΔ１に対して０～１５％とされる。
同様に中間部６ｂの相対屈折率はΔ１に対して０～－１０％とされる。

なお、図５（ｃ’）、図５（ｄ’）に示した屈折率分布においては、中心部３ａ、４ａの屈折率は、クラッド１１に対する相対屈折率で－０．０５～０．３％程度の値が製造性の観点から好ましい。

【００７５】

そして、図５（ａ）～図５（ｈ）に示した屈折率分布において共通するのは、上述のように、コア１０が二層以上からなり、コア１０の中心付近に最も高屈折率の最大屈折率層が配され、その外周上に、これよりも低屈折率の中間層が配されている点である。このように、コア１０内において、その中心の高屈折率の部分に、一層ＬＰ０１モードを集中させることによって、上述の条件を満足させることができる。

【００７６】

図５（ａ）～図５（ｈ）に示した屈折率分布を有する単一モードファイバは、従来から存在している。しかしながら、その正規化周波数Ｖは、ＬＰ１１モードの発生を抑えるため、小さめに設定されている。実際、従来のものはかなり厳密な単一モード条件を守ってきた。

本発明においては、上述のように、このような制限を敢えて取り払い、より多くのモードが伝搬しつつも、モード変換の作用により、ＬＰ１１モード以降のモードが適当な距離伝搬後には放射モードに散逸して消滅するようなモード配置を行うものであって、従来のものとは屈折率分布が同じであっても、設計条件が異なる。

【００７７】

定性的には、本発明においては、コアにおいて最大屈折率層（第１層）の屈折率（コアのピーク屈折率）をｎ１とするとき、例えばその外周上の中間層の最大屈折率をｎ２とする。そしてこれらｎ１、ｎ２において、クラッド１１の屈折率を基準としたときの相対屈折率をそれぞれΔ１、Δ２としたとき、Δ２をΔ１の５～９０％、さらに好ましくは３０％程度の値に設定することによって、本発明の条件を満足することができる。ｎ１は０．５～１．５％とされる。

この程度の屈折率差で実現できるのは、多モード光ファイバを伝搬するＬＰモードの中で、ＬＰ０１モードを除くと、そのエネルギー分布は、中心部の最大屈折率層の領域にはほとんど存在せず、ＬＰ０１以外のモードの伝搬定数は、あまり中心の最大屈折率層の屈折率に依存しないためである。

また、このコアにおいて、最大屈折層の外径に対してコアの外径は３～８倍、好ましくは３～５．５倍とされる。

【００７８】

ただし、一般の多モードファイバのように、数十個のＬＰモードが存在する場合、Ｖが大きくなるとこのような条件は成立しなくなる。したがって、本発明において、伝搬モード数の上限値は、上述のように伝搬定数がコアの中心の最も高い屈折率の部分の屈折率に依存しないような条件を満足する値が設定される。すなわち、本発明の多モード光ファイバのような振る舞いを実現するためには、図５（ａ）～図５（ｈ）に示した屈折率分布を有し、かつ伝搬モードのＬＰモード数が３～６個程度、場合によっては３～５個程度とすると好ましい。

【００７９】

このように本発明の多モード光ファイバにおいては、従来の単一モード条件を緩和することによって、伝送システムにおいて要求される光ファイバとしての光学特性に対して、より柔軟に対応することが可能となる。また、これらの特性値は屈折率分布などの設計条件によって調節することが可能である。

例えば近年盛んに開発が進められている波長多重伝送システムにおいては、使用波長帯における分散の絶対値を１０ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下、好ましくは５ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ以下に設定すること要求される。ただし、ＦＷＭ（４光子混合）の影響を低減するため、分散が完全にゼロではないことが望ましい。ただし、分散値は伝送距離と伝送速度を考慮して決定されるため、これらの数値は絶対的なものではない。

本発明の多モード光ファイバにおいては、ＬＰ０１モードの分散が使用波長帯よりも長い

波長でゼロになり、かつ使用波長帯における分散値を上述の範囲に抑えた設計が可能であり、海底ケーブルに代表される長距離伝送システムに対して有効である。また、ＬＰ０１モードの分散が使用波長帯よりも短い波長でゼロになり、かつ使用波長帯における分散値を上述の範囲に抑えた設計も可能であり、伝送システムに応じた柔軟な設計をすることができる。

【００８０】

また、Ａｅｆｆが大きいと好ましい。例えば本発明を適用することによって、５０μm^{2}以上のＡｅｆｆ、好ましくは７０μm^{2}以上のＡｅｆｆを有する光ファイバが得られる。さらに、曲げ損失感受性が小さいと好ましい。曲げ損失は、例えば２０ｍｍφの径に一様に巻いた被測定光ファイバについて測定した値（「一様曲げ損失」という。）が、好ましくは３０ｄＢ／ｍ以下、さらに好ましくは１０ｄＢ／ｍ以下であると、様々にケーブル構造に対して安定なケーブル化が可能であると考えられる。

【００８１】

さらに、分散スロープと呼ばれる波長に対する分散の傾きは、特に波長多重伝送に適用するファイバにおいては、小さい方が広帯域の伝搬が実現できるため、望ましい。分散スロープが小さいと、使用波長帯において複数の波長の光信号を伝送するにおいて、それらの伝送状態が均一になりやすいためである。本発明においては、上述のように設計パラメータの自由度の増大により、波長多重伝送用ファイバに適した低分散スロープを有する光ファイバの設計にあたってもファイバパラメータ設定の自由度が増大する。

【００８２】

【実施例】

以下、実施例を示してさらに具体的に説明する。

本実施例において、正規化周波数の定義は前記式（２）で示される。ここで、ｎ1は、コアの中心部付近の最大屈折率ｎAとする。また、コア半径ａは、半径方向の屈折率分布において、クラッドの屈折率と同じ値になる位置までの長さで定義されている。

【００８３】

（実施例１）

図６は、図５（ａ）に示した階段型屈折率分布を有する多モード光ファイバの実施例の正規化周波数と正規化伝搬定数との関係のシミュレーション結果を示したグラフである。この多モード光ファイバにおいて、中心部１ａの屈折率と階段部１ｂの屈折率の相対値（単位％）は０．８０と０．０６とした。また、中心部１ａの半径を１としたとき、階段部１ｂの半径は５とした。

ＬＰモードの伝搬を除去できる範囲の正規化周波数の上限値ＶC11は８付近であり、従来のようにＬＰ１１モードの伝搬を極力許さない設計をする場合、Ｖはこの値よりも小さい範囲とする必要がある。よって、設計自由度は非常に狭い。これに対して本発明を適用すると、３番目のモードであるＬＰ０２モードが発生する８から１５付近の範囲で設計可能であり、設計の自由度が増大することがわかる。

【００８４】

例えばＶが１５付近の場合、ＬＰ０１モード以外に、ＬＰ１１、ＬＰ０２、ＬＰ２１、およびＬＰ３１モードなどが伝搬可能である。

そして、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの間の正規化伝搬定数差は非常に大きいが、ＬＰ１１モード以上の高次のモード間の正規化伝搬定数差は非常に小さい。

また、クラッドモードは理論的にｂｍｎ＝０の位置に存在すると考えられるが、クラッドモードと高次モードとの間の正規化伝搬定数差も小さくなっている。したがって、ＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの間ではエネルギー交換が生じにくく、高次モード間および高次モードとクラッドモード間ではエネルギー交換が発生しやすいく、高次モードがコア外に放射されやすいことがわかる。

【００８５】

そこで、Ｖの値を１５、b01を０．６５程度とし、ＶＡＤ法によって実際に多モード光ファイバを作製した。そして、この多モード光ファイバの屈折率分布を測定した結果を図７

に示した。この図からわかるように、屈折率分布は完全な階段型ではなく、中心部１ａ，階段部１ｂ，クラッド１１の各部分の境界は丸みを帯びた形状であった。
この多モード光ファイバは、例えばファイバ長２ｍにおけるカットオフ波長を測定する通常の測定方法では１．７５μｍという結果が得られ、この結果からは、１．５～１．６μｍの伝送を行うにおいては明らかに多モードファイバであり、シングルモード伝送には適さないという結論となった。

【００８６】

一方、この多モード光ファイバのファイバ長とカットオフ波長との関係について、図８（ａ），図８（ｂ）に示した方法で測定した。
まず、図８（ａ）に示したように、可変波長光源２２からレンズ２３を介してまっすぐな状態の測定長の光ファイバ２１に、測定波長の光を全モード励振し、光ファイバ２１を透過した光を光検出器２４にて検出する。その結果を出力Ａとする。ついで、この光ファイバ２１に図８（ｂ）に示したように光ファイバ２１の出射端付近に曲がり２１ａを加え、同様にして光検出器２４にて光ファイバ２１の透過光を検出する。その結果を出力Ｂとする。

【００８７】

そして、これらの出力Ａと出力Ｂとを比較して、損失波長特性の差を観測する。
まっすぐな状態で測定長の光ファイバ２１を高次モードが伝搬する場合は、曲がり２１ａを与えると過剰な損失が生じる。よって、出力Ｂが出力Ａと比較して過剰な損失を生じている場合は、高次モードの存在を確認することが出来る。
逆に、その測定長で既に光ファイバ２１から高次モードが放射されている場合、出力Ａにおいては、ＬＰ０１モードのみが検出される。よって光ファイバ２１に曲がり２１ａを与えても、出力Ｂにおいて損失増加を生じることはない。したがって、出力Ａと出力Ｂの強度が等しい範囲がシングルモード伝送が可能な範囲である。
そして、図８（ｃ）に示したグラフから、ファイバ長毎のカットオフ波長を求めることができる。このグラフの横軸は波長であり、縦軸に示したＡ、Ｂは、それぞれ出力Ａの光の強度と出力Ｂの光の強度である。

【００８８】

図９はこの測定結果を示したものである。この結果より、カットオフ波長がファイバ長に大きく依存していることがわかる。また、今回の例では３ｋｍ程度で１．５μｍ以下となることが確認できる。

【００８９】

なお、この多モード光ファイバにおいて、十分に長尺伝搬後（４ｋｍ以上伝搬後）の零分散波長は１．５８μｍ、１．５５μｍ帯における実効コア断面積は約７０μｍ^2、分散スロープは約０．１５ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ^{2}であった。これらの値は、いわゆる高密度波長多重伝送に十分耐えるものであり、例えば数千ｋｍの距離を１５３０～１５６０ｎｍ帯を中心に数波～数十波の波長多重信号を光ファイバ増幅器で中継増幅しながら伝送することができる特性を有することがわかった。

【００９０】

また、上述のようにモード間のエネルギー交換は光ファイバの被覆層やケーブル化の状態などに依存する。そこで、以下のようにして被覆層およびケーブル化の状態とカットオフ波長との関係について実験を行った。

【００９１】

外径１２５μｍの実施例１の多モード光ファイバに、内層のヤング率が１ｋｇ／ｍｍ^{2}よりも小さく、外層のヤング率が４０ｋｇ／ｍｍ^{2}よりも大きい被覆層を設けて光ファイバ素線とし、これを用いて常法にしたがってケーブル化した。
ケーブル化の構造は、テープ型構造とルーズチューブ型構造とした。そして、これらのケーブルについて、上述の方法と同様にしてカットオフ波長とファイバ長の関係を測定した。
カットオフ波長のファイバ長依存性については、ファイバ長１ｋｍ以下の領域において、

ファイバ長が一桁増加するごとに、カットオフ波長が、８０～１２０ｎｍ程度ずつ短くなってゆくことが観測され、カットオフ波長のファイバ長依存性は被覆層を設けない前と大きな差はなかった。
したがって、実施例１の多モード光ファイバは、ケーブル化した場合にも、その特性を維持しており、問題なく使用可能であることがわかった。

【００９２】

（実施例２、３）

図１０、図１１は、それぞれ実施例２、３の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。
実施例２、３は、これらのグラフ中にそれぞれ示されているように、図５（ａ）に示した階段状の屈折率分布を備えたものとした。
実施例２において、クラッドの屈折率を基準にしたときの中心部１ａと階段部１ｂの相対屈折率は、それぞれ０．８０％、０．０８％とした。また、実施例３においては０．８０％、０．１２％とした。また、実施例２、３のいずれにおいても、中心部１ａの半径を１としたとき階段部１ｂの半径は５とした。

【００９３】

（実施例４）

図１２は、実施例４の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。
実施例４の多モード光ファイバは、このグラフ中に示されているように、図５（ｅ）に示した屈折率分布を備えたものであった。このグラフ中の図は、中心から一方の半径方向の屈折率分布を示したものである。そして、中間部５ｂの屈折率を基準としたときの中心部５ａ、リング部５ｃおよびクラッド１１の相対屈折率は、それぞれ０．６１、０．３１、－０．０２％とした。また、中心部５ａの半径を１としたときの中間部５ｂの半径は２．８、リング部５ｃの半径は３．９とした。

【００９４】

（実施例５）

図１３は、実施例５の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。
実施例５の多モード光ファイバは、このグラフ中に示されているように、図５（ｈ）に示した屈折率分布を備えたものであった。そして、中間部８ｂとクラッド１１の屈折率を基準としたときの中心部８ａ、リング部８ｃおよび低屈折率部８ｄの相対屈折率は、それぞれ０．６１、０．２１、－０．０５％とした。また、中心部８ａの半径を１としたときの中間部８ｂの半径は２．８、リング部８ｃの半径は３．９、低屈折率部８ｄの半径は８とした。

【００９５】

（実施例６）

図１４は、実施例６の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。
実施例６の多モード光ファイバは、このグラフ中に示されているように、図５（ｂ）に示した屈折率分布を備えたものであった。そして、中間部２ｂとクラッド１１の屈折率を基準としたときの中心部２ａとリング部２ｃの相対屈折率は、それぞれ０．６４、０．３３％とした。また、中心部２ａの半径を１としたときの中間部２ｂの半径は２．８、リング部２ｃの半径は３．９とした。

【００９６】

図１０～図１４に示したグラフからわかるように、いずれにおいても正規化周波数Ｖを、ＬＰ０２モードが発生する下限値よりも大きな値に設定することによって、ＬＰ０１モード以外にＬＰ１１、ＬＰ０２、ＬＰ２１、およびＬＰ３１モードなどが伝搬可能であり、かつＬＰ０１モードとＬＰ１１モードとの間の正規化伝搬定数差は非常に大きいが、ＬＰ１１モード以上の高次のモード間の正規化伝搬定数差は非常に小さいという、実施例１と

同様の結果が得られた。よって、Ｖの値を適切な範囲として多モード光ファイバを作製すれば、実施例１と同様に、伝送距離が長くなることにより、実質的にシングルモード条件での伝送が可能となるものが得られることが明らかとなった。

【００９７】

（実施例７）

実施例７の多モード光ファイバは、図１５に示したように、図５（ｅ）に示した屈折率分布を備えたものであった。中間部５ｂの屈折率を基準としたときの中心部５ａ、リング部５ｃおよびクラッド１１の相対屈折率は、それぞれ０．７、０．３、－０．１％とした。また、中心部５ａの半径を１としたときの中間部５ｂの半径は４、リング部５ｃの半径は５とした。

図１６は、実施例７の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。

【００９８】

ついで、図１６に示したようにＶの値を６．１に設定して、ＭＣＶＤ法と呼ばれる内付け法を用いてこの多モード光ファイバを実際に作製した。そして、屈折率分布を実際に測定したところ、若干変形したものであったが、図１５に示した理想的な形状に近い屈折率分布が得られた。

【００９９】

この多モード光ファイバの特性の実測値を以下に示した。理論値と実測値は数％以内の誤差で一致した。

コア径（リング部５ｃの外径）	１６．３μｍ
正規化周波数	Ｖ＝６．１
正規化伝搬定数	ｂ01＝０．２２
コア中心の相対屈折率差	０．８％
零分散波長	１５５０ｎｍ
分散値（λ：１５５０ｎｍ）	２．０ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ
高次モードのカットオフ波長（ファイバ長２ｍ）	約１．８１μｍ
ＭＦＤ	１０．２μｍ
Ａｅｆｆ	８９．５μｍ^2
ＬＰ０１モードの曲げ損失	約２３ｄＢ／ｍ（曲げ径２０ｍｍ）
波長分散スロープ（λ：１５５０ｎｍ）	約０．１３３ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ^2

【０１００】

この外径１２５μｍの多モード光ファイバを、図１７に示したように、多モード光ファイバ３１の外周上に軟らかいヤング率０．１０ｋｇ／ｍｍ^{2}の内層３２（厚さ約３５μｍ）とヤング率６０ｋｇ／ｍｍ^2、硬い外層３３（厚さ約２７μｍ）からなる紫外線硬化型樹脂からなる被覆層を設けて光ファイバ素線３４とし、この光ファイバ素線３４を、６本、鋼線３５の上にポリエチレンからなる被覆層３６が設けられたテンションメンバ３７の外周上に撚り合わせてた集合体の上に、ポリエチレンからなる一括被覆層３８が設けて６心のユニット構造とした。そして、このユニットの高次モードのカットオフ波長を測定したところ、ユニット長約２ｋｍの位置の、各多モード光ファイバ３１…のカットオフ波長は、１．５０μｍまで短くなっていた。

【０１０１】

したがって、ファイバ長が２ｍのときのカットオフ波長は約１．８１μｍであり、この値のみから判断すると実用には向かないと考えられるが、所定のファイバ長を確保することによってシングルモード伝搬が可能となることが確認できた。　しかもこの多モード光ファイバのＡｅｆｆはほぼ９０μｍ^{2}と大きく、多モード光ファイバ中の光信号のパワー密度を下げることができ、非線形効果の抑制を図ることができることがわかった。

【０１０２】

（実施例８）

実施例８の多モード光ファイバは、図１８に示されているように、図５（ｂ）に示した屈

折率分布を備えたものであった。そして、中間部２ｂとクラッド１１の屈折率を基準としたときの中心部２ａとリング部２ｃの相対屈折率は、それぞれ０．８、０．５％とした。また、中心部２ａの半径を１としたときの中間部２ｂの半径は３、リング部２ｃの半径は４とした。
図１９は、実施例８の多モード光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係のシミュレーション結果を示したグラフである。

【０１０３】
ついで、Ｖの値を５．４に設定して、実施例７と同様にＭＣＶＤ法と呼ばれる内付け法を用いてこの多モード光ファイバを実際に作製した。
この多モード光ファイバの特性の実測値を以下に示した。理論値と実測値は数％以内の誤差で一致した。

【０１０４】
コア径（リング部２ｃの外径）　１４．６μｍ
正規化周波数　Ｖ＝５．４
正規化伝搬定数　ｂ01＝０．２３
コア中心の相対屈折率差　０．８％
零分散波長　１５６４ｎｍ
分散値（λ：１５５０ｎｍ）　２．０ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ
高次モードのカットオフ波長（ファイバ長２ｍ）　約１．８７μｍ
ＭＦＤ　９．７μｍ
Ａｅｆｆ　９３．９μｍ^2
ＬＰ０１モードの曲げ損失　約１５ｄＢ／ｍ（曲げ径２０ｍｍ）
波長分散スロープ（λ：１５５０ｎｍ）　約０．１３３ｐｓ／ｋｍ／ｎｍ^2

【０１０５】
この多モード光ファイバを実施例７と同様にして図１７に示したようにユニットとし、このユニットの高次モードのカットオフ波長を測定したところ、４ｋｍ伝送したところで１５００ｎｍを下回る値が得られ、シングルモード伝送が可能であることが確認できた。また、上記のようにＡｅｆｆも大きく、非線形抑制の効果にも優れていることがわかった。

【０１０６】
（実施例９）
上述の図８（ａ）、図８（ｂ）に示した方法の他、多モード光ファイバの伝搬モードが複数存在していること確認する方法として、反射型のファイバグレーティングを利用した方法が例示できる。
ファイバグレーティングとは、多モード光ファイバの長さ方向に、コアの屈折率やコア径の周期的な変化などの摂動を形成したものである。そして、この周期的な変化の作用によって、特定波長帯の光を反射する特性が得られる。

【０１０７】
図２０（ａ）はファイバグレーティングの製造方法の一例を示した説明図であって、この製造方法は、ゲルマニウム添加石英ガラスに特定波長の紫外光を照射すると屈折率が上昇する特性（いわゆるフォトリフラクティブ効果）を利用したものである。
光ファイバ４１は、そのコア４１ａの少なくとも中心付近の高屈折率の部分がゲルマニウム添加石英ガラスからなるものである。コア４１ａの他の部分は、純石英ガラスまたはフッ素添加石英ガラスから形成されている。クラッド４１ｂは純石英ガラスまたはフッ素添加石英ガラスからなるものである。
一方、符号５２は位相マスクである。この位相マスク５２は石英ガラスなどからなり、その片面には所定の周期で複数の格子５２ａ…が形成されている。

【０１０８】
そして、光ファイバ４１の側面に格子５２ａ…の形成面が対峙するように位相マスク５２を配置し、この光ファイバ４１の側面に位相マスク５２を介して紫外光を照射する。
すると、格子５２ａ…によって＋１次回折光と－１次回折光とが回折して干渉縞が生じ、

紫外光の強度パターンが形成される。その結果、前記干渉縞が生じた部分のコア４１ａの屈折率が変化し、この紫外光の強度パターンが半永久的なコア４１ａの屈折率変化としてコア４１ａに転写される。このようにして光ファイバ４１の長さ方向にコア４１ａの屈折率の周期的な変化が形成されたグレーティング部４３が得られる。

【０１０９】

そして、図２０（ｂ）に示したように、光ファイバ４１に光を入射すると、グレーティング部４３において特定波長の光が反射し、この特定波長の光が損失した透過光が得られる。

反射光の波長は、屈折率変化の周期（屈折率摂動）に依存する。すなわち、光ファイバ４１中のモードのファイバ内波長とこの屈折率摂動の１／２の周期とが一致すると、非常に強い反射が生じる。したがって、この反射波長の測定によって光ファイバ４１を伝搬するモードを、かなり正確に知ることができる。

【０１１０】

図２１は、実施例６に類似する屈折率分布を有する多モード光ファイバに、紫外線レーザ（エキシマレーザ）を用いて、約０．５μｍの短い周期のグレーティング部を形成したファイバグレーティングの反射波長特性を測定した反射スペクトルである。伝搬モードがひとつしかなければ、反射スペクトルは１本しか観測されないが、この実施例においてはＬＰ０１モード以外に複数のモードの反射スペクトルが観測され、複数のモードが伝搬しているものであることが確認できた。

【０１１１】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明の高次モード除去機能を有する多モード光ファイバにおいては、所定距離伝搬した後には単一モード伝搬が可能となるため、従来の単一モード条件を緩和して、ファイバパラメータを比較的自由に設定することができる。

その結果、使用波長帯において分散を小さくすることができる。また、実効コア断面積を大きくすることができる。そして、接続損失、曲げ損失および非線形効果の低減を図ることができる。

さらに、このような設計パラメータの自由度の増大により、長距離伝送に適した光ファイバや、長距離伝送に適し、かつ波長多重伝送用に適した光ファイバなどの設計に有効である。

【図面の簡単な説明】

【図１】　光ファイバの伝搬モードの存在範囲をβダイアグラムで示したグラフである。

【図２】　マイクロベンドが生じている光ファイバを示した斜視図である。

【図３】　ファイバ径が長さ方向に変動している光ファイバを示した斜視図である。

【図４】　ステップ型の屈折率分布を有する光ファイバにおける正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。

【図５】　図５（ａ）～図５（ｈ）は本発明の光ファイバの屈折率分布の例を示したグラフである。

【図６】　実施例１の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。

【図７】　実施例１において、実際に作製した光ファイバの屈折率分布を測定した結果を示したグラフである。

【図８】　図８（ａ），図８（ｂ）は光ファイバのファイバ長とカットオフ波長との関係を測定する方法を示した説明図、図８（ｃ）は、カットオフ波長を求めるためのグラフの一例を示した図である。

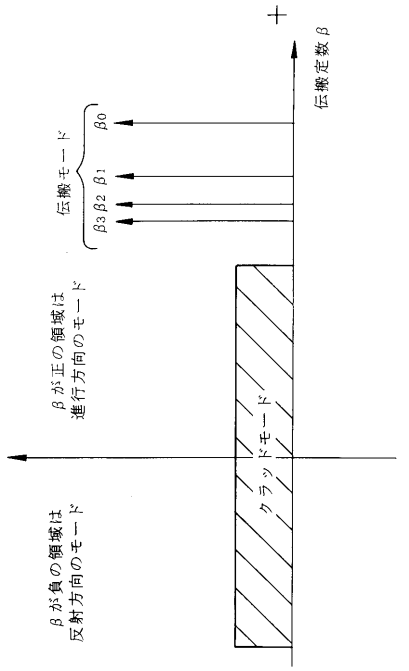
【図９】　実施例１の光ファイバのファイバ長とカットオフ波長の関係の測定結果を示したグラフである。

【図１０】　実施例２の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。

【図１１】　実施例３の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を

示したグラフである。
【図１２】　実施例４の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
【図１３】　実施例５の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
【図１４】　実施例６の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
【図１５】　実施例７の光ファイバの屈折率分布を示したグラフである。
【図１６】　実施例７の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
【図１７】　実施例７の光ファイバを用いて作製したユニットの断面図である。
【図１８】　実施例８の光ファイバの屈折率分布を示したグラフである。
【図１９】　実施例８の光ファイバの正規化周波数Ｖと正規化伝搬定数ｂｍｎとの関係を示したグラフである。
【図２０】　図２０（ａ）はファイバグレーティングの製造方法の一例を示した説明図、図２０（ｂ）はファイバグレーティングの作用を示した説明図である。
【図２１】　実施例９において、ファイバグレーティングの反射スペクトルの測定結果を示したグラフである。
【符号の説明】
１ａ…中心部、１ｂ…階段部、２ａ…中心部、２ｂ…中間部、
３ｂ…第１のリング部、３ｃ…中間部、
４ｂ…第１のリング部、４ｃ…階段部、
５ａ…中心部、５ｂ…中間部、６ａ…中心部、６ｂ…中間部、
７ａ…中心部、７ｂ…階段部、８ａ…中心部、８ｂ…中間部、
１０…コア、１１…クラッド。

【図１】



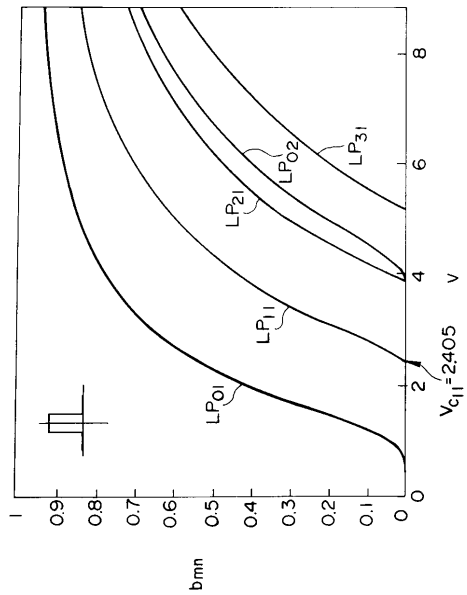
【図２】



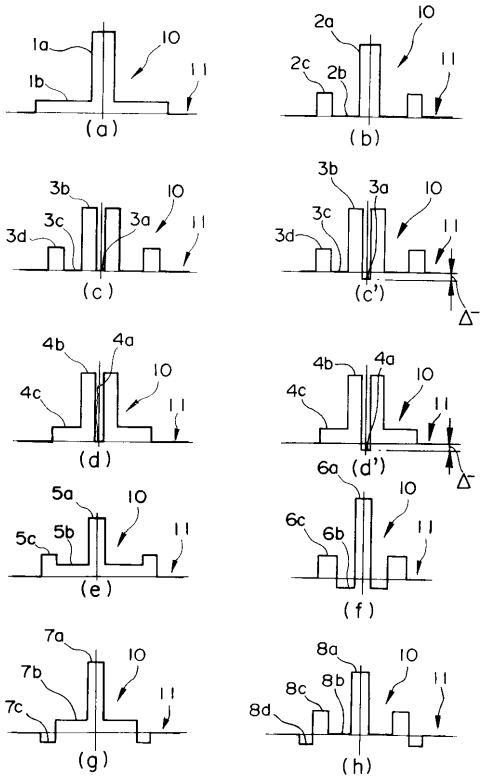
【図３】



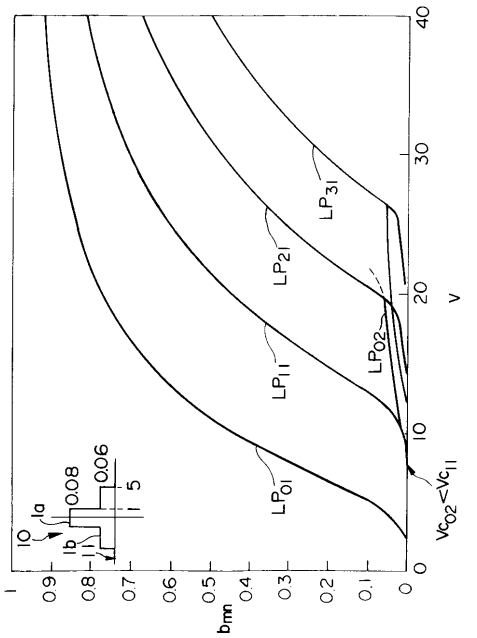
【図４】



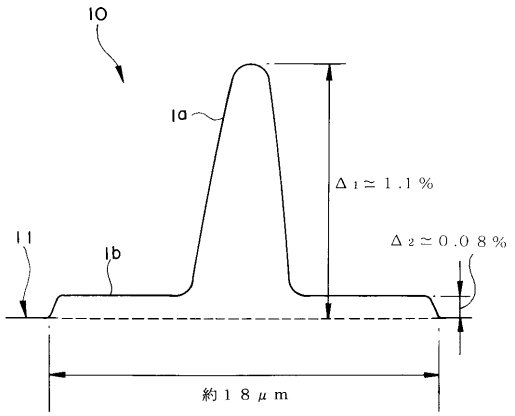
【図５】


1a
1b
10
11
(a)
2a
2c
2b
(b)
3b
3c
3d
3a
(c)
(c')
4b
4a
4c
(d)
(d')
5a
5b
5c
(e)
6a
6b
6c
(f)
7a
7b
7c
(g)
8a
8b
8c
8d
(h)
Δ

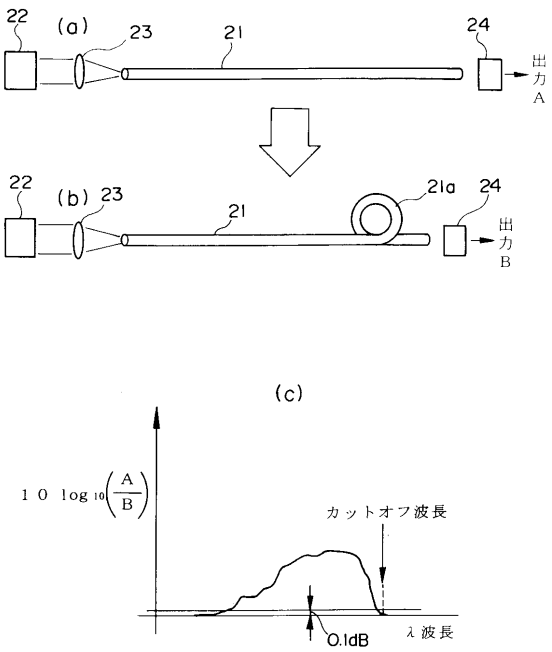
【図６】


LP31
LP21
LP11
LP01
LP02
Vc02<Vc11
V
bmn
10
1a
1b
11
0.08
0.06
5

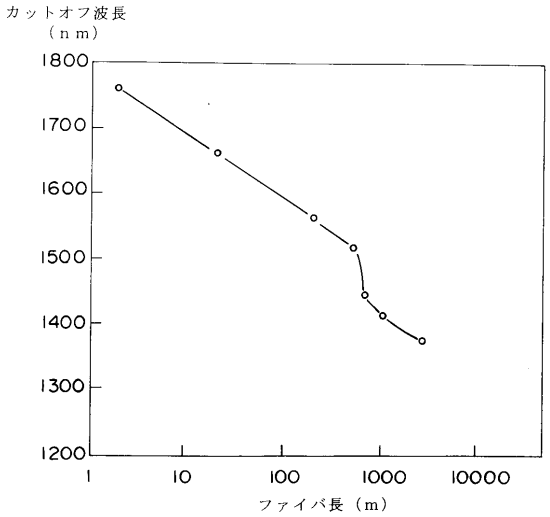
【図７】


10
1a
Δ1≃1.1%
Δ2≃0.08%
11
1b
約18μm

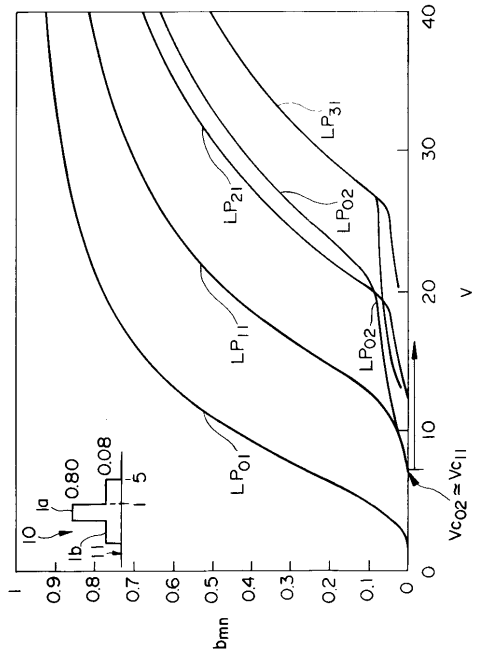
【図８】


22
(a)
23
21
24
出力A
(b)
21a
出力B
(c)
10 log10(A/B)
カットオフ波長
0.1dB
λ波長

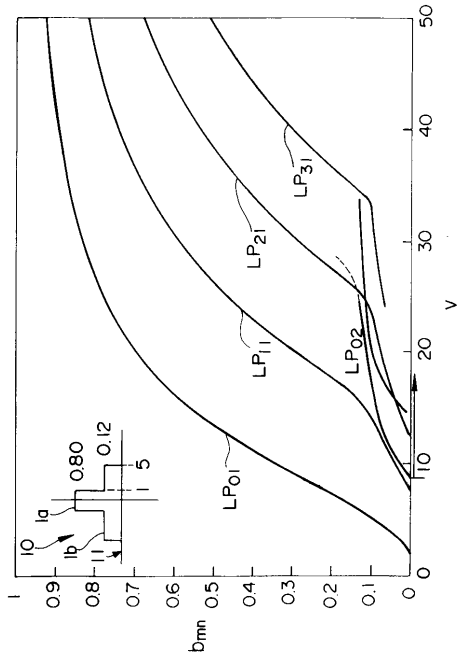
【図９】



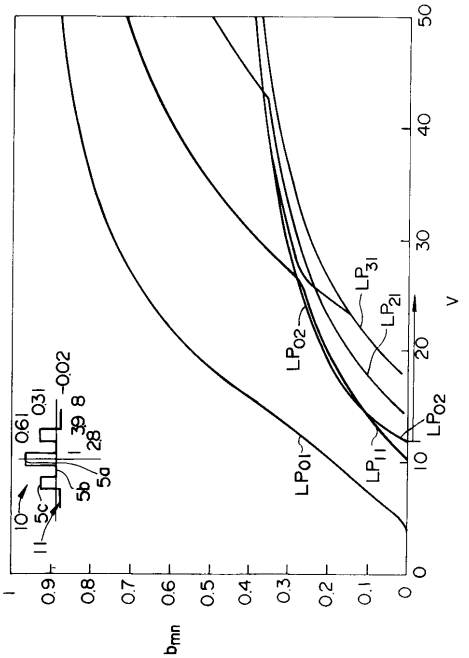
【図１０】



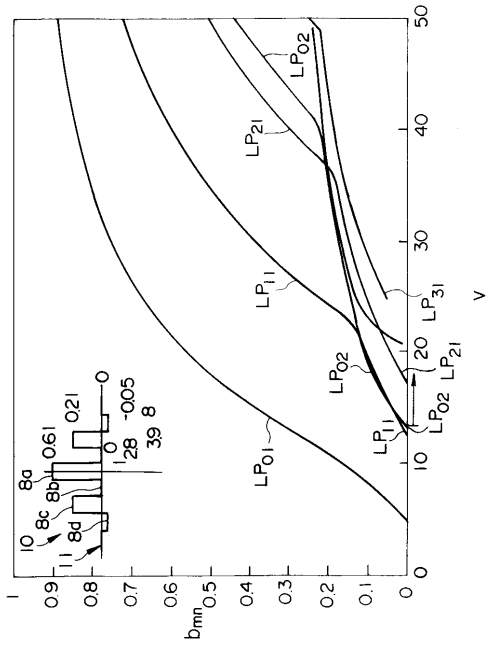
【図１１】



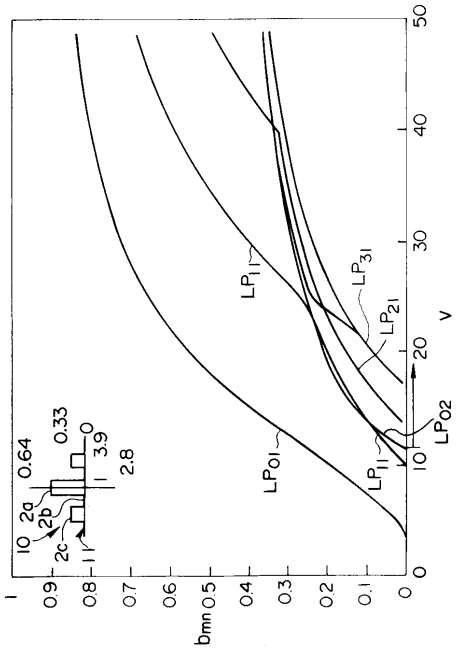
【図１２】



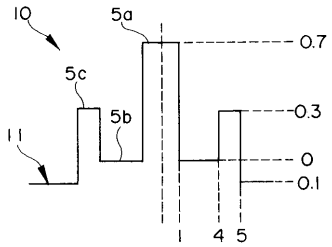
【図１３】



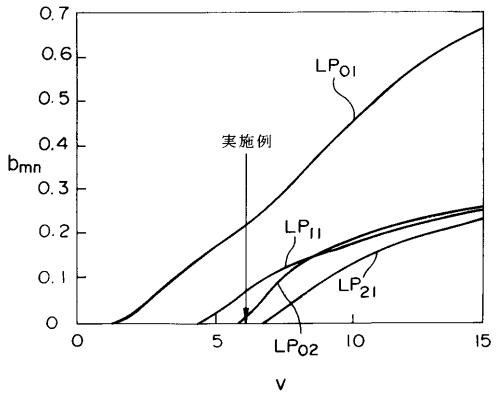
【図１４】



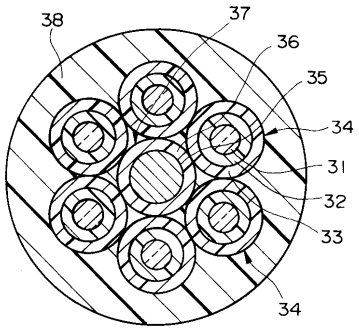
【図１５】



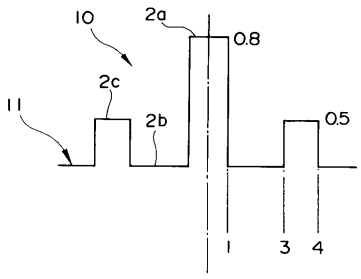
【図１６】



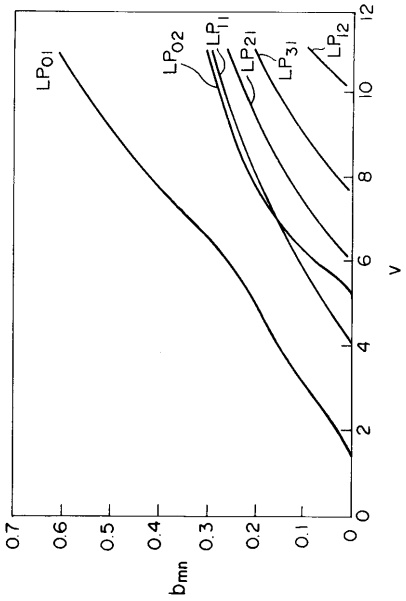
【図１７】



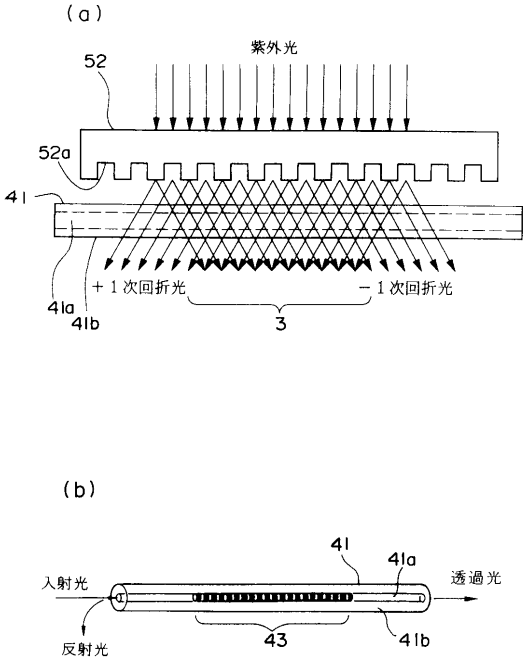
【図１８】



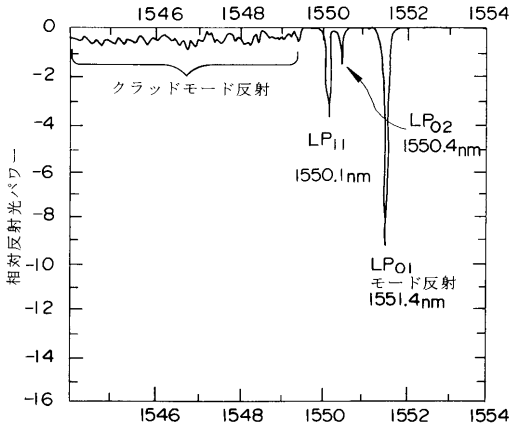
【図１９】


LP01
LP02
LP11
LP21
LP31
LP12
V
bmn

【図２０】


(a)
紫外光
52
52a
41
41a
41b
+1次回折光
−1次回折光
3
(b)
41
41a
入射光
透過光
反射光
43
41b

【図２１】


相対反射光パワー
クラッドモード反射
LP11
1550.1nm
LP02
1550.4nm
LP01
モード反射
1551.4nm

フロントページの続き

(72)発明者　畔蒜　富夫
千葉県佐倉市六崎１４４０番地　株式会社フジクラ　佐倉事業所内
(72)発明者　松尾　昌一郎
千葉県佐倉市六崎１４４０番地　株式会社フジクラ　佐倉事業所内
(72)発明者　高橋　浩一
千葉県佐倉市六崎１４４０番地　株式会社フジクラ　佐倉事業所内

合議体
審判長　稲積　義登
審判官　里村　利光
審判官　岩本　勉

(56)参考文献　加藤考利ほか、「波長多重（ＷＤＭ）伝送用分散シフトファイバ」、電子情報通信学会技術研究報告、１９９６年１１月１日、Ｖｏｌ．　９６、　Ｎｏ．　３３９　（ＯＣＳ９６－５８）、第４３－４８頁

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
G02B 6/00 - 6/54