

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3667660号
(P3667660)

(45) 発行日 平成17年7月6日(2005.7.6)

(24) 登録日 平成17年4月15日(2005.4.15)

(51) Int. Cl.⁷

F I

G O 2 B 6/10

G O 2 B 6/10

C

G O 2 B 6/14

G O 2 B 6/14

G O 2 B 6/16

G O 2 B 6/16

請求項の数 10 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2001-163604 (P2001-163604)	(73) 特許権者	596092698
(22) 出願日	平成13年5月31日(2001.5.31)		ルーセント テクノロジーズ インコーポ
(65) 公開番号	特開2001-343545 (P2001-343545A)		レーテッド
(43) 公開日	平成13年12月14日(2001.12.14)		アメリカ合衆国, 07974-0636
審査請求日	平成14年5月23日(2002.5.23)		ニュージャージー, マレイ ヒル, マウン
(31) 優先権主張番号	09/584072		テン アヴェニュー 600
(32) 優先日	平成12年5月31日(2000.5.31)	(74) 代理人	100064447
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 岡部 正夫
前置審査		(74) 代理人	100085176
			弁理士 加藤 伸晃
		(74) 代理人	100106703
			弁理士 産形 和央
		(74) 代理人	100096943
			弁理士 臼井 伸一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 少数モードの光導波管のブラッグ格子からなる物品

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

少数モードの導波管内で波長 λ の光を所与の導波されたモードから別の導波されたモードへ変換する光導波モード変換装置からなる物品であって、該モード変換装置は該導波管内に傾斜屈折率格子からなり、該格子は傾斜角 θ を有し、該少数モードの導波管はコアおよび該コアを囲むクラディングを有し、該モード変換装置は複数の結合強度と関連づけられており、

a) 該少数モードの導波管は、該導波管に屈折率プロファイル $n(r)$ および感光性プロファイル $p(r)$ を提供するように選択されたドーパント分布を有し、 $n(r)$ および $p(r)$ は該導波管の放射座標の関数であり、

b) $p(r)$ は該コア内に少なくとも2つの異なるレベルの感光性を有し、そして、

c) $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、該所与の導波されたモードと特定の1つのモードとの間の結合強度を最大化し、そして該所与の導波されたモードと該特定の1つのモード以外の全てのモードとの間の結合強度を最小化するように選択され、

前記結合強度の最小化は、前記結合強度を - 30 dB よりも小さくすることであり、そして前記結合強度の最大化は、前記結合強度を少なくとも - 10 dB とすることであり、そして、

最小化された結合の結合強度の積分において、被積分関数が領域の1つにおいて両方とも正であり、別の領域において両方とも負であり、合計の積分において互いに打ち消すように、感光性が除去または大幅に低減されていることを特徴とする物品。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の物品において、該少数モードの導波管は 3 モードの導波管であり、該所与の導波されたモードは基本モード $LP_{01,f}$ であり、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、 $LP_{01,f}$ から $LP_{11,b}$ の結合強度および $LP_{01,f}$ から $LP_{01,b}$ の結合強度は実質上最小化され、そして $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ の結合強度が実質上最大化されるように選択されることを特徴とする物品。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の物品において、該所与の導波されたモードは基本モード $LP_{01,f}$ であり、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、該導波管の 1 つのモードを除くすべての導波されたモードで $LP_{01,f}$ 結合強度は最小化されるように選択されることを特徴とする物品。

10

【請求項 4】

請求項 1 に記載の物品において、該所与の導波されたモードは基本モード $LP_{01,f}$ であり、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、該導波管のすべての導波されたモードで $LP_{01,f}$ 結合強度は最小化され、そして任意の 2 つのより高いオーダのモード間の 1 つの結合強度は実質上最大化されるように選択されることを特徴とする物品。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の物品において、該少数モードの導波管は 3 モードの光ファイバであり、該所与の導波されたモードは順方向に伝播する基本モード $LP_{01,f}$ であり、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、 $LP_{01,f}$ から $LP_{01,b}$ の結合強度は実質上最小化され、 $LP_{01,f}$ から $LP_{11,b}$ の結合強度は実質上最小化され、そして $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ の結合強度は実質上最大化されるように選択されることを特徴とする物品。

20

【請求項 6】

請求項 1 に記載の物品において、該物品は、送信器と、2 以上の受信器と、該送信器と該受信器とを信号送信で結合する光ファイバ送信パスとからなる WDM 光ファイバ通信システムであり、該送信パスのうち少なくとも 1 つは該傾斜屈折率格子をからなるデマルチプレクサからなることを特徴とする物品。

【請求項 7】

請求項 6 に記載の物品において、該送信パスのうち少なくとも一部は単一モードのファイバであり、該単一モードのファイバが、該少数モードの導波管に送波的に接続されることを特徴とする物品。

30

【請求項 8】

請求項 1 に記載の物品において、該少数モードの導波管は LP_{01} モード、 LP_{11} モード、 LP_{02} モードをサポートする 3 モードの光ファイバであり、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ が、 $LP_{02,f} - LP_{11,b}$ 結合強度を最大化し、そして他のすべての結合強度を最小化するように選択されることを特徴とする物品。

【請求項 9】

請求項 1 に記載の物品において、1 つを除きすべての結合強度は最小化されることを特徴とする物品。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の物品において、該傾斜屈折率格子が第 1 の波長の UV 放射へ曝露することによって形成され、そして第 2 の波長の UV 放射へ曝露することによって修正され、該傾斜屈折率格子の最小化条件が調整されることを特徴とする物品。

40

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の分野】

本願は屈折率（ブラッグ）格子を伴う少数モードの光導波管 (few-moded optical waveguides)、およびこのような導波管を備える光通信システムに関する。

【0002】

尚、この出願は、同時に提出され参照により本明細書に援用される、T.A.Strasserらによる「Article Comprising a Tilted Grating in a Single Mode Waveguide」という題名の

50

米国特許出願に関するものである。

【0003】

【発明の背景】

光導波管の中のブラッグ格子（屈折率格子とも呼ばれる）は知られている。従来、このような格子は単一モードのファイバの中で順方向に伝播するコアの導波されたモードを後方反射されたコアモードに結合する。

【0004】

モード変換格子も知られている。たとえば、米国特許第5,717,798号および第5,740,292号を参照されたい。中でも後者は、基本モード（ LP_{01} ）の光を LP_{11} モードに結合する反射格子を開示している。

10

【0005】

モード結合格子は光導波システム内で種々の用途を見いだすことができる。たとえば、WDMネットワーク内で波長ルーティングフィルタ(wavelength routing filter)として機能することもできる。

【0006】

しかし、 LP_{11} モードの空間的な縮退(spatial degeneracy)があるために、 LP_{01} 放射を LP_{11} 放射に効率的に変換する反射格子モード変換装置の製造はしばしば困難であることが分かってきた。 LP_{11} 空間モードの1つは典型的には、 LP_{01} から LP_{11} モード変換装置によって LP_{01} に変換できるが、別の LP_{11} 空間モードは、近くに変質する2つの空間モードの干渉があるため、典型的にはそのように変換できない。この空間的な自由の程度は制御が困難である。したがって、空間的に変質するモードとの間の結合を含まないで使用可能なモード変換装置を有することが望ましい。

20

【0007】

特に、 LP_{01} モードをたとえば LP_{11} および反射 LP_{01} など任意の他の導波されたモードに結合することなく、 LP_{01} モードを LP_{02} モードに結合するモード変換装置に対するニーズがある。このような LP_{01} - LP_{02} モード変換装置はたとえば、追加/削除マルチプレクサ(add/drop multiplexer)内で使用できる。これは高価で損失の多いサーキュレータを不要にすることになる。サーキュレータは、従来技術のブラッグ格子に基づいた追加/削除濾波用途を実装する際には必須である。

【0008】

LP_{02} モードは空間的には変質しないので、効率的に LP_{01} に変換できる。しかし、 LP_{01} から LP_{02} へのモード変換反射格子は典型的には、 LP_{01} から LP_{11} へのモード変換および LP_{01} から LP_{01} へのモード変換の両方が実質上ヌル化(substantially nulled)されるように設計されなければならない。 LP_{01} から LP_{02} へのモード変換が強力であるためには、光ファイバは LP_{02} モードを導波しなければならないため、したがって、 LP_{11} モードも導波しなければならないため、光ファイバ内に LP_{11} モードが存在しなければならない。発明者らの知る限りでは、従来技術はこのような反射性の LP_{01} から LP_{02} へのモード変換装置を作成するための技法を提供しない。この出願は特に、このようなモード変換装置を開示する。

30

【0009】

C.X.Shiは、1996年8月のIEEE Journal of Quantum Electronics Vol.32(8)の1360頁で、2つのモード変換（ LP_{01} から LP_{02} ）「ミラー」を有する光ファイバファブリペロー共振器の理論的な処理を提供している。また、1992年12月のC.X.Shiらの、Optics Letters Vol.17(23)、1655頁、および1991年4月のF.BilodeauらのElectronics Letters Vol.27(8)、682頁を参照されたい。

40

【0010】

M.J.Holmesらは、1999年9月26日から30日の、フランス、ニースのECOC'99のI-216乃至217ページで、サイドタップフィルタ(sidetap filters)用のファイバを開示している。このファイバは正規化半径が0.4未満に関しては非感光性のコアドーパント、正規化半径0.4乃至1に関しては非感光性のコアドーパントおよびゲルマニアの組合せ、正規化

50

半径 3 . 5 までに関してはゲルマニアでドーピングされた感光性のクラディングを有し、ここにホウ素が追加されてクラディングインデックスが低減され、析出チューブと一致している。領域 0 . 4 乃至 1 . 0 および 1 . 0 乃至 3 . 5 に関するゲルマニアの濃度は、必要な相対的な感光性を得るために 0 . 6 : 1 . 0 の比である。このように、Holmesらの論文は、コアが 2 つの異なる感光性レベルを有し、クラディングも感光性であるファイバを開示している。感光性プロファイルは用途に関してクラディングモードの損失スペクトルの波長依存性を最適化し、関連するタイプのモード変換装置を得ないように選択されている。

【 0 0 1 1 】

すべての引用された参照箇所は、参照により本明細書に援用される。

10

【 0 0 1 2 】

【用語および定義】

容易に説明するために、本明細書での議論は一般に光ファイバに関する。しかし、たとえばプレーナ導波管などの他の光導波管でも同様な結果が得られることを理解されたい。

【 0 0 1 3 】

少数モードの光ファイバにおける 2 つの導波コアモードの間の「結合強度」は従来、下の式 2) に示されるように重複積分の項で表現される。結合強度は典型的には屈折率プロファイル $n(r)$ 、感光性プロファイル $p(r)$ 、および傾斜角 θ に依存する。

【 0 0 1 4 】

所与の導波管内で 2 つの導波されたコアモードの間の結合を「最小化する」ということは、2 つのモード間の結合強度が - 3 0 d B 未満であるように傾斜格子の傾斜角を調整することを意味する。

20

【 0 0 1 5 】

所与の導波管内で 2 つの導波されたコアモードの間の結合を「最大化する」ということは、2 つのモード間の結合強度が少なくとも約 - 1 0 d B であるように傾斜格子の傾斜角を調整することを意味する。

【 0 0 1 6 】

本明細書では「通常のヌル(regular null)」という言葉で、傾斜(「ブレード(blazed)」)ファイバブラッグ格子内で、傾斜角度の小さな角度範囲(典型的には 0 . 1 ° 未満)に渡ってのみ、- 3 0 d B 未満である既定の波長の光に関してコアモード結合強度を有する傾斜角の領域を意味する。通常のヌルは多くの傾斜角度に関して発生する。

30

【 0 0 1 7 】

本明細書では「スーパーヌル(super null)」という言葉で、空間的に近い傾斜角で発生し、それによって、通常のヌルの間で、比較的大きな範囲(0 . 1 ° より大きい、望ましくは 0 . 2 ° より大きい、0 . 5 ° またはそれ以上)の傾斜角に渡って、既定の波長におけるコアモード結合を非常に低くする(典型的には - 3 0 d B 未満)、2 つの(またはそれ以上の可能性もある)通常のヌルを意味する。

【 0 0 1 8 】

導波された光のモードは従来の方法で LP_{mn} と示され、 m および n は整数である。たとえば、 LP_{01} は基本モードである。 $LP_{01,f}$ は順方向伝播基本モードを指し、 $LP_{01,b}$ は後方伝播基本モードを指す。

40

【 0 0 1 9 】

「感光性(photosensitivity)」は、適切にドーピングされた導波管が、典型的には UV 放射である光化学性の放射に曝露された場合に結果として生じる導波管内の屈折率の変化を指す。

【 0 0 2 0 】

「少数モード(few-moded)の」光導波管は、基本モードおよび 1 つまたは複数のより高いオーダのモード、典型的には合計で 1 0 以下の導波されたモードをサポートする。

【 0 0 2 1 】

本発明の説明は一般に、基本モードと LP_{02} などのより高いオーダのモードの間の変換

50

に関する。これは具体的に記述するためだけのものであり、本発明は少なくとも原理的には物品において、2つの適切なより高いオーダのモード間でモードを変換するためにも具体化できる。

【0022】

【発明の概要】

本発明による例としてのモード変換装置においては、 $LP_{01,f}$ 光が $LP_{02,b}$ モードに強力に結合されていることが必要である。しかし、このようなモード変換装置においては、 $LP_{01,f}$ と他のすべての導波された反射モード（例として $LP_{11,b}$ および $LP_{01,b}$ ）の間の結合は小さくなくてはならず、例としては、 $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ への結合より少なくとも 20 dB 小さくなくてはならない。この、 $LP_{01,f}$ と他の導波されたモード間の結合（すなわち所望の結合以外の結合）を同時に「ヌル化 (nulling)」することは、コア全体で均一な感光性を有する光ファイバでは達成できず、次に説明するようなより複雑なファイバ設計の使用を必要とする。

【0023】

光ファイバ内の種々の導波されたモード間の結合強度は、ファイバの屈折率プロファイルおよび種々のモードの電界に依存する。これらのパラメータは両方とも一般的に格子の形成時に固定され、変更して所望の結合を達成することはできない。相対的な結合強度を大幅に変更するように変更できる格子のパラメータは、コア軸に対する格子の傾斜のみである。しかし、ファイバコア内の感光性が均一であれば、格子内に傾斜を導入することによって達成可能な種々の結合強度に対する制御は限定される。特に、均一な放射感光性プロファイルでは、偶数 - 偶数反射（たとえば $LP_{01,f}$ から $LP_{01,b}$ ）および偶数 - 奇数反射（たとえば $LP_{01,f}$ から $LP_{11,b}$ ）を同時に「ヌル化」することは不可能である。したがって、発明者らは追加の自由の程度を提供しなければならないと決定した。この自由の程度は光ファイバの感光性プロファイルである。このプロファイルはコア内に少なくとも2つの異なるレベルの感光性を有し（そのうち1つまたは複数がゼロである可能性がある）、さらに、クラディング内には実質上感光性を有しない場合もあるが、これは必ずしも必要ではない。

【0024】

このように例として、光ファイバ内でブラッグ格子を形成し、ファイバコアの所定の領域において感光性を除去する（または大幅に低減する）と、コア内に均一の感光性を有するファイバで可能な範囲よりはるかに広い範囲で相対的な結合強度をファイバの傾斜角の関数として達成することが可能になる。特に、強力な $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ 結合で偶数 - 偶数（たとえば $LP_{01,f}$ から $LP_{01,b}$ ）反射と偶数 - 奇数（たとえば $LP_{01,f}$ から $LP_{11,b}$ ）反射の両方を同時にヌル化することが可能になり、これはコア内に均一の感光性を有する傾斜屈折率格子では不可能であったことである。

【0025】

さらに一般的には、本発明は波長 λ （例として約 $1.5 \mu m$ ）の光を、順方向に伝播する所与の導波されたモードから、別の既定の導波されたモードへ変換する光導波管モード変換装置を備える物品の中で具体化される。モード変換装置は導波管内に傾斜屈折率格子を備え、格子は導波管軸に対して傾斜角 θ を有し、導波管の少なくとも一部に渡って長手方向に伸びる。導波管は波長 λ の光に関して少数モードの導波管であり、コアと、コアに接触してコアを囲むクラディングを有する。ファイバは、ファイバに屈折率プロファイル $n(r)$ および感光性プロファイル $p(r)$ を提供するように選択されたドーパント分布を有し、どちらのプロファイルも導波管の放射座標 r の関数である。

【0026】

モード変換装置は、2つまたはそれ以上の非ゼロの結合強度をコアの導波されたモードの間に有し、 $p(r)$ はコア内に少なくとも2つの異なるレベルの感光性を有する。さらに、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ は、その非ゼロ結合強度のうち複数が同時にヌル化されるように選択される。たとえば、 $n(r)$ 、 $p(r)$ および θ は、所与の導波されたモード（たとえば $LP_{01,f}$ ）が少なくとも1つの別の導波されたモード（たとえば $LP_{01,b}$ および $LP_{11,b}$ ）

10

20

30

40

50

b) と共にヌル化され、少なくとも 1 つの別の導波されたモード (たとえば $LP_{02, b}$) に強力に結合されるように選択される。本発明の好ましい実施例では、基本モード $LP_{01, f}$ は偶数および奇数の後方に伝播する導波されたモード (それぞれ $LP_{01, b}$ および $LP_{11, b}$) と同時にヌル化され、 $LP_{01, f}$ は同時により高いオーダの偶数モード (たとえば $LP_{02, b}$) に強力に結合される。

【0027】

【発明の実施の形態】

次に、少なくとも近似的に所望の結合強度を提供する感光性プロファイルを決定するために使用できる数式を提供する。所望であれば、傾斜角または可能であれば感光性プロファイルの典型的には小さな変更によって、最適化された結果が得られる。UV 曝露による感光性プロファイルのトリミングも最適化のために使用できる。

10

【0028】

光導波管内の第 1 の導波されたモードと第 2 の導波されたモードの間 (LP_{mn} および LP_{pq} と示される) の結合は結合強度 κ に依存し、これは次の θ に依存する積分に比例する。

【数 1】

$$1) \quad \kappa_{mn-pq}(\theta) = \int E_{mn} E_{pq} H(r) r dr,$$

20

上式で、 $H(r)$ は、モードインデックスおよび格子傾斜角に依存する (たとえば、参照により本明細書に援用されるもの、T. Erdogan らによる「Tilted Fiber Phase Gratings」(J. Optical Soc. America, A. Vol.13(2)、1996年、第 296 頁乃至第 313 頁) ページを参照されたい)。

【0029】

たとえば、光ファイバが LP_{01} モードならびに LP_{11} モードをサポートする場合、傾斜格子は LP_{01} モードと LP_{11} モードを、 LP_{01} から LP_{11} の重複積分に依存する強度で結合する。すなわち、次式のようになる。

【数 2】

$$2) \quad \kappa_{01-11}(\theta) = \int E_{01} E_{11} J_1(K_{\text{grating}} r \sin \theta) W(r) r dr,$$

30

上式で E_{01} および E_{11} は、 LP_{01} モードおよび LP_{11} モードの放射状に依存した電界の振幅 (1 に正規化されている。すなわち

【数 3】

$$\int_0^\infty E_{01}^2 r dr = 1$$

40

であり、 K_{grating} は格子 ($K_{\text{grating}} = 2\pi / \Lambda_{\text{grating}}$) の波ベクトルであり、 θ はファイバ軸に対する格子の傾斜角であり、 $W(r)$ は格子の感光性プロファイルである $p(r)$ の放射の変化を表す放射状に依存した重み付け関数である。ベッセル関数 J_1 は方位角の積分から生じ、 LP_{11} モードは奇数で LP_{01} モードは偶数であるため、 $\theta = 0$ の時にはゼロである。

【0030】

重み付け関数 $W(r)$ は、傾斜格子の完全インデックス変調を介して定義できる。すなわち、次式のとおりである。

【数 4】

$$3) \quad \delta n(r, \phi, z) = \delta n W(r) \exp[(iK_{\text{grating}})(\sin \theta r \cos \phi + \cos \theta z)].$$

【0031】

式(3)において、 ϕ は円柱座標内の方位角であり、 δn はインデックス変調の振幅である。均一に感光性であるファイバでは、 $W(r)$ はインデックスプロファイル $n(r)$ と同じであり、コア半径まで1である。しかしここでは、 $W(r)$ が均一ではなく、インデックスプロファイル $n(r)$ と同じ放射依存性を有する場合もあるが有しない場合もあるファイバを考慮している。

【0032】

上記の数式は、選択された感光性プロファイルに関して所与の2つの導波されたモードの間で所望の結合を生む傾斜角 θ を決定するために使用できる。 θ の数学的に決定された値が所望の結合強度を直接生まない場合、典型的には少ない量の慣例的な実験で、たとえばモードの間の結合をヌル化する所望の結合を生む修正された傾斜角を十分に決定できる。所望の結合強度を提供する傾斜角を決定した後、傾斜角および所望の長さおよび強度を有する格子が従来の方法で製造される。

【0033】

少数モードの光ファイバ内で2つの既定の導波されたモードの間で効率的なモードの変換を達成するには、典型的にはモード変換結合を除いたすべての結合を実質上ヌル化し、モード変換結合を実質上最大化することが必要である。例として、ファイバが LP_{01} 、 LP_{11} および LP_{02} をサポートし、任意のより高次モード(higher order mode)(たとえば LP_{21})をサポートせず、所望のモード変換が $LP_{01, f}$ から $LP_{02, b}$ へのモード変換である場合、 $LP_{01, f}$ から $LP_{01, b}$ の結合強度および $LP_{01, f}$ から $LP_{11, b}$ の結合強度は所望のようにヌル化され、 $LP_{01, b}$ から $LP_{02, b}$ の結合強度は所望のように最大化される。

【0034】

明瞭に説明するために、以下の説明は3モードの光ファイバ内の LP_{01} から LP_{02} へのモード変換装置に関する。この手法はより高いモードの光ファイバ内の格子にも拡張することができ、任意の2つの空間モードの間の結合にも拡張することができる。

【0035】

ファイバが LP_{01} モードおよび LP_{11} モードをサポートする場合、ファイバ内の傾斜格子は $LP_{01} - LP_{11}$ 重複積分に依存する強度で、 $LP_{01, f}$ モードを $LP_{11, b}$ モードに結合する。上記の式(2)を参照されたい。類似のことが $LP_{01, f}$ から $LP_{01, b}$ の結合および $LP_{01, f}$ から $LP_{02, b}$ の結合に関しても行える。ファイバの感光性プロファイル $p(r)$ を適切に選択することにより、 $LP_{01, f}$ から $LP_{01, b}$ の結合および $LP_{01, f}$ から $LP_{11, b}$ の結合を同時にヌル化し、大きな $LP_{01, f}$ から $LP_{02, b}$ の結合を得ることが可能になる。

【0036】

同じ値の傾斜角 θ で LP_{01} から LP_{11} の結合と LP_{01} から LP_{01} の結合の両方をヌル化するためには、感光性プロファイル $p(r)$ を適切に選択しなければならない。同時のヌル化は、2つの結合強度の積分において、被積分関数が領域の1つにおいて両方とも正であり、別の領域において両方とも負であり、合計の積分において互いに打ち消すように、放射の範囲に渡って感光性が除去(または大幅に低減)された時に達成される。別法としては、 LP_{01} から LP_{01} と LP_{01} から LP_{11} を同時にヌル化することは、2つの通常のヌルが所定の傾斜角の値に関して近接する $LP_{01} - LP_{01}$ 結合に関して、「スーパーヌル」が形成された結果と理解できる。したがって、この大きな角度範囲は $LP_{01} - LP_{11}$ 角度ヌルを重複するように作成できる。

【0037】

図1aは本発明による例としての3モードのファイバの屈折率プロファイルを概略的に示し、図1bはファイバの感光性プロファイルを概略的に示す。図1aの中で n_0 はシリカの屈折率を指す。もっとも中心のコア領域11はGeおよびAlでドーピングされ、その

10

20

30

40

50

領域を部分的に感光性に行っている。中間のコア領域 12 は A1 でドーピングされてその領域を非感光性に行っており、もっとも外側のコア領域 13 は Ge でドーピングされてその領域を強力に感光性に行っている。3つのコア領域がそれぞれ 14 ~ 16 と示されている図 1b を参照されたい。

【0038】

図 2a から b は、屈折率プロファイルおよび感光性プロファイルを概略的に示し、図 2c は LP_{01} (参照番号 21)、 LP_{02} (参照番号 22) および LP_{11} (参照番号 23) の電界の強度をそれぞれ示す。

【0039】

図 3 は、図 2a から c のファイバに関して種々の結合強度の計算された値を傾斜角の関数として示す。図 3 から容易に理解されるように、 $\theta \sim 6.5^\circ$ においては、 $LP_{01,f}$ から $LP_{01,b}$ の結合強度 31 は「スーパーヌル」を有し、 $LP_{01,f}$ から $LP_{11,b}$ の結合強度 32 は LP_{01} から LP_{01} のスーパーヌルと重複する通常のヌルを有する。同じ傾斜角において、 $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ の結合強度 33 は非常に最大に近いものを有し、これによって効率的なモードの変換を容易にする。

【0040】

本発明の実行は具体的に開示された感光性プロファイルに限定されず、 $LP_{01,f}$ から $LP_{02,b}$ のモード変換装置にも限定されないことを理解されたい。少数モードの光ファイバは知られており、さらなる議論を必要としない。

【0041】

少数モードの光導波管の屈折率プロファイルと感光性プロファイルの独立した操作は上述の特定の実施例に限定されず、より一般的な設計の手順で適用されていくつかのより高いオーダーのモードの結合を同時にヌル化することもできる。

【0042】

この一般的な技法の例として、図 4a によって例示されているように、感光性は 0 から r_1 、 r_1 から r_2 など、異なる環状の領域内で異なるレベル $p(r)$ に設定される場合もある。屈折率 $n(r)$ は同様に、0 から r_4 、 r_4 から r_5 など、別の環状の領域の組内で異なる値に設定される場合もある。モード重複積分の好ましい組は次いで、知られた数学の最適化手順を介して計算できる。この手順はファイバを定義するいくつかの変数の関数として望ましくない結合を最小化すること（および所望の結合強度を最大化すること）、すなわち、感光性プロファイルおよび屈折率プロファイル、感光性レベル、屈折率レベルおよび傾斜角の半径を定義することを含む。

【0043】

図 4a および 4b は、少数モードファイバの例としての感光性および屈折率プロファイルを概略的に描く。変数は p_1 、 p_2 および p_3 ; r_1 、 r_2 、 $\dots$ 、 r_6 ; n_1 、 n_2 および n_3 であり、傾斜角は θ である。最適化手順は実質上上記に示されたような重複積分の評価を含む。最適化手順は既定の結合強度の最小化（ヌル化）（たとえば K_{01-01} 、 K_{01-11} 、 K_{01-02} 、 K_{11-11} および K_{02-02} ）および別の既定の結合強度、たとえば K_{11-02} を最大化することに関する。別の例として、3モードファイバ内では、 LP_{01} は LP_{02} および LP_{11} と共にヌル化される。さらなる例として、少数モードファイバ（3つ以上の導波されたモード）内では、 LP_{01} は 1つを除くすべての導波されたモードでヌル化されるかまたは LP_{01} はすべての導波されたモードでヌル化される。

【0044】

上述のようなモード変換装置は光ファイバ通信システム内で種々の使用法を見出すことができる。図 5 は例としての光ファイバ通信システム 50 を概略的に描き、ここで参照番号 51 は WDM 送信器を指し、52 は光送信ファイバを指し、53 および 54 はデマルチプレクサを指し、55 から 57 は波長 λ_1 、 λ_2 、 $\dots$ の光の受信器を示す。ファイバ 52 は基本モード LP_{01} のみを第 1 のデマルチプレクサ 53 に導波し、第 1 のデマルチプレクサ 53 は本発明によるモード変換装置を備える。チャンネル（たとえば λ_1 ）は LP_{01}

10

20

30

40

50

λ_2 に変換され、信号ストリームから削除され、受信器55によって受信される。デマルチプレクサ54は同様にチャンネル λ_2 を削除し、チャンネル λ_2 は受信器56によって検出される。他のチャンネルも同様な方法で削除され、最後には1つのチャンネル(たとえば λ_n)のみが残って受信器57によって検出される。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による例としてのファイバに関する屈折率プロファイルおよび感光性プロファイルを概略的に示す図である。

【図2】本発明によるファイバのインデックスプロファイル、感光性プロファイルおよびモードの電界を概略的に示す図である。

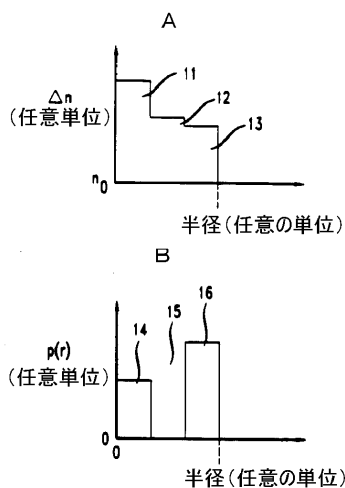
【図3】傾斜角の関数として種々の結合定数を示す図である。

10

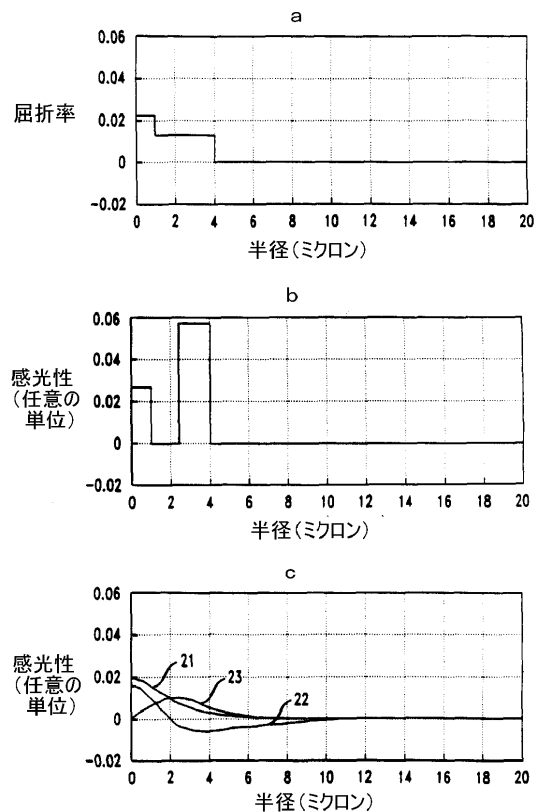
【図4】それぞれ、例としての感光性プロファイルおよび屈折率プロファイルを概略的に描く図である。

【図5】本発明によるモード変換装置を備える光ファイバ通信システムを概略的に示す図である。

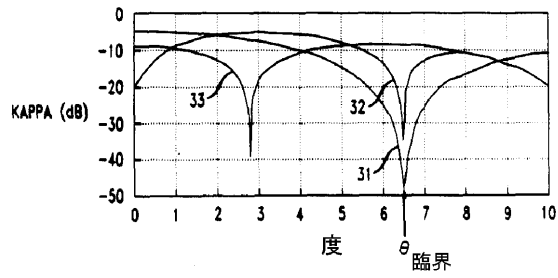
【図1】



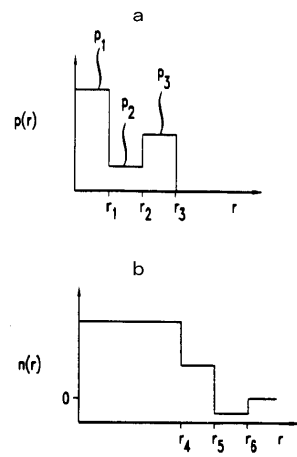
【図2】



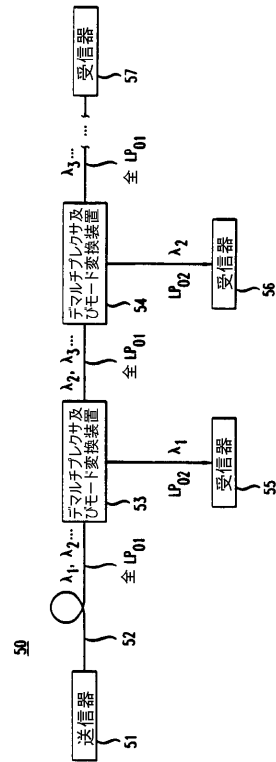
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(74)代理人 100101498

弁理士 越智 隆夫

(74)代理人 100096688

弁理士 本宮 照久

(74)代理人 100104352

弁理士 朝日 伸光

(72)発明者 トーマス アンドリュー ストラッサー

アメリカ合衆国 07060 ニュージャージー, ワレン, ハーモニー ロード 6

(72)発明者 ポール ステファン ウェストブルック

アメリカ合衆国 07928 ニュージャージー, チャットハム, リバー ロード 420 アパ
ートメント ケー - 11

審査官 日夏 貴史

(56)参考文献 国際公開第99/027401(WO, A1)

特開2000-009956(JP, A)

特開2000-9941(JP, A)

国際公開第97/26571(WO, A1)

米国特許第6009222(US, A)

特開平10-104454(JP, A)

国際公開第99/00686(WO, A1)

M.J.Holmes et.al., European Conference on Optical Communication (ECOC' 99), 1999
年 9月27日, Vol.1, p.216-217

L.Brilland et.al., Electronics Letters, 1999年 2月 4日, Vol.35 No.3, p.234-236

C.W.Haggans et.al., IEEE Photonics Technology Letters, May 1998, Vol.10 No.5, p.690-69
2

N.G.R.Broderick et.al., Optics Letters, 1999年 4月15日, Vol.24 No.8, p.566-568

I.Riant et.al., Optical Fiber Communication Conference 1999 (OFC'99), 1999年 2月
25日, Vol.3, p.147-149

C.-X. Shi et al., Optics Letters, 1992年12月 1日, Vol.17 No.23, p.1655-1657

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)

G02B 6/10 - 6/16

G02B 5/18