

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7601197号
(P7601197)

(45)発行日 令和6年12月17日(2024.12.17)

(24)登録日 令和6年12月9日(2024.12.9)

(51)国際特許分類

F I

G 0 2 B 6/14 (2006.01)

G 0 2 B 6/14

G 0 2 B 6/02 (2006.01)

G 0 2 B 6/02 4 1 6

請求項の数 6 (全16頁)

(21)出願番号	特願2023-500172(P2023-500172)	(73)特許権者	000004226
(86)(22)出願日	令和3年2月17日(2021.2.17)		日本電信電話株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/005851		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(87)国際公開番号	WO2022/176046	(74)代理人	100119677
(87)国際公開日	令和4年8月25日(2022.8.25)		弁理士 岡田 賢治
審査請求日	令和5年6月15日(2023.6.15)	(74)代理人	100160495
			弁理士 畑 雅明
		(74)代理人	100115794
			弁理士 今下 勝博
		(72)発明者	山下 陽子
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			日本電信電話株式会社内
		(72)発明者	森 崇嘉
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			日本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 モード変換デバイス及び設計方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

少なくとも2つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに長周期グレーティングを有するモード変換デバイスであって、

前記長周期グレーティングが数C1の関係を満たしていることを特徴とするモード変換デバイス。

【数C1】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta}$$

$$C = \sin^2\left(\frac{\pi L_g}{2 L_c}\right)$$

(C1)

$$FWHM \cdot L_c = 10^4 \times b \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1}$$

10

$$b = -1169.3C + 1705.6$$

ただし、

λ は波長 (nm)、半値全幅 FWHM は中心波長におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域 (nm)、 C は結合効率、 L_c は完全結合長 (cm)、 L_g はグレーティング長 (cm)、 Λ はグレーティングピッチ (μm)、 $\Delta\beta$ はモード変換対象の中心波長における 2 つの前記伝搬モードの伝搬定数差 (μm^{-1})、 $|d\Delta\beta/d\lambda|$ の単位は (10^{15}m^{-2}) である。

20

【請求項 2】

光の伝搬方向において前記長周期グレーティングの後段にあり、前記光ファイバのコアを伝搬する光の内、前記長周期グレーティングが 1 のモードから他のモードへ変換した所望の波長の光を前記光ファイバの側面から出力するタップ導波路をさらに備えており、

前記タップ導波路は、前記コアの中心から角度 α で前記光ファイバの側面に向けて伸びることを特徴とする請求項 1 に記載のモード変換デバイス。

【請求項 3】

前記長周期グレーティングと前記タップ導波路との組が前記光ファイバに縦列されていることを特徴とする請求項 2 に記載のモード変換デバイス。

【請求項 4】

前記長周期グレーティングは、前記 1 のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が互いに異なるように、数 C 1 に記載される設計パラメータがそれぞれ異なることを特徴とする請求項 3 に記載のモード変換デバイス。

30

【請求項 5】

前記長周期グレーティングは、前記 1 のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が同じ且つ前記結合効率が異なるように、前記グレーティング長 L_g がそれぞれ異なることを特徴とする請求項 3 に記載のモード変換デバイス。

【請求項 6】

少なくとも 2 つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに設置する長周期グレーティングの設計パラメータを決定する設計方法であって、

40

前記光ファイバのコア半径 a (μm)、比屈折率差 Δ (%)、モード変換を行う光の中心波長 λ_0 (nm)、結合効率 C 、及び半値全幅 FWHM (nm) が与えられること、

前記光ファイバのコア半径 a (μm) と比屈折率差 Δ (%) から、モード変換対象の前記中心波長 λ_0 (nm) における 2 つの前記伝搬モードの伝搬定数差 $\Delta\beta$ (μm^{-1}) 及びその波長微分 $d\Delta\beta/d\lambda$ をモード解析で取得すること、

数 C 2 で前記長周期グレーティングのグレーティングピッチ Λ (μm) を計算すること、

数 C 3 で係数 b を計算すること、

数 C 4 で完全結合長 L_c (cm) を計算すること、及び

数 C 5 でグレーティング長 L_g (cm) を計算すること

を特徴とする設計方法。

50

【数 C 2】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (\text{C } 2)$$

【数 C 3】

$$b = -1169.3C + 1705.6 \quad (\text{C } 3)$$

【数 C 4】

10

$$L_c = \frac{10^4 \times b}{FWHM \cdot \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|} \quad (\text{C4})$$

ただし、半値全幅 FWHM (nm) は中心波長 λ_0 (nm) におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域、 $|d\Delta\beta/d\lambda|$ の単位は (10^{15} m^{-2}) である。

【数 C 5】

20

$$L_g = 2L_c \frac{\arcsin(\sqrt{C})}{\pi} \quad (\text{C5})$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、光ファイバに長周期グレーティング (LPG; Long Period Grating) が形成されたモード変換デバイス及びその設計方法に関する。

【背景技術】

30

【0002】

非特許文献 1 は、ある波長の光のみを選択的に光ファイバのクラッドモードへ結合させる LPG について開示する。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【文献】Craig D. Poole, et al., "Helical-Grating Two-Mode Fiber Spatial-Mode Coupler", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL 9, NO 5, MAY 1991

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

LPG において結合効率と半値全幅の関係は一意に求まるが、完全結合長、ファイバ構造、及び中心波長のいずれかの値が変わると、結合効率と半値全幅の関係も変化する。このため、LPG を備えるモード変換デバイスは、任意に結合効率と半値全幅を設計することが困難という課題があった。なお、「半値全幅」とは、中心波長におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域を意味し、モード変換デバイスのモード変換可能な波長域である。

【0005】

50

前記課題を解決するために、本発明は、任意の結合効率と半値全幅を設計することができるモード変換デバイス及びその設計方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記目的を達成するために、本発明に係るモード変換デバイスは、変換する2つのモード間の伝搬定数差 $\Delta\beta$ の波長微分と結合効率及び半値全幅との関係に基づいてパラメータを調整することとした。

【0007】

具体的には、本発明に係るモード変換デバイスは、少なくとも2つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに長周期グレーティングを有するモード変換デバイスであって、前記長周期グレーティングが数C1の関係を満たしていることを特徴とする。

【数C1】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta}$$

$$C = \sin^2\left(\frac{\pi L_g}{2 L_c}\right)$$

(C1)

$$FWHM \cdot L_c = 10^4 \times b \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1}$$

$$b = -1169.3C + 1705.6$$

ただし、

λ は波長(nm)、半値全幅FWHMは中心波長におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域(nm)、Cは結合効率、 L_c は完全結合長(cm)、 L_g はグレーティング長(cm)、 Λ はグレーティングピッチ(μm)、 $\Delta\beta$ はモード変換対象の中心波長における2つの前記伝搬モードの伝搬定数差(μm^{-1})、 $|d\Delta\beta/d\lambda|$ の単位は(10^{15}m^{-2})である。

【0008】

コア半径a、コアの比屈折率差 Δ の光ファイバのコアに、数C1の関係を満たすグレーティングピッチ Λ とグレーティング長 L_g のLPGを形成することで、所望の波長において所望の半値全幅FWHMと結合効率Cのモード変換デバイスを得ることができる。

【0009】

具体的な設計方法は、少なくとも2つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに設置する長周期グレーティングの設計パラメータを決定する設計方法であって、

前記光ファイバのコア半径a(μm)、比屈折率差 Δ (%)、モード変換を行う光の中心波長 λ_0 (nm)、結合効率C、及び半値全幅FWHM(nm)が与えられること、

前記光ファイバのコア半径a(μm)と比屈折率差 Δ (%)から、モード変換対象の前記中心波長 λ_0 (nm)における2つの前記伝搬モードの伝搬定数差 $\Delta\beta$ (μm^{-1})及びその波長微分 $d\Delta\beta/d\lambda$ をモード解析で取得すること、

数C2で前記長周期グレーティングのグレーティングピッチ Λ (μm)を計算すること、

数C3で係数bを計算すること、

数C4で完全結合長 L_c (cm)を計算すること、及び

数C5でグレーティング長 L_g (cm)を計算すること

を特徴とする。

【数 C 2】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (C2)$$

【数 C 3】

$$b = -1169.3C + 1705.6 \quad (C3)$$

10

【数 C 4】

$$L_c = \frac{10^4 \times b}{FWHM \cdot \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|} \quad (C4)$$

ただし、半値全幅 FWHM (nm) は中心波長 λ_0 (nm) におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域、 $|d\Delta\beta/d\lambda|$ の単位は (10^{15} m^{-2}) である。

【数 C 5】

20

$$L_g = 2L_c \frac{\arcsin(\sqrt{C})}{\pi} \quad (C5)$$

【0010】

従って、本発明は、任意の結合量と半値全幅を設計することができるモード変換デバイス及びその設計方法を提供することができる。

【0011】

本発明に係るモード変換デバイスは、光の伝搬方向において前記長周期グレーティングの後段にあり、前記光ファイバのコアを伝搬する光の内、前記長周期グレーティングが1のモードから他のモードへ変換した所望の波長の光を前記光ファイバの側面から出力するタップ導波路をさらに備えることを特徴とする。

30

【0012】

本モード変換デバイスは、光ファイバを伝搬する光から所望波長の光を所望のパワーで取り出すことができる。

【0013】

ここで、本発明に係るモード変換デバイスは、前記長周期グレーティングと前記タップ導波路との組が前記光ファイバに縦列されていることでもよい。

【0014】

40

この場合、前記長周期グレーティングは、前記1のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が互いに異なるように、数C1に記載される設計パラメータがそれぞれ異なることとする。それぞれのタップ導波路から異なる波長の光を取り出すことができる。

【0015】

この場合、前記長周期グレーティングは、前記1のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が同じ且つ前記結合効率が異なるように、前記グレーティング長 L_g がそれぞれ異なることとしてもよい。それぞれのタップ導波路から異なる所望のパワーの光を取り出すことができる。

【0016】

なお、上記各発明は、可能な限り組み合わせることができる。

50

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明は、任意の結合効率と半値全幅を設計することができるモード変換デバイス及びその設計方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

【図 1】長周期グレーティング（ＬＰＧ）を有するモード変換デバイスの概要を説明する図である。

【図 2】長周期グレーティング（ＬＰＧ）を形成した場合の透過スペクトルの一例を説明する図である。

10

【図 3】長周期グレーティング（ＬＰＧ）を形成した場合の結合量と半値全幅（ＦＷＨＭ）の関係の一例を説明する図である。

【図 4】ＦＷＨＭと結合量の関係の一例を説明する図である。

【図 5】ＦＷＨＭとＬｃの積と $d\Delta\beta/d\lambda$ の関係を説明する図である。

【図 6】結合効率Ｃと係数ｂの関係を説明する図である。

【図 7】本発明に係る設計方法を説明する図である。

【図 8】本発明に係るモード変換デバイスを説明する図である。

【図 9】本発明に係るモード変換デバイスを説明する図である。

【図 10】本発明に係るモード変換デバイスを説明する図である。

【発明を実施するための形態】

20

【 0 0 1 9 】

添付の図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下に説明する実施形態は本発明の実施例であり、本発明は、以下の実施形態に制限されるものではない。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。

【 0 0 2 0 】

(実施形態 1)

図 1 は、長周期グレーティング（ＬＰＧ）を有するモード変換デバイスの概要を説明する図である。周期的に摂動を加えることで入射したモード（モード 1）が別のモード（モード 2）に変換する。このとき摂動を加える周期（ Λ ）と中心波長（ λ_0 ）におけるモード 1 とモード 2 の伝搬定数差（ $\Delta\beta$ ）が式（1）の関係を満たす必要がある。

30

【数 1】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (1)$$

【 0 0 2 1 】

ここで、入射したモード 1 がモード 2 に完全結合する長さを完全結合長（ L_c ）と呼ぶ。 L_c は摂動 1 か所あたりのモード変換量によって決定し、1 か所あたりのモード変換量が大きいと、完全結合長が短くなる。一方で 1 か所あたりのモード変換量が大きいとモード不整合による損失が増大する。また、グレーティング長を L_g と定義する。 $L_g = L_c$ の場合、前述の通り図 1（a）に示すようにモード 1 は完全にモード 2 へ変換する。また、 L_g を調整することで、図 1（b）に示すようにモード 1 からモード 2 への結合量（ C ）を制御することができる。

40

【 0 0 2 2 】

このときの、波長 λ_0 における結合効率 C は式（2）で示される。

【数 2】

$$C = \sin^2\left(\frac{\pi L_g}{2 L_c}\right) \quad (2)$$

50

$L_g = L_c$ の場合、モード 1 は完全にモード 2 へ結合し、 $C = 1$ となる。

【 0 0 2 3 】

図 2 は、コア半径 (a) $4.5 \mu\text{m}$ 、且つクラッドに対するコアの比屈折率差 (Δ) 0.35% の光ファイバに、 $L_c = 3 \text{ cm}$ のグレーティングを形成した場合の中心波長 (λ_0) 1350 nm の光の透過率の一例を説明する図である。図 1 で説明したモード 1 及びモード 2 を、それぞれ LP_{01} モード及び LP_{11a} モードとしている。ここで「透過率」とは、 LP_{01} モードを入射した際の LP_{01} モードの透過率である。「結合効率」は、中心波長で減衰している量である。図 2 の各ラインは L_g / L_c を変化させた場合の透過率を示しており、 L_g / L_c を制御することで結合効率を制御できること、及び結合効率が增加する (L_g を大きくする) と帯域幅が狭くなる傾向があることがわかる。

10

【 0 0 2 4 】

図 3 は、結合効率と半値全幅 ($FWHM$) の関係を説明する図である。 $\lambda_0 = 1350 \text{ nm}$ 、 $L_c = 3 \text{ cm}$ とし、光ファイバ構造であるコア半径 a とコア比屈折率 Δ をそれぞれ ($a = 5 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.28\%$)、($a = 4.5 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.35\%$)、($a = 4 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.44\%$) とした。

【 0 0 2 5 】

図 3 より、結合効率が増大する (L_g を大きくする) にしたがって $FWHM$ が減少すること、及び $FWHM$ と結合効率の関係は光ファイバ構造に依存することがわかる。 $FWHM$ と結合効率の関係は、光ファイバ構造だけでなく、 L_c 又は λ_0 を変えても同様に变化する。ここで、光ファイバ構造を示すパラメータとして波長 λ_0 における 2 モードの伝搬定数差 $\Delta\beta$ の波長微分 ($d\Delta\beta / d\lambda$) を導入する。なお、2 モードの伝搬定数差 $\Delta\beta$ は光ファイバ構造からモード解析によって求めることができる。

20

【 0 0 2 6 】

図 4 は、図 3 で説明した $FWHM$ と結合効率の関係を $d\Delta\beta / d\lambda$ を横軸にしてプロットし直した図である。本図では、光ファイバ構造 (Δ , a) および中心波長 (λ_0) を変えたデータを重ねて表示している。図 4 より、ファイバ構造や中心波長に関わらず結合効率に対して、 $FWHM$ と $d\Delta\beta / d\lambda$ の関係が一意に決定することがわかる。

【 0 0 2 7 】

さらに、 $FWHM$ と L_c の積を計算することで、 L_c に関わらず結合効率に対して $FWHM$ と $d\Delta\beta / d\lambda$ の関係が一意に決定する。図 5 は、 $FWHM$ と L_c の積と $d\Delta\beta / d\lambda$ の関係を説明する図である。各プロットは、計算から求めた $FWHM$ と L_c の積と $d\Delta\beta / d\lambda$ の関係を、破線は各結合効率に対して求めた近似関数を示す。各結合効率に対する近似関数を式 (3) ~ (6) に示す。

30

【数 3】

$$FWHM \cdot L_{c0.5} = 1121 \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (3)$$

【数 4】

$$FWHM \cdot L_{c0.75} = 810.3 \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (4)$$

40

【数 5】

$$FWHM \cdot L_{c0.94} = 628.5 \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (5)$$

【数 6】

50

$$FWHM \cdot L_{c0.99} = 546 \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (6)$$

【 0 0 2 8 】

式 (3) ~ (6) に示すように、FWHM と L_c の積と $d\Delta\beta / d\lambda$ の関係は式 (7) に示す反比例の式に近似できることがわかる。

【 数 7 】

$$FWHM \cdot L_c = b \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (7) \quad 10$$

ここで、結合効率と反比例の係数 b の関係を図 6 に示す。図 6 より、係数 b は、式 (8) から求められる。

【 数 8 】

$$b = -1169.3C + 1705.6 \quad (8)$$

ここで C は、線形表示の結合効率である。

【 0 0 2 9 】

これより、式 (1)、式 (2)、式 (7) 及び式 (8) を満たすグレーティング構造を光ファイバに設けることで、任意の結合効率と帯域幅を有するモード変換デバイスを構成することができる。すなわち、本発明に係るモード変換デバイスは、少なくとも 2 つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに長周期グレーティングを有し、前記長周期グレーティングが数 C 1 の関係を満たしていることを特徴とする。

【 数 C 1 】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad 30$$

$$C = \sin^2 \left(\frac{\pi L_g}{2 L_c} \right) \quad (C1)$$

$$FWHM \cdot L_c = 10^4 \times b \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|^{-1}$$

$$b = -1169.3C + 1705.6$$

40

ただし、

λ は波長 (nm)、半値全幅 FWHM は中心波長におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域 (nm)、 C は結合効率、 L_c は完全結合長 (cm)、 L_g はグレーティング長 (cm)、 Λ はグレーティングピッチ (μm)、 $\Delta\beta$ はモード変換対象の中心波長における 2 つの前記伝搬モードの伝搬定数差 (μm^{-1})、 $|d\Delta\beta / d\lambda|$ の単位は ($10^{15} m^{-2}$) である。

【 0 0 3 0 】

ここでは、LP01 モードと LP11 モードの変換効率を例に挙げて計算を行ったが、例えば LP01 モードとクラッドモードや、LP01 モードと LP02 モード、LP11

50

モードとLP21モードなどほかのモード間の結合でも同様に考えることができる。また、光ファイバがステップインデックス構造に関わらず、グレーデッドインデックス構造などほかの構造でも同様に考えることができる。

【0031】

(実施形態2)

図7は、実施形態1で説明したモード変換デバイスの長周期グレーティングを設計する方法を説明するフローチャートである。当該設計方法は、少なくとも2つの伝搬モードで光を伝搬できる、ステップインデックス構造の光ファイバのコアに設置する長周期グレーティングの設計パラメータを決定する設計方法であって、

前記光ファイバのコア半径 a (μm)、比屈折率差 Δ (%)、モード変換を行う光の中心波長 λ_0 (nm)、結合効率 C 、及び半値全幅 FWHM (nm) が与えられること(ステップS01)、

10

前記光ファイバのコア半径 a (μm) と比屈折率差 Δ (%) から、モード変換対象の前記中心波長 λ_0 (nm) における2つの前記伝搬モードの伝搬定数差 $\Delta\beta$ (μm^{-1}) 及びその波長微分 $d\Delta\beta/d\lambda$ をモード解析で取得すること(ステップS02)、

数C2で前記長周期グレーティングのグレーティングピッチ Λ (μm) を計算すること(ステップS03)、

数C3で係数 b を計算すること(ステップS04)、

数C4で完全結合長 L_c (cm) を計算すること(ステップS05)、及び

数C5でグレーティング長 L_g (cm) を計算すること(ステップS06) を特徴とする。

20

【数C2】

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta\beta} \quad (\text{C2})$$

【数C3】

$$b = -1169.3C + 1705.6 \quad (\text{C3})$$

30

【数C4】

$$L_c = \frac{10^4 \times b}{\text{FWHM} \cdot \left| \frac{d\Delta\beta}{d\lambda} \right|} \quad (\text{C4})$$

ただし、半値全幅 FWHM (nm) は中心波長 λ_0 (nm) におけるモード変換の結合効率と比較して結合効率が半分になる波長帯域、 $|d\Delta\beta/d\lambda|$ の単位は(10^{15}m^{-2}) である。

【数C5】

40

$$L_g = 2L_c \frac{\arcsin(\sqrt{C})}{\pi} \quad (\text{C5})$$

【0032】

設計パラメータは、光ファイバ構造を示す $d\Delta\beta/d\lambda$ 、 L_c 、 L_g 、 Λ 、 λ_0 、 C 及び FWHM である。まず、ステップS01において仕様値として前記光ファイバのコア半径 a (μm)、比屈折率差 Δ (%)、モード変換を行う光の中心波長 λ_0 (nm)、結合効率 C 、及び半値全幅 FWHM (nm) が与えられる。

50

【 0 0 3 3 】

ステップ S 0 2 で、光ファイバ構造のコア半径 a (μm) と比屈折率差 Δ (%) から、中心波長 λ_0 (nm) における伝搬定数差 $\Delta\beta$ およびその波長微分 $d\Delta\beta/d\lambda$ をモード解析によって求める。

ステップ S 0 3 で、式 (C 2) に伝搬定数差 $\Delta\beta$ を代入し、グレーティングピッチ Λ (μm) を計算する。

ステップ S 0 4 で、式 (C 3) に仕様値である結合効率 C を代入し、係数 b を計算する。

ステップ S 0 5 で、式 (C 4) に係数 b 、仕様値の半値全幅 FWHM、及び波長微分 $d\Delta\beta/d\lambda$ を代入し、完全結合長 L_c を計算する。

ステップ S 0 6 で、式 C 5 に完全結合長 L_c と仕様値である結合効率 C を代入してグレーティング長 L_g を計算する。

10

【 0 0 3 4 】

なお、ステップ S 0 3 とステップ (S 0 4 ~ S 0 6) とは同時に行ってもよいし、いずれか一方を先に行ってもよい。

【 0 0 3 5 】

モード変換可能な波長域 (FWHM) は、LPGを使用するデバイスによって異なる。例えば、モード多重伝送等で広い帯域で用いるような場合には広いほうが望ましい。一方で、実施形態 3 で説明するようなタップデバイスの場合には狭いほうが望ましい。本実施形態の設計方法は、デバイスの用途 (仕様) に合わせたグレーティングピッチ Λ とグレーティング長 L_g を導き出せることがポイントである。

20

【 0 0 3 6 】

(実施形態 3)

図 8 は、本実施形態のモード変換デバイス 3 0 1 を説明する図である。モード変換デバイス 3 0 1 は、光の伝搬方向において長周期グレーティング 2 1 の後段にあり、光ファイバ 5 0 のコア 5 1 を伝搬する光の内、長周期グレーティング 2 1 が 1 のモードから他のモードへ変換した所望の波長の光を前記光ファイバの側面から出力するタップ導波路 5 3 をさらに備えることを特徴とする。

【 0 0 3 7 】

本実施形態では、1 のモードが基本モード、他のモードが高次モードとして説明する。

モード変換デバイス 3 0 1 は、光ファイバ 5 0 のコア 5 1 を伝搬する光の内、高次モードの光を光ファイバ 5 0 の側面から出力するタップ導波路 5 3 が形成されたタップ部 1 0 と、

30

前記光の伝搬方向においてタップ部 1 0 の前段にあり、光ファイバ 5 0 のコア 5 1 に所望の波長の光を基本モードから前記高次モードへ変換するグレーティング 2 1 が形成されたグレーティング部 2 0 と、
を備える。

【 0 0 3 8 】

光ファイバ 5 0 は、ステップインデックスファイバとする。光ファイバ 5 0 は、長手方向に、グレーティング部 2 0 およびタップ部 1 0 が順に形成されている。タップ導波路 5 3 へ光が入射できる方向を光導波方向とする。図 8 では、光導波方向は左から右への方向である。また、タップ導波路 5 3 がコア 5 1 から光ファイバ 5 0 の側面へ向いている方向をタップ方向とする。図 8 では、タップ方向は、光導波方向に対して順方向に傾いた方向である。

40

【 0 0 3 9 】

グレーティング部 2 0 は、光ファイバ 5 0 のコア 5 1 を伝搬する光のうち、取り出したい波長の光を所望量だけ長周期グレーティング 2 1 によって LP 0 1 モードから LP 1 1 モードに変換する。グレーティング構造は、例えばフェムト秒レーザ加工、CO2 レーザ加工、またはグレーティングの押し当てによって実現することができる。

【 0 0 4 0 】

タップ部 1 0 は、コア 5 1 の中心から角度 α で光ファイバ 5 0 の側面 (クラッド 5 2 の

50

界面)に向けて伸びるタップ導波路53を有している。タップ部10は、タップ導波路53とコア51との角度 α 、タップ導波路53の直径 d_t 、及びタップ導波路53の屈折率を制御することで、コア51からLP11モードのみを選択的に取り出す。

【0041】

ここで、コア51からタップ導波路53へ結合する光をタップ光、コア51をそのまま伝搬する光を透過光と定義する。例えば、タップ部10の出力端(光ファイバ50の側面)に受光器54を接続することで、光ファイバ50からタップ光のみを取り出し受光することができる。

【0042】

タップ部10において、コア51からタップ導波路53への結合効率は、コア51を伝搬する光の伝搬モードに強く依存する。これは、高次モードになるほど閉じ込めが小さくなり、タップ導波路53へ結合しやすくなるためである。このため、高次モードのみをタップ導波路へ遷移させることができる。

10

【0043】

ここで、高次モードのみをタップ導波路53へ結合させるためには、タップ導波路53の屈折率と直径 d_t の値が重要である。これらの値が大きすぎると、タップ導波路53のNAが大きくなり、LP01モードも結合しやすくなるため、透過光の損失が増加することになる。一方、これらの値が小さすぎると、タップ導波路53のNAが小さくなり、高次モードが結合し難くなるため、タップ光のタップ導波路53への結合効率が低下することになる。つまり、タップ導波路53の屈折率と直径 d_t の値を適切に決定する必要がある。

20

【0044】

また、高次モードの光を高効率にタップ導波路53へ結合させ、基本モードの光をコア51に閉じ込めたまま伝搬させるためには、 α を十分小さくし、断熱的にモードを遷移させていく必要がある。 α が大きいと、LP01モードもタップ導波路51の影響を受けて放射モードに結合し、損失が発生する。このため、LP01モードの損失の観点から α の上限値が決定される。一方、 α は0より大きい任意の値をとることができるが、 α によってタップ部10の全長 L_{tap} が決定されるため、タップ導波路53の伝搬損失やデバイスの全長に対する要求条件の観点から α の下限値が決定される。

【0045】

30

一般的なシングルモードファイバでは光ファイバ50の直径 d_f は $125\mu m$ であり、例えば、タップ部 L_{tap} を5cm以下にするためには、 α は 0.07° 以上に設定する必要がある。

【0046】

グレーティング部20は、ピッチ Λ のグレーティング21を有する。例えば、グレーティング21は、長周期ファイバグレーティング(LPG)である。グレーティング部20で任意の波長 λ 且つ所望の光量の光をLP01モードからLP11モードへ変換するためには、実施形態1及び2で説明した設計パラメータでグレーティング21を成型する。

【0047】

(実施形態4)

40

図9及び図10は、本実施形態のモード変換デバイス302を説明する図である。モード変換デバイス302は、図8で説明したモード変換デバイス301の長周期グレーティング21とタップ導波路53との組が光ファイバ50に縦列されていることを特徴とする。つまり、モード変換デバイス302は、モード変換デバイス301を多段に組み合わせたシステムである。長周期グレーティング21とタップ導波路53の組(モード変換デバイス301)は、例えば、ある程度の距離(数m~数km)ごとに配置されている。

【0048】

図9のモード変換デバイス302の長周期グレーティング21は、前記1のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が互いに異なるように、数C1に記載される設計パラメータがそれぞれ異なることを特徴とする。

50

図 9 のモード変換デバイス 3 0 2 は、各モード変換デバイス (3 0 1 - 1、3 0 1 - 2、3 0 1 - 3) ごとに波長を割り当て、取り出す信号を波長によって制御する。取り出したい波長の波長間隔 (中心波長 λ_0 と帯域幅 (F W H M)) に合わせ、各モード変換デバイスの設計パラメータを設定することで、任意の波長間隔で信号を取り出すことができる。
【 0 0 4 9 】

図 1 0 のモード変換デバイス 3 0 2 の長周期グレーティング 2 1 は、前記 1 のモードから前記他のモードへ変換する光の波長が同じ且つ前記結合効率が異なるように、グレーティング長 L_g がそれぞれ異なることを特徴とする。

図 1 0 のモード変換デバイス 3 0 2 は、1 波長に対して複数のモード変換デバイス (3 0 1 - 1、3 0 1 - 2、3 0 1 - 3) を割り当てている。1 波長で信号を送り各 L P G の結合効率を制御することで、少しずつ多段に信号を取り出すことができる。図 1 0 のモード変換デバイス 3 0 2 は、1 波長で複数個所から同時に信号を出力させることができる。

【 符号の説明 】

【 0 0 5 0 】

1 0 : タップ部

2 0 : グレーティング部

2 1 : 長周期グレーティング (L P G)

5 0 : 光ファイバ

5 1 : コア

5 2 : クラッド

5 3 : タップ導波路

5 4 : 受光器

3 0 1、3 0 2 : モード変換デバイス

10

20

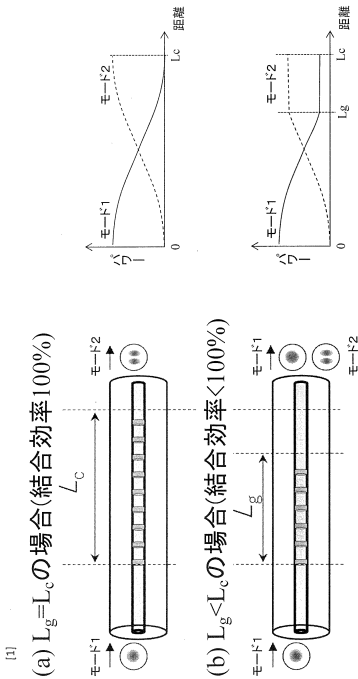
30

40

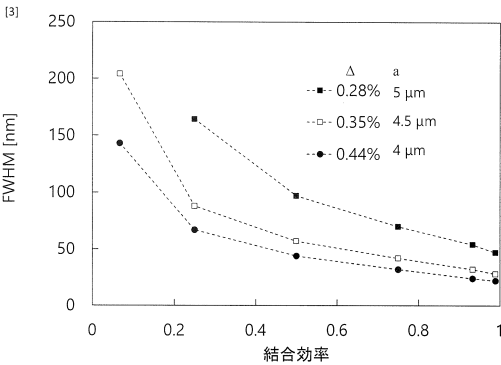
50

【図面】

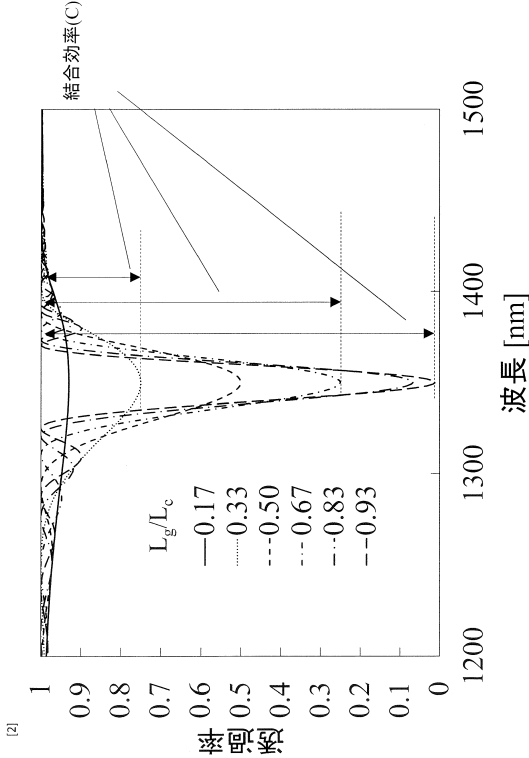
【図 1】



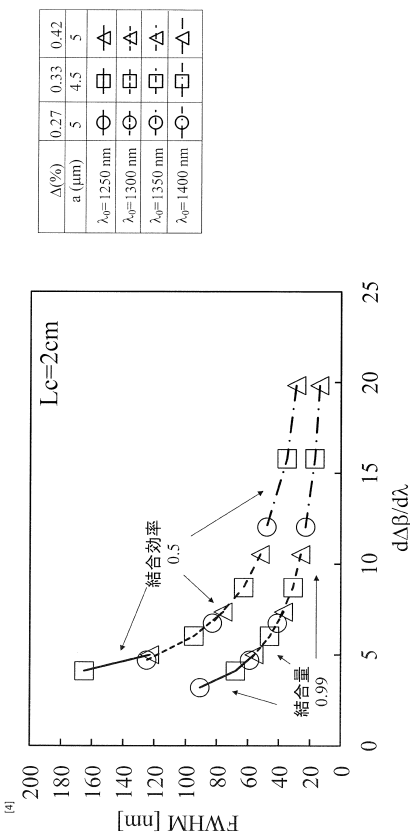
【図 3】



【図 2】



【図 4】



10

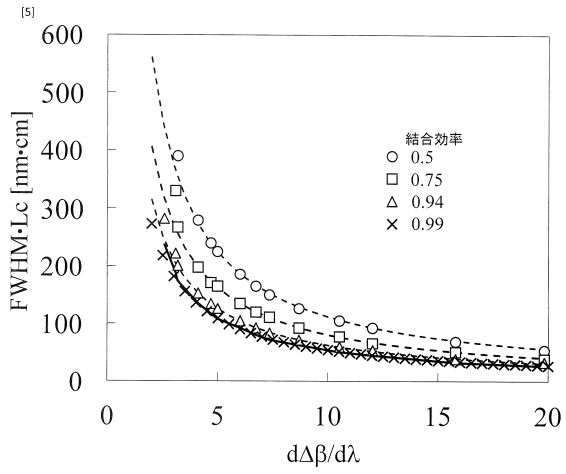
20

30

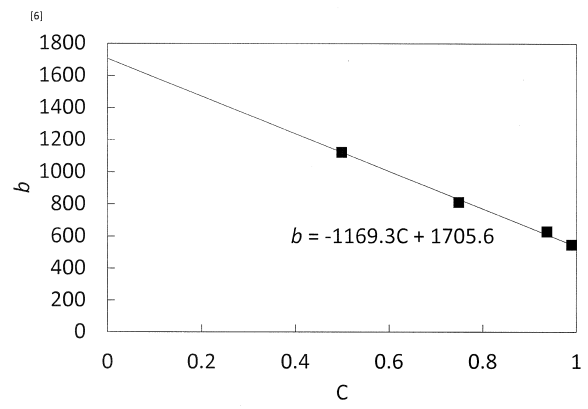
40

50

【 図 5 】

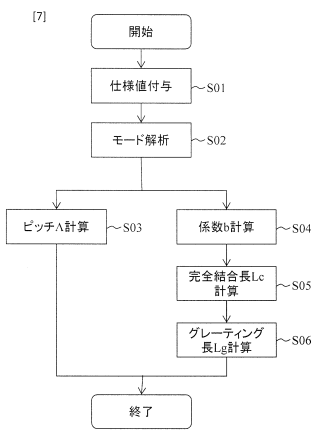


【 図 6 】

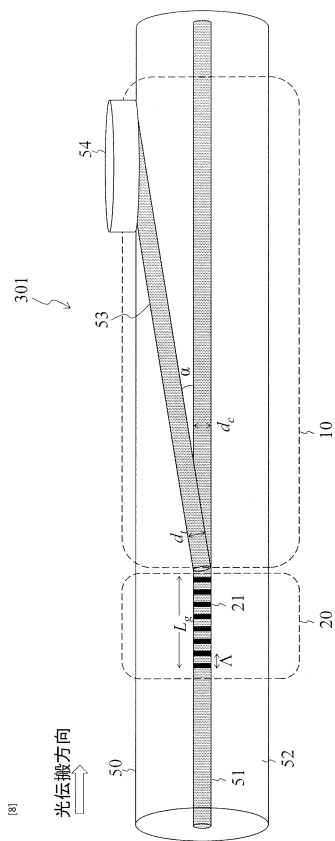


10

【圖 7】



【圖 8】



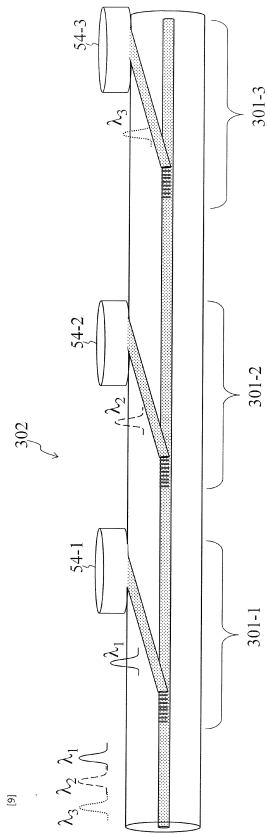
20

30

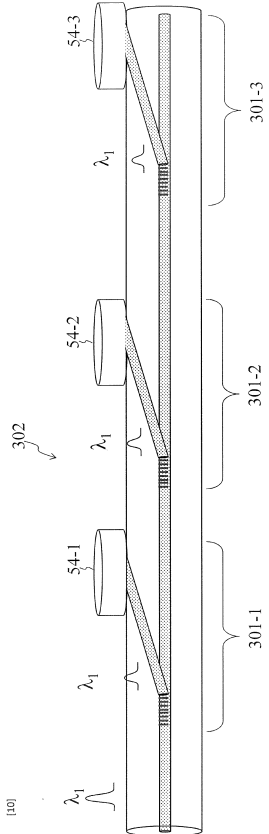
40

50

【図 9】



【図 10】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 松井 隆
東京都千代田区大手町一丁目 5 番 1 号 日本電信電話株式会社内
(72)発明者 中島 和秀
東京都千代田区大手町一丁目 5 番 1 号 日本電信電話株式会社内

審査官 山本 元彦

(56)参考文献 特開 2 0 1 7 - 1 5 6 6 4 1 (J P , A)
特開昭 6 2 - 2 2 9 1 1 0 (J P , A)
米国特許第 0 5 2 1 6 7 3 9 (U S , A)
FANG, Jian et al. , Low-DMD few-mode fiber with distributed long-period grating , Optics Letters , FANG , 2015年08月17日 , Vol. 40, No. 17 , pp. 3937 - 3940

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
G 0 2 B 6 / 1 4
G 0 2 B 6 / 0 2
I E E E X p l o r e
S c o p u s