

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6194789号
(P6194789)

(45) 発行日 平成29年9月13日(2017.9.13)

(24) 登録日 平成29年8月25日(2017.8.25)

(51) Int. Cl.		F I			
GO2B	6/12	(2006.01)	GO2B	6/12	311
GO2B	6/125	(2006.01)	GO2B	6/125	301
GO2B	6/124	(2006.01)	GO2B	6/124	

請求項の数 4 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2013-265763 (P2013-265763)	(73) 特許権者	000000295 沖電気工業株式会社 東京都港区虎ノ門一丁目7番12号
(22) 出願日	平成25年12月24日(2013.12.24)	(74) 代理人	100141955 弁理士 岡田 宏之
(65) 公開番号	特開2015-121696 (P2015-121696A)	(74) 代理人	100085419 弁理士 大垣 孝
(43) 公開日	平成27年7月2日(2015.7.2)	(72) 発明者	太繩 陽介 東京都港区虎ノ門一丁目7番12号 沖電気工業株式会社内
審査請求日	平成28年8月16日(2016.8.16)	審査官	林 祥恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

i 次モード (i は 0 以上の整数) の、 T E 偏波及び T M 偏波のいずれか一方の偏波、並びに l 次モード (l は i とは異なる 0 以上の整数) の T E 偏波及び T M 偏波を伝播させる多モード導波路部、及び該多モード導波路部と接続されたブラッグ反射部を有する第 1 光導波路コアと、

結合部を有する第 2 光導波路コアとを備え、

前記ブラッグ反射部には、前記一方の偏波の l 次モードと i 次モードとを変換してブラッグ反射し、他方の偏波を透過させるグレーティングが形成されており、

前記多モード導波路部と前記結合部とが、互いに離間しかつ並んで配置された双方向結合領域が設定されており、

前記双方向結合領域では、前記多モード導波路部を伝播する i 次モードの前記一方の偏波と、前記結合部を伝播する m 次モード (m は i とは異なる 0 以上の整数) の前記一方の偏波とが結合される

ことを特徴とする光導波路素子。

【請求項2】

前記グレーティングは、

ブラッグ波長 λ_{TE} 、グレーティング周期 Λ 、l 次モードの T E 偏波の等価屈折率 N_{TEl} 、i 次モードの T E 偏波の等価屈折率 N_{TEi} 、l 次モードの T M 偏波の等価屈折率 N_{TMl}

N_{TM1} 、及び j 次モード (j は 0 以上の整数) の TM 偏波の等価屈折率 N_{TMj} について、 $(N_{TE1} + N_{TEi}) = \sqrt{\epsilon_{TM}}$ 及び $(N_{TM1} + N_{TMj}) = \sqrt{\epsilon_{TE}}$ をともに満足する設計、又は、

ブラッグ波長 λ_{TM} 、グレーティング周期 Λ 、 l 次モードの TM 偏波の等価屈折率 N_{TMl} 、 i 次モードの TM 偏波の等価屈折率 N_{TMi} 、 l 次モードの TE 偏波の等価屈折率 N_{TEl} 、及び j 次モードの TE 偏波の等価屈折率 N_{TEj} について、 $(N_{TMl} + N_{TMi}) = \sqrt{\epsilon_{TM}}$ 及び $(N_{TEl} + N_{TEj}) = \sqrt{\epsilon_{TE}}$ をともに満足する設計で形成される

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光導波路素子。

【請求項 3】

前記グレーティングは、一定の幅で、光の伝播方向に沿って延在して形成される基部と、該基部の両側面にそれぞれ周期的に複数形成されている突出部とを含んで構成され、

前記基部の一方の側面に形成された突出部と、前記基部の他方の側面に形成された突出部とは、半周期ずれて配置されており、

前記突出部は、周期毎に突出幅が一定の変化量で変化することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路素子。

【請求項 4】

前記グレーティングは、一定の幅で、光の伝播方向に沿って延在して形成される基部と、該基部の両側面にそれぞれ周期的に複数形成されている突出部とを含んで構成され、

前記基部の一方の側面に形成された突出部と、前記基部の他方の側面に形成された突出部とは、半周期ずれて配置されており、

前記突出部の周期は、周期毎に一定の変化量で変化することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、TE (Transverse Electric) 偏波と TM (Transverse Magnetic) 偏波との経路を切り換える光導波路素子に関する。

【背景技術】

【0002】

情報伝達量の増大に伴い、光配線技術が注目されている。光配線技術では、光ファイバや光導波路を伝送媒体とした光デバイスを用いて、情報処理機器内の装置間、ボード間又はチップ間等の情報伝達を光信号で行う。その結果、高速信号処理を要する情報処理機器においてボトルネックとなっている、電気配線の帯域制限を改善することができる。

【0003】

光デバイスは、光送信器や光受信器等の光学素子を備えて構成される。これらの光学素子は、各光学素子の中心位置 (受光位置あるいは発光位置) を設計位置に合わせるための複雑な光軸合わせを行った上で、例えばレンズを用いて互いに空間結合することができる。

【0004】

ここで、各光学素子を結合するための手段として、レンズの代わりに光導波路素子を利用する技術がある (例えば、特許文献 1 参照)。光導波路素子を利用する場合には、光が光導波路内に閉じ込められて伝搬するため、レンズを利用する場合と異なり、複雑な光軸合わせを必要としない。従って、光デバイスの組立工程が簡易となるため、量産に適する形態として有利である。光導波路素子は、例えばシリコン (Si) を導波路材料として、極めて小型に形成される。しかも、製造には CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) の製造過程が流用され低コスト化が実現されている (例えば、非特許文献 1 参照)。

【0005】

ところで、受動型光加入者ネットワーク (PON: Passive Optical Network) 等の波長多重技術を利用する通信システムにおいて光デバイスを用いる

10

20

30

40

50

場合には、波長毎に光信号の経路を切り換える素子が必要となる。これを実現するために、波長フィルタとしての機能が付与された光導波路素子を使用した構造がある（例えば、特許文献1参照）。

【0006】

光導波路素子の構造として、リブ型導波路やSi細線導波路がある。Si細線導波路では、実質的に光の伝送路となる光導波路コアを、Siを材料として形成する。そして、Siよりも屈折率の低い例えばシリカ等を材料としたクラッドで、光導波路コアの周囲を覆う。このような構成により、光導波路コアとクラッドとの屈折率差が極めて大きくなるため、光導波路コア内に光を強く閉じ込めることができる。その結果、曲げ半径を例えば数 μm 程度まで小さくした、小型の曲線導波路を実現することができる。そのため、電子回路と同程度の大きさの光回路を作成することが可能であり、光デバイス全体の小型化に有利である。

10

【0007】

ここで、Si細線導波路は、偏波によって特性が異なる。そのため、Si細線導波路を用いた波長フィルタには、偏波依存性があるという欠点がある。そこで、偏波依存性を解消するために、波長フィルタとして機能する領域の前段に、偏波分離素子及び偏波回転素子を設ける構造がある（例えば、特許文献2参照）。

【0008】

この構造では、まず、偏波分離素子によって、入力された光信号を、互いに直交するTE偏波とTM偏波とを分離する。次に、偏波回転素子によって、一方の偏波を 90° 回転させる。その結果、波長フィルタに入力される光信号の偏波状態が、TE偏波又はTM偏波のいずれかに統一される。従って、波長フィルタの設計を、TE偏波又はTM偏波のいずれかに対してのみ行えばよく、偏波依存性が解消される。

20

【0009】

偏波分離素子は、例えば、並んで配置された2つのSi細線導波路を有する方向性結合器を利用して構成することができる（例えば、特許文献2参照）。方向性結合器を利用した偏波分離素子では、扁平な断面形状でSi細線導波路のコアを形成する。これによって、TE偏波とTM偏波とに対する、方向性結合器の結合作用長に差を生じさせる。その結果、TE偏波とTM偏波とを異なる経路で出力することができる。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開2011-77133号公報

【特許文献2】特開2009-244326号公報

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol.12, No.6, November/December 2006 p.1371-1379

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0012】

しかしながら、方向性結合器を利用した偏波分離素子では、製造誤差の影響を受けやすい（すなわち、製造トレランスが小さい）という欠点がある。例えば、方向性結合器を構成する2つのSi細線導波路の幅に誤差が生じた場合、各Si細線導波路間における結合効率が劣化する。その結果、TE偏波とTM偏波とを分離できず、一方の偏波を出力すべき経路に、他方の偏波が混入する恐れがある。

【0013】

この発明の目的は、TE偏波とTM偏波との経路を切り換える偏波分離素子として使用できる、製造トレランスが大きい光導波路素子を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

50

【0014】

上述した課題を解決するために、この発明による光導波路素子は、以下の特徴を備えている。

【0015】

この発明による光導波路素子は、第1光導波路コアと第2光導波路コアとを備えて構成される。第1光導波路コアは、 i 次モード(i は0以上の整数)の、TE偏波及びTM偏波のいずれか一方の偏波、並びに l 次モード(l は i とは異なる0以上の整数)のTE偏波及びTM偏波を伝播させる多モード導波路部、及び多モード導波路部と接続されたブラッグ反射部を有している。また、第2光導波路コアは、結合部を有している。

【0016】

ブラッグ反射部には、一方の偏波の l 次モードと i 次モードとを変換してブラッグ反射し、他方の偏波を透過させるグレーティングが形成されている。

【0017】

また、多モード導波路部と結合部とが、互いに離間しかつ並んで配置された双方向結合領域が設定されている。双方向結合領域では、多モード導波路部を伝播する i 次モードの一方の偏波と、結合部を伝播する m 次モード(m は i とは異なる0以上の整数)の一方の偏波とが結合される。

【発明の効果】

【0018】

この発明による光導波路素子では、ブラッグ反射部のグレーティングによって、TE偏波とTM偏波を分離することができる。さらに、グレーティングにおいて反射される一方の偏波について、双方向結合領域において、第1光導波路コアと第2光導波路コアとの間で移行させることができる。従って、この一方の偏波を入力ポートとは別の出力ポートから出力することができる。そのため、この発明による光導波路素子は、TE偏波とTM偏波との経路を切り換える偏波分離素子として使用することができる。

【0019】

また、この発明による光導波路素子では、偏波の分離を行うグレーティングを含む各構成要素を、簡易な導波路作成プロセスで作成することができる。そのため、方向性結合器を利用した偏波分離素子と比して、製造トレランスを改善することができる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】(A)及び(B)は、実施の形態による光導波路素子を説明するための模式図である。

【図2】グレーティングを説明するための模式図である。

【図3】グレーティングを説明するための模式図である。

【図4】ブラッグ反射帯域の拡大について説明するための図である。

【図5】グレーティングを説明するための模式図である。

【図6】双方向結合領域を説明するための模式図である。

【図7】グレーティングの設計例を決定するための図である。

【図8】(A)及び(B)は、グレーティングの設計例を決定するための図である。

【図9】グレーティングの特性を評価するための図である。

【図10】双方向結合領域の設計例を決定するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、図を参照して、この発明の実施の形態について説明するが、各構成要素の形状、大きさ及び配置関係については、この発明が理解できる程度に概略的に示したものに過ぎない。また、以下、この発明の好適な構成例につき説明するが、各構成要素の材質及び数値的条件などは、単なる好適例にすぎない。従って、この発明は以下の実施の形態に限定されるものではなく、この発明の構成の範囲を逸脱せずにこの発明の効果を達成できる多くの変更又は変形を行うことができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 2 】

(構成)

図 1 (A) 及び (B) を参照して、この実施の形態による光導波路素子について説明する。図 1 (A) は、光導波路素子を示す概略的平面図である。なお、図 1 では、後述するクラッド層を省略して示してある。図 1 (B) は、図 1 (A) に示す光導波路素子を I - I 線で切り取った概略的端面図である。

【 0 0 2 3 】

光導波路素子 1 0 0 は、支持基板 1 0 と、クラッド層 2 0 と、第 1 ポート 3 5、多モード導波路部 3 1、第 1 テーパ部 3 9 a、プラグ反射部 3 3、第 2 テーパ部 3 9 b 及び第 2 ポート 3 7 を有する第 1 光導波路コア 3 0 と、結合部 5 1 及び第 3 ポート 5 7 を有する第 2 光導波路コア 5 0 とを備えて構成されている。また、プラグ反射部 3 3 には、特定の波長の光を反射するグレーティング 4 0 が形成されている。また、多モード導波路部 3 1 と、結合部 5 1 とが互いに離間しかつ並んで配置された双方向結合領域 6 0 が設定されている。

10

【 0 0 2 4 】

なお、以下の説明において、支持基板 1 0 の厚さに沿った方向を厚さ方向とする。また、第 1 光導波路コア 3 0 及び第 2 光導波路コア 5 0 について、これらを伝播する光の伝播方向に沿った方向を長さ方向とする。また、長さ方向及び厚さ方向に直交する方向を幅方向とする。

【 0 0 2 5 】

支持基板 1 0 は、例えば単結晶 S i を材料とした平板状体として構成されている。

20

【 0 0 2 6 】

クラッド層 2 0 は、支持基板 1 0 上に、支持基板 1 0 の上面 1 0 a を被覆し、かつ第 1 光導波路コア 3 0 及び第 2 光導波路コア 5 0 を包含して形成されている。そして、クラッド層 2 0 は、例えば S i O₂ を材料として形成されている。

【 0 0 2 7 】

第 1 光導波路コア 3 0 は、クラッド層 2 0 よりも高い屈折率を有する例えば S i を材料として形成されている。その結果、第 1 光導波路コア 3 0 は、光の伝送路として機能し、第 1 光導波路コア 3 0 に入射された光が第 1 光導波路コア 3 0 の平面形状に応じた伝播方向に伝播する。また、第 2 光導波路コア 5 0 は、第 1 光導波路コア 3 0 と同様に、クラッド層 2 0 よりも高い屈折率を有する例えば S i を材料として形成されている。その結果、第 2 光導波路コア 5 0 は、光の伝送路として機能し、第 2 光導波路コア 5 0 に入射された光が第 2 光導波路コア 5 0 の平面形状に応じた伝播方向に伝播する。

30

【 0 0 2 8 】

光導波路素子 1 0 0 は、例えば、入力される光信号の T E 偏波と T M 偏波との経路を切り換える偏波分離素子として使用される。ここでは、一例として、第 1 ポート 3 5 から基本モード (0 次モード) の光信号を入力し、基本モードの T M 偏波を第 2 ポート 3 7 から出力し、かつ基本モードの T E 偏波を第 3 ポート 5 7 から出力する構成例について説明する。

【 0 0 2 9 】

この例では、基本モードの光信号は、第 1 光導波路コア 3 0 の第 1 ポート 3 5 に入力され、多モード導波路部 3 1 を経てプラグ反射部 3 3 に送られる。光信号に含まれる基本モードの T E 偏波は、プラグ反射部 3 3 に形成されたグレーティング 4 0 において、1 次モードに変換されてプラグ反射され、再び多モード導波路部 3 1 に送られる。基本モードの T M 偏波は、モード変換されずに、グレーティング 4 0 を透過して第 2 ポート 3 7 から出力される。グレーティング 4 0 で反射され、多モード導波路部 3 1 を伝播する 1 次モードの T E 偏波は、双方向結合領域 6 0 において、基本モードに変換されて、第 2 光導波路コア 5 0 の結合部 5 1 へ送られる。基本モードの T E 偏波は、結合部 5 1 を経て、第 3 ポート 5 7 から出力される。

40

【 0 0 3 0 】

50

第1ポート35は、シングルモード条件を達成する厚さ及び幅に設定されている。従って、基本モードの光を伝播させる。第1ポート35の一端35aは、多モード導波路部31の他端31bと接続されている。

【0031】

多モード導波路部31は、基本モードのTE偏波及びTM偏波、並びに1次モードのTE偏波を伝播させる。なお、多モード導波路部31の幾何学的な設計については後述する。多モード導波路部31は、第1テーパ部39aを介してブラッグ反射部33と接続されている。第1テーパ部39aの幅は、光の伝播方向に沿って、多モード導波路部31の一端31aの幅からブラッグ反射部33の一端33aの幅へ、連続的に変化するように設定されている。第1テーパ部39aを設けることによって、多モード導波路部31及びブラッグ反射部33間を伝播する光の反射を緩和することができる。

10

【0032】

ブラッグ反射部33には、グレーティング40が形成されている。図2を参照して、グレーティング40について説明する。図2は、ブラッグ反射部に形成されたグレーティングを説明するための概略的平面図である。なお、図2では、支持基板及びクラッド層を省略して示してある。

【0033】

この実施の形態では、グレーティング40は、特定の波長のTE偏波を、基本モードと1次モードとを変換してブラッグ反射する。また、基本モードのTM偏波を透過させる。

【0034】

グレーティングにおけるブラッグ反射条件は、下式(1)で表される。なお、 N_a 及び N_b は、グレーティングにおいて結合される、入射光及び反射光の等価屈折率を示す。 N_a 及び N_b におけるa及びbは、0以上の整数であり、それぞれ入射光及び反射光の次数を示す。また、 Λ はグレーティングの周期を示す。そして、グレーティングでは、下式(1)が成立する波長 λ 、すなわちブラッグ波長の光がブラッグ反射される。

20

【0035】

$$(N_a + N_b) \Lambda = m \lambda \quad \dots (1)$$

【0036】

等価屈折率 N_a 及び N_b には波長依存性があるため、特定の波長 λ に対してのみ上式(1)が成立する。また、等価屈折率 N_a 及び N_b には偏波依存性があるため、等価屈折率 N_a 及び N_b は、TE偏波とTM偏波とで異なる値となる。

30

【0037】

上式(1)に基づき、波長 λ_{TE} のTE偏波を、基本モードと1次モードとを変換してブラッグ反射する条件は、下式(2)で表される。なお、 N_{TE0} はTE偏波の基本モードの等価屈折率を、 N_{TE1} はTE偏波の1次モードの等価屈折率を、それぞれ示す。

【0038】

$$(N_{TE0} + N_{TE1}) \Lambda = \lambda_{TE} \quad \dots (2)$$

【0039】

波長 λ_{TE} で、基本モードのTM偏波が、基本モード及び他の次数モードのTM偏波と結合されない条件において、基本モードのTM偏波はグレーティングを透過する。従って、基本モードのTM偏波がグレーティングを透過する条件は、下式(3)で表される。なお、 N_{TM0} はTM偏波の基本モードの等価屈折率を、 N_{TMj} はTM偏波のj次モード(jは0以上の整数)の等価屈折率を、それぞれ示す。

40

【0040】

$$(N_{TM0} + N_{TMj}) \Lambda = \lambda_{TE} \quad \dots (3)$$

【0041】

グレーティング40は、基部41と突出部43a及び43bとを一体的に含んで構成されている。基部41は、一定の幅 W_1 で、光の伝播方向に沿って延在して形成されている。突出部43a及び43bは、基部41の両側面に、それぞれ周期的に複数形成されている。基部41の幅 W_1 、突出部43a及び43bの突出幅 D 、及び突出部43a及び43b

50

の周期は、上式(2)及び(3)がともに成立するように設計される。また、基部41の一方の側面に形成された突出部43aと、他方の側面に形成された突出部43bとは、半周期(すなわち $\lambda/2$)ずれて配置されている。

【0042】

その結果、多モード導波路部31から送られる、波長 λ_{TE} の基本モードのTE偏波は、グレーティング40において、1次モードに変換されて反射される。ブラッグ反射された1次モードのTE偏波は、再び多モード導波路部31へ送られる。一方、基本モードのTM偏波は、モード変換及びブラッグ反射されずに、グレーティング40を透過する。グレーティング40を透過した基本モードのTM偏波は、第2テーパ部39bを経て第2ポート37へ送られる。

10

【0043】

ここで、グレーティング40の変形例として、周期 Λ を一定に設定し、突出部43a及び43bの突出幅Dが周期毎に変化する構成とすることができる。図3を参照して、グレーティング40の変形例について説明する。図3は、グレーティングの変形例を説明するための概略的平面図である。なお、図3では、支持基板及びクラッド層を省略して示している。

【0044】

図3に示す構成例では、第1周期目の突出部43a及び43bの突出幅 $D = D_0$ に対して、周期毎に突出幅Dが一定の変化量 ΔD ずつ増加する。従って、第k周期では、突出部43a及び43bの突出幅Dが $D_0 + \Delta D(k-1)$ となる。

20

【0045】

突出部43a及び43bの突出幅Dが変化することによって、上式(2)及び(3)を満足するブラッグ波長 λ_{TE} が変化し、それに伴い等価屈折率が変化する。従って、突出幅Dを変化させることによって、グレーティング40においてブラッグ反射される波長帯域(ブラッグ反射帯域)を拡大することができる。

【0046】

図4を参照して、ブラッグ反射帯域の拡大について説明する。図4では、横軸に波長を、また、縦軸に反射強度をそれぞれ取って示している。なお、グレーティング40の第 $k-1$ 周期におけるブラッグ波長を λ_{k-1} 、第k周期におけるブラッグ波長を λ_k 、及び第 $k+1$ 周期におけるブラッグ波長を λ_{k+1} とする。

30

【0047】

図4に示すように、周期毎に突出幅Dが ΔD 増加すると、隣り合う周期のブラッグ波長の中心波長が長波長側に $\Delta\lambda$ シフトする。

【0048】

周期毎のブラッグ波長のシフト量 $\Delta\lambda$ は、突出幅Dの変化量 ΔD を用いて、近似的に下式(4)で表すことができる。なお、 N_0 は基本モードの等価屈折率を、 N_1 は1次モードの等価屈折率を、それぞれ示す。この実施の形態では、グレーティング40がTE偏波をブラッグ反射する構成例であるため、 N_0 はTE偏波の基本モードの等価屈折率に、 N_1 はTE偏波の1次モードの等価屈折率に、それぞれ対応する。

【0049】

【数1】

$$\Delta\lambda \doteq \frac{\Lambda \frac{\partial(N_0+N_1)}{\partial D_0} \Delta D}{1-\Lambda \frac{\partial(N_0+N_1)}{\partial \lambda}} \quad \dots (4)$$

40

【0050】

従って、 ΔD を調整し、各周期のブラッグ波長がオーバーラップするように Λ を設定することによって、ブラッグ反射帯域を拡大することができる。例えばk周期のグレーティング40を形成する場合には、突出幅Dが一定である場合と比して、ブラッグ反射帯域

50

を $\times k$ 程度拡大することができる。その結果、ブラッグ反射の波長依存性を緩和することができる。

【0051】

また、グレーティング40におけるブラッグ反射帯域を拡大する、他の変形例として、突出部43a及び43bの突出幅D及びデューティ比を一定として、周期 Λ が周期毎に変化する構成とすることもできる。この変形例を図5に示す。図5に示す構成例では、第1周期目の周期 Λ_0 に対して、周期毎に周期 Λ が一定の変化量 $\Delta\Lambda$ で $\Delta\Lambda$ ずつ増加する。従って、第k周期では、周期 Λ が $\Lambda_0 + \Delta\Lambda(k-1)$ となる。

【0052】

周期 Λ が変化することによって、上式(2)及び(3)を満足するブラッグ波長 λ_{TE} が変化し、それに伴い等価屈折率が変化する。従って、周期 Λ を変化させることでも、グレーティング40においてブラッグ反射帯域を拡大することができる。周期毎のブラッグ波長のシフト量 $\Delta\lambda$ は、周期 Λ の変化量 $\Delta\Lambda$ を用いて、近似的に下式(5)で表すことができる。

【0053】

【数2】

$$\Delta\lambda \doteq \frac{(N_0+N_1)\Delta\Lambda}{1 - \frac{\partial(N_0+N_1)}{\partial\lambda}(\Lambda_0+\Delta\Lambda)} \quad \dots (5)$$

【0054】

従って、 $\Delta\lambda$ を調整し、各周期のブラッグ波長がオーバーラップするように $\Delta\lambda$ を設定することによって、ブラッグ反射帯域を拡大することができる。突出幅Dを変化させる場合と同様に、例えばk周期のグレーティング40を形成する場合には、周期 Λ が一定である場合と比して、ブラッグ反射帯域を $\times k$ 程度拡大することができる。その結果、ブラッグ反射の波長依存性を緩和することができる。

【0055】

第2ポート37は、シングルモード条件を達成する厚さ及び幅に設定されている。従って、基本モードの光を伝播させる。第2ポート37は、第2テーパ部39bを介してブラッグ反射部33と接続されている。第2テーパ部39bは、ブラッグ反射部33の他端33bの幅から第2ポート37の一端37aの幅へ、連続的に変化するように設定されている。第2テーパ部39bを設けることによって、ブラッグ反射部33及び第2ポート37間を伝播する光の反射を緩和することができる。

【0056】

結合部51は、第1光導波路コア30の多モード導波路部31と、互いに離間し、かつ並んで配置されている。結合部51は、シングルモード条件を達成する厚さ及び幅に設定されている。従って、結合部51は、基本モードの光を伝播させる。さらに、結合部51の他端51bは、第3ポート57と接続されている。

【0057】

第3ポート57は、シングルモード条件を達成する厚さ及び幅に設定されている。従って、第3ポート57は、基本モードの光を伝播させる。

【0058】

また、光導波路素子100では、第1光導波路コア30の多モード導波路部31と、第2光導波路コア50の結合部51とが、互いに離間しかつ並んで配置された双方向結合領域60が設定されている。図6を参照して、双方向結合領域60について説明する。図6は、双方向結合領域60を説明するための概略的平面図である。なお、図6では、支持基板及びクラッド層を省略して示してある。

【0059】

双方向結合領域60では、多モード導波路部31を伝播する1次モードのTE偏波と、結合部51を伝播する基本モードのTE偏波とが結合される。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 0 】

多モード導波路部 3 1 及び結合部 5 1 は、それぞれの中心軸が平行とされている。さらに、多モード導波路部 3 1 及び結合部 5 1 は、多モード導波路部 3 1 の一端 3 1 a と結合部 5 1 の一端 5 1 a とが揃って配置されている。また、多モード導波路部 3 1 の他端 3 1 b と結合部 5 1 の他端 5 1 b とが揃って配置されている。

【 0 0 6 1 】

多モード導波路部 3 1 は、一端 3 1 a から他端 3 1 b へ、幅が連続的に縮小するテーパ形状とされている。多モード導波路部 3 1 の一端 3 1 a の幅 W_2 は、基本モード及び 1 次モードの TE 偏波、並びに基本モードの TM 偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定されている。また、多モード導波路部 3 1 の他端 3 1 b の幅 W_3 は、基本モードの TE 偏波及び TM 偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定されている。

10

【 0 0 6 2 】

また、結合部 5 1 は、一端 5 1 a から他端 5 1 b へ、幅が連続的に拡大するテーパ形状とされている。結合部 5 1 の一端 5 1 a の幅 W_4 及び他端 5 1 b の幅 W_5 は、それぞれ基本モードの TE 偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定されている。

【 0 0 6 3 】

多モード導波路部 3 1 の一端 3 1 a における 1 次モードの TE 偏波の伝播定数は、結合部 5 1 の一端 5 1 a における基本モードの TE 偏波の伝播定数よりも大きく設定されている。また、多モード導波路部 3 1 の他端 3 1 b における基本モードの TE 偏波の伝播定数は、結合部 5 1 の他端 5 1 b における基本モードの TE 偏波の伝播定数よりも大きく設定されている。

20

【 0 0 6 4 】

このように設計した双方向結合領域 6 0 では、多モード導波路部 3 1 の 1 次モードの TE 偏波の伝播定数と、結合部 5 1 の基本モードの TE 偏波の伝播定数とが一致する点が存在する。その結果、多モード導波路部 3 1 を伝播する 1 次モードの TE 偏波と、結合部 5 1 を伝播する基本モードの TE 偏波とを結合することができる。従って、ブラッグ反射部 3 3 から送られ、一端 3 1 a 側から多モード導波路部 3 1 に入力される 1 次モードの TE 偏波は、基本モードに変換されて結合部 5 1 に移行する。なお、上述したように、多モード導波路部 3 1 の他端 3 1 b における基本モードの TE 偏波の伝播定数は、結合部 5 1 の他端 5 1 b における基本モードの TE 偏波の伝播定数よりも大きく設定されている。そのため、他端 3 1 b 側から多モード導波路部 3 1 に入力される基本モードの TE 偏波が、結合部 5 1 に移行する恐れはない。

30

【 0 0 6 5 】

以上説明したように、この実施の形態による光導波路素子 1 0 0 では、ブラッグ反射部 3 3 のグレーティング 4 0 によって、TE 偏波と TM 偏波を分離することができる。さらに、グレーティング 4 0 において反射された TE 偏波を、双方向結合領域 6 0 において、第 1 光導波路コア 3 0 から第 2 光導波路コア 5 0 へ移行することができる。従って、TE 偏波を入力ポートとは別の出力ポートから出力することができる。そのため、光導波路素子 1 0 0 は、TE 偏波と TM 偏波との経路を切り換える偏波分離素子として使用することができる。

40

【 0 0 6 6 】

また、実質的に偏波の分離を行うグレーティング 4 0 を含む、光導波路素子 1 0 0 の各構成要素は、簡易な導波路作成プロセスで作成可能である。そのため、方向性結合器を利用した偏波分離素子と比して、製造トレランスを改善することができる。

【 0 0 6 7 】

なお、ここでは、グレーティング 4 0 が、TE 偏波の基本モードと 1 次モードとを変換してブラッグ反射する構成について説明した。しかしながら、この発明による光導波路素子 1 0 0 は、この構成に限定されない。

【 0 0 6 8 】

下式 (6) 及び (7) がともに成立するように設計することによって、波長 λ_{TE} の T

50

E 偏波の 1 次モード (1 は 0 以上の整数) と i 次モード (i は 1 とは異なる 0 以上の整数) とを変換してブラッグ反射し、かつ TM 偏波を透過させるグレーティング 40 を形成することができる。なお、 N_{TE1} は TE 偏波の 1 次モードの等価屈折率を、 N_{TEi} は TE 偏波の i 次モードの等価屈折率を、 N_{TM1} は TM 偏波の 1 次モードの等価屈折率を、 N_{TMj} は TM 偏波の j 次モード (j は 0 以上の整数) の等価屈折率を、それぞれ示す。

【 0 0 6 9 】

$$(N_{TE1} + N_{TEi}) = N_{TE} \cdots (6)$$

【 0 0 7 0 】

$$(N_{TM1} + N_{TMj}) = N_{TM} \cdots (7)$$

【 0 0 7 1 】

あるいは、下式 (8) 及び (9) がともに成立するように設計することによって、波長 λ_{TM} の TM 偏波の 1 次モードと i 次モードとを変換してブラッグ反射し、かつ TE 偏波を透過させるグレーティング 40 を形成することもできる。

【 0 0 7 2 】

$$(N_{TM1} + N_{TMi}) = N_{TM} \cdots (8)$$

【 0 0 7 3 】

$$(N_{TE1} + N_{TEj}) = N_{TE} \cdots (9)$$

【 0 0 7 4 】

また、双方向結合領域 60 において結合される光についても、基本モードの TE 偏波と 1 次モードの TE 偏波とに限定されない。多モード導波路部 31 の一端 31 a の幅 W2 及び他端 31 b の幅 W3、並びに結合部 51 の一端 51 a の幅 W4 及び他端 51 b の幅 W5 を、適宜設定することによって、多モード導波路部 31 を伝播する i 次モードの一方の偏波と、結合部 51 を伝播する m 次モード (m は i とは異なる 0 以上の整数) の一方の偏波とを結合することができる。

【 0 0 7 5 】

(製造方法)

この実施の形態による光導波路素子 100 は、例えば SOI (Silicon On Insulator) 基板を利用することによって、簡易に製造することができる。

【 0 0 7 6 】

すなわち、まず、支持基板層、 SiO_2 層、及び Si 層が順次積層されて構成された SOI 基板を用意する。

【 0 0 7 7 】

次に、例えばエッチング技術を用い、Si 層をパターニングすることによって、第 1 光導波路コア 30 及び第 2 光導波路コア 50 を形成する。その結果、支持基板 10 としての支持基板層上に SiO_2 層が積層され、さらに SiO_2 層上に第 1 光導波路コア 30 及び第 2 光導波路コア 50 が形成された構造体を得ることができる。

【 0 0 7 8 】

次に、例えば CVD 法を用いて、 SiO_2 層上に、 SiO_2 を材料とした材料層を、第 1 光導波路コア 30 及び第 2 光導波路コア 50 を被覆して形成する。その結果、 SiO_2 層及び材料層から、第 1 光導波路コア 30 及び第 2 光導波路コア 50 を包含するクラッド層 20 が形成される。

【 0 0 7 9 】

(利用形態)

発明者は、光導波路素子 100 の利用形態として、好適な設計例を決定するためにいくつかのシミュレーションを行った。なお、以下の各シミュレーションでは、光導波路素子 100 に入力される光信号の波長が $1.5 \mu m$ である場合を想定している。そして、グレーティング 40 は、TE 偏波の基本モードと 1 次モードとを変換してブラッグ反射する構成例を想定している。また、双方向結合領域 60 は、基本モードの TE 偏波と 1 次モードの TE 偏波とを結合する構成例を想定している。また、第 1 光導波路コア 30 及び第 2 光導波路コア 50 を厚さ $0.22 \mu m$ の Si 製とし、クラッド層 20 を SiO_2 製とした。

10

20

30

40

50

【0080】

まず、FEM (Finite Element Method) を用い、上式(2)及び(3)がともに成立するグレーティング40の設計の好適例について検討した。

【0081】

このシミュレーションでは、グレーティング40の基部41の幅 W_1 と、基本モード及び1次モードのTE偏波、並びに基本モード及び1次モードのTM偏波のそれぞれの等価屈折率との関係を確認した。なお、このシミュレーションでは、グレーティング40の突出部43a及び43bの突出幅 D を $0.1\mu\text{m}$ の一定とした。

【0082】

シミュレーションの結果を図7に示す。図7は、グレーティング40の基部41の幅 W_1 と、各等価屈折率との関係を示す図である。図7では、縦軸に等価屈折率を任意の目盛で、また、横軸に基部41の幅 W_1 を μm 単位で取って示してある。また、図7において、 \square は基本モードのTE偏波の結果を、 \triangle は1次モードのTE偏波の結果を、 \circ は基本モードのTM偏波の結果を、及び \times は1次モードのTM偏波の結果を、それぞれ示している。

10

【0083】

図7に示すように、基部41の幅 W_1 を $0.52\mu\text{m}$ よりも小さく設定する構成では、1次モードのTM偏波の等価屈折率がカットオフとなる。また、基部41の幅 W_1 を $0.3\mu\text{m}$ よりも小さく設定する構成では、1次モードのTE偏波の等価屈折率がカットオフとなる。従って、基部41の幅 W_1 を $0.3 < W_1 < \sim 0.52$ の範囲内とすることによって、グレーティング40において、1次モードのTE偏波を伝播可能とし、かつ1次モードのTM偏波を伝播不可能とすることができる。

20

【0084】

この結果に基づき、発明者は、基部41の幅 W_1 を $0.4\mu\text{m}$ に決定した。図7に示すように、基部41の幅 W_1 が $0.4\mu\text{m}$ であるとき、基本モードのTE偏波の等価屈折率は 2.487 となり、また、1次モードのTE偏波の等価屈折率は 1.602 となる。このとき、ブラッグ波長を $\lambda_{TE} = 1.5\mu\text{m}$ として、上式(2)から、グレーティング40の周期が $\Lambda = 0.367\mu\text{m}$ に決定される。従って、基部41の幅 W_1 を $0.4\mu\text{m}$ 、突出部43a及び43bの突出幅 D を $0.1\mu\text{m}$ 、及び周期 Λ を $0.367\mu\text{m}$ にそれぞれ設計することによって、グレーティング40において、波長 $1.5\mu\text{m}$ の基本モードのTE偏波を、1次モードに変換してブラッグ反射させることができる。

30

【0085】

また、図7に示すように、基部41の幅 W_1 が $0.4\mu\text{m}$ であるとき、基本モードのTM偏波の等価屈折率は 1.839 となる。このとき、ブラッグ波長を $\lambda_{TE} = 1.5\mu\text{m}$ とすると、上式(3)の右辺と左辺とが一致しない。この結果から、上述した設計において、波長 $1.5\mu\text{m}$ の基本モードのTM偏波が、グレーティング40を透過することが確認された。

【0086】

次に、発明者は、グレーティング40において、ブラッグ反射帯域を拡大する設計について検討した。ここでは、周期 Λ を一定として、突出部43a及び43bの突出幅 D が周期毎に変化する構成(図3参照)について、突出幅 D の変化量 ΔD を決定した。

40

【0087】

上式(4)を変形することによって、下式(10)が導かれる。

【0088】

【数3】

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta D} \doteq \frac{\Lambda \frac{\partial(N_0+N_1)}{\partial D_0}}{1-\Lambda \frac{\partial(N_0+N_1)}{\partial \lambda}} \quad \dots (10)$$

50

【 0 0 8 9 】

このシミュレーションでは、上式(10)に基づき、基本モードのTE偏波の等価屈折率及び1次モードのTE偏波の等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の、波長分散及びDに係る構造分散を確認した。

【 0 0 9 0 】

シミュレーションの結果を図8(A)及び(B)に示す。図8(A)は、波長と等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の関係を示す図である。図8(A)では、縦軸に等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)を任意の目盛で、また、横軸に波長を μm 単位で取って示してある。また、図8(B)は、突出幅Dの変化量Dと等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の関係を示す図である。図8(B)では、縦軸に等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)を任意の目盛で、また、横軸に突出幅Dの変化量Dを μm 単位で取って示してある。

10

【 0 0 9 1 】

図8(A)における、波長と等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の関係を線形近似と仮定すると、傾き-1.83が得られる。これを、等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の波長分散として、上式(10)の $\{ (N_0 + N_1) \} / ()$ に代入する。また、図8(B)における、突出幅Dの変化量Dと等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の関係を線形近似と仮定すると、傾き2.63が得られる。これを、等価屈折率の和($N_{TE0} + N_{TE1}$)の構造分散として、上式(10)の $\{ (N_0 + N_1) \} / (D_0)$ に代入する。さらに、図7に係るシミュレーションにおいて決定した周期 $= 0.367 \mu\text{m}$ を代入して、上式(10)から $/ D = 0.576$ が得られる。

20

【 0 0 9 2 】

ここで、例えば、100周期のグレーティング40を形成し、ブラッグ波長を $0.1 \mu\text{m}$ 拡大することを想定する(すなわち $\times 100 = 0.1$)。その場合には、シミュレーションによって得られた $/ D = 0.576$ を用いて、Dを $0.0018 \mu\text{m}$ と決定できる。

【 0 0 9 3 】

次に、発明者は、3次元FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いて、図7及び図8に係るシミュレーションから決定した設計のグレーティング40について特性を評価した。このシミュレーションでは、基本モードのTE偏波及びTM偏波を含む光をグレーティング40に入力した。そして、グレーティング40からの反射光に含まれる各偏波、及びグレーティング40からの透過光に含まれる各偏波の強度を観測した。なお、グレーティング40からの反射光については、1次モードを観測した。また、グレーティング40からの透過光については、基本モードを観測した。

30

【 0 0 9 4 】

シミュレーションの結果を図9に示す。図9は、特性評価の結果を示す図である。図9では、縦軸に光の強度をdB目盛で、また、横軸に波長を μm 単位で取って示してある。

【 0 0 9 5 】

図9に示すように、グレーティング40からの反射光では、1次モードのTE偏波が、1次モードのTM偏波に比して大きく含まれている。図9から、反射光に含まれる1次モードのTE偏波及びTM偏波の偏波間消光比を、少なくとも35dB程度確保できることが確認された。また、図9に示すように、グレーティング40からの透過光では、基本モードのTM偏波が、基本モードのTE偏波に比して大きく含まれている。図9から、透過光に含まれる基本モードのTE偏波及びTM偏波の偏波間消光比を、少なくとも50dB程度確保できることが確認された。図9の結果から、グレーティング40を用いることによって、十分な偏波間消光比でTE偏波とTM偏波とを分離できることが確認された。

40

【 0 0 9 6 】

次に、発明者は、双方向結合領域60の好適な設計例について検討した。

【 0 0 9 7 】

50

既に説明したように、双方向結合領域60に含まれる多モード導波路部31については、一端31aの幅W2を、基本モード及び1次モードのTE偏波、並びに基本モードのTM偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定する。また、他端31bの幅W3を、基本モードのTE偏波及びTM偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定する。一方、双方向結合領域60に含まれる結合部51については、結合部51の一端51aの幅W4及び他端51bの幅W5を、それぞれ基本モードのTE偏波を伝播可能な伝播定数に対応して設定する。そして、多モード導波路部31の一端31aにおける1次モードのTE偏波の伝播定数を、結合部51の一端51aにおける基本モードのTE偏波の伝播定数よりも大きく設定する。また、多モード導波路部31の他端31bにおける基本モードのTE偏波の伝播定数は、結合部51の他端51bにおける基本モードのTE偏波の伝播定数よりも大きく設定する。発明者は、これらの条件を満たす多モード導波路部31及び結合部51を、FEMを用いて決定した。

10

【0098】

図10は、FEMを用いて算出した、光導波路コアの幅と等価屈折率との関係を示す図である。図10では、縦軸に等価屈折率を任意の目盛で、また、横軸に光導波路コアの幅を μm 単位で取って示してある。なお、図10において、 \square は基本モードのTE偏波の結果を、 \triangle は1次モードのTE偏波の結果を、及び \diamond は基本モードのTM偏波の結果を、それぞれ示している。

【0099】

まず、多モード導波路部31の一端31aの幅W2を、基本モード及び1次モードのTE偏波、並びに基本モードのTM偏波を伝播可能な幅として、 $W2 = 0.6 \mu\text{m}$ に決定した。なお、 $W2 = 0.6 \mu\text{m}$ では、TM偏波は、基本モードのみが伝播可能である。

20

【0100】

次に、多モード導波路部31の他端31bの幅W3として、TE偏波及びTM偏波が、基本モードのみ伝播可能となる条件を見出す。図10に示すように、光導波路コアの幅が $0.4 \mu\text{m}$ よりも小さくなる条件において、1次モードのTE偏波の等価屈折率がカットオフとなる。従って、多モード導波路部31の他端31bの幅W3を、 $W3 < 0.4 \mu\text{m}$ とする。ここでは、 $W3 = 0.35 \mu\text{m}$ に決定した。

【0101】

次に、多モード導波路部31の一端31aにおける1次モードのTE偏波の伝播定数が、結合部51の一端51aにおける基本モードのTE偏波の伝播定数よりも大きくなる条件で、結合部51の一端51aの幅W4を決定する。多モード導波路部31の一端31aの幅W2を $W2 = 0.6 \mu\text{m}$ とする。図10に示すように、光導波路コアの幅が $0.6 \mu\text{m}$ のときの1次モードのTE偏波の等価屈折率は、光導波路コアの幅が 0.28 よりも小さい条件における、基本モードのTE偏波の等価屈折率よりも大きくなる。従って、結合部51の一端51aの幅W4を $W4 < 0.28 \mu\text{m}$ とする。ここでは、 $W4 = 0.1 \mu\text{m}$ に決定した。

30

【0102】

次に、多モード導波路部31の他端31bにおける基本モードのTE偏波の伝播定数が、結合部51の他端51bにおける基本モードのTE偏波の伝播定数よりも大きくなる条件で、結合部51の他端51bの幅W5を決定する。この条件は、 $W3 > W5 > W4$ を満たすことで達成される。ここでは、 $W5 = 0.25 \mu\text{m}$ に決定した。

40

【0103】

また、多モード導波路部31と結合部51との中心間距離W6、及び双方向結合領域60の長さ(結合長)L1は、多モード導波路部31を伝播する1次モードのTE偏波と結合部51を伝播する1次モードのTE偏波とで結合が生じる寸法で設計する。ここでは、中心間距離 $W6 = 0.78 \mu\text{m}$ 、及び結合長 $L1 = 100 \mu\text{m}$ に決定した(図6参照)。

【0104】

以上に説明した設計の双方向結合領域60について、発明者は、BPM(Beam Propagation Method)を用いて特性を評価した。その結果、多モード導

50

波路部 3 1 を伝播する 1 次モードの T E 偏波と結合部 5 1 を伝播する基本モードの T E 偏波との結合効率は、 -0.15 dB 程度であった。また、多モード導波路部 3 1 を伝播する基本モードの T E 偏波及び T M 偏波が、結合部 5 1 に移行しないことが確認された。この結果から、双方向結合領域 6 0 が、一方の偏波の特定のモードに対する変換及び分離機能を有することが確認された。

【符号の説明】

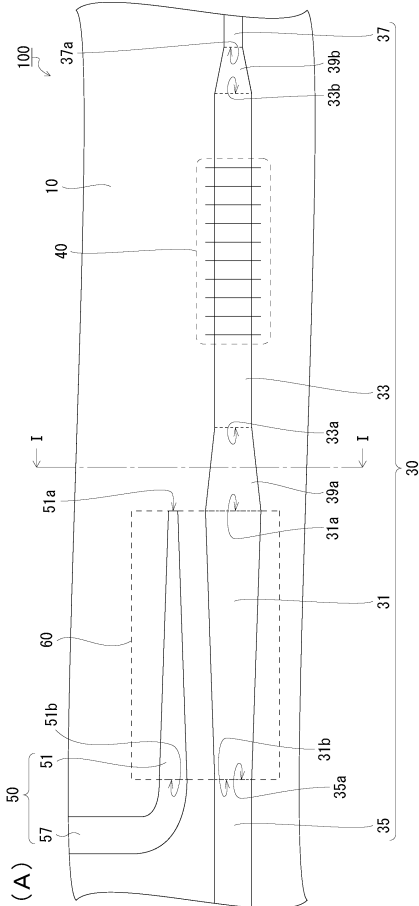
【 0 1 0 5 】

- 1 0 : 支持基板
- 2 0 : クラッド層
- 3 0 : 第 1 光導波路コア
- 3 1 : 多モード導波路部
- 3 3 : ブラッグ反射部
- 3 5 : 第 1 ポート
- 3 7 : 第 2 ポート
- 4 0 : グレーティング
- 5 0 : 第 2 光導波路コア
- 5 1 : 結合部
- 5 7 : 第 3 ポート
- 6 0 : 双方向結合領域
- 1 0 0 : 光導波路素子

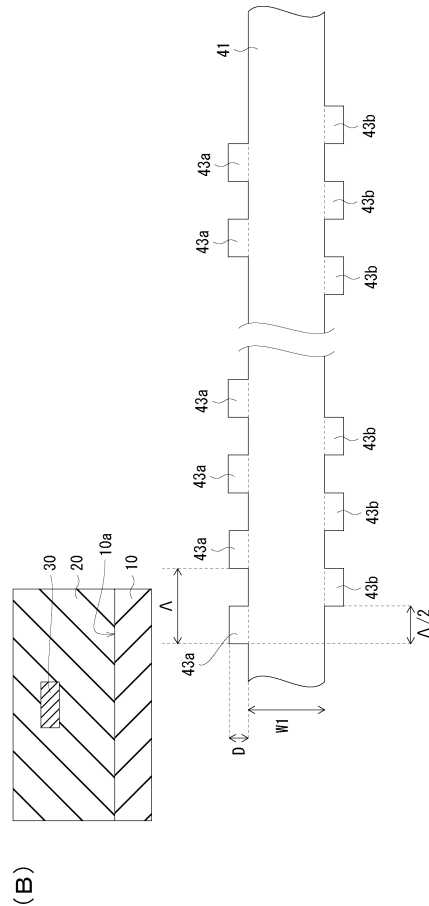
10

20

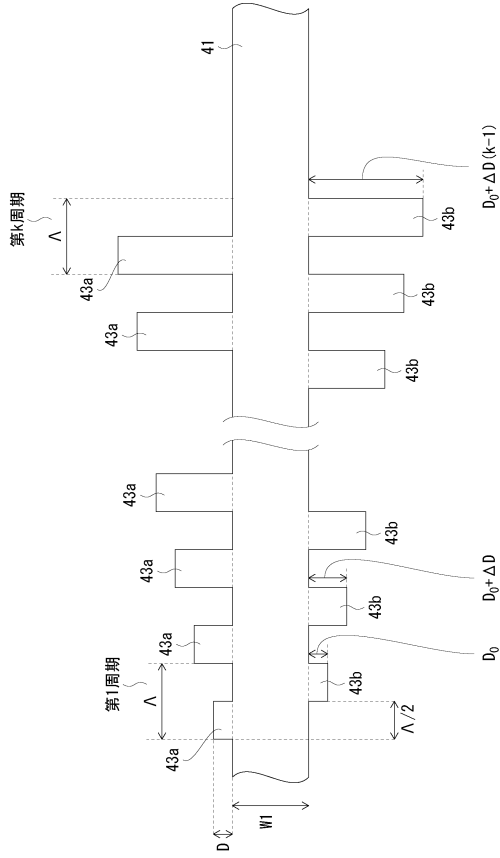
【 図 1 】



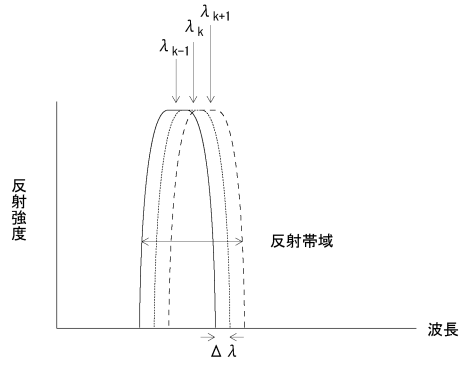
【 図 2 】



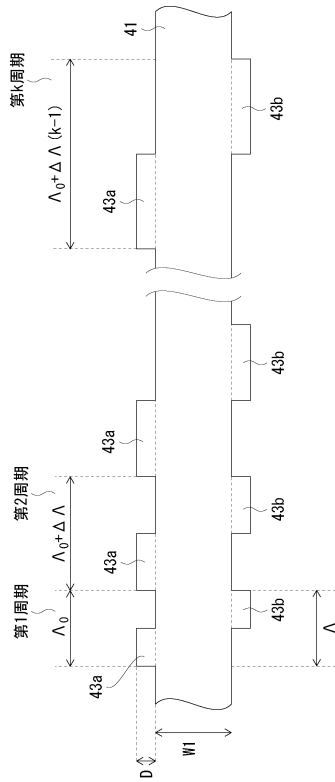
【図3】



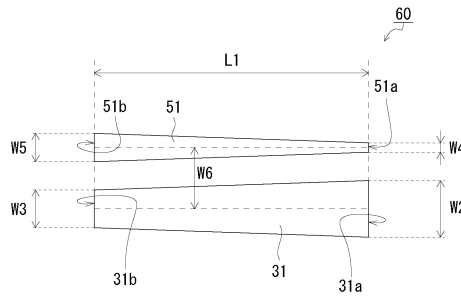
【図4】



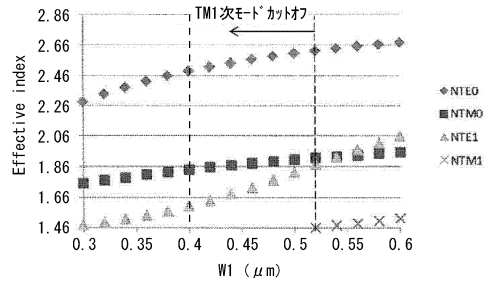
【図5】



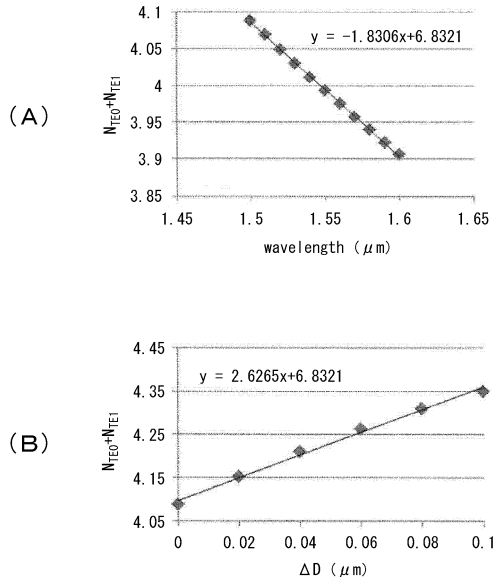
【図6】



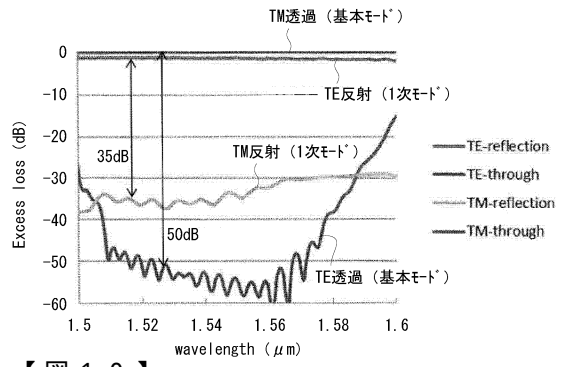
【図7】



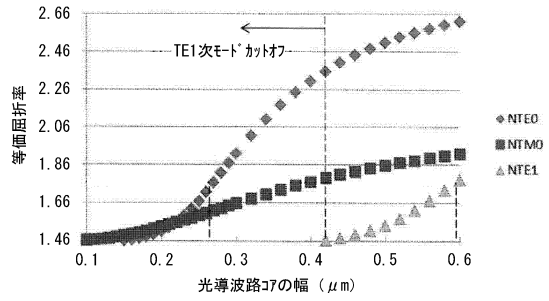
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2006-235380(JP,A)
米国特許第3891302(US,A)
特開2006-269543(JP,A)
米国特許出願公開第2012/0288229(US,A1)
米国特許出願公開第2002/0122629(US,A1)
Y.-B. Cho, et al., "Silicon Photonic Wire Filter Using Asymmetric Sidewall Long-Period Waveguide Grating in a Two-Mode Waveguide", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2008年 4月 1日, Vol.20, No.7, p.520-522

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/12 - 6/14
G02F 1/00 - 1/21
G02F 1/29 - 1/39
IEEE Xplore