

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B1)

(11) 特許番号

特許第6127171号
(P6127171)

(45) 発行日 平成29年5月10日 (2017.5.10)

(24) 登録日 平成29年4月14日 (2017.4.14)

(51) Int. Cl.		F 1			
GO2B	6/12	(2006.01)	GO2B	6/12	341
GO2B	6/126	(2006.01)	GO2B	6/126	
GO2B	6/122	(2006.01)	GO2B	6/122	311

請求項の数 4 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2016-35720 (P2016-35720)</p> <p>(22) 出願日 平成28年2月26日 (2016.2.26)</p> <p>審査請求日 平成28年2月26日 (2016.2.26)</p> <p>(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願 (平成25年度国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願)</p>	<p>(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</p> <p>(73) 特許権者 513065077 技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 東京都文京区関口1丁目20番10号</p> <p>(74) 代理人 100141955 弁理士 岡田 宏之</p> <p>(74) 代理人 100085419 弁理士 大垣 孝</p> <p>(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</p> <p>審査官 廣崎 拓登</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
--	--

(54) 【発明の名称】 偏波無依存波長フィルタ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1サブ導波路、第3サブ導波路及び第1モード変換部を長さ方向に直列に備える第1導波路と、

第2サブ導波路、第4サブ導波路及び第2モード変換部を長さ方向に直列に備える第2導波路と

を備え、

前記第1サブ導波路と前記第2サブ導波路は、方向性結合器として機能する第1光結合部を構成し、

前記第1光結合部では、互いに直交して伝播するX偏波及びY偏波に対して、第1サブ導波路を伝播するX偏波の基本モードは、第2サブ導波路にN次モード(Nは0より大きい整数)として移行可能であり、かつ、X偏波の他のモード及びY偏波は第2サブ導波路に移行不可能であり、並びに、第2サブ導波路を伝播するX偏波のN次モードは、第1サブ導波路に基本モードとして移行可能であり、及び、X偏波の他のモード及びY偏波は第1サブ導波路に移行不可能であり、

前記第3サブ導波路と前記第4サブ導波路は、方向性結合器として機能する第2光結合部を構成し、

第2光結合部では、第3サブ導波路を伝搬するY偏波のM次モード(Mは0より大きい整数)は、第4サブ導波路に基本モードとして移行可能であり、かつ、Y偏波の他のモード及びX偏波は、第4サブ導波路に移行不可能であり、並びに、第4サブ導波路を伝搬す

10

20

る Y 偏波の基本モードは、第 3 サブ導波路に M 次モードとして移行可能であり、かつ、Y 偏波の他のモード及び X 偏波は第 3 サブ導波路に移行不可能であり、

前記第 1 モード変換部は、特定の波長に対して、Y 偏波の基本モードを M 次モードにモード次数を変換して反射し、

前記第 2 モード変換部は、特定の波長に対して、X 偏波の N 次モードを基本モードにモード次数を変換して反射する

ことを特徴とする偏波無依存波長フィルタ。

【請求項 2】

第 1 サブ導波路、第 3 サブ導波路及び第 1 モード変換部を長さ方向に直列に備える第 1 導波路と、

10

第 2 サブ導波路、第 4 サブ導波路及び第 2 モード変換部を長さ方向に直列に備える第 2 導波路と

を備え、

前記第 1 サブ導波路と前記第 2 サブ導波路は、方向性結合器として機能する第 1 光結合部を構成し、

前記第 3 サブ導波路と前記第 4 サブ導波路は、方向性結合器として機能する第 2 光結合部を構成し、

前記第 1 モード変換部は、特定の波長に対して、Y 偏波の基本モードを M 次モード (M は 0 より大きい整数) にモード次数を変換して反射し、

前記第 2 モード変換部は、特定の波長に対して、X 偏波の N 次モード (N は 0 より大きい整数) を基本モードにモード次数を変換して反射し、

20

前記第 1 サブ導波路における、X 偏波に対する基本モード及び i 次モード (i は 0 以上の整数) の伝搬定数をそれぞれ a_{x0} 及び a_{xi} とし、前記第 1 サブ導波路における、Y 偏波に対する j 次モード (j は 0 以上の整数) の伝搬定数を a_{yj} とし、前記第 2 サブ導波路における、X 偏波に対する基本モード及び N 次モードの伝搬定数をそれぞれ b_{x0} 及び b_{xN} とし、前記第 2 サブ導波路における、Y 偏波に対する k 次モード (k は 0 以上の整数) の伝搬定数を b_{yk} としたとき、以下の式 (1) が成り立ち、

前記第 3 サブ導波路における、X 偏波に対する i' 次モード (i' は 0 以上の整数) の伝搬定数を $c_{xi'}$ とし、前記第 3 サブ導波路における、Y 偏波に対する基本モード及び M 次モードの伝搬定数を、それぞれ c_{y0} 及び c_{yM} とし、前記第 4 サブ導波路における、X 偏波に対する j' 次モード (j' は 0 以上の整数) の伝搬定数を $d_{xj'}$ とし、前記第 4 サブ導波路における、Y 偏波に対する基本モード及び k' 次モード (k' は 0 以上の整数) の伝搬定数を、それぞれ d_{y0} 及び $d_{yk'}$ としたとき、以下の式 (2) が成り立つ

30

ことを特徴とする偏波無依存波長フィルタ。

【数 3】

$$\beta_{ax0} = \beta_{bxiN}$$

$$\beta_{axi} \neq \beta_{bx0} \quad \dots (1)$$

$$\beta_{ayj} \neq \beta_{byk}$$

40

【数 4】

$$\beta_{cxr'} \neq \beta_{dxj'}$$

$$\beta_{cy0} \neq \beta_{dyk'}$$

$$\beta_{cym} = \beta_{dy0}$$

【請求項 3】

前記第 1 モード変換部及び第 2 モード変換部は、

コア側壁に周期的に屈折率変調領域が形成されたグレーティングであり、

前記第 1 モード変換部及び第 2 モード変換部の屈折率変調周期を Λ_1 及び Λ_2 とし、

前記第 1 モード変換部における、Y 偏波の基本モードと M 次モードの等価屈折率を n_y

50

n_{Y0} 及び n_{YM} とし、前記第 2 モード変換部における、X 偏波の N 次モードと基本モードの等価屈折率を、それぞれ、 n_{XN} 及び n_{X0} とし、ブラッグ波長を λ_b としたときに、以下の式 (3) を満たし、

前記特定の波長が前記ブラッグ波長である

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の偏波無依存波長フィルタ。

【数 5】

$$\begin{aligned} \Lambda_1(n_{Y0} + n_{YM}) &= \lambda_b \\ \Lambda_2(n_{XN} + n_{X0}) &= \lambda_b \end{aligned} \quad \dots (3)$$

【請求項 4】

前記第 1 サブ導波路と前記第 3 サブ導波路は、第 1 テーパ導波路を介して光学的に接続され、前記第 1 テーパ導波路の前記第 1 サブ導波路側の端部の幅は、前記第 1 サブ導波路の幅と等しく、前記第 1 テーパ導波路の前記第 3 サブ導波路側の端部の幅は、前記第 3 サブ導波路の幅と等しく、

前記第 2 サブ導波路と前記第 4 サブ導波路は、第 2 テーパ導波路を介して光学的に接続され、前記第 2 テーパ導波路の前記第 2 サブ導波路側の端部の幅は、前記第 2 サブ導波路の幅と等しく、前記第 2 テーパ導波路の前記第 4 サブ導波路側の端部の幅は、前記第 4 サブ導波路の幅と等しい

ことを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の偏波無依存波長フィルタ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、光導波路素子として構成される偏波無依存波長フィルタに関する。

【背景技術】

【0002】

高速信号処理を要する情報処理機器において、電気配線の帯域制限がボトルネックとなっている。このため、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素子を伝送媒体とした光デバイスを用いて、情報処理機器内の素子間、ボード間又はチップ間等の情報伝達を光信号で行う。

【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、光デバイスは、その組立工程が簡易となるため、量産に適している。

【0005】

特に、電子機能回路の基板と同様の材料であるシリコン（Si）を導波路材料とした光導波路素子では、電子機能回路及び光機能回路を一括形成する光電融合（シリコンフォトニクス）の実現が期待されている（例えば、非特許文献 1 又は非特許文献 2 参照）。シリコンフォトニクスでは、製造に際して、技術成熟した半導体製造技術を流用することができる。

【0006】

光導波路の構造としては、リブ型や埋め込み（細線）型導波路が挙げられるが、特に後者は光の閉じ込めの面で有利であり、光導波路素子の小型化に適する。

【0007】

一方で Si 細線導波路は偏波依存性が大きく、Si 導波路で形成された波長フィルタも

10

20

30

40

50

同様に大きな偏波依存性を示す。ここでの偏波依存性とは、互いに直交するTE (Transverse - Electric) 偏波及びTM (Transverse - Magnetic) 偏波間での動作波長の不一致を指す。このため、Si 細線導波路を用いた波長フィルタを偏波状態が時間と共に変動する環境下で使用する場合には、偏波変動に対し適正な設計処置をとらないと、動作が不安定となる。

【0008】

光導波路素子として構成される波長フィルタには、導波路に周期的な屈折率変調領域を形成したグレーティングを用いたものが知られている。グレーティングはBragg条件を満たす波長のみ選択的に反射する機能をもつため、特定波長を取り出す波長フィルタなどとして利用される。また、Si 細線導波路を用いると屈折率変調強度が大きくなり、グレーティングの反射効率が高まるため、素子長を小さく出来るというメリットがある。しかしながら先にも述べたようにSi 細線導波路は偏波依存性が大きく、グレーティングにおいても偏波依存性を解決するための措置が必要となる。

10

【0009】

Si 細線導波路の偏波依存性を緩和する手法としては、互いに直交して導波路を伝搬するTE 偏波及びTM 偏波の導波モードの伝搬定数(あるいは等価屈折率)を一致させる手法が一般的である。このためには、Si の導波路コアの断面構造を、幅方向と厚み方向とで等方的な正方構造とすれば良い。例えば、SOI ウェハのSOI 層をSi 導波路コアとして用いる場合、導波路コアの幅寸法をSOI 層の厚み寸法に合わせて設計すればよい。

【先行技術文献】

20

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開2011-77133号公報

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】T.Tsuchizawa.et.al."Microphotonics Devices Based on Silicon Mirrofabrication Technology" IEEE Journal of selected topics quantum electronics, vol.11, No.1, 2005 p.232-240

【非特許文献2】H.Yamada.et.al"Si Photonic Wire Waveguide Devices" IEEE Journal of selected topics quantum electronics, vol.12, No.6, November/December 2006 p.1371-1379

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

ところで、Si 細線導波路を用いたデバイス開発において、利用されるSOI ウェハはSOI 層の厚みが220nm、あるいはそれ以下のものが主流となっている。この理由として、シングルモード伝搬条件を確保しつつ、伝搬損失を抑制しやすいということが挙げられる。また、波長フィルタにおける偏波依存性を緩和するためには、Si の導波路コアの断面構造が、幅方向と厚み方向とで等方的な正方構造とされる。従って、設計上のSi 細線導波路の導波路コアの断面寸法を幅×厚さ=220×220nm²とすればよい。

40

【0013】

しかしながら、導波路コアの断面寸法が小さくなるほどSi の導波路コアへの光の閉じ込め作用は弱くなり、導波路外部への放射損失の問題が生じる。波長フィルタの導波路コアの幅及び厚さの寸法として、上記の220nm程度の値を適用しようとする、例えば曲線部での放射損失を抑制するため曲率半径を大きくとらざるを得ず、現実的に波長フィルタの偏波無依存化が困難となる。

【0014】

従って、Si 細線導波路の伝搬損失を抑制しつつ、かつ波長フィルタの偏波依存性を緩和するには、TE 偏波及びTM 偏波の導波モードの伝搬定数を一致させる以外の方法が求められる。このため、光導波路素子中に偏波分離素子の構造を導入することも考えられて

50

いる。しかし、TE偏波及びTM偏波用の2つの光回路が必要となるため、レイアウトサイズが大きく、光導波路素子としては煩雑な構造となってしまう。

【0015】

この発明は、上述の問題点に鑑みてなされたものである。従って、この発明の目的は、Si細線導波路を用いたグレーティング型波長フィルタとして、偏波無依存で動作可能な、偏波無依存波長フィルタを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0016】

上述した目的を達成するために、この発明の偏波無依存波長フィルタは、第1サブ導波路、第3サブ導波路及び第1モード変換部を長さ方向に直列に備える第1導波路と、第2サブ導波路、第4サブ導波路及び第2モード変換部を長さ方向に直列に備える第2導波路とを備えて構成される。

10

【0017】

第1サブ導波路と第2サブ導波路は、方向性結合器として機能する第1光結合部を構成する。第1光結合部では、互いに直交して伝播するX偏波及びY偏波に対して、第1サブ導波路を伝播するX偏波の基本モードは、第2サブ導波路にN次モード(Nは0より大きい整数)として移行可能であり、かつ、X偏波の他のモード及びY偏波は第2サブ導波路に移行不可能であり、並びに、第2サブ導波路を伝播するX偏波のN次モードは、第1サブ導波路に基本モードとして移行可能であり、及び、X偏波の他のモード及びY偏波は第1サブ導波路に移行不可能である。

20

【0018】

第3サブ導波路と第4サブ導波路は、方向性結合器として機能する第2光結合部を構成する。第2光結合部では、第3サブ導波路を伝搬するY偏波のM次モード(Mは0より大きい整数)は、第4サブ導波路に基本モードとして移行可能であり、かつ、Y偏波の他のモード及びX偏波は、第4サブ導波路に移行不可能であり、並びに、第4サブ導波路を伝搬するY偏波の基本モードは、第3サブ導波路にM次モードとして移行可能であり、かつ、Y偏波の他のモード及びX偏波は第3サブ導波路に移行不可能である。

【0019】

第1モード変換部は、特定の波長に対して、Y偏波の基本モードをM次モードにモード次数を変換して反射し、第2モード変換部は、特定の波長に対して、X偏波のN次モードを基本モードにモード次数を変換して反射する。

30

【発明の効果】

【0020】

この発明の偏波無依存波長フィルタによれば、偏波に依存することなく所望の信号波長を取り出すことができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】偏波無依存波長フィルタを示す概略的平面図である。

【図2】図1に示す偏波無依存波長フィルタをI-I線で切り取った概略的端面図である。

40

【図3】グレーティング構造を説明するための模式図である。

【図4】波長フィルタの動作を説明するための模式図(1)である。

【図5】波長フィルタの動作を説明するための模式図(2)である。

【図6】シミュレーション結果を示す特性図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

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

50

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。

【0023】

(構成)

図1及び図2を参照して、この発明の実施の形態による偏波無依存波長フィルタについて説明する。図1は、偏波無依存波長フィルタ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及び支持基板を省略して示してある。図2は、図1に示す偏波無依存波長フィルタをI-I線で切り取った概略的端面図である。

【0024】

なお、図1において、光の概略的な伝搬方向を矢印zで示す。ただし、光は逆過程が成り立つので、光の伝搬方向は矢印zと反対方向でも成立する。また、以下の説明では、支持基板の厚さに沿った方向を厚さ方向とする。また、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。

【0025】

偏波無依存波長フィルタ(以下、単に波長フィルタとも称する。)100は、支持基板10、クラッド層20、第1導波路30及び第2導波路40を備えて構成されている。

【0026】

支持基板10は、例えば単結晶Siを材料とした平板状体で構成されている。

【0027】

クラッド層20は、支持基板10上に、支持基板10の上面10aを被覆し、かつ第1導波路30及び第2導波路40を包含して形成されている。クラッド層20は、例えばSiO₂を材料として形成されている。

【0028】

第1導波路30及び第2導波路40は、クラッド層20よりも高い屈折率を有する例えばSiを材料としてそれぞれ形成されている。その結果、第1導波路30及び第2導波路40は、実質的な光の伝送路として機能し、入力された光がこれらの平面形状に応じた伝播方向に伝播する。また、第1導波路30及び第2導波路40は、伝播する光が支持基板10へ逃げるのを防止するために、支持基板10の上面10aから例えば少なくとも1~3μm程度の範囲内の距離で離間して形成されているのが好ましい。

【0029】

第1導波路30は、入力導波路2、第1サブ導波路31、第3サブ導波路41及び第1モード変換部5を長さ方向に直列に備えている。第1サブ導波路31と第3サブ導波路41は、第1テーパ導波路81を介して光学的に接続されている。第1テーパ導波路81の第1サブ導波路31側の端部81aの幅は、第1サブ導波路31の幅と等しく、第1テーパ導波路81の第3サブ導波路41側の端部81bの幅は、第3サブ導波路41の幅と等しい。

【0030】

また、第2導波路40は、出力導波路7、第2サブ導波路32、第4サブ導波路42及び第2モード変換部6を長さ方向に直列に備えている。第2サブ導波路32と第4サブ導波路42は、第2テーパ導波路82を介して光学的に接続されている。第2テーパ導波路82の第2サブ導波路32側の端部82aの幅は、第2サブ導波路32の幅と等しく、第2テーパ導波路82の第4サブ導波路42側の端部82bの幅は、第4サブ導波路42の幅と等しい。

【0031】

第1サブ導波路31と第2サブ導波路32は、平行に配置されており、方向性結合器として機能する第1光結合部3を構成する。また、第3サブ導波路41と第4サブ導波路42は、平行に配置されており、方向性結合器として機能する第2光結合部4を構成する。これに対し、第1モード変換部5と第2モード変換部6とは、互いに光の相互結合が生じないように配置されている。

【0032】

10

20

30

40

50

第1光結合部3を構成する第1サブ導波路31及び第2サブ導波路32の固有モードフィールドをそれぞれ E_a 及び E_b で表わすと、第1サブ導波路31と第2サブ導波路32との各固有モード間でのモード結合係数 κ_{ab} は、以下の式(a1)で与えられる。

【0033】

【数1】

$$\kappa_{ab} = \frac{1}{4} \omega \epsilon_0 \int E_a^* \delta \epsilon E_b dS \quad \dots (a1)$$

【0034】

ここで、 κ_{ab} は、互いのサブ導波路の存在に起因する、孤立した導波路構造からの誘電率の摂動項である。

10

【0035】

例えば、第1サブ導波路31の、第3サブ導波路41とは反対側の一端(入射端)31aに光の入射があった場合、第1サブ導波路31及び第2サブ導波路32の固有モードの伝搬定数をそれぞれ β_a 及び β_b とすると、伝搬軸座標 z におけるそれぞれの固有モードの電力変化率は、以下の式(a2)~(a4)で表わすことができる。

【0036】

【数2】

$$\left| \frac{A(z)}{A(0)} \right|^2 = 1 - \left(\frac{2\kappa_{ab}}{\delta\beta_{ab}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\delta\beta_{ab} z}{2} \right) \quad \dots (a2)$$

20

$$\left| \frac{B(z)}{A(0)} \right|^2 = \left(\frac{2\kappa_{ab}}{\delta\beta_{ab}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\delta\beta_{ab} z}{2} \right) \quad \dots (a3)$$

$$\delta\beta_{ab} = \left[(\beta_a - \beta_b)^2 + |2\kappa_{ab}|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots (a4)$$

【0037】

ここで伝搬軸は、長手方向に沿った軸であり、入射端31aを $z=0$ とする。また、第1サブ導波路31から第3サブ導波路41に向かう方向を正とする。

30

【0038】

第1光結合部3において、第1サブ導波路31から第2サブ導波路32へ、あるいは、第2サブ導波路32から第1サブ導波路31へ、100%電力を移行させるための完全結合条件は、上記(a2)~(a4)式から $\beta_a = \beta_b$ となる。すなわち、第1サブ導波路31を伝搬するモードの伝搬定数と、第2サブ導波路32を伝搬するモードの伝搬定数とが一致することが求められる。

【0039】

第1サブ導波路31と第2サブ導波路32とが同一構造でかつ相互結合に寄与するモードの次数が一致する場合には、 $\beta_a = \beta_b$ は必然的に満たされ、第1光結合部3を構成する第1サブ導波路31及び第2サブ導波路32の間では完全結合が可能となる。しかしながら、第1サブ導波路31と第2サブ導波路32とで構造が異なり、相互結合に寄与するモードの次数が同次数の場合、基本的には $\beta_a \neq \beta_b$ となり、両モードの伝搬定数の乖離が大きくなるほど2つのモード間での相互結合は無視できるようになる。

40

【0040】

第1サブ導波路31と第2サブ導波路32の構造が異なる場合に、 $\beta_a = \beta_b$ の完全結合条件を満たすための方法として、例えば、相互結合に寄与するモードとして互いに次数の異なるモードを利用することが考えられる。

【0041】

そこで第1光結合部3を以下の式(1)を満たすように設計する。

【0042】

50

【数3】

$$\begin{aligned} \beta_{ax0} &= \beta_{bxN} \\ \beta_{axi} &\neq \beta_{bx0} \quad \dots(1) \\ \beta_{ayj} &\neq \beta_{byk} \end{aligned}$$

【0043】

ここで、 a_{x0} 及び a_{xi} は、それぞれ、第1サブ導波路31における、X偏波に対する基本モード及び*i*次モード(*i*は0以上の整数)の伝搬定数を示している。 a_{yj} は、第1サブ導波路31における、Y偏波に対する*j*次モード(*j*は0以上の整数)の伝搬定数を示している。 b_{x0} 及び b_{xN} は、それぞれ、第2サブ導波路32における、X偏波に対する基本モード及び*N*次モード(*N*は0より大きい整数)の伝搬定数を示している。 b_{yk} は、第2サブ導波路32における、Y偏波に対する*k*次モード(*k*は0以上の整数)の伝搬定数を示している。また、X偏波及びY偏波は、互いに直交する偏波であり、ここでは、TE偏波及びTM偏波の何れかである。

10

【0044】

上記式(1)の関係を満足するとき、第1光結合部3では、X偏波に対して、第1サブ導波路31における基本モードと、第2サブ導波路32における*N*次モードの間でのみモードの相互結合が生じ、第1サブ導波路31と第2サブ導波路32の間での電力の移行が起こる。実際には、他のモード間での相互結合も生じ得るが、ここでは比較的導波路コアへの閉じ込め作用が強い導波モードを扱い、式(1)で与えられるモード結合係数 $|a_b|$ が伝搬定数の乖離 $|a - b|$ よりも十分小さいものとする。従って、他のモード間では第1サブ導波路31と第2サブ導波路32の間の電力移行は無視できる。

20

【0045】

つまり、第1光結合部3において、第1サブ導波路31に入力された、X偏波の基本モードは第2サブ導波路32に*N*次モードとして移行する。一方、第1サブ導波路31に入力された、Y偏波及びX偏波の他のモードは第2サブ導波路32に移行しない。また、第2サブ導波路32に入力された、X偏波の*N*次モードは、第1サブ導波路31に基本モードとして移行しうるが、X偏波の他のモード及びY偏波は第1サブ導波路31に移行しない。

【0046】

第2光結合部4は、第1光結合部3と同様の思想で構成され、以下の式(2)を満たすように設計される。

30

【0047】

【数4】

$$\begin{aligned} \beta_{cx'i} &\neq \beta_{dx'j} \\ \beta_{cy'0} &\neq \beta_{dy'k} \quad \dots(2) \\ \beta_{cym} &= \beta_{dy'0} \end{aligned}$$

【0048】

ここで、 $c_{xi'}$ は、第3サブ導波路41における、X偏波に対する*i*'モード(*i*'は0以上の整数)の伝搬定数を示している。 $c_{y'0}$ 及び c_{ym} は、それぞれ、第3サブ導波路41における、Y偏波に対する基本モード及び*M*次モード(*M*は0より大きい整数)の伝搬定数を示している。 $d_{x'j}$ は、第4サブ導波路42における、X偏波に対する*j*'次モード(*j*'は0以上の整数)の伝搬定数を示している。 $d_{y'k}$ は、それぞれ、第4サブ導波路42における、Y偏波に対する基本モード及び*k*'次モード(*k*'は0以上の整数)の伝搬定数を示している。

40

【0049】

上記式(2)の関係を満足するとき、第2光結合部4では、第3サブ導波路41におけるY偏波の*M*次モードと、第4サブ導波路42におけるY偏波の基本モードの間でのみモードの相互結合が生じる。一方、Y偏波の他のモードやX偏波の間でのモード相互結合は

50

生じない。

【 0 0 5 0 】

つまり、第 2 光結合部 4 において、第 3 サブ導波路 4 1 に入力された Y 偏波の M 次モードは第 4 サブ導波路 4 2 に基本モードとして移行する。一方、第 3 サブ導波路 4 1 に入力された Y 偏波の他のモード及び X 偏波は、第 4 サブ導波路 4 2 に移行しない。また、第 4 サブ導波路 4 2 に入力された、Y 偏波の基本モードは、第 3 サブ導波路 4 1 に M 次モードとして移行しうるが、Y 偏波の他のモード及び X 偏波は第 3 サブ導波路 4 1 に移行しない。

【 0 0 5 1 】

第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 は、コア側壁に周期的屈折率変調が形成されたグレーティングを備えている。図 3 を参照して、第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 のグレーティング構造を説明する。図 3 は、グレーティング構造を説明するための模式図である。

10

【 0 0 5 2 】

グレーティングは、基準導波路コア幅を W_0 として、コア側壁に変調幅 D の凸凹領域が変調周期 に従って交互に配置された構造となっている。また、コア両サイドの凸凹領域は z 軸に沿って互いに $W_0/2$ だけずれて配置される。

【 0 0 5 3 】

第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 におけるグレーティングの B r a g g 条件として、以下の式 (3) を満たすように設計される。

20

【 0 0 5 4 】

【数 5】

$$\begin{aligned} \Lambda_1(n_{Y0} + n_{YM}) &= \lambda_b \\ \Lambda_2(n_{XN} + n_{X0}) &= \lambda_b \end{aligned} \quad \dots (3)$$

【 0 0 5 5 】

ここで、 Λ_1 及び Λ_2 は、それぞれ第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 の屈折率変調周期を示す。 n_{Y0} 及び n_{YM} は、それぞれ、第 1 モード変換部 5 における、Y 偏波の基本モードと M 次モードの等価屈折率を示す。また、 n_{XN} 及び n_{X0} は、それぞれ、第 2 モード変換部 6 における、X 偏波の N 次モードと基本モードの等価屈折率を示す。

30

λ_b は、ブラッグ波長である。各導波モードの等価屈折率は波長依存性を含む。このため、上記式 (3) で与えられる B r a g g 条件は、ブラッグ波長 λ_b でのみ成立し、特定の波長だけを選別することが可能となる。

【 0 0 5 6 】

なお、ここでは、第 1 導波路 3 0 が、入力導波路 2、第 1 サブ導波路 3 1、第 3 サブ導波路 4 1 及び第 1 モード変換部 5 を、この順に長さ方向に直列に備え、第 2 導波路 4 0 が、出力導波路 7、第 2 サブ導波路 3 2、第 4 サブ導波路 4 2 及び第 2 モード変換部 6 を、この順に長さ方向に直列に備える例を説明したが、接続順序は、これに限定されない。第 1 サブ導波路 3 1 と第 3 サブ導波路 4 1 を入れ換え、かつ、第 2 サブ導波路 3 2 と第 4 サブ導波路 4 2 を入れ換えても良い。すなわち、第 1 導波路 3 0 が、入力導波路 2、第 3 サブ導波路 4 1、第 1 サブ導波路 3 1 及び第 1 モード変換部 5 を、この順に長さ方向に直列に備え、第 2 導波路 4 0 が、出力導波路 7、第 4 サブ導波路 4 2、第 2 サブ導波路 3 2 及び第 2 モード変換部 6 を、この順に長さ方向に直列に備える構成にしても良い。

40

【 0 0 5 7 】

このように、入力導波路 2 を経て入力された光が、第 1 光結合部 3 及び第 2 光結合部 4 をこの順に経て、第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 で特定の波長を反射させて、第 2 光結合部 4 及び第 1 光結合部 3 をこの順に経て、出力導波路 7 を経て出力する構成としても、入力導波路 2 を経て入力された光が、第 2 光結合部 4 及び第 1 光結合部 3 をこの順に経て、第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 で特定の波長を反射させて、第 1 光結合部 3 及び第 2 光結合部 4 をこの順に経て、出力導波路 7 を経て出力する構成とし

50

ても、同様の効果を得ることができる。

【 0 0 5 8 】

(動作)

図 4 及び図 5 を参照して、波長フィルタの動作を説明する。図 4 及び図 5 は、波長フィルタの動作を説明するための模式図である。図 4 は、X 偏波が入力された場合の動作を示し、図 5 は、Y 偏波が入力された場合の動作を示している。

【 0 0 5 9 】

入力導波路 2 を経て第 1 サブ導波路 3 1 の一端へと入力された基本モードの光信号は、第 1 光結合部 3 を通過する際、上記式 (1) の関係より、X 偏波については第 2 サブ導波路 3 2 に N 次モードとして移行する (図 4 中、矢印 I で示す。)。一方、Y 偏波については第 2 サブ導波路 3 2 に移行せずに第 1 サブ導波路 3 1 を伝搬する。

10

【 0 0 6 0 】

第 1 サブ導波路 3 1 を伝播する Y 偏波の基本モードは、第 1 テーパ導波路 8 1 を経て第 3 サブ導波路 4 1 に入力される。また、第 2 サブ導波路 3 2 を伝播する X 偏波の N 次モードは、第 2 テーパ導波路 8 2 を経て第 4 サブ導波路 4 2 に入力される (図 4 中、矢印 I I で示す)。

【 0 0 6 1 】

第 2 光結合部 4 では、上記式 (2) の関係から、第 3 サブ導波路 4 1 を伝搬する Y 偏波の基本モードは第 4 サブ導波路 4 2 の導波モードと相互結合を生じない。このため、Y 偏波の基本モードは第 4 サブ導波路 4 2 に移行せず、第 3 サブ導波路 4 1 をそのまま伝搬し、第 1 モード変換部 5 に送られる。一方、第 4 サブ導波路 4 2 を伝搬する X 偏波の N 次モードは、第 3 サブ導波路 4 1 の導波モードと相互結合を生じない。このため、X 偏波の N 次モードは、第 3 サブ導波路 4 1 に移行せず、第 4 サブ導波路 4 2 をそのまま伝搬し第 2 モード変換部 6 に送られる。

20

【 0 0 6 2 】

第 1 モード変換部 5 には、第 3 サブ導波路 4 1 から Y 偏波の基本モードが入力される。Y 偏波の基本モードは上記式 (3) に従って、M 次モードにモード次数を変換して反射される (図 5 中、矢印 I で示す)。反射された Y 偏波の M 次モードは、第 3 サブ導波路 4 1 に送られる。

【 0 0 6 3 】

一方、第 2 モード変換部 6 には、第 4 サブ導波路 4 2 から X 偏波の N 次モードが入力される。X 偏波の N 次モードは上記式 (3) に従って、基本モードにモード次数を変換して反射される (図 4 中、矢印 I I I で示す。)。反射された X 偏波の基本モードは、第 4 サブ導波路 4 2 に送られる。

30

【 0 0 6 4 】

第 2 光結合部 4 では、上記式 (2) の関係より、第 3 サブ導波路 4 1 を伝搬する Y 偏波の M 次モードは、第 4 サブ導波路 4 2 の基本モードと結合し、第 4 サブ導波路 4 2 に Y 偏波の基本モードとして移行する (図 5 中、矢印 I I で示す)。また、第 4 サブ導波路 4 2 を伝搬する X 偏波の基本モードは、第 3 サブ導波路 4 1 の導波モードと結合せず、第 4 サブ導波路 4 2 をそのまま伝搬する。

40

【 0 0 6 5 】

第 4 サブ導波路 4 2 を伝搬する、X 偏波の基本モード及び Y 偏波の基本モードは、第 2 テーパ導波路 8 2 を介して第 2 サブ導波路 3 2 に送られる。X 偏波の基本モード及び Y 偏波の基本モードは、上記式 (1) の関係より、第 1 サブ導波路 3 1 の導波モードと相互結合することなく、第 2 サブ導波路 3 2 をそのまま伝搬し、出力導波路 7 に送られる。

【 0 0 6 6 】

この結果、X 偏波及び Y 偏波ともに出力導波路 7 から基本モードの光信号として取り出すことができ、偏波に依存することなく波長フィルタとしての機能をもたせることが可能となる。

【 0 0 6 7 】

50

以上説明したように、この発明の偏波無依存波長フィルタによると、偏波に依存することなく所望の信号波長を取り出すことができる。また、互いに直交する偏波に対して各モード変換領域を独立して制御できるので、設計が容易になる。

【0068】

ここで、式(1)を満たす第1光結合部3と式(2)を満たす第2光結合部4の順列構造は、X偏波とY偏波の基本モードが入力されると、Y偏波の基本モードとX偏波のN次モードに空間的に分離する、偏光ビームスプリッタ(PBS: Polarization Beam Splitter)として振舞うことを示している。

【0069】

また、式(2)を満たす第2光結合部4と式(1)を満たす第1光結合部3の順列構造は、Y偏波のM次モードとX偏波の基本モードが入力されると、これらを合波する、偏光ビームコンバイナ(PBC: Polarization Beam Combiner)として振る舞うことを示している。

10

【0070】

また、第1光結合部3と第2光結合部4とは、伝搬方向に沿って第1光結合部3と第2光結合部4との接続順序を入れ替えても同様の効果を得ることができる。

【0071】

(実施例)

偏波無依存波長フィルタを実現するため、先ず、基本となる光導波路構造の検討をした。例えば、SOIウェハを用いて偏波無依存波長フィルタを作製する場合、支持基板及びコアをSiとし、クラッドをSiO₂とする。

20

【0072】

次に波長フィルタが備える第1光結合部3及び第2光結合部4に、式(1)及び式(2)の特性を与えるための各導波路の条件寸法を考える。Siの導波路コアの厚さは、220nm SOIを用いた場合を想定し、一律に220nmとした。前提として、X偏波をTE偏波とし、Y偏波をTM偏波とし、また、簡単化のためN=M=1とする。すなわち、第1光結合部3では、第1サブ導波路31を導波するTE偏波の基本モードと第2サブ導波路32を導波するTE偏波の1次モードとが相互結合し、第2光結合部4では、第3サブ導波路41を導波するTM偏波の1次モードと第4サブ導波路42を導波するTM偏波の基本モードとが相互結合する。

30

【0073】

各々導波路の固有モードの解析には有限要素法を用いた。ここでは、入力される光の波長を1.55μmとしている。

【0074】

第1光結合部3において、式(1)の関係为满足するため、導波路コアの幅をパラメータとして導波モードの解析をした。第1サブ導波路31の導波路コアの幅を0.36μm、第2サブ導波路32の導波路コアの幅を0.76μmとしたときの各導波モードの等価屈折率(伝搬定数と等価屈折率は比例関係にあるため)を以下の表1に示す。

【0075】

【表1】

40

	第1サブ導波路(A) (第1光結合部)		第2サブ導波路(B) (第1光結合部)		第3サブ導波路(C) (第2光結合部)		第4サブ導波路(D) (第2光結合部)	
	β_{ax}	β_{ay}	β_{bx}	β_{by}	β_{cx}	β_{cy}	β_{dx}	β_{dy}
基本モード	2.096957	1.661643	2.673942	1.902506	2.797290	2.002930	2.549821	1.827764
1次モード			2.094962		2.634191	1.828818	1.643144	
2次モード					2.340425	1.552477		
3次モード					1.880575			

50

【 0 0 7 6 】

表 1 では第 1 サブ導波路 3 1 の T E 偏波の基本モードの等価屈折率 (2 . 0 9 6 9 5 7) と第 2 サブ導波路 3 2 の T E 偏波の 1 次モードの等価屈折率 (2 . 0 9 4 9 6 2) がほぼ一致し、かつ、他の導波モード間では、等価屈折率が一致していないことが分かる。すなわち式 (1) の関係が満たされている。第 1 サブ導波路 3 1 と第 2 サブ導波路 3 2 との間隔 S_1 は、モード結合係数 a_{ab} を小さくして、余分なモード間の結合を抑制するため、 $0.3 \mu\text{m}$ とした。さらに式 (a 2)、(a 3) から第 1 サブ導波路 3 1 の T E 偏波の基本モードを第 2 サブ導波路 3 2 の T E 偏波の 1 次モードへと 1 0 0 % 移行するための並走長 L_1 を $2.3 \mu\text{m}$ とした。

【 0 0 7 7 】

同様に第 2 光結合部 4 においても、式 (2) の関係を満足するため、導波路コアの幅をパラメータとして導波モードの解析をした。第 3 サブ導波路 4 1 の導波路コアの幅を $1.40 \mu\text{m}$ 、第 4 サブ導波路 4 2 の導波路コアの幅を $0.58 \mu\text{m}$ としたときの各導波モードの等価屈折率を上記表 1 に示す。

【 0 0 7 8 】

表 1 では第 3 サブ導波路 4 1 の T M 偏波の 1 次モードの等価屈折率 (1 . 8 2 8 8 1 8) と第 4 サブ導波路 4 2 の T M 偏波の基本モードの等価屈折率 (1 . 8 2 7 7 6 4) がほぼ一致し、かつ他の導波モード間では、等価屈折率が一致していないことが分かる。すなわち式 (2) の関係が満たされている。第 3 サブ導波路 4 1 と第 4 サブ導波路 4 2 との間隔 S_2 は、モード結合係数 a_{ab} を小さくして、余分なモード間の結合を抑制するため、 $0.45 \mu\text{m}$ とした。さらに、第 3 サブ導波路 4 1 の T M 偏波の 1 次モードを第 4 サブ導波路 4 2 の T M 偏波の基本モードへと 1 0 0 % 移行するための並走長 L_2 を $46.9 \mu\text{m}$ とした。

【 0 0 7 9 】

第 1 サブ導波路 3 1 と第 3 サブ導波路 4 1 とは光学的に接続されるが、幅の不一致を解消するため、両者の間に第 1 テーパ導波路 8 1 が挿入される。また、第 2 サブ導波路 3 2 と第 4 サブ導波路 4 2 とは光学的に接続されるが、幅の不一致を解消するため、両者の間には第 2 テーパ導波路 8 2 が挿入される。第 1 テーパ導波路 8 1 及び第 2 テーパ導波路 8 2 が並走する区間において生じる余分なモード間結合を抑制するため、これら第 1 テーパ導波路 8 1 及び第 2 テーパ導波路 8 2 の長さは、この部分での放射損失の影響を許容できる範囲で極力短くすることが好ましい。

【 0 0 8 0 】

次に、第 1 モード変換部 5 及び第 2 モード変換部 6 の設計について説明する。第 3 サブ導波路 4 1 の光学経路に接続される第 1 モード変換部 5 では、T M 偏波の基本モードを T M 偏波の 1 次モードにモード変換して反射させる必要がある。このため、第 1 モード変換部 5 では、少なくとも T M 偏波に対して基本モードと 1 次モードとが導波可能である条件が求められる。そこで有限要素法を用いた固有モード解析をし、基準導波路幅 W_0 を $0.9 \mu\text{m}$ とした。上記式 (3) を考慮し、ブラッグ波長 λ_b が $1.55 \mu\text{m}$ となるように、屈折率変調周期 Λ_1 を $0.438 \mu\text{m}$ とした。また、屈折率の変調幅 D_1 は短い素子長で十分な反射強度を得られるようにするため $0.15 \mu\text{m}$ とした。

【 0 0 8 1 】

さらに、第 4 サブ導波路 4 2 の光学経路に接続される第 2 モード変換部 6 では、T E 偏波の 1 次モードを T E 偏波の基本モードにモード変換して反射させる必要がある。このため、第 2 モード変換部 6 では、少なくとも T E 偏波に対して基本モードと 1 次モードとが導波可能である条件が求められる。そこで有限要素法を用いた固有モード解析をし、基準導波路幅 W_0 を $0.55 \mu\text{m}$ とした。上記式 (3) を考慮し、ブラッグ波長 λ_b を $1.55 \mu\text{m}$ となるように、屈折率変調周期 Λ_2 を $0.379 \mu\text{m}$ とした。また、屈折率の変調幅 D_2 は短い素子長で十分な反射強度を得られるようにするため $0.1 \mu\text{m}$ とした。

【 0 0 8 2 】

上記の設計で得られた波長フィルタの波長応答特性を確認するため、F D T D (F i n

10

20

30

40

50

ite Differential Time Domain)法による光学シミュレーションをした。入力導波路2から基本モード信号を入力し、出力導波路7における基本モードのパワーをモニタした。その結果を図6に示す。図6はシミュレーション結果を示す特性図である。図6では、横軸に波長(μm)を取って示し、縦軸に信号強度(dB)を取って示している。図6に示されるようにブラッグ波長 λ_b に対応する $1.55\mu\text{m}$ 付近において、TE偏波とTM偏波の両者に対する出力導波路7へのスペクトルピークが確認でき、設計した波長フィルタが偏波によらず動作していることが示された。厳密にはTM偏波のスペクトルピークが若干長波にシフトしているが、これはFDTDの計算グリッドが若干大きく(粗く)実効的な屈折率が設計からずれてしまったためであると考えられる。FDTDの計算グリッドを少々大きくせざるをえない原因は、シミュレーションに用いる

10

【符号の説明】

【0083】

- 2 入力導波路
- 3 第1光結合部
- 4 第2光結合部
- 5 第1モード変換部
- 6 第2モード変換部
- 7 出力導波路
- 10 支持基板
- 20 クラッド層
- 30 第1導波路
- 31 第1サブ導波路
- 32 第2サブ導波路
- 40 第2導波路
- 41 第3サブ導波路
- 42 第4サブ導波路
- 81 第1テーパ導波路
- 82 第2テーパ導波路
- 100 偏波無依存波長フィルタ

20

30

【要約】

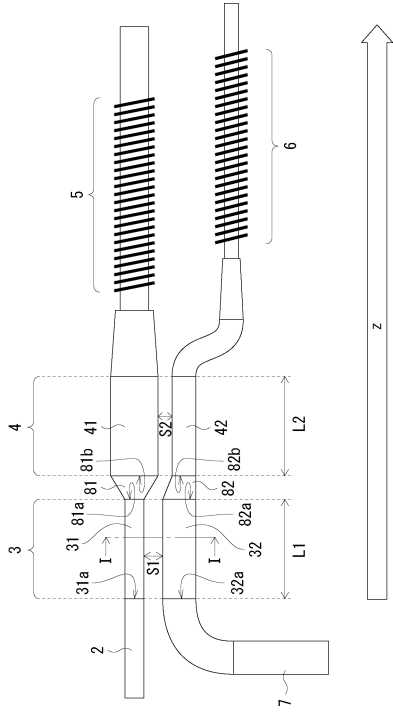
【課題】Si細線導波路を用いたグレーティング型波長フィルタを偏波無依存で動作可能にする。

【解決手段】第1サブ導波路、第3サブ導波路及び第1モード変換部を長さ方向に直列に備え、第2サブ導波路、第4サブ導波路及び第2モード変換部を長さ方向に直列に備えて構成される。第1サブ導波路と第2サブ導波路が構成する第1光結合部では、第1サブ導波路を伝播するX偏波の基本モードは第2サブ導波路にN次モードとして移行し、それ以外は移行しない。第3サブ導波路と第4サブ導波路が構成する第2光結合部では、第3サブ導波路を伝播する、Y偏波のM次モードは第4サブ導波路に基本モードとして移行可能

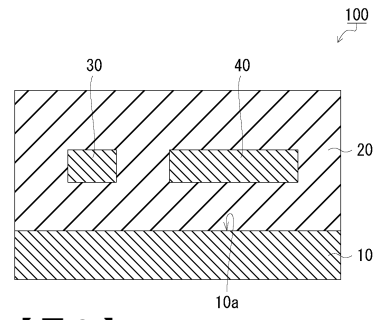
40

【選択図】図1

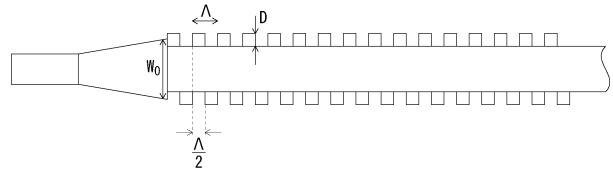
【図1】



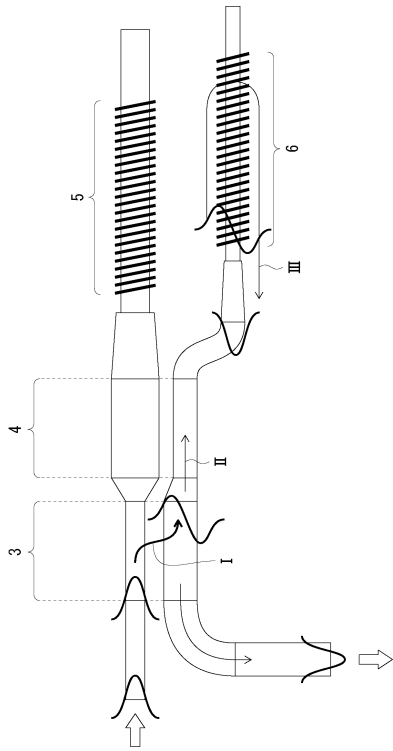
【図2】



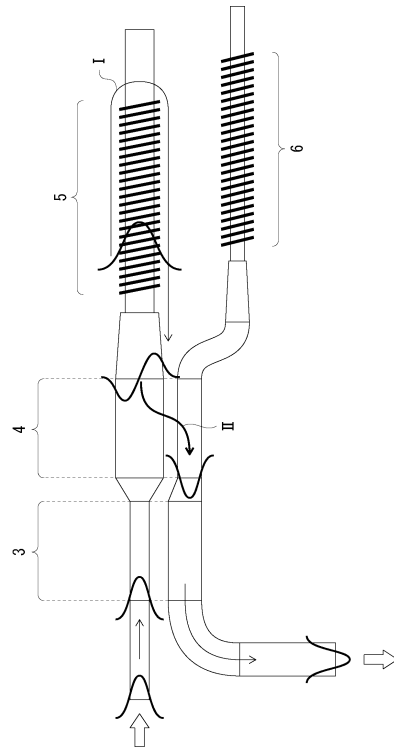
【図3】



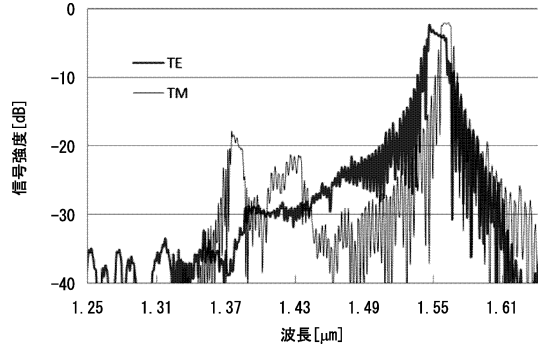
【図4】



【図5】



【 図 6 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2014-066905(JP,A)
特開2015-059982(JP,A)
特開2015-121696(JP,A)
特開平11-014847(JP,A)
米国特許出願公開第2005/0123241(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/12 - 6/14
G02F 1/00 - 1/125
1/21 - 7/00