

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6320573号  
(P6320573)

(45) 発行日 平成30年5月9日(2018.5.9)

(24) 登録日 平成30年4月13日(2018.4.13)

(51) Int. Cl. F 1  
**GO 2 B 6/126 (2006.01)** GO 2 B 6/126  
**GO 2 B 6/122 (2006.01)** GO 2 B 6/122 3 1 1

請求項の数 12 (全 40 頁)

|               |                              |           |   |
|---------------|------------------------------|-----------|---|
| (21) 出願番号     | 特願2016-570640 (P2016-570640) | (73) 特許権者 | 000005186<br>株式会社フジクラ<br>東京都江東区木場1丁目5番1号              |
| (86) (22) 出願日 | 平成28年1月19日(2016.1.19)        | (74) 代理人  | 110000338<br>特許業務法人HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK |
| (86) 国際出願番号   | PCT/JP2016/051375            | (72) 発明者  | 岡 徹<br>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                  |
| (87) 国際公開番号   | W02016/117532                |           |   |
| (87) 国際公開日    | 平成28年7月28日(2016.7.28)        |           |   |
| 審査請求日         | 平成29年3月1日(2017.3.1)          |           |   |
| (31) 優先権主張番号  | 特願2015-8118 (P2015-8118)     | 審査官       | 井上 徹  |
| (32) 優先日      | 平成27年1月19日(2015.1.19)        |           |   |
| (33) 優先権主張国   | 日本国(JP)                      |           |   |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 基板型光導波路素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、

上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、

上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、

上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTM0偏波の実効屈折率、及び、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の実効屈折率は、上記並走区間の始点からの距離の関数として連続であり、

上記コアを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、

上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードと上記コアを導波するTM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間において、上下非対称である、

10

20

ことを特徴とする基板型光導波路素子。

【請求項 2】

上記第 1 コアの出射端面と上記第 2 コアの出射端面とは、互いに離間している、ことを特徴とする請求項 1 に記載の基板型光導波路素子。

【請求項 3】

上記第 1 コアの出射端面と上記第 2 コアの出射端面とは、互いに合同であり、  
上記並走区間の終点入射側における上記コアの断面、及び、上記並走区間の終点出射側における上記コアの断面は、それぞれ左右対称な形状であり、  
上記並走区間の終点入射側における上記コアの断面の対称軸と、上記並走区間の終点出射側における上記コアの断面の対称軸とは、互いに一致する、  
ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の基板型光導波路素子。

10

【請求項 4】

上記第 1 コアの出射端面の幅  $W_{1\text{out}}$ 、上記第 2 コアの出射端面の幅  $W_{2\text{out}}$ 、及び、上記第 3 コアの入射端面の幅  $W_{3\text{in}}$  は、 $W_{1\text{out}} + W_{2\text{out}} > W_{3\text{in}}$  を満たす、  
ことを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

【請求項 5】

上記第 1 コアと上記第 2 コアとの間隔は、上記並走区間の始点から終点に近づくにしたがって次第に狭まる、  
ことを特徴とする請求項 1 ~ 4 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

20

【請求項 6】

上記コアは、上記相互作用区間において上記第 1 コアと上記第 2 コアとを連通させるスラブであって、その高さが上記第 1 コア及び上記第 2 コアの高さよりも低いスラブを更に含む、  
ことを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

【請求項 7】

出射端面に上記第 1 コアの入射端面が接続された第 4 コアと、出射端面が上記第 2 コアの入射端面に接続された第 5 コアとを更に備え、

上記第 4 コアと上記第 5 コアとの間隔は、上記並走区間の始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる、  
ことを特徴とする請求項 6 に記載の基板型光導波路素子。

30

【請求項 8】

上記第 4 コアと上記第 5 コアとを連通させるスラブであって、上記第 1 コアと上記第 2 コアとを連通させるスラブと高さが共通のスラブと、

上記スラブと高さが共通である第 1 のテーパ部であって、上記第 4 コアと上記第 5 コアとを連通させるスラブ、及び、上記第 4 コアの各々と連通し、上記第 4 コアの入射端面から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がる第 1 のテーパ部と、

上記スラブと高さが共通である第 2 のテーパ部であって、上記第 4 コアと上記第 5 コアとを連通させるスラブ、及び、上記第 5 コアの各々と連通し、上記第 5 コアの入射端面から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がる第 2 のテーパ部と、を更に備えている、  
ことを特徴とする請求項 7 に記載の基板型光導波路素子。

40

【請求項 9】

上記下部クラッドと上記上部クラッドとは、互いに屈折率が異なる材料からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

【請求項 10】

上記第 1 コア、上記第 2 コア、及び上記第 3 コアの断面形状は、何れも台形又は台形に準ずる形状である、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

【請求項 11】

TE0 偏波を変調する第 1 の位相変調部と、

50

TE0 偏波を変調する第2の位相変調部と、を更に備え、  
 上記第1コアの入射端面には、上記第1の位相変調部が変調したTE0 偏波が入力され、  
 上記第2コアの入射端面には、上記第2の位相変調部が変調したTE0 偏波が入力される、  
 ことを特徴とする請求項1～10の何れか1項に記載の基板型光導波路素子。

【請求項12】

下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、

10

上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、

上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE0 偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0 偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、

上記コアを導波するTE0 偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM0 偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、

上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE0 偏波の奇モードと上記コアを導波するTM0 偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間において、上下非対称であり、

20

上記並走区間の始点においてTE0 偏波の奇モードであるモード、及び、上記並走区間の始点においてTM0 偏波の偶モードであるモードは、ともに上記並走区間の始点からの距離の関数として連続である、

ことを特徴とする基板型光導波路素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、偏波多重導波路として機能する基板型光導波路素子に関する。また、そのような基板型光導波路素子を備えた光変調器に関する。

30

【背景技術】

【0002】

現在、光通信で伝送される情報量は増加し続けている。こうした情報量の増加に対して、信号速度の高速化、波長多重通信を用いたチャネル数の増設などの対策が進められている。このうち、信号速度の高速化を可能にする次世代の100 Gbps デジタルコヒーレント伝送技術では、単位時間あたりに送信可能な情報量を2倍にするために、電界が直交する2つの偏波に異なる情報を載せる偏波多重方式が利用されている。しかしながら、偏波多重方式を利用する変調方式では、複雑な構成の光変調器が必要になり、装置の大型化、高額化といった課題が生じる。

40

【0003】

こうした課題に対して、製造プロセスが簡単、集積化による光学素子の小型化が可能、大口径ウェハによる製造コストの低コスト化が可能などのメリットを持つ、シリコンをコアに用いた基板型光導波路による光変調器が非特許文献1に記載されている。

【0004】

偏波多重方式の光変調器は、偏波ローテータ (Polarization Rotator) (以下、「PR」と略記) と偏波ビームコンバイナ (Polarization Beam Combiner) (以下、「PBC」と略記) とを備えている。図24は、PR6の構成を示すブロック図であり、図25は、PBC7の構成を示すブロック図である。PR6は、入力ポートと出力ポートとを備えている。PR6は、入力ポートから入力されたTE偏波をTM偏波に変換して出力ポートか

50

ら出力する。PBC7は、第1の入力ポートと、第2の入力ポートと、出力ポートとを備えている。PBC7は、第1の入力ポートに入力されたTE偏波と、第2の入力ポートに入力されたTM偏波とを多重し、この多重したTE偏波及びTM偏波を出力ポートから出力する。PR6とPBC7とを組み合わせることによって、偏波多重導波路を構成することができる。

#### 【0005】

図26は、偏波多重導波路9を備えた光変調器8の構成を示すブロック図である。すなわち、光変調器8は、偏波多重方式の光変調器である。光変調器8は、PR6及びPBC7を含む偏波多重導波路9と、TE偏波を変調する第1の位相変調部と、TM偏波を変調する第2の位相変調部とを備えている。

10

#### 【0006】

それぞれの位相変調部に入力された別個のTE偏波の光は、独立した電気信号によって変調され、それぞれ異なる情報が重畳される。偏波多重導波路9は、位相変調部の後段に設置されている。偏波多重導波路9に入力された2つのTE偏波のうち、第1の入力ポートに入力されたTE偏波は、一方がTM偏波に変換され、第2の入力ポートに入力されたTE偏波と多重され出力される。このように、偏波多重導波路を用いることによって、同様に構成された第1の位相変調部及び第2の位相変調部を利用することができる。

#### 【0007】

ここで、TE偏波は、基板型光導波路内で光の進行方向に対して垂直な面内において基板に水平な方向（以下、幅方向もしくはx方向と呼ぶ）の電界成分が主となるモードを指す。特に、実効屈折率が最大となるTE偏波のことを、「TE0偏波」と呼ぶ。また、TM偏波は、基板型光導波路内で光の進行方向に対して垂直な面内において基板に垂直な方向（以下、高さ方向もしくはy方向と呼ぶ）の電界成分が主となるモードを指す。特に、実効屈折率が最大となるTM偏波のことを、「TM0偏波」と呼ぶ。TE0偏波及びTM0偏波は、TE偏波及びTM偏波のそれぞれにおいて最も導波路内に強く閉じ込められる偏波であるため、基板型光導波路素子において広く用いられる導波モードである。

20

#### 【0008】

非特許文献2及び非特許文献3には、偏波ビームスプリッタが記載されている。これらの文献に記載された偏波ビームスプリッタは、入出力を逆転させることにより偏波ビームコンバイナとしても機能する。

30

#### 【0009】

非特許文献2に係る基板型光導波路素子は、非対称Y分岐（非特許文献2のasymmetric Y-junctionに対応）とリブ導波路構造のテーパ導波路（非特許文献2のtaperに対応）との2つの素子から成る。非特許文献2に係る基板型光導波路素子を偏波ビームコンバイナとして機能させる場合、非対称Y分岐において、空間的に分離された2つのTE0偏波のうち、一方をTE1偏波に変換し、かつ他方のTE0偏波と多重する。ここで、TE1偏波は、TE偏波の内2番目に実効屈折率が大きな導波モードを表す。テーパ導波路では、非対称Y分岐で多重されたTE1偏波とTE0偏波のうち、TE1偏波のみをTM0偏波に変換する。以上より、非特許文献2の素子は偏波多重導波路として機能する。

#### 【0010】

40

非特許文献3に係る基板型光導波路素子は、断熱変換結合器（文献中のAdiabatic coupler）とリブ導波路構造のテーパ導波路（文献中のBi level taper）との2つの素子から成る。非特許文献3に係る基板型光導波路素子を偏波ビームコンバイナとして機能させる場合、断熱変換結合器において、空間的に分離された2つのTE0偏波のうち、一方をTE1偏波に変換し、かつ他方のTE0偏波と多重する。ここで、TE1偏波は、TE偏波の内2番目に実効屈折率が大きな導波モードを表す。テーパ導波路では、断熱変換結合器で多重されたTE1偏波とTE0偏波のうち、TE1偏波をTM0偏波に変換する。以上より、非特許文献3の素子は偏波多重導波路として機能する。

#### 【先行技術文献】

#### 【非特許文献】

50

## 【 0 0 1 1 】

【非特許文献1】Po Dong, et al., "112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon", ECOC2012 Th.3.B.1 (2012)

【非特許文献2】Jing Wang, et al., "Novel ultra-broadband polarization splitters based on mode-evolution tapers and a mode-sorting asymmetric Y-junction", OPTICS EXPRESS, Vol.22, No.11, pp. 13565 (2014)

【非特許文献3】Wesley D. Sacher, et al., "Polarization rotator-splitters in standard active silicon photonics platforms", OPTICS EXPRESS, Vol.22, No.4, pp. 3777 (2014)

【非特許文献4】Amnon Yariv, "Optical Electronics in Modern Communications (FIFTH EDITION)", Oxford University Press (1997)

【非特許文献5】Konrad Mertens, et al., "New Highly Efficient Polarization Converters Based on Hybrid Supermodes", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 13, No. 10, pp.2087 (1995)

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【 0 0 1 2 】

しかしながら、非特許文献2及び非特許文献3に記載の基板型光導波路素子は、素子の全長、すなわちデバイス長が長くなり大型化を避けることが難しいという課題を有する。

## 【 0 0 1 3 】

非特許文献2に記載の基板型光導波路素子では、TE<sub>0</sub>偏波をTE<sub>1</sub>偏波に変換し、かつ、他方のTE<sub>0</sub>偏波と多重する非対称Y分岐と、このTE<sub>1</sub>偏波をTM<sub>0</sub>偏波に変換するテーパ導波路の2つの素子が必要となる。したがって、デバイス長が長くなることを避けることが難しい。

## 【 0 0 1 4 】

非特許文献3に記載の基板型光導波路素子についても、非特許文献2に記載の基板型光導波路素子と同様に、偏波多重導波路を実現するために2つの異なる素子を必要とする。したがって、デバイス長が長くなることを避けることが難しい。

## 【 0 0 1 5 】

本発明は、上記の課題を鑑みてなされたものであり、その目的は、偏波多重導波路として機能する基板型光導波路素子のデバイス長を短くすることによって小型化することである。

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 1 6 】

上記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る基板型光導波路素子は、下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE<sub>0</sub>偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE<sub>0</sub>偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTM<sub>0</sub>偏波の実効屈折率、及び、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE<sub>0</sub>偏波の実効屈折率は、上記並走区間の始点からの距離の関数として連続であり、上記コアを導波するTE<sub>0</sub>偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM<sub>0</sub>偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE<sub>0</sub>偏波の奇モードと上記コアを導波するTM<sub>0</sub>偏波の偶モードと

10

20

30

40

50

が相互作用する相互作用区間において、上下非対称である、ことを特徴とする。

【0017】

また、本発明の一態様に係る基板型光導波路素子は、下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードと上記コアを導波するTM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間において、上下非対称であり、上記並走区間の始点においてTE0偏波の奇モードであるモード、及び、上記並走区間の始点においてTM0偏波の偶モードであるモードは、ともに上記並走区間の始点からの距離の関数として連続である、ことを特徴とするとも表現できる。

10

【発明の効果】

20

【0018】

本発明は、偏波多重導波路として機能する基板型光導波路素子のデバイス長を短くすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】(a)は、本発明の第1の実施形態に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

【図2】(a)及び(b)は、上記基板型光導波路素子の機能を説明するための上面図である。

30

【図3】(a)～(f)のそれぞれは、上記基板型光導波路素子の第1の入射ポートにTE0偏波を入射した場合に生じる電界を、上記基板型光導波路素子の断面であって光の進行方向に対して垂直な断面ごとに数値計算した計算結果を示す。

【図4】(a)～(f)のそれぞれは、上記基板型光導波路素子の第2の入射ポートにTE0偏波を入射した場合に生じる電界を、上記基板型光導波路素子の断面であって光の進行方向に対して垂直な断面ごとに数値計算した結果を示す。

【図5】(a)は、本発明の実施例に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

【図6】本発明の実施例に係る基板型光導波路素子のコアを導波するTE0偏波の偶モード、TE0偏波の奇モード、及びTM0の偶モードに対する実効屈折率を、光の進行方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。

40

【図7】(a)は、本発明の比較例に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

【図8】本発明の比較例に係る基板型光導波路素子のコアを導波するTE0偏波の偶モード、TE0偏波の奇モード、及びTM0の偶モードに対する実効屈折率を光の進行方向であるz方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。

【図9】図6に示した#1の導波モードのx方向の電力成分及びy方向の電力成分を、光の進行方向であるz方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。

【図10】本発明の第1の変形例に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。

【図11】本発明の第2の変形例に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。

50

【図12】本発明の一実施形態に係る基板型光導波路素子であって、数値実験に用いた基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。

【図13】図12に示した基板型光導波路素子であって、光の波長を1580nmとし、デバイス長を60 $\mu$ mとした基板型光導波路素子におけるTM損失の幅 $W_c$ 依存性を数値計算した結果を示すグラフである。

【図14】(a)及び(b)は、それぞれ、図12に示した基板型光導波路素子であって、デバイス長を80 $\mu$ m、幅 $W_a$ を400nmとした基板型光導波路素子におけるTM損失の光の波長依存性及びTE損失の光の波長依存性を数値計算した結果を示すグラフである。

【図15】図12に示した基板型光導波路素子であって、デバイス長を80 $\mu$ m、幅 $W_a$ を400nmとした基板型光導波路素子における偏波消光比の光の波長依存性を数値計算した結果を示すグラフである。

10

【図16】図12に示した基板型光導波路素子であって、デバイス長を80 $\mu$ m、幅 $W_a$ を400nmとした基板型光導波路素子におけるTM損失の光の波長依存性を数値計算した結果を示すグラフである。

【図17】(a)及び(b)は、それぞれ、図12に示した基板型光導波路素子であって、デバイス長を80 $\mu$ m、幅 $W_a$ を400nmとした基板型光導波路素子におけるTM損失の光の波長依存性及びTE損失の光の波長依存性を示すグラフである。

【図18】(a)は、本発明の第2の実施形態に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

20

【図19】(a)は、本発明の第2の実施形態に係る基板型光導波路素子のコアを導波するTE0偏波の偶モード、TE0偏波の奇モード、及びTM0の偶モードに対する実効屈折率を、光の進行方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。(b)は、(a)に示したグラフの相互作用区間i近傍を拡大したグラフである。

【図20】(a)は、本発明の第3の実施形態に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

【図21】本発明の第3の実施形態に係る基板型光導波路素子のコアを導波するTE0偏波の偶モード、TE0偏波の奇モード、及びTM0の偶モードに対する実効屈折率を、光の進行方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。

30

【図22】(a)は、本発明の第4の実施形態に係る基板型光導波路素子の構成を示す上面図である。(b)及び(c)は、(a)に示した基板型光導波路素子の構成を示す断面図である。

【図23】本発明の適用例に係る光変調器の構成を示すブロック図である。

【図24】既存の偏波ローテータの構成を示すブロック図である。

【図25】既存の偏波ビームコンバイナの構成を示すブロック図である。

【図26】既存の偏波ローテータ及び偏波ビームコンバイナを適用した光変調器の構成を示すブロック図である。

【図27】(a)は、理想的な非対称Y分岐構造のコアの構成を示す上面図である。(b)は、実際に製造した非対称Y分岐構造のコアの構成を示す上面図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0020】

〔第1の実施形態〕

本発明に係る基板型光導波路素子の第1の実施形態について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【0021】

(基板型光導波路素子の構成)

本実施形態に係る基板型光導波路素子1の構成について、図1～図2を参照して説明する。図1の(a)は、基板型光導波路素子1の構成を示す上面図である。図1の(b)及

50

び(c)は、それぞれ、基板型光導波路素子1の構成を示す断面図であって、図1の(a)に示すA-A'線及びB-B'線における断面図である。図2の(a)及び(b)は、基板型光導波路素子1の機能を説明するための上面図である。

【0022】

基板型光導波路素子1は、図1の(b)及び(c)に示すように、下部クラッド12と、下部クラッド12上に形成されたコア11と、コア11を覆うように下部クラッド12上に形成された上部クラッドとを備えている。

【0023】

コア11は、図1の(a)に示すように、互いに並走して配置された第1コア11a及び第2コア11b、並びに、その入射端面11c1が第1コア11aの出射端面11a2及び第2コア11bの出射端面11b2に接続された第3コア11cを含む。

10

【0024】

以下の説明においては、第1コア11aと第2コア11bとが並走する区間を並走区間Iとする。並走区間Iの始点は、第1コア11a及び第2コア11bの入射端面11a1、11b1を含む断面であり、並走区間Iの終点は、第1コア11a及び第2コア11bの出射端面11a2、11b2を含む断面である。また、並走区間Iにおいてコア11を導波する光の進行方向をz軸正方向と定義する。z座標の値としては、並走区間Iの長さで規格化された値を用いる。

【0025】

第1コア11aの入射端面11a1は、基板型光導波路素子1の第1の入射ポートとして機能する。なお、第1コア11aの幅を幅 $W_a$ とし、特に入射端面11a1の幅及び出射端面11a2の幅を、それぞれ、幅 $W_{a1}$ 及び幅 $W_{a2}$ とする。幅 $W_{a2}$ は、特許請求の範囲に記載の $W_{1out}$ に対応する。

20

【0026】

第2コア11bの入射端面11b1は、基板型光導波路素子1の第2の入射ポートとして機能する。なお、第2コア11bの幅を幅 $W_b$ とし、特に入射端面11b1の幅及び出射端面11b2の幅を、それぞれ、幅 $W_{b1}$ 及び幅 $W_{b2}$ とする。幅 $W_{b2}$ は、特許請求の範囲に記載の $W_{2out}$ に対応する。

【0027】

第3コア11cの出射端面11c2は、基板型光導波路素子1の出射ポートとして機能する。なお、第3コア11cの幅を幅 $W_c$ とする。本実施形態において、第3コア11cの幅 $W_c$ は、入射端面11c1出射端面11c2まで一定である。幅 $W_c$ は、特許請求の範囲に記載の $W_{3in}$ に対応する。

30

【0028】

基板型光導波路素子1は、以下の要件(1)~(4)を満たすように構成されている。

【0029】

(1)第2コア11bが存在しない場合の第1コア11aの入射端面11a1を導波するTE0偏波の実効屈折率は、第1コア11aが存在しない場合の第2コア11bの入射端面11b1を導波するTE0偏波の実効屈折率より小さい。

【0030】

(2)上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTM0偏波の実効屈折率、及び、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の実効屈折率は、上記並走区間の始点からの距離の関数として連続である。

40

【0031】

(3)並走区間Iを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率と、並走区間Iを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、コア11の並走区間Iの始点と終点とで逆転する。

【0032】

(4)並走区間Iのうち、上記TE0偏波の奇モードと上記TM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間iにおいては、光の導波方向(z軸方向)に対して垂直な断面

50



における屈折率分布が上下非対称である。

【0033】

本実施形態においては、要件(1)を満たすために、第1コア11aの入射端面11a1の幅 $W_{a1}$ と、第2コア11bの入射端面11b1の幅 $W_{b1}$ とを、 $W_{a1} < W_{b1}$ を満たすように定める。

【0034】

また、本実施形態においては、要件(2)を満たすために、第1コア11aおよび第2コア11bの断面形状を、並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって、連続的に変化させる構成を採用している。具体的には、第1コア11aの高さと第2コア11bの高さを高さ $h$ に共通化した上で、幅 $W_a$ と幅 $W_b$ との各々を並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって連続的に狭くする構成を採用している。

10

【0035】

また、要件(3)を満たすコア11の形状は、並走区間Iを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率及び並走区間Iを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率をシミュレーションを用いて計算することによって決定することができる。

【0036】

また、各断面における第1コア11aの幅 $W_a(z)$ を、 $W_a(z)$ が負の傾きを有する連続関数となるように定め、各断面における第2コア11bの幅 $W_b(z)$ を、 $W_b(z)$ が負の傾きを有する連続関数となるように定める。換言すれば、幅 $W_a$ は、並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって、幅 $W_{a1}$ から幅 $W_{a2}$ まで連続的に狭まり、幅 $W_b$ は、並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって、幅 $W_{b1}$ から幅 $W_{b2}$ まで連続的に狭まるように定める。

20

【0037】

また、本実施形態においては、要件(4)を満たすために、第1コア11aと第2コア11bとを連通させるスラブ11dであって、第1コア11a及び第2コア11bよりも高さの低いスラブ11dを設ける。

【0038】

スラブ11dを備えていることによって、コア11の断面形状は、上下非対称な形状となる。その結果、下部クラッド12及び上部クラッド13の各々を、同じ屈折率を有する材料によって構成した場合であっても、光の導波方向(図1の(a)に図示されるz軸方向)に対して垂直な断面における屈折率分布は、上下非対称な形状となる。なお、本実施形態においては、スラブ11dを並走区間I全体に亘って設けているが、本発明はこれに限定されない。すなわち、スラブ11dは、相互作用区間iに設けられていればよい。なお、相互作用区間iについては、参照する図を代えて後述する。

30

【0039】

なお、上記要件(1)、(3)、(4)が満たされている場合、上記要件(2)は、下記要件(2')とも表現できる。すなわち、基板型光導波路素子1は、要件(1)、(2')、(3)、(4)を満たすように構成されているとも表現できる。

【0040】

(2')並走区間Iの始点においてTE0偏波の奇モードであるモード、及び、並走区間Iの始点においてTM0偏波の偶モードであるモードは、ともに並走区間Iの始点からの距離の関数として連続である。

40

【0041】

なお、後述する「モード変換の動作原理」の項において図6を参照して説明するように、並走区間Iの始点においてTE0偏波の奇モードであるモード(図6に図示する#1)は、相互作用区間iにおいて2つのハイブリッドモードのうち実効屈折率が高い方のモードとなり、並走区間Iの終点においてTM0偏波の偶モードであるモードとなる。同様に、並走区間Iの始点においてTM0偏波の偶モードであるモード(図6に図示する#2)は、相互作用区間iにおいて2つのハイブリッドモードのうち実効屈折率が低い方のモードとなり、並走区間Iの終点においてTE0偏波の奇モードとなる。

50

## 【 0 0 4 2 】

また、スラブ 1 1 d は、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間に生じる光結合を強めるという副次的な効果を奏する。スラブ 1 1 d を備えていない場合、並走区間 I を導波する光の電界の多くは、第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b の各々の内部に閉じ込められる。その結果として、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間に生じる光結合は、強くならない。一方、コア 1 1 がスラブ 1 1 d を備えている場合、並走区間 I を導波する光の電界は、第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b の各々からスラブ 1 1 d を介して他方のコアの方向へ大きく浸み出す。その結果、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間に生じる光結合は、強くなる。

## 【 0 0 4 3 】

また、スラブ 1 1 d は、並走区間 I の終点において、光が並走区間 I から第 3 コア 1 1 c に入射するときの効率を高めるといふ副次的な効果も奏する。ここで、並走区間 I を導波してきた後に第 3 コア 1 1 c に入射した T M 0 偏波の偶モードは、第 3 コア 1 1 c を導波する T M 0 偏波に変換することができる。同様に、並走区間 I を導波してきた後に第 3 コア 1 1 c に入射した T E 0 偏波の偶モードは、第 3 コア 1 1 c を導波する T E 0 偏波に変換することができる。スラブ 1 1 d を備えていることによって、基板型光導波路素子 1 は、この並走区間 I から第 3 コア 1 1 c に T M 0 偏波の偶モード及び T E 0 偏波の偶モードが入射するときの効率を高め、損失を低減する。この効果は、スラブ 1 1 d が並走区間 I と第 3 コア 1 1 c との不連続性を小さくすることに起因する。換言すれば、この効果は、並走区間 I における第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との隙間をスラブ 1 1 d が埋めることによって、並走区間 I の断面形状と第 3 コア 1 1 c の断面形状とが近づくことに起因する。

## 【 0 0 4 4 】

以上のように構成された基板型光導波路素子 1 の第 1 の入射ポートに入射された T E 0 偏波は、コア 1 1 を導波する T E 0 偏波の奇モードと見做すことができる。この T E 0 偏波の奇モードは、並走区間 I を導波する過程において T E 0 偏波の奇モードから T M 0 偏波の偶モードへ変換され、第 3 コア 1 1 c に入射する。第 3 コア 1 1 c に入射した T M 0 偏波の偶モードは、第 3 コア 1 1 c を導波する T M 0 偏波と見做すことができる。第 3 コア 1 1 c を導波する T M 0 偏波は、基板型光導波路素子 1 の出射ポートから出射される（図 2 参照）。

## 【 0 0 4 5 】

また、基板型光導波路素子 1 の第 2 の入射ポートに入射された T E 0 偏波は、コア 1 1 を導波する T E 0 偏波の偶モードと見做すことができる。この T E 0 偏波の偶モードは、並走区間 I を T E 0 偏波の偶モードのまま導波し、第 3 コア 1 1 c に入射する。第 3 コア 1 1 c に入射した T E 0 偏波の偶モードは、第 3 コア 1 1 c を導波する T E 0 偏波と見做すことができる。第 3 コア 1 1 c を導波する T E 0 偏波は、基板型光導波路素子 1 の出射ポートから出射される（図 2 参照）。

## 【 0 0 4 6 】

したがって、基板型光導波路素子 1 は、第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートに、それぞれ別個の T E 0 偏波が入射された場合に、第 1 の入射ポートに入射された T E 0 偏波を T M 0 偏波に変換すると共に、変換された該 T M 0 偏波と第 2 の入射ポートに入射された T E 0 偏波とを多重して出射する偏波多重導波路として機能する。すなわち、基板型光導波路素子 1 は、偏波ローテータと偏波ビームコンバイナとの機能を併せ持ち、図 2 6 に示す偏波多重導波路として機能する。

## 【 0 0 4 7 】

また、基板型光導波路素子 1 の出射ポートに T E 0 偏波と T M 0 偏波とを入力した場合、基板型光導波路素子 1 は、第 1 の入射ポートから T E 0 偏波を出力し、第 2 の入射ポートから T E 0 偏波を出力する。したがって、基板型光導波路素子 1 は、偏波ビームスプリッタと偏波ローテータとしての機能を併せ持つ。

## 【 0 0 4 8 】

基板型光導波路素子 1 は、リソグラフィプロセスとエッチングプロセスとを組み合わせることによって製造することができる。リソグラフィプロセスを用いる場合、露光する光の波長などに起因して、実現可能なパターンの精細さ、換言すればコア 1 1 a , 1 1 b 間の最小間隔が制限される。基板型光導波路素子 1 がスラブ 1 1 d を備えていることによって、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間隔を上記最小間隔より十分に広く設定したとしても、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b と間に生じる光結合は、相互作用区間 i として機能するのに十分な強さとなる。したがって、基板型光導波路素子 1 は、製造誤差に強く、容易に製造することができ、結果として製造コストを抑制することができる。

【 0 0 4 9 】

なお、基板型光導波路素子 1 において、コア 1 1、すなわち、第 1 コア 1 1 a、第 2 コア 1 1 b、第 3 コア 1 1 c、及びスラブ 1 1 d は、単一の材料からなることが好ましく、シリコン ( S i ) 製であることがより好ましい。例えば、S O I ( Silicon-On-Insulator ) ウェハを用いることによって、シリコン製のコア 1 1 を備えた基板型光導波路素子 1 を作製可能である。S O I ウェハを用いる場合、( i ) S O I ウェハ上にリソグラフィプロセスを用いて保護膜を形成し、( i i ) B O X 層 ( Buried Oxide Layer ) 上に形成されたシリコン層を 2 回エッチングすることによって、コア 1 1 を形成することができる。

【 0 0 5 0 】

また、この場合には、下部クラッド 1 2 として、S O I ウェハの B O X 層をなすシリカ ( S i O <sub>2</sub> ) を利用することができる。すなわち、この場合、シリカ製の下部クラッド 1 2 を採用することになる。

【 0 0 5 1 】

上部クラッド 1 3 は、コア 1 1 を埋設するように下部クラッド 1 2 上に好適な屈折率を有する材料を積層することによって形成可能である。基板型光導波路素子 1 においては、スラブ 1 1 d により屈折率分布が非対称化されているため、同じ材料からなる下部クラッド 1 2 及び上部クラッド 1 3 を採用しても、上述した要件 ( 4 ) を満たすことができる。下部クラッド 1 2 と同様にシリカ製の上部クラッド 1 3 を採用する場合、コア 1 1 を埋設するように下部クラッド 1 2 上にシリカ膜を積層すればよい。

【 0 0 5 2 】

下部クラッド 1 2 及び上部クラッド 1 3 の各々が異なる材料からなる場合、それぞれの材料が有する線膨張係数の違いなどに起因して、製造プロセスの難易度が上昇したり、歩留りが低下したりする可能性がある。しかし、それぞれが同じ材料からなる下部クラッド 1 2 及び上部クラッド 1 3 を採用することによって、このような問題を回避することができる。

【 0 0 5 3 】

以下に、基板型光導波路素子 1 のより好ましい構成について説明する。

【 0 0 5 4 】

基板型光導波路素子 1 において、第 1 コア 1 1 a の出射端面 1 1 a 2 と第 2 コア 1 1 b の出射端面 1 1 b 2 とは、互いに離間していることが好ましい。

【 0 0 5 5 】

並走区間 I の終点において第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との側面同士が接する構造、すなわち、非特許文献 2 に記載された非対称 Y 分岐の構造を製造する場合、図 2 7 の ( a ) に示すように、Y 字の付け根部分が精度よく作ることができず、図 2 7 の ( b ) に示すように Y 字の付け根部分が丸みを帯びた形になってしまう。これは、基板型光導波路を製造する際に、主にリソグラフィによる導波路構造の描写が解像限界によって制限されるために起こる。付け根部分が丸みを帯びると、導波する光は付け根部分で急激に電界分布が変化して、光散乱が生じ損失が増大する。これは、エネルギー効率の観点から好ましくない。

【 0 0 5 6 】

並走区間 I の終点において第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との側面同士が離間していることによって、並走区間 I の終点におけるスラブ 1 1 d の幅をリソグラフィプロセス及

10

20

30

40

50

びエッチングプロセスを用いて実現可能なコア11a, 11b間の最小間隔に対して十分広く設定することができる。したがって、基板型光導波路素子1は、並走区間Iの終点におけるスラブ11dの形状の誤差を低減することができ、該形状の誤差に起因する損失を低減することができる。

【0057】

また、第1コア11aの出射端面11a2と第2コア11bの出射端面11b2とは、合同な形状であり、並走区間Iの終点入射側におけるコア11の断面、及び、並走区間Iの終点出射側におけるコア11の断面は、それぞれ左右対称な形状であり、並走区間Iの終点入射側におけるコア11の断面の対称軸と、並走区間Iの終点出射側におけるコア11の断面の対称軸とは、互いに一致することが好ましい。

10

【0058】

ここで、並走区間Iの終点( $z=1$ )におけるコア11の断面が左右対称な形状となるためには、出射端面11a2と出射端面11b2とが合同な長方形(矩形)又は等脚台形であり、スラブ11dの高さが均一であればよい。この場合、並走区間Iの終点( $z=1$ )におけるコア11の断面は、コア11の高さ方向と平行な直線であって、コア11の幅を二等分する点と通る直線を対称軸として、左右対称な形状となる。

【0059】

また、入射端面11c1が左右対称な形状となるためには、入射端面11c1の形状が長方形(矩形)又は等脚台形であればよい。この場合、入射端面11c1は、コア11の高さ方向と平行な直線であって、第3コア11cの幅 $W_c$ を二等分する点と通る直線を対称軸として、左右対称な形状となる。このように構成された基板型光導波路素子1では、並走区間Iの終点におけるコア11の断面の上記対称軸と、第3コア11cの入射端面11c1の上記対称軸とは、互いに一致する。

20

【0060】

上記の構成によれば、低損失化でき、クロストークを低減させることが可能となる。以下、その理由を説明する。

【0061】

出射端面11a2と出射端面11b2とが互いに合同であることにより、隣接するコア11a, 11bの間に生じる光結合が強まる。したがって、コア11の並走区間Iを導波する光の電界分布は、第1コア11aと第2コア11bとの間、すなわちスラブ11dに浸み出す。なぜなら、出射端面11a2と出射端面11b2とが互いに合同である場合、位相整合条件が成立するためである(非特許文献4参照)。

30

【0062】

加えて、並走区間Iの終点入射側におけるコア11の断面、及び、並走区間Iの終点出射側におけるコア11の断面は、それぞれ左右対称な形状であることによって、並走区間Iにおけるコア11のTE<sub>0</sub>偏波の偶モード及びTM<sub>0</sub>偏波の偶モードは、並走区間Iにおける基板型光導波路素子1の断面であって、光の進行方向に垂直な断面において、左右対称な電界分布を形成する。

【0063】

更に、並走区間Iの終点入射側におけるコア11の断面の対称軸と、並走区間Iの終点出射側におけるコア11の断面の対称軸とが互いに一致することによって、並走区間Iにおける、コア11のTE<sub>0</sub>偏波の偶モードの電界分布及びTM<sub>0</sub>偏波の偶モードの電界分布は、それぞれ、第3コア11cのTE<sub>0</sub>偏波の電界分布及びTM<sub>0</sub>偏波の電界分布と大きく重なる。したがって、並走区間Iにおけるコア11の導波モードと、第3コア11cの導波モードとの光結合の効率が高まり、結果として損失が低下する。

40

【0064】

また、第1コア11a及び第2コア11bにおいて、第1の入力ポートにTE<sub>0</sub>偏波を入力したときに生じるTE<sub>0</sub>偏波の奇モードが並走区間Iにおいて十分にTM<sub>0</sub>偏波の偶モードに変換されなかった場合を考える。この場合、変換されずに残留したTE<sub>0</sub>偏波の奇モードは、並走区間Iの終点に到達する。このとき、残留したTE<sub>0</sub>偏波の奇モードが

50

並走区間 I から第 3 コア 1 1 c に入射する可能性がある。第 3 コア 1 1 c に入射した上記残留した T E 0 偏波の奇モードは、第 3 コア 1 1 c を導波する T E 0 偏波に変換される可能性があり、第 2 の入力ポートに入力した T E 0 偏波と混在した状態で出力ポートから出力される。これは、クロストークを生じさせるため好ましくない。

【 0 0 6 5 】

しかしながら、残留した T E 0 偏波の奇モードが左右方向に対して反対称な電界分布を持つため、残留した T E 0 偏波の奇モードと第 3 コア 1 1 c の T E 0 偏波との重なりは小さい。理論的には、( 3 ) により、反対称な T E 0 偏波の奇モードの電界分布と、対称な T E 0 偏波の電界分布との重なりは、積分するとゼロになる。

【 0 0 6 6 】

したがって、並走区間 I を導波する T E 0 偏波の奇モードと、第 3 コア 1 1 c の T E 0 偏波との結合効率が低下するため、基板型光導波路素子 1 は、結果として上述したクロストークを低減できる。

【 0 0 6 7 】

なお、ここでいう長方形（矩形）とは、厳密な意味での長方形（矩形）に加えて、基板型光導波路素子 1 の製造プロセスにおいて長方形（矩形）を形成しようとした結果として得られた形状を含む。本明細書において、上記長方形（矩形）を形成しようとした結果として得られた形状のことを長方形（矩形）に準ずる形状とする。

【 0 0 6 8 】

シリコン製のコア 1 1 を形成する場合には、例えば、R I E (Reactive Ion Etching) などのエッチングプロセスを利用可能である。このようなエッチングプロセスにおいては、形成されたコア 1 1 の側面と、下部クラッド 1 2 の表面に対する垂線との成す角が  $0^\circ$  にならず、上記側面がわずかに（具体的には、 $\pm 5^\circ$  以下）傾くことがある。また、このようなエッチングプロセスにおいては、形成されたコア 1 1 の頂点の角が鈍ることがある。このように、側面がわずかに傾いている長方形のような形状、及び、頂点の角が鈍った長方形のような形状は、何れも長方形に準ずる形状に該当する。

【 0 0 6 9 】

また、ここでいう等脚台形とは、一方の底辺の両端に位置する内角の大きさが、それぞれ  $85^\circ$  以下である等脚台形のことを意味する。本明細書において、等脚台形を形成しようとした結果として得られた形状のことを等脚台形に準ずる形状とする。例えば、頂点の角が鈍った等脚台形のような形状は、等脚台形に準ずる形状に該当する。なお、上記内角の大きさが  $85^\circ$  より大きく  $90^\circ$  以下である等脚台形は、上述した長方形に準ずる形状に含まれる。

【 0 0 7 0 】

また、基板型光導波路素子 1 において、第 1 コア 1 1 a の出射端面 1 1 a 2 の幅  $W_{a_2}$ 、第 2 コア 1 1 b の出射端面 1 1 b 2 の幅  $W_{b_2}$ 、及び、第 3 コア 1 1 c の入射端面の幅  $W_c$  は、 $W_{a_2} + \text{幅} W_{b_2} > \text{幅} W_c$  を満たすことが好ましい。ここで、幅  $W_{a_2}$ 、幅  $W_{b_2}$ 、及び幅  $W_c$  は、それぞれ、特許請求の範囲に記載の幅  $W_{1 \text{ out}}$ 、幅  $W_{2 \text{ out}}$ 、及び幅  $W_{3 \text{ in}}$  に対応する。

【 0 0 7 1 】

上述したとおり、コア 1 1 の並走区間 I を導波する光の電界分布は、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間に浸み出す。第 3 コア 1 1 c の幅  $W_c$  を狭めることによって、第 3 コア 1 1 c の T M 0 偏波及び T E 0 偏波の各々の電界分布の幅を絞ることが可能である。したがって、上記の構成によれば、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b の間に集まった T M 0 偏波の偶モードの電界分布と、第 3 コア 1 1 c の T M 0 偏波の電界分布との重ね合わせの割合（( 3 ) 参照）を大きくできる場合がある。同様に、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b の間に集まった T E 0 偏波の偶モードの電界分布と、第 3 コア 1 1 c の T E 0 偏波の電界分布との重ね合わせの割合（( 3 ) 参照）を大きくできる場合がある。これらの重ね合わせを大きくすることによって、基板型光導波路素子 1 は、並走区間 I の終点における損失をさらに低減することができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 2 】

図 1 の ( a ) に示すように、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b との間隔は、並走区間 I の始点 (  $z = 0$  ) から終点 (  $z = 1$  ) に近づくにしたがって、次第に狭まるのが好ましい。換言すれば、並走区間 I の始点において、第 1 コア 1 1 a の入射端面 1 1 a 1 と第 2 コア 1 1 b の入射端面 1 1 b 1 とは、相互作用を生じさせない程度に離間されていることが好ましく、並走区間 I の終点において、第 1 コア 1 1 a の出射端面 1 1 a 2 と第 2 コア 1 1 b の出射端面 1 1 b 2 とは、十分な相互作用を生じさせる程度に近接されていることが好ましい。

## 【 0 0 7 3 】

第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b とが互いに離間している場合、非特許文献 4 に示されるように、第 1 コア 1 1 a の導波モードと第 2 コア 1 1 b の導波モードとの光結合は、弱くなる。光結合が弱いと、一方のコアが隣接する他方のコアから受ける影響が小さくなり、スーパーモードの電界分布は、それぞれのコア 1 1 a , 1 1 b が独立に存在するときの電界分布に近づく。すなわち、第 1 の入力ポートにおいて、T E 0 偏波の奇モードの電界分布は、独立に存在するときの第 1 コア 1 1 a の T E 0 偏波の電界分布に近づく。また、第 2 の入力ポートにおいて、T E 0 偏波の偶モードの電界分布は、独立に存在する場合の第 2 コア 1 1 b の T E 0 偏波の電界分布に近づく。

## 【 0 0 7 4 】

第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートの各々に接続される外部導波路のコアは、互いに独立であると見做せる。そのため、第 1 の入射ポートと第 2 の入射ポートとの間隔を十分に離間しておくことによって、外部導波路のコアから入力される T E 0 偏波を第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b のスーパーモードにモード変換するときの変換効率を高めることができる。換言すれば、外部導波路のコアから入力される T E 0 偏波を第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b の各々に入力するときの損失をより低減することができる。

## 【 0 0 7 5 】

なお、本実施形態では、要件 ( 4 ) を満たすために、コア 1 1 がスラブ 1 1 d を備える構成を採用しているが、本発明は、これに限定されない。すなわち、要件 ( 4 ) を満たすために、スラブ 1 1 d に代えて、第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b の断面が上下非対称である構成を採用してもよいし、下部クラッド 1 2 と上部クラッド 1 3 とが互いに屈折率が異なる材料からなる構成を採用しても構わない。後者の場合には、下部クラッド 1 2 の屈折率と上部クラッド 1 3 の屈折率とを異ならせるために、互いに異なる屈折率を有する材料を下部クラッド 1 2 及び上部クラッド 1 3 の各々として用いる構成を採用しても構わない。また、下部クラッド 1 2 とは屈折率が異なる空気層を上部クラッド 1 3 として用いる構成、すなわち、上部クラッド 1 3 を積層しない構成を採用しても構わない。

## 【 0 0 7 6 】

また、本実施形態では、スラブ 1 1 d が並走区間 I の全区間に渡って設けられている構成を採用しているが、本発明は、これに限定されない。すなわち、要件 ( 4 ) を満たすために、スラブ 1 1 d は、少なくとも、並走区間 I を導波する T E 0 偏波の奇モードと T M 0 偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間  $i$  に形成されていればよい。

## 【 0 0 7 7 】

( モード変換の動作原理 )

要件 ( 1 ) を満たすことによって、第 1 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は、コア 1 1、すなわち第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b とを含む断面における T E 0 偏波の奇モードに変換され、第 2 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b を含む断面における T E 0 偏波の偶モードに変換される。換言すれば、第 1 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は、コア 1 1 を導波する T E 0 偏波の奇モードと見做せ、第 2 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は、コア 1 1 を導波する T E 0 偏波の偶モードと見做せる。以下に、その理由を説明する。

## 【 0 0 7 8 】

以下では、非特許文献 4 の p p . 5 2 6 - 5 3 1 ( 13.9 THE EIGENMODES OF A COUPLED

10

20

30

40

50

WAVEGUIDE SYSTEM (supermodes) ) を参考にしている。

【 0 0 7 9 】

非特許文献 4 によると、2 つのコア 1 1 a , 1 1 b が隣接した場合、一方のコア 1 1 a のある導波モードが他方のコア 1 1 b のある導波モードに結合し、2 つのコア 1 1 a , 1 1 b を合わせた断面において、コア 1 1 全体にまたがった電界分布を持つような導波モードを示す。これは、スーパーモードと呼ばれる分布である。スーパーモードは隣接するコア 1 1 a , 1 1 b の電界分布がそれぞれ同位相となる偶モードと、逆位相となる奇モードとに分かれる。

【 0 0 8 0 】

非特許文献 4 によると、スーパーモードの電界がコア 1 1 全体にまたがって存在する割合は、隣接させたコア 1 1 a , 1 1 b が、それぞれ独立に存在するときの T E 0 偏波の実効屈折率の一致の程度で決まり、実効屈折率が一致するほど、隣接させたコア 1 1 a , 1 1 b に電界がまたがって存在する割合は大きくなる。反対に言うと、実効屈折率が一致しない場合、一方のコア (例えばコア 1 1 a ) に局在した分布を示す。要件 ( 1 ) が満たされる場合、第 1 の入力ポート及び第 2 の入力ポートでは、独立にコア 1 1 a , 1 1 b が存在した時の T E 0 偏波の実効屈折率には差があるため、一方のコアに電界分布は局在した分布を示す。このときの電界分布は、それぞれのコア 1 1 a , 1 1 b が独立に存在するときの T E 0 偏波の電界分布に近くなる。

【 0 0 8 1 】

更に、非特許文献 4 で開示されるように、奇モードは偶モードよりも常にその実効屈折率が小さくなる。したがって、要件 ( 1 ) が満たされる場合、第 1 の入力ポート及び第 2 の入力ポートの断面における T E 0 偏波の奇モードは、第 1 コア 1 1 a が独立に存在するときの T E 0 偏波の電界分布に近づき、T E 0 偏波の偶モードは、第 2 コア 1 1 b が独立に存在するときの T E 0 偏波の電界分布に近づく。そのため、第 1 コア 1 1 a の第 1 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は T E 0 偏波の奇モードに変換され、第 2 コア 1 1 b の第 2 の入力ポートに入力された T E 0 偏波は、T E 0 偏波の偶モードとなる。

【 0 0 8 2 】

これらの変換は、第 1 の入力ポート及び第 2 の入力ポートのそれぞれの断面で行われるため、実質的にデバイス長の増加には寄与しない。

【 0 0 8 3 】

なお、要件 ( 1 ) を満たす方法として、コアの面積を第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b とで変える方法が考えられる。コアの面積が大きいほど、電界分布はコアにより強く閉じ込められ、その結果、コアの屈折率を強く感じるため実効屈折率は上昇する。即ち、コアの面積が大きいほど、実効屈折率は高くなる。したがって、第 1 の入力ポート及び第 2 の入力ポートを含む断面において、第 2 コア 1 1 b よりも第 1 コア 1 1 a のコア面積を小さくすることで、要件 ( 1 ) を満たすことができる。

【 0 0 8 4 】

要件 ( 3 ) 及び要件 ( 4 ) を満たすことにより、第 1 の入力ポートと第 2 の入力ポートを含む断面における T E 0 偏波の奇モードは、断熱的に、接続面における T M 0 偏波の偶モードに変換される。以下、具体例を交えて詳しく述べる。

【 0 0 8 5 】

始めに、要件 ( 3 ) を満たすが、要件 ( 4 ) を満たさない場合、すなわち、相互作用区間  $i$  の断面における屈折率分布が上下対称となる場合を考える。ここでは、基板型光導波路素子 1 に対する比較例として、図 7 に示す基板型光導波路素子 5 を用いて説明する。また、図 8 に、比較例に係る基板型光導波路素子 5 の並走区間  $I'$  を導波する光の進行方向 (図 7 に図示される  $z$  軸方向) に対して垂直な断面におけるモードの実効屈折率を計算した結果を示す。図 8 は、T E 0 偏波の偶モード ( # 0 ) 、T E 0 偏波の奇モード ( # 1 ) 、T M 0 偏波の偶モード ( # 2 ) を示す。

【 0 0 8 6 】

図 8 によれば、並走区間  $I'$  の始点 (  $z = 0$  ) と終点 (  $z = 1$  ) とで、T E 0 偏波の奇

10

20

30

40

50

モードと $TM_0$ 偏波の偶モードのそれぞれの実効屈折率の大小が逆転していることが分かった。

【0087】

また、並走区間 $I'$ の何れかの断面、すなわち、 $0 < z < 1$ の何れかの $z$ における断面において、 $TE_0$ 偏波の奇モードの実効屈折率と $TM_0$ 偏波の偶モードの実効屈折率とは、等しくなることが分かった。ここでは、 $TE_0$ 偏波の奇モードの実効屈折率と $TM_0$ 偏波の偶モードの実効屈折率とが等しくなる断面のことを縮退面と呼ぶ。図8によれば、基板型光導波路素子5の縮退面は、 $z = 0.75$ 付近にあることが分かった。

【0088】

続いて、要件(4)を満たす場合、すなわち、本実施形態に係る基板型光導波路素子1を10  
考える。並走区間 $I$ の断面であって、 $z$ 軸方向に対して垂直な断面における屈折率が上下非対称性を有するため、 $TE_0$ 偏波の奇モードと $TM_0$ 偏波の偶モードとの縮退面付近において、これらの導波モードは相互作用する。その結果、 $TE_0$ 偏波の奇モードと $TM_0$ 偏波の偶モードとは、相互作用区間 $i$ において2つのハイブリッドモードと呼ばれる混在した導波モードを形成する。

【0089】

これにより、縮退面において一致していた $TE_0$ 偏波の奇モードと $TM_0$ 偏波の偶モードの実効屈折率は、もはや一致しなくなる。したがって、光の進行方向( $z$ 軸正方向)に対して、並走区間 $I$ の始点における $TE_0$ 偏波の奇モードの実効屈折率と、並走区間 $I$ の終点における $TM_0$ 偏波の偶モードの実効屈折率とは、上記2つのハイブリッドモードのうち実効屈折率が高い方のハイブリッドモードの実効屈折率によって連続に接続されている(図6に示した1参照)。同様に、光の信号方向に対して、並走区間 $I$ の始点における $TM_0$ 偏波の偶モードの実効屈折率と、並走区間 $I$ の終点における $TE_0$ 偏波の奇モードの実効屈折率とは、上記2つのハイブリッドモードのうち実効屈折率が低い方のハイブリッドモードの実効屈折率によって連続に接続されている(図6に示した2参照)。なお、図6に示した実効屈折率を求めるために用いた基板型光導波路素子1の具体的な構成については、次の実施例において説明する。

【0090】

連続的に接続された実効屈折率を持つ2つの導波モード間では、緩やかに導波路構造を変化させることによって、非常に低損失なモード変換が可能なことが知られている。この低損失な変換は、断熱変換と呼ばれる。したがって、要件(3)と要件(4)とを満たすことによって、並走区間 $I$ の断面における $TE_0$ 偏波の奇モードは、断熱的に、接続面における $TM_0$ 偏波の偶モードに変換される。

【0091】

非特許文献5には、コアが矩形状の導波路において、下部クラッド12と上部クラッド13の屈折率が異なる場合、コアの最初の3つのモード(文献中では、 $TE_{11}$ 、 $TM_{11}$ 、 $TE_{21}$ と記載)のうち、 $TM_{11}$ と $TE_{21}$ とが相互作用することが記載されている。ここで言う最初の3つのモードとは、導波モードのうち実効屈折率の大きい3つのモードを指す。

【0092】

ここでは、次の2点に着目する。

【0093】

1点目は、基板型光導波路素子1における $TE_0$ 偏波の奇モードは、非特許文献5の $TE_{21}$ に対応し、 $TM_0$ 偏波の偶モードは、非特許文献5の $TM_{11}$ に対応する点である。スーパーモードは、隣接するコアを1つのコアと見做した場合に、この1つのコア内の導波モードを表す。そのため、この1つのコアにおいて、 $TE$ 偏波の中で2番目に実効屈折率が高い $TE_0$ 偏波の奇モードは、同様に定義される非特許文献5の $TE_{21}$ に対応する。また、 $TM$ 偏波の中で最も実効屈折率が高い $TM_0$ 偏波の偶モードは、同様に定義される非特許文献5の $TM_{11}$ に対応する。

【0094】

10

20

30

40

50



2点目は、非特許文献5では、上部クラッド13と下部クラッド12との屈折率が異なる場合を開示しているが、2つの導波モードの相互作用の強さを表す非特許文献5に記載の(1)式によれば、屈折率分布が上下非対称であれば良いことが分かる。

【0095】

以上より、要件(3)及び要件(4)から、TE0偏波の奇モードとTM0偏波の偶モードは、相互作用する。したがって、基板型光導波路素子1において、並走区間Iの始点の断面におけるTE0偏波の奇モードは、断熱的に、並走区間Iの終点の断面におけるTM0偏波の偶モードにモード変換される。

【0096】

一方で、TE0偏波の偶モードは、上記1つのコアのどのモードとも相互作用しないため、並走区間Iを導波する間に他のモードにモード変換されることはない。

10

【0097】

なお、要件(2)及び要件(3)を満たすために、光の進行方向(図1の(a)に図示されたz軸正方向)に沿って、第1コア11a及び第2コア11bの幅を連続的に変化させる構成を採用してもよい。電界のコア-クラッドの界面における境界条件から、TE偏波の実効屈折率は、TM偏波の実効屈折率と比較して、コアの幅(基板型光導波路素子1における幅 $W_a$ 及び幅 $W_b$ )の変化に対して敏感である。すなわち、幅 $W_a$ 及び幅 $W_b$ が変化することに伴って、TE偏波の実効屈折率は、TM偏波の実効屈折率よりも大きく変化する。そのため、コアの幅を連続的に変化させることによって、TE0偏波の奇モードの実効屈折率とTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係を、並走区間Iの始点と終点とで入れ替えることができる。

20

【0098】

一方で、TM偏波は、TE偏波と比較して、コアの高さ(基板型光導波路素子1における高さ $h$ )の変化に対して敏感である。すなわち、高さ $h$ が変化することに伴って、TM偏波の実効屈折率は、TE偏波の実効屈折率よりも大きく変化する。

【0099】

したがって、並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって幅 $W_a$ 及び幅 $W_b$ を狭める構成に代えて、並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって、高さ $h$ を高くする構成を採用してもよい。高さ $h$ を変化させる構成を採用した場合も、幅 $W_a$ 及び幅 $W_b$ を変化させる構成を採用した場合と同様に、 $0 < z < 1$ の何れかの位置に縮退面を含む並走区間Iを形成することができる。

30

【0100】

また、(1)並走区間Iの始点においてTM0偏波の偶モード及びTM0偏波の奇モードの実効屈折率が、何れも、TE0偏波の偶モード及びTE0偏波の奇モードの実効屈折率を上回るような第1の入射ポート及び第2の入射ポートの断面形状としたうえで、(2)並走区間Iの始点から終点に近づくにしたがって、高さ $h$ を低くする構成を採用してもよい。この構成によっても、 $0 < z < 1$ の何れかの位置に縮退面を含む並走区間Iを形成することができる。

【0101】

(実施例)

40

上述したモード変換をより具体的に説明するために、本発明の実施例に係る基板型光導波路素子1について、図5を参照して説明する。図5の(a)は、本実施例に係る基板型光導波路素子1の構成を示す上面図である。図5の(b)及び(c)は、本実施例に係る基板型光導波路素子1の構成を示す断面図である。図5の(b)は、図5の(a)に示したA-A'線によるAA'断面である。図5の(c)は、図5の(a)に示したB-B'線によるBB'断面である。

【0102】

本実施例に係る基板型光導波路素子1は、第1の実施形態に係る基板型光導波路素子1と同様に構成されており、各部のサイズを次のように定めたものである。

【0103】

50

具体的には、図5の(a)に示すように、並走区間Iの始点における第1コア11aの幅(第1の入射ポートの幅)を400nmとし、第2コア11bの幅(第2の入射ポートの幅)を600nmとした。並走区間Iの終点における第1コア11aの幅を200nmとし、第2コア11bの幅を200nmとした。第1コア11aと第2コア11bとの間隔を、並走区間Iの始点において300nmとし、並走区間Iの終点において150nmとした。第3コア11cの幅を400nmとした。

【0104】

また、図5の(b)及び(c)に示すように、第1コア11a、第2コア11b、及び第3コア11cの高さを、共通に220nmとした。一方、スラブ11dの高さを95nmとした。

【0105】

次に、図6を参照して、本実施例に係る基板型光導波路素子1の並走区間Iにおける実効屈折率について説明する。図6は、並走区間I(0 <math>z</math> 1)の断面であって、 $z$ 軸方向に沿った各位置の各断面における実効屈折率を計算した結果を示すグラフである。

【0106】

図6は、実効屈折率が大きな順に、3つのモード(順に、#0、#1、#2)の実効屈折率の計算結果を示す。図6によれば、比較例に係る基板型光導波路素子5(図8参照)では交わっていたTE0偏波の奇モードとTM0偏波の偶モードの実効屈折率曲線が、本実施例に係る基板型光導波路素子1では分離していることが分かった。その結果、並走区間Iの始点( $z=0$ )におけるTE0偏波の奇モードは、連続的に接続された実効屈折率の曲線上(#1)を辿り、並走区間Iの終点( $z=1$ )におけるTM0偏波の偶モードと接続されていることが分かった。したがって、コア11a、11bの幅を $z$ 軸正方向に沿って緩やかに変化させることによって、断熱的にTE0偏波の奇モードからTM0偏波の偶モードにモード変換可能なことが分かった。

【0107】

#1の導波モードの変換をさらに詳しくみるために、#1の導波モードの幅方向( $x$ 方向)の電界成分( $E_x$ )と、高さ方向( $y$ 方向)の電界成分( $E_y$ )との電力の割合を計算した結果を図9に示す。

【0108】

図9における値 $R_{TE}$ 及び $R_{TM}$ は、以下で定義される値であり、それぞれ、規格化された $E_x$ 及び $E_y$ 成分の割合を示す。

【0109】

【数1】

$$R_{TE} = \frac{\left| \int_S E_x H_y ds \right|}{\left| \int_S E_x H_y ds \right| + \left| \int_S E_y H_x ds \right|} \quad (1)$$

【0110】

【数2】

$$R_{TM} = \frac{\left| \int_S E_y H_x ds \right|}{\left| \int_S E_x H_y ds \right| + \left| \int_S E_y H_x ds \right|} \quad (2)$$

【0111】

ここで、 $H_x$ 及び $H_y$ は、それぞれ幅方向と高さ方向の磁界成分であり、積分は幅方向、高さ方向を含む平面全体で行うとする。

【0112】

$E_x$ が支配的な導波モードでは、 $H_y$ が支配的である。電界成分と磁界成分の積の積分

10

20

30

40

50

値は、電力の次元を持つため、 $R_{TE}$  は、全電力に対する  $E_x$  の電力割合を示している。同様に、 $R_{TM}$  は、全電力に対する  $E_y$  の電力割合を示している。

【0113】

本明細書において、 $0.3 < R_{TE} < 0.7$  及び  $0.3 < R_{TM} < 0.7$  を満たす区間のことを相互作用区間  $i$  と定義し、このときの導波モードのことをハイブリッドモードと定義する。

【0114】

図9を見ると、並走区間 I の始点 ( $z = 0$ ) では、 $E_x$  が主成分であり、相互作用区間  $i$  を通して主成分が  $E_y$  に連続的に変換し、接続面で  $E_y$  が主成分となっていることが分かる。このことから、並走区間 I を導波する光の偏波方向が回転していることが分かる。

10

【0115】

以上のように、要件(4)を満たすことによって、TE0 偏波の奇モードと TM0 偏波の偶モードとは、互いに相互作用する。その結果として、TE0 偏波の奇モードと TM0 偏波の偶モードとは、互いにモード変換することが可能である。

【0116】

(並走区間の終点において第1コア11aと第2コア11bとが離間していることの効果)

接続面では、第1コア11a、第2コア11bと第3コア11cが突き合わせ結合によって接続される。この断面において、第1コア11a、第2コア11bのスーパーモードは、第3コア11cの導波モードに変換される。

20

【0117】

突合せ結合の変換効率は、(3)によって近似的に表すことができる。

【0118】

【数3】

$$\eta = C \left| \int (E_x^{WG1,2} \times E_x^{WG3} + E_y^{WG1,2} \times E_y^{WG3}) dS \right|^2 \quad (3)$$

【0119】

ここで、各パラメータは以下のとおり。

30

【0120】

【数4】

$E_x^{WG1,2}$  : 並走区間 I の終端入射側におけるコア11の導波モードの電界の x 成分

$E_y^{WG1,2}$  : 並走区間 I の終端入射側におけるコア11の導波モードの電界の y 成分

$E_x^{WG3}$  : 並走区間 I の終端出射側におけるコア11の導波モードの電界の x 成分

$E_y^{WG3}$  : 並走区間 I の終端出射側におけるコア11の導波モードの電界の y 成分

40

$C$  : その他の係数

【0121】

また、積分は接続面を含む平面内全てで行っている。

【0122】

(3) は、同一の電界成分同士の積を積分したものになっている。そのため、 $E_y$  成分が主である、第1コア11aと第2コア11bの接続面における TM0 偏波の偶モードは、第3コア11cの TM0 偏波に変換され、 $E_x$  成分が主である、第1コア11aと第2コア11bの接続面における TE0 偏波の偶モードは、第3コア11cの TE0 偏波に変

50

換される。

【 0 1 2 3 】

この部分の変換は、断面で行われるため、実質的にデバイス長の増加には寄与しない。

【 0 1 2 4 】

以上より、基板型光導波路素子 1 は偏波多重導波路の機能を有し、従来技術のように、TE0 偏波から TE1 偏波を変換するデバイスと、TE1 偏波から TM0 偏波へ変換するデバイスといった独立した 2 つのデバイスが不要なことから、デバイスの小型化が可能となる。

【 0 1 2 5 】

(並走区間における電界分布)

初めに、各断面の導波モードの電界分布をシミュレーションすることで、基板型光導波路素子 1 の動作原理を説明する。なお、シミュレーションは有限要素法を用いて行った。図 5 のように構成した基板型光導波路素子 1 を用いて、電界分布をシミュレーションした。シミュレーションの結果を図 3 及び図 4 に示す。

【 0 1 2 6 】

第 1 コア 1 1 a の第 1 の入力ポートに TE0 偏波を入力した場合の各断面の電界を z 軸に沿って計算した。結果を図 3 に示す。波長は 1580 nm であり、図には、電界の Ex と Ey の両方を示している。(a) は、第 2 コア 1 1 b が存在しない場合の TE0 偏波であり、入力される電界を示している。(b) ~ (e) は、第 1 コア 1 1 a, 第 2 コア 1 1 b における 2 番目に実効屈折率の大きな導波モード(図 6 の # 1 に対応)、(f) は z = 1 における第 3 コア 1 1 c の TM0 偏波を示している。

【 0 1 2 7 】

(b) の TE0 偏波の奇モードの電界を見ると、入力される TE0 偏波を示す(a)の電界と類似した分布を持つことが分かる。これは、要件(1)を満たすことによって、TE0 偏波の奇モードが第 1 コア 1 1 a に局在した電界分布を持つためである。(b), (c) にかけて、隣接導波路の幅が近づくため、位相整合が起こり、TE0 偏波の奇モードは第 1 コア 1 1 a, 第 2 コア 1 1 b にまたがった分布をもつ。(d) は、図 6 に示す相互作用区間 i の電界分布であり、TE0 偏波の奇モードは Ey の電界成分が強まり、TM0 偏波の偶モードへと変換する過程の電界分布を表している。相互作用区間 i を経て、(e) では、TM0 偏波の偶モードとなっていることが分かる。(f) は、第 3 コア 1 1 c の z = 1 における TM0 偏波を表しており、(e) の TM0 偏波の偶モードと類似した電界分布を持つことが分かる。このため、これらは突合せ結合によって高効率な変換が可能となる。

【 0 1 2 8 】

続いて、第 2 コア 1 1 b の第 2 の入力ポートに TE0 偏波を入力した場合の各断面の電界を z 軸に沿って計算した。結果を図 4 に示す。波長は 1580 nm であり、図には、電界の Ex のみを示している。(a) は、第 1 コア 1 1 a が存在しない場合の TE0 偏波であり、入力される電界を示している。(b) ~ (e) は、第 1 コア 1 1 a, 第 2 コア 1 1 b における 1 番目に実効屈折率の大きな導波モード(図 6 の # 0 に対応)、(f) は z = 1 における第 3 コア 1 1 c の TE0 偏波を示している。

【 0 1 2 9 】

(b) の TE0 偏波の偶モードの電界を見ると、入力される TE0 偏波を示す(a)の電界と類似した分布を持つことが分かる。これは、要件(1)を満たすことによって、TE0 偏波の偶モードが第 2 コア 1 1 b に局在した電界分布を持つためである。(b), (c) にかけて、隣接導波路の幅が近づくため、位相整合が起こり、TE0 偏波の偶モードは第 1 コア 1 1 a, 第 2 コア 1 1 b にまたがった分布をもつ。(d) は、図 6 に示す相互作用区間 i の電界分布である。TE0 偏波の偶モードは、どのモードとも相互作用しない。そのため、TE0 偏波の偶モードにモード変換は生じず、(e) に至るまで TE0 偏波の偶モードのまま導波する。(f) は、第 3 コア 1 1 c の z = 1 における TE0 偏波を表しており、(e) の TE0 偏波の偶モードと類似した電界分布を持つことが分かる。こ

10

20

30

40

50

のため、これらは突合せ結合によって高効率な変換が可能となる。

【0130】

以上に示すように、基板型光導波路素子1は偏波多重導波路として機能する。

【0131】

上述のように基板型光導波路素子1をSOIウェハを用いて作製する場合には、SOIウェハのシリコン層を用いてコア11を作製可能なため、第1コア11aの高さ、第2コア11bの高さ、及び第3コア11cの高さは、それぞれ、上記シリコン層の高さと共通に構成することが好ましい。この構成によれば、基板型光導波路素子1の製造工程に含まれるエッチング工程を簡便にすることができる。

【0132】

(第1の変形例)

第1の実施形態に係る基板型光導波路素子1の第1の変形例について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【0133】

本変形例に係る基板型光導波路素子1の構成について、図10を参照して説明する。図10は、本変形例に係る基板型光導波路素子1の構成を示す上面図である。

【0134】

図10に示すように、基板型光導波路素子1は、並走区間Iの前段に設けられた離間部14を備えている。離間部14は、互いに離間して配置された第4コア14aと第5コア14bとを含むコアである。第4コア14aの出射端面は、第1コア11aの入射端面が接続されており、第5コア14bの出射端面は、第2コア11bの入射端面に接続されている。第4コア14aと第5コア14bとの間隔は、並走区間Iの始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる。

【0135】

第4コア14aの幅が第1コア11aの幅と共通であり、第5コア14bの幅が第2コア11bの幅と共通であるため、第4コア14aの幅は、第5コア14bの幅より狭い。

【0136】

第4コア14aと第5コア14bとの間隔を次第に広げるために、基板型光導波路素子1では、並走区間Iにおける光の進行方向と平行な方向に第4コア14aを延伸し、第5コア14bを緩く曲げる構成を採用している。

【0137】

上記の構成によれば、基板型光導波路素子1の第1の入射ポートと第2の入射ポートとの間隔を十分に広くすることができる。

【0138】

本実施形態においては、第4コア14aと第5コア14bとの間隔を次第に広げるために第5コア14bのみを曲げる構成を採用しているが、本発明はこれに限定されない。第4コア14aのみを曲げる構成を採用してもよいし、第4コア14a及び第5コア14bの両方を曲げる構成を採用してもよい。

【0139】

なお、第5コア14bを曲げる構成は、第4コア14aを曲げる構成と比較して、コアにおいて生じる曲げ損失を低減することができる。コアの面積が広いほど、すなわち、高さ共通であればコアの幅が広いほど光をコアの内部に閉じ込めることができ、結果として曲げ損失を低減することができるためである。

【0140】

また、コア11がスラブ11dを含む場合、離間部14は、スラブ14cを更に含むことが好ましい。スラブ14cは、第4コア14aと第5コア14bとの間に、第4コア14aと第5コア14bとを連通させるスラブであって、第1コア11aと第2コア11bとを連通させるスラブ11dと高さが共通のスラブである。

【0141】

離間部14がスラブ14cを含むことによって、並走区間Iの始点において離間部14

10

20

30

40

50

の断面形状とコア 1 1 の断面形状とを一致させることができる。

【 0 1 4 2 】

( 第 2 の変形例 )

第 1 の実施形態に係る基板型光導波路素子 1 の第 2 の変形例について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【 0 1 4 3 】

本変形例に係る基板型光導波路素子 1 の構成について、図 1 1 を参照して説明する。図 1 1 は、本変形例に係る基板型光導波路素子 1 の構成を示す上面図である。

【 0 1 4 4 】

図 1 1 に示すように、基板型光導波路素子 1 は、並走区間 I の前段に設けられた変換部 1 5 を備えている。変換部 1 5 は、互いに離間して配置された第 4 コア 1 5 a と、第 5 コア 1 5 b と、スラブ 1 5 c とを含むコアである。スラブ 1 5 c は、第 1 の変形例に係るスラブ 1 4 c に対応する。

10

【 0 1 4 5 】

第 4 コア 1 5 a の出射端面は、第 1 コア 1 1 a の入射端面が接続されており、第 5 コア 1 5 b の出射端面は、第 2 コア 1 1 b の入射端面に接続されている。第 5 コア 1 5 b と第 5 コア 1 5 b との間隔は、並走区間 I の始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる。

【 0 1 4 6 】

変換部 1 5 は、第 1 のテーパ部 1 5 d と、第 2 のテーパ部 1 5 e とを更に含んでいる。

20

【 0 1 4 7 】

第 1 のテーパ部 1 5 d は、スラブ 1 1 d と高さが共通であるテーパ部であって、スラブ 1 4 c 及び第 4 コア 1 5 a の各々と連通し、第 4 コア 1 5 a の入射端面 1 5 a 1 から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がるテーパ部である。

【 0 1 4 8 】

第 2 のテーパ部 1 5 e は、スラブ 1 1 d と高さが共通であるテーパ部であって、スラブ 1 4 c 及び第 5 コア 1 5 b の各々と連通し、第 5 コア 1 5 b の入射端面 1 5 b 1 から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がるテーパ部である。

【 0 1 4 9 】

図 1 1 に示すように、第 5 コア 1 5 b は、曲線状に構成された区間と、直線状に構成された区間とを含む。上記曲線状に構成された区間を含むことによって、変換部 1 5 は、離間部 1 4 と同様の効果を奏する。

30

【 0 1 5 0 】

基板型光導波路素子 1 の第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートには、それぞれ、外部導波路のコアから T E 0 偏波が入力される。第 1 の入射ポートと第 2 の入射ポートとが十分に離れているため、第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートの各々において T E 0 偏波から変換された T E 0 偏波の奇モードと T E 0 偏波の偶モードとの間に働く相互作用は、とても弱い。

【 0 1 5 1 】

上記のように構成された第 1 のテーパ部 1 5 d 及び第 2 のテーパ部 1 5 e の各々は、変換部 1 5 を導波する光が第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートから並走区間 I の始点に近づくにしたがって、上述した T E 0 偏波の奇モードと T E 0 偏波の偶モードとの間に働く相互作用を次第に強める効果を奏する。

40

【 0 1 5 2 】

( 数値実験 )

続いて、この実施例について、シミュレーションによって、損失と偏波消光比を計算した。損失、偏波消光比は以下に定義したとおり。

【 0 1 5 3 】

【数 5】

$$TM\text{損失} = -10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{出力ポートから出力する } TM_0 \text{ のパワー}}{\text{入力ポート 1 に入力した } TE_0 \text{ のパワー}} \right) \quad (4)$$

【0154】

【数 6】

$$TE\text{損失} = -10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{出力ポートから出力する } TE_0 \text{ のパワー}}{\text{入力ポート 2 に入力した } TE_0 \text{ のパワー}} \right) \quad (5)$$

10

【0155】

【数 7】

$$\text{偏波消光比} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{出力ポートから出力する } TM_0 \text{ のパワー}}{\text{出力ポートから出力する } TE_0 \text{ のパワー}} \right) \quad (6)$$

【0156】

ただし、偏波消光比は、第 1 の入力ポートに TE 0 偏波を入れた場合を想定する。第 1 コア 1 1 a は、TE 0 偏波の奇モードから TE 0 偏波の偶モードへの偏波の変換が生じるコアであり、クロストークへの寄与が大きいためである。

20

【0157】

シミュレーションは、有限差分時間領域法 (FDTD) を用いて行った。また、シミュレーションにあたり、図 5 で示した実施例の構造に、第 1 の実施形態で述べた第 1 の変形例の構造 (曲げ導波路を有する構造) を用いている (図 1 2 参照)。

【0158】

初めに、第 3 コア 1 1 c の幅  $W_c$  による損失の影響をみるため、幅  $W_c$  を変化させたときの TM 損失を計算した。光の波長は 1 5 8 0 nm、並走区間 I の長さは 6 0  $\mu$ m とした。なお、本明細書において並走区間 I の長さのことをデバイス長とも表現する。TM 損失の結果を図 1 3 に示す。図より、第 3 コア 1 1 c のコア幅が狭いほど、TM 損失を低減できることが分かった。これは、上述したように、接続面において、コア 1 1 a, 1 1 b を含むコア 1 1 の TM 0 偏波の偶モードと第 3 コア 1 1 c の TM 0 偏波の電界分布の重なる割合が大きくなるためである。

30

【0159】

次に、TM 損失、TE 損失、偏波消光比の波長依存性を計算した。デバイス長は 8 0  $\mu$ m、 $W_c = 4 0 0$  nm とした。結果を図 1 4 及び図 1 5 に示す。

【0160】

図 1 4 の (a) より、光通信で一般的に使用される C バンド (波長範囲: 1 5 3 0 - 1 5 6 5 nm) と L バンド (波長範囲: 1 5 6 5 - 1 6 2 5 nm) を含む 1 2 0 nm の非常に広い波長範囲において、TM 損失は 0 . 2 2 dB 以下 (9 5 % 以上の変換効率) となることが分かる。したがって、基板型光導波路素子 1 は、非常に小さい損失で、TE 0 偏波から TM 0 偏波へ変換可能である。また、TM 損失の変動 (前記波長範囲の損失の最大値と最小値の比) は、0 . 1 5 dB 以下であり非常に小さい。

40

【0161】

図 1 4 の (a) より、TE 損失は、同波長範囲で 0 . 2 9 dB 以下となることが分かる。即ち、基板型光導波路素子 1 は、TE 0 偏波もほとんど損失なく出力ポートから出射可能である。また、TE 損失の変動は 0 . 0 6 dB 以下であり非常に小さい。

【0162】

偏波消光比は、同波長範囲において 3 2 dB 以上となることが分かる。これは、TE 0 偏波を第 1 の入力ポートに入力した場合、出力される TM 0 偏波のパワーに対して、変換

50

が不十分でTE<sub>0</sub>偏波として出力されるパワーが、 $1/1580$ 以下であることを意味し、基板型光導波路素子1が高い偏波変換効率を持ち、クロストークの影響も非常に小さいということを意味している。

【0163】

したがって、基板型光導波路素子1は、広い波長範囲に渡ってTE損失及びTM損失を抑制可能であることが分かった。その理由は、以下のように考えられる。

【0164】

第1コア11aと第2コア11bとが隣接した部分、すなわち並走区間Iは、第1の入射ポートに入力された光の導波モードを別の導波モードに断熱変換する。断熱変換では、光の進行方向に対して、徐々に電界分布を変化させていくため、波長に対する変換効率の依存性が小さい。

【0165】

したがって、基板型光導波路素子1は、並走区間Iの終点における、並走区間Iの導波モードと第3コア11cの導波モードとのモード変換効率の波長依存性を小さくすることができる。例えば、コアを導波する光の波長が長くなるほど、光のコアへの閉じ込めが弱くなるため、電界分布はクラッドに浸み出す。同様に、コアを導波する光の波長が短くなるほど、電界はコアへ閉じ込められるため、電界分布はコアに閉じ込められる。

【0166】

しかしながら、波長の変化に伴う電界分布の変化は、並走区間Iの導波モードと第3コア11cの導波モードとに対して同様に生じる。例えば、導波する光の波長が長くなると、第1コア11a及び第2コア11bを導波する光の導波モードは、広がる。しかし、第3コア11cを導波する光の導波モードも広がるため、電界が重ね合わさる割合は、光の波長の変化に対して大きく変化しない。また、(3)より、モード変換の変換効率は、電界分布の重ね合わせによって決定される。以上のことから、基板型光導波路素子1は、導波する光の波長に対する依存性が小さい基板型光導波路であるといえる。

【0167】

続いて、製造誤差の影響を調べるため、全ての導波路のコア幅が一律に $+30\text{ nm}$ 又は $-30\text{ nm}$ だけ図12の値からずれたときの、TM損失をそれぞれ計算した。デバイス長は $80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $W_c = 400\text{ nm}$ とした。結果を図16に示す。図において、“*w/o error*”は、製造誤差が無い場合を表し、“*width + 30 nm*”及び“*width - 30 nm*”は、それぞれ、コア幅が $+30\text{ nm}$ 及び $-30\text{ nm}$ だけ変化したときの結果を示している。

【0168】

図16より、製造誤差の影響を考慮しても、 $120\text{ nm}$ の広い波長範囲で、TM損失は $0.23\text{ dB}$ 以下となり、非常に低い損失を維持することが分かる。また、この製造誤差の下でのTM損失の変動は、 $0.17\text{ dB}$ と非常に小さい。(波長範囲での損失変動も含む)

したがって、基板型光導波路素子1は、製造誤差に強いということが示された。

【0169】

最後に、実施例(図12)を実際に作製し、TM損失、TE損失を測定した。その結果を図17に示す。図14及び図15と同じ波長範囲において、測定系の雑音を含んでも、TM損失は $0.35\text{ dB}$ 以下、TE損失は $0.55\text{ dB}$ 以下と低損失な動作が可能であることが実証された。

【0170】

したがって、基板型光導波路素子1は、製造される過程において生じる製造誤差がTE損失及びTM損失に与える影響を小さくすることができる。換言すれば、基板型光導波路素子1のTE損失及びTM損失は、製造誤差の影響を受けにくい。その理由は、以下のように考えられる。

【0171】

リソグラフィとエッチングによるプロセスを用いて基板型光導波路素子1を作製する場

10

20

30

40

50



合、上記プロセスの各々において生じ得る製造誤差は、基板型光導波路素子1の全体、特に、コア11の全体に対して同様に生じる。また、2回のエッチングを行うことによってコア11a~11c及びスラブ11dを形成する場合であっても、同一のプロセスを用いてコア11a~11cを一括して形成する。したがって、製造誤差が生じたとしても、コア11a~11cの各々の高さが均一に形成されるため、コア11a~11cの各々の高さとはスラブ11dの高さにおける相対関係は、均一になる。

【0172】

また、波長が変化した時と同様で、断熱変換を利用する部分は、徐々に電界を変化させるため損失の変動は小さく、また、突合せ結合の部分も、電界分布は全ての導波路で同様に变化する(広がるか、狭まる)ため、製造誤差の影響は小さい。

10

【0173】

〔第2の実施形態〕

本発明に係る基板型光導波路素子の第2の実施形態について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【0174】

(基板型光導波路素子の構成)

本実施形態に係る基板型光導波路素子2の構成について、図18を参照して説明する。図18の(a)は、基板型光導波路素子2の構成を示す上面図である。図18の(b)及び(c)は、それぞれ、基板型光導波路素子2の構成を示す断面図であって、図18の(a)に示すA-A'線におけるAA'断面図、及び、B-B'線におけるBB'断面図である。

20

【0175】

基板型光導波路素子2は、第1の実施形態に係る基板型光導波路素子1と同様に、コア21、下部クラッド22、及び上部クラッド23を備えている。コア21は、シリコン製であり、下部クラッド22及び上部クラッド23は、シリカ製である。

【0176】

コア21は、下部クラッド22上に形成されたコアであって、第1コア21a、第2コア21b、及び第3コア21cを備えたコアである。図18の(a)に示すように、第1コア21a、第2コア21b、及び第3コア21cは、基板型光導波路素子1の第1コア11a、第2コア11b、及び第3コア11cと同様に配置されている。

30

【0177】

図18の(b)及び(c)に示すように、基板型光導波路素子2は、基板型光導波路素子1と比較して、第1コア21a、第2コア21b、及び第3コア21cの断面形状が長方形ではなく上下非対称な台形であることによって、第1の実施形態に記載した要件(4)を満たす。したがって、基板型光導波路素子2は、第1コア21aと第2コア21bとの間に形成されたスラブ部(板状コア)を備えなくとも要件(4)を満たすことができる。

【0178】

また、第1コア21a、第2コア21b、及び第3コア21cの断面形状は、等脚台形であり、並走区間Iの終点( $z=1$ )における第1コア21a及び第2コア21bの断面形状は、互いに合同であることが好ましい。

40

【0179】

この構成によれば、並走区間Iの終点におけるコア21の断面、及び、第3コア21cの入射端面は、それぞれ左右対称な形状であり、並走区間Iの終点におけるコア21の断面が左右対称となる対称軸、及び、第3コア21cの入射端面が左右対称となるための対称軸は、互いに一致する。

【0180】

このような構成を実現するために、基板型光導波路素子2の各部は、以下のように構成されている(図18の(a)~(c)参照)。

【0181】

50

第1コア21a、第2コア21b、及び第3コア21cの各々の高さは、220nmで共通である。

【0182】

第1コア21aの入射端面（第1の入射ポート）及び出射端面の幅は、それぞれ、400nm及び200nmである。

【0183】

第2コア21bの入射端面（第2の入射ポート）及び出射端面の幅は、それぞれ、600nm及び200nmである。

【0184】

第1コア21aと第2コア21bとの間隔は、並走区間Iの始点において300nmであり、並走区間Iの終点において150nmである。

【0185】

第3コア21cの幅は、400nmである。

【0186】

本実施形態において、コア21をなすコア21a～21cの各々の側面と、下部クラッド22の表面に対する垂線との成す角は、何れも20°である。コア21を形成するときのエッチング条件を適切に選択することで、コア21の側面を傾斜させて形成することが可能である。この場合、コア21を1度のエッチングで形成でき、基板型光導波路素子2の製造プロセスを簡略化することが可能となる。

【0187】

ここでは、図18の(a)に示すように、各コア21a～21cの幅のうち、最も幅が広い部分の幅を、それぞれ、各コア21a～21cの幅としている。より具体的には、各コア21a～21cの下底の幅を、それぞれ、各コア21a～21cの幅としている。

【0188】

第1の実施形態と同様に、台形は、台形に準ずる形状を含み、等脚台形は、等脚台形に準ずる形状を含む。

【0189】

なお、本実施形態では、並走区間Iの全区間に渡って第1コア21a及び第2コア21bの断面形状が等脚台形である場合について説明したが、本発明は、これに限定されない。すなわち、要件(4)を満たすために、少なくとも、並走区間Iを導波するTE0偏波の奇モードとTM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間iに形成された第1コア21a及び第2コア21bの断面形状が等脚台形に形成されていればよい。

【0190】

また、要件(4)を満たすために、断面形状が等脚台形である第1コア21a及び第2コア21bに代えて、第1コア及び第2コアの少なくとも一方のコアの側面から、下部クラッド22の表面と平行であって、z軸方向と直交する方向に突き出したスラブ(板状コア)を採用しても構わない。

【0191】

図19の(a)は、基板型光導波路素子2のコアを導波するTE0偏波の偶モード、TE0偏波の奇モード、及びTM0の偶モードに対する実効屈折率を、光の進行方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。図19の(b)は、(a)に示したグラフの相互作用区間i近傍を拡大したグラフである。図19によれば、相互作用区間iを導波することによって、TE0偏波の奇モードをTM0偏波の偶モードへ断熱的にモード変換可能なことがわかった。

【0192】

〔第3の実施形態〕

本発明に係る基板型光導波路素子の第3の実施形態について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【0193】

(基板型光導波路素子の構成)

10

20

30

40

50

本実施形態に係る基板型光導波路素子3の構成について、図20を参照して説明する。図20の(a)は、基板型光導波路素子3の構成を示す上面図である。図20の(b)及び(c)は、それぞれ、基板型光導波路素子3の構成を示す断面図であって、図20の(a)に示すA-A'線におけるAA'断面図、及び、B-B'線におけるBB'断面図である。

**【0194】**

基板型光導波路素子3は、第1の実施形態に係る基板型光導波路素子1と同様に、コア31及び下部クラッド32を備えている。コア31は、シリコン製であり、下部クラッド32は、シリカ製である。換言すれば、基板型光導波路素子3は、上部クラッドを省略している。上部クラッドを省略することによって、下部クラッド32上には、コア31を包囲する空気の層(図20の(b)及び(c)に記載のAir)が形成される。空気は、コア31を成すシリカより屈折率が低く、下部クラッド32を成すシリカとは異なる屈折率を有するため、基板型光導波路素子3において、下部クラッド32と上部クラッドとは、互いに屈折率が異なる材料となる。

10

**【0195】**

コア31は、下部クラッド32上に形成されたコアであって、第1コア31a、第2コア31b、及び第3コア31cを備えたコアである。図20の(a)に示すように、第1コア31a、第2コア31b、及び第3コア31cは、基板型光導波路素子1の第1コア11a、第2コア11b、及び第3コア11cと同様に配置されている。

**【0196】**

図20の(b)及び(c)に示すように、基板型光導波路素子3は、上部クラッドを省略することによって、第1の実施形態に記載した要件(4)を満たす。したがって、基板型光導波路素子3は、第1コア21aと第2コア21bとの間に形成されたスラブ部(板状コア)を備えなくとも要件(4)を満たすことができる。

20

**【0197】**

この構成によれば、並走区間Iの終点におけるコア31の断面、及び、第3コア31cの入射端面は、それぞれ左右対称な形状であり、並走区間Iの終点におけるコア21の断面が左右対称となる対称軸、及び、第3コア31cの入射端面が左右対称となるための対称軸は、互いに一致する。

**【0198】**

このような構成を実現するために、基板型光導波路素子3の各部分は、以下のように構成されている(図20の(a)~(c)参照)。

30

**【0199】**

第1コア31aの入射端面(第1の入射ポート)及び出射端面の幅は、それぞれ、400nm及び200nmである。第1コア31aの高さは、220nmである。

**【0200】**

第2コア31bの入射端面(第2の入射ポート)及び出射端面の幅は、それぞれ、600nm及び200nmである。第2コア31bの高さは、220nmであり、第1コア21aの高さと共通である。

**【0201】**

第1コア31aと第2コア31bとの間隔は、並走区間の始点において300nmであり、並走区間の終点において150nmである。

40

**【0202】**

第3コア31cの幅は、400nmである。

**【0203】**

なお、本実施形態では、コア31の周囲に形成される空気の層を上部クラッドとして用いる場合について説明したが、本発明は、これに限定されない。すなわち、要件(4)を満たすために、上部クラッドを成す材料は、コア31より屈折率が小さな材料であって、下部クラッド32と異なる屈折率を有する材料であればよい。

**【0204】**

50

また、コア 3 1 を埋設するように下部クラッド 3 2 上に、この条件を満たす材料を積層することによって上部クラッドを形成する場合、該上部クラッドは、並走区間 I のうち、少なくとも並走区間 I を導波する T E 0 偏波の奇モードと T M 0 偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間 i に設けられていればよく、並走区間 I の全域に渡って形成されていてもよい。

【 0 2 0 5 】

図 2 1 は、基板型光導波路素子 3 のコアを導波する T E 0 偏波の偶モード、T E 0 偏波の奇モード、及び T M 0 の偶モードに対する実効屈折率を、光の進行方向に沿って数値計算した結果を示すグラフである。図 2 1 によれば、相互作用区間 i を導波することによって、T E 0 偏波の奇モードを T M 0 偏波の偶モードへ断熱的にモード変換可能なことが分

10

【 0 2 0 6 】

〔 第 4 の実施形態 〕

本発明に係る基板型光導波路素子の第 4 の実施形態について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

【 0 2 0 7 】

( 基板型光導波路素子の構成 )

本実施形態に係る基板型光導波路素子 6 の構成について、図 2 2 を参照して説明する。図 2 2 の ( a ) は、基板型光導波路素子 6 の構成を示す上面図である。図 2 2 の ( b ) 及び ( c ) は、それぞれ、基板型光導波路素子 6 の構成を示す断面図であって、図 2 2 の ( a ) に示す A - A ' 線における A A ' 断面図、及び、B - B ' 線における B B ' 断面図である。

20

【 0 2 0 8 】

基板型光導波路素子 6 は、図 2 2 の ( a ) に示すように、下部クラッド 6 2 と、下部クラッド 6 2 上に形成されたコア 6 1 と、コア 6 1 を覆うように下部クラッド 6 2 上に形成された上部クラッドとを備えている。

【 0 2 0 9 】

コア 6 1 は、互いに並走して配置された第 1 コア 6 1 a 及び第 2 コア 6 1 b、並びに、その入射端面 6 1 c 1 が第 1 コア 6 1 a の出射端面 6 1 a 2 及び第 2 コア 6 1 b の出射端面 6 1 b 2 に接続された第 3 コア 6 1 c を含む。また、コア 6 1 は、第 1 コア 6 1 a と第 2 コア 6 1 b とを連通させるスラブであって、その高さが第 1 コア 6 1 a 及び第 2 コア 6 1 b の高さよりも低いスラブ 6 1 d を更を含む。

30

【 0 2 1 0 】

基板型光導波路素子 6 の以上の構成は、第 1 の実施形態に係る基板型光導波路素子 1 と同様である。

【 0 2 1 1 】

一方、基板型光導波路素子 6 は、次の 2 つの構成において基板型光導波路素子 1 と異なる。

【 0 2 1 2 】

( 1 ) 第 1 コア 6 1 a の出射端面 6 1 a 2 と第 2 コア 6 1 b の出射端面 6 1 b 2 とが直接接している。

40

【 0 2 1 3 】

( 2 ) 第 3 コア 6 1 c の幅が第 1 コア 6 1 a の幅と第 2 コア 6 1 b の幅との和と等しい。

【 0 2 1 4 】

このように構成された基板型光導波路素子 6 は、基板型光導波路素子 1 と同様の効果に加えて、並走区間 I の終点入射側の導波モードを並走区間 I の終点出射側の導波モードにモード変換するときの変換効率を高められるという効果を奏する。これは、並走区間 I の終点入射側におけるコア 6 1 の断面、及び、並走区間 I の終点出射側におけるコア 6 1 の断面が互いに合同であるため、モード変換に伴う損失を低減できるためである。

50

## 【 0 2 1 5 】

## 〔 適用例 〕

本発明の各実施形態に係る基板型光導波路素子の適用例について、図面に基づいて説明すれば以下のとおりである。

## 【 0 2 1 6 】

本適用例に係る光変調器の構成について、図 2 3 を参照して説明する。図 2 3 は、本適用例に係る光変調器 4 の構成を示すブロック図である。

## 【 0 2 1 7 】

上述の各実施形態に係る基板型光導波路素子 1 ~ 3 , 6 は、本発明の適用例に係る光変調器（特許請求の範囲に記載の基板型光導波路素子）が備えている偏波多重導波路として利用可能である。

10

## 【 0 2 1 8 】

本発明の適用例に係る光変調器 4 は、第 1 の位相変調部 4 1、第 2 の位相変調部 4 2、及び偏波多重導波路 4 3 を備えている。2 つに分岐された T E 0 偏波の各々は、第 1 の位相変調部 4 1 及び第 2 の位相変調部 4 2 に入力される。

## 【 0 2 1 9 】

第 1 の位相変調部 4 1 及び第 2 の位相変調部 4 2 の各々は、それぞれに入力された T E 0 偏波を所定の方式の変調信号に変調する。なお、位相変調部 4 1、4 2 の各々が出力する変調信号は、T E 0 偏波のまま位相変調部 4 1、4 2 から出力される。ここで、所定の方式の変調信号としては、例えば Q P S K (Quadrature Phase Shift Keying) 信号が挙げられる。

20

## 【 0 2 2 0 】

第 1 の位相変調部 4 1 が変調した T E 0 偏波の変調信号は、偏波多重導波路 4 3 の第 1 の入射ポートに入力され、第 2 の位相変調部 4 2 が変調した T E 0 偏波の変調信号は、偏波多重導波路 4 3 の第 2 の入射ポートに入力される。

## 【 0 2 2 1 】

偏波多重導波路 4 3 は、第 1 の入射ポートに入力された T E 0 偏波を T M 0 偏波に変換するとともに、変換した T M 0 偏波と第 2 の入射ポートに入力された T E 0 偏波とを多重する偏波多重導波路として機能する。

## 【 0 2 2 2 】

上述の各実施形態に係る基板型光導波路素子 1 ~ 3 , 6 の各々は、光変調器 4 が備えている偏波多重導波路 4 3 として利用可能である。例えば第 1 の実施形態に係る基板型光導波路素子 1 を光変調器 4 の偏波多重導波路 4 3 として利用する場合、基板型光導波路素子 1 の第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b は、それぞれ、偏波多重導波路 4 3 の第 1 の入射ポート及び第 2 の入射ポートに対応する。

30

## 【 0 2 2 3 】

したがって、第 1 コア 1 1 a の入射端面には、第 1 の位相変調部 4 1 が変調した T E 0 偏波が入力され、第 2 コア 1 1 b の入射端面には、第 2 の位相変調部 4 2 が変調した T E 0 偏波が入力される。

## 【 0 2 2 4 】

偏波多重導波路 4 3 を備えている光変調器 4 は、C バンド及び L バンドを含む広い波長範囲で低損失である。そのため、これらの広い波長範囲で低損失な基板型光導波路による光変調器が実現可能である。

40

## 【 0 2 2 5 】

なお、位相変調部 4 1、4 2 が T E 0 偏波を変調する方式は、Q P S K 方式に限らず、複雑な構成を持つ光変調器であっても、本発明を用いて偏波多重を行うことが可能である。他の位相変調方式の例として、例えば O O K 変調、Q P S K 変調、Q A M 変調などが挙げられる。

## 【 0 2 2 6 】

また、位相変調部 4 1、4 2 が T E 0 偏波を変調する変調方法として、リブ導波路に P

50

N接合を設け、その空乏層を印加する電圧で変化させることで位相を変化させる変調方法がある。このような変調方法を採用する場合、基板型光導波路素子1を製造する製造プロセスを用いて、位相変調部41, 42と基板型光導波路素子1とを一括して製造することができる。なぜなら、位相変調部41, 42が備えているリブ導波路は、コアを2回エッチングする製造プロセスによって形成可能な段階状コアから成り、この製造プロセスは、基板型光導波路素子1を製造可能な製造プロセスでもあるからである。したがって、位相変調部41, 42を形成するために新たな製造プロセスを追加する必要がない。

【0227】

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

10

【0228】

〔まとめ〕

以上のように、上記各実施形態に係る基板型光導波路素子は、下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTM0偏波の実効屈折率、及び、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の実効屈折率は、上記並走区間の始点からの距離の関数として連続であり、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードと上記コアを導波するTM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間において、上下非対称である、ことを特徴とする。

20

30

【0229】

上記のように構成された基板型光導波路素子の第1コア及び第2コアの各々に、別個にTE0偏波を入射する。この場合、第1コアに入射したTE0偏波は、コア(第1コア及び第2コアの両方を含む)を導波するTE0偏波の奇モードと見做すことができる。コアを導波するTE0偏波の奇モードは、並走区間Iを導波する過程においてTM0偏波の偶モードに変換され、第3コアに入射する。第3コアに入射したTM0偏波の偶モードは、第3コアを導波するTM0偏波に変換される。第3コアを導波するTM0偏波は、外部に出力される。

【0230】

一方、第2コアに入射したTE0偏波は、コアを導波するTE0偏波の偶モードと見做すことができる。コアを導波するTE0偏波の偶モードは、並走区間IをTE0偏波の偶モードのまま導波し、第3コアに入射する。第3コアに入射したTE0偏波の偶モードは、第3コアを導波するTE0偏波に変換される。第3コアを導波するTE0偏波は、外部に出力される。

40

【0231】

したがって、上記各実施形態に係る基板型光導波路素子は、一方の入射ポートに入射したTE0偏波をTM0偏波に変換すると共に、得られたTM0偏波を他方の入射ポートに入射したTE0偏波と合波する偏波多重導波路として機能する。すなわち、TE0偏波をTM0偏波に変換する偏波ローテータとしての機能と、TM0偏波とTE0偏波とを合波する偏波ビームコンバイナとしての機能とを併せ持つ。したがって、偏波ローテータと偏

50

波ビームコンバイナとを別個の素子として設ける場合と比較して、偏波多重導波路のデバイス長を短くすることができる。

【0232】

なお、上記各実施形態において、「コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における基板型光導波路素子の屈折率分布が上下非対称である」とは、当該断面に含まれる、下部クラッドと上部クラッドとの境界面と平行な任意の直線について、該屈折率分布が線対称でないことを指す。

【0233】

また、上記基板型光導波路素子において、上記第1コアの出射端面と上記第2コアの出射端面とは、互いに離間している、ことが好ましい。

10

【0234】

上記基板型光導波路素子は、リソグラフィプロセス及びエッチングプロセスを組み合わせることによって製造することができる。上記の構成によれば、並走区間の終点における第1コアと第2コアとの間隔を、リソグラフィプロセス及びエッチングプロセスを用いて実現可能な第1コアと第2コアと最小間隔に対して十分広く設定することができる。したがって、上記基板型光導波路素子は、並走区間の終点における形状の誤差を低減することができる。該形状の誤差に起因する損失を低減することができる。

【0235】

また、上記基板型光導波路素子において、上記第1コアの出射端面と上記第2コアの出射端面とは、互いに合同であり、上記並走区間の終点入射側における上記コアの断面、及び、上記並走区間の終点出射側における上記コアの断面は、それぞれ左右対称な形状であり、上記並走区間の終点入射側における上記コアの断面の対称軸と、上記並走区間の終点出射側における上記コアの断面の対称軸とは、互いに一致する、ことが好ましい。

20

【0236】

上記の構成によれば、上記基板型光導波路素子を低損失化でき、クロストークを低減させることが可能となる。

【0237】

また、上記基板型光導波路素子において、上記第1コアの出射端面の幅 $W_{1out}$ 、上記第2コアの出射端面の幅 $W_{2out}$ 、及び、上記第3コアの入射端面の幅 $W_{3in}$ は、 $W_{1out} + W_{2out} > W_{3in}$ を満たす、ことが好ましい。

30

【0238】

上記の構成によれば、並走区間Iの終点における損失を更に低減することができる。

【0239】

また、上記基板型光導波路素子において、上記第1コアと上記第2コアとの間隔は、上記並走区間の始点から終点に近づくにしたがって次第に狭まる、ことが好ましい。

【0240】

上記の構成によれば、並走区間の始点において第1コアの入射端面と第2コアの入射端面との間隔を十分に離間しつつ、TE0偏波の奇モードをTM0偏波の偶モードにモード変換可能な並走区間を実現できる。したがって、上記モード変換に伴う損失をより低減することができる。

40

【0241】

また、上記基板型光導波路素子において、上記コアは、上記相互作用区間において上記第1コアと上記第2コアとを連通させるスラブであって、その高さが上記第1コア及び上記第2コアの高さよりも低いスラブを更に含む、ことが好ましい。

【0242】

上記の構成によれば、相互作用区間におけるコアの断面であって光の進行方向に垂直な断面の形状は、上下非対称になる。そのため、下部クラッド及び上部クラッドを形成する材料に関わらず相互作用区間における上記基板型光導波路素子の断面であって光の進行方向に垂直な断面における屈折率分布は、上下非対称になる。したがって、下部コア及び上部コアを形成する場合の材料選択の自由度が高まる。

50

## 【0243】

また、上記基板型光導波路素子は、出射端面に上記第1コアの入射端面が接続された第4コアと、出射端面が上記第2コアの入射端面に接続された第5コアとを更に備え、上記第4コアと上記第5コアとの間隔は、上記並走区間の始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる、ことが好ましい。

## 【0244】

第4コアの入射端面及び第5コアの入射端面は、それぞれ上記基板型光導波路素子の第1の入射ポート及び第2の入射ポートとして機能する。上記の構成によれば、上記基板型光導波路素子の第1の入射ポートと第2の入射ポートとの間隔を十分に広くすることができる。

10

## 【0245】

また、上記基板型光導波路素子は、上記第4コアと上記第5コアとを連通させるスラブであって、上記第1コアと上記第2コアとを連通させるスラブと高さが共通のスラブと、上記スラブと高さが共通である第1のテーパ部であって、上記第4コアと上記第5コアとを連通させるスラブ、及び、上記第4コアの各々と連通し、上記第4コアの入射端面から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がる第1のテーパ部と、上記スラブと高さが共通である第2のテーパ部であって、上記第4コアと上記第5コアとを連通させるスラブ、及び、上記第5コアの各々と連通し、上記第5コアの入射端面から遠ざかるにしたがって次第に幅が広がる第2のテーパ部と、を更に備えている、ことが好ましい。

## 【0246】

上記の構成によれば、第1のテーパ部及び第2のテーパ部の各々は、第4コア及び第5コアを導波する光が第1の入射ポート及び第2の入射ポートから並走区間の始点に近づくにしたがって、TE<sub>0</sub>偏波の奇モードとTE<sub>0</sub>偏波の偶モードとの間に働く相互作用を次第に強めることができる。

20

## 【0247】

また、上記基板型光導波路素子において、上記下部クラッドと上記上部クラッドとは、互いに屈折率が異なる材料からなる、ことが好ましい。

## 【0248】

上記の構成によれば、相互作用区間におけるコアの断面であって光の進行方向に垂直な断面の形状として、上下対称な形状を採用することができる。したがって、スラブを形成しなくてよいため、製造プロセスをより簡略化できる。

30

## 【0249】

また、上記基板型光導波路素子において、上記第1コア、上記第2コア、及び上記第3コアの断面形状は、何れも台形又は台形に準ずる形状である、ことが好ましい。

## 【0250】

上記の構成によれば、断面形状が上下非対称なコアを、1回のエッチングプロセスによって形成することができる。したがって、製造プロセスをより簡略化できる。

## 【0251】

また、上記基板型光導波路素子は、TE<sub>0</sub>偏波を変調する第1の位相変調部と、TE<sub>0</sub>偏波を変調する第2の位相変調部と、を更に備え、上記第1コアの入射端面には、上記第1の位相変調部が変調したTE<sub>0</sub>偏波が入力され、上記第2コアの入射端面には、上記第2の位相変調部が変調したTE<sub>0</sub>偏波が入力される、ように構成されていてもよい。

40

## 【0252】

上記の構成によれば、上記基板型光導波路素子は、偏波多重導波路を含む光変調器として機能する。このような基板型光導波路素子においても、上記基板型光導波路素子と同様の効果が得られる。

## 【0253】

また、上記各実施形態に係る基板型光導波路素子は、下部クラッドと、上記下部クラッド上に形成されたコアであって、互いに並走する第1コア及び第2コア、並びに、その入射端面が上記第1コア及び上記第2コアの出射端面に接続された第3コアを含むコアと、

50



上記コアを覆うように上記下部クラッド上に形成された上部クラッドとを備えた基板型光導波路素子において、上記第1コアと上記第2コアとが並走する区間であって、上記第1コア及び上記第2コアの入射端面を始点とし、上記第1コア及び上記第2コアの出射端面を終点とする区間を並走区間として、上記第2コアが存在しない場合に第1コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率は、上記第1コアが存在しない場合に第2コアを導波するTE0偏波の上記並走区間の始点における実効屈折率よりも小さく、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波するTM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、上記並走区間の始点と終点とで逆転し、上記コアを導波する光の進行方向に対して垂直な断面における当該基板型光導波路素子の屈折率分布は、上記コアを導波するTE0偏波の奇モードと上記コアを導波するTM0偏波の偶モードとが相互作用する相互作用区間において、上下非対称であり、上記並走区間の始点においてTE0偏波の奇モードであるモード、及び、上記並走区間の始点においてTM0偏波の偶モードであるモードは、ともに上記並走区間の始点からの距離の関数として連続である、ことを特徴とするとも表現できる。したがって、上述した各構成は、当該基板型光導波路素子に対しても適用可能である。

10

【産業上の利用可能性】

【0254】

本発明は、偏波多重導波路として機能する基板型光導波路素子に利用することができる。また、そのような基板型光導波路素子を備えた光変調器に利用することができる。

20

【符号の説明】

【0255】

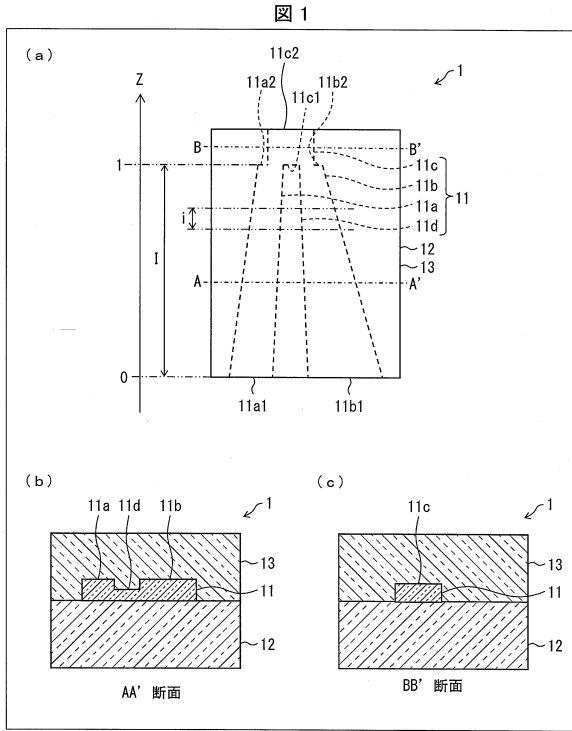
|                    |           |      |
|--------------------|-----------|------|
| 1, 2, 3, 6         | 基板型光導波路素子 |      |
| 11, 21, 31, 61     | コア        |      |
| 11a, 21a, 31a, 61a |           | 第1コア |
| 11a1               | 入射端面      |      |
| 11a2               | 出射端面      |      |
| 11b, 21b, 31b, 61b |           | 第2コア |
| 11b1               | 入射端面      |      |
| 11b2               | 出射端面      |      |
| 11c, 21c, 31c, 61c |           | 第3コア |
| 11c1               | 入射端面      |      |
| 11c2               | 出射端面      |      |
| 11d, 61d           | スラブ       |      |
| I                  | 並走区間      |      |
| i                  | 相互作用区間    |      |
| 12, 22, 32, 62     | 下部クラッド    |      |
| 13, 23, 63         | 上部クラッド    |      |
| 14                 | 離間部       |      |
| 14a                | 第4コア      |      |
| 14b                | 第5コア      |      |
| 14c                | スラブ       |      |
| 15                 | 変換部       |      |
| 15a                | 第4コア      |      |
| 15a1               | 入射端面      |      |
| 15b                | 第5コア      |      |
| 15b1               | 入射端面      |      |
| 15c                | スラブ       |      |
| 15d                | 第1のテーパ部   |      |
| 15e                | 第2のテーパ部   |      |

30

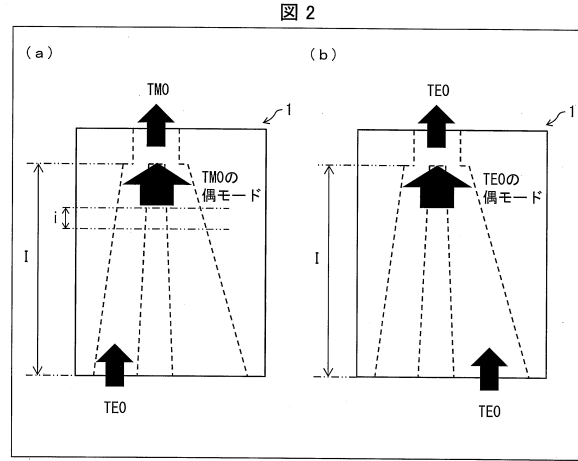
40

50

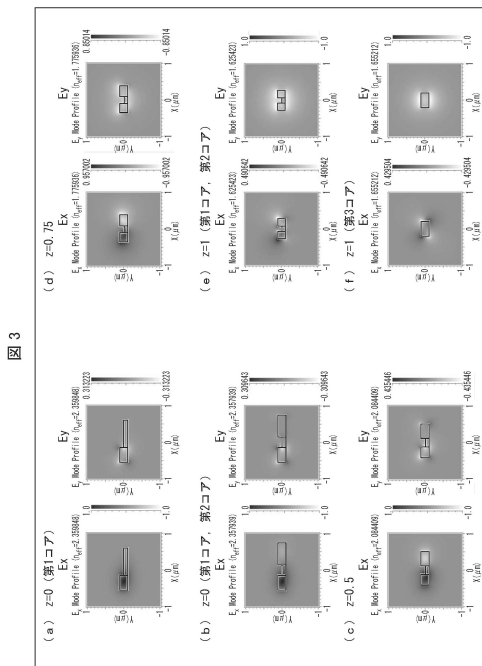
【 図 1 】



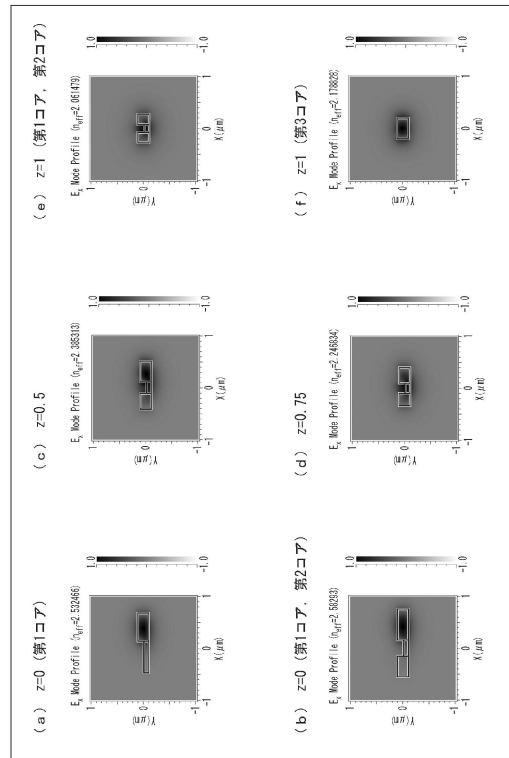
【 図 2 】



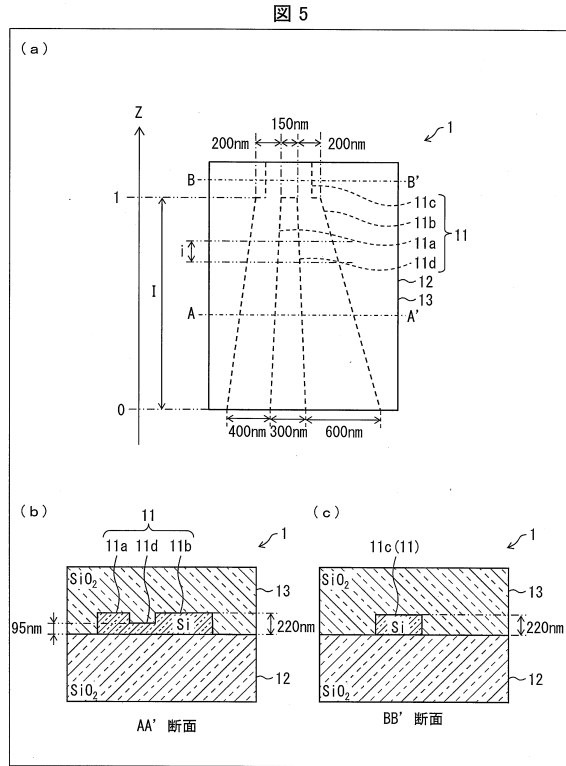
【 図 3 】



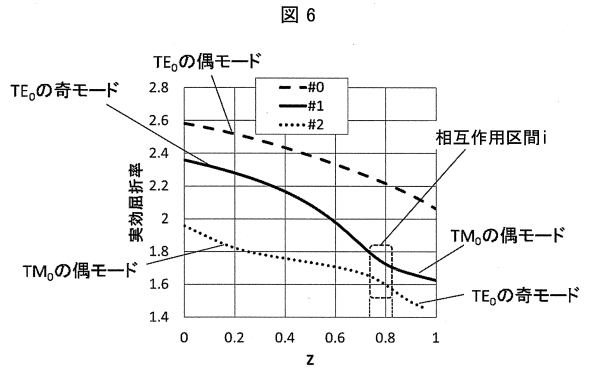
【 図 4 】



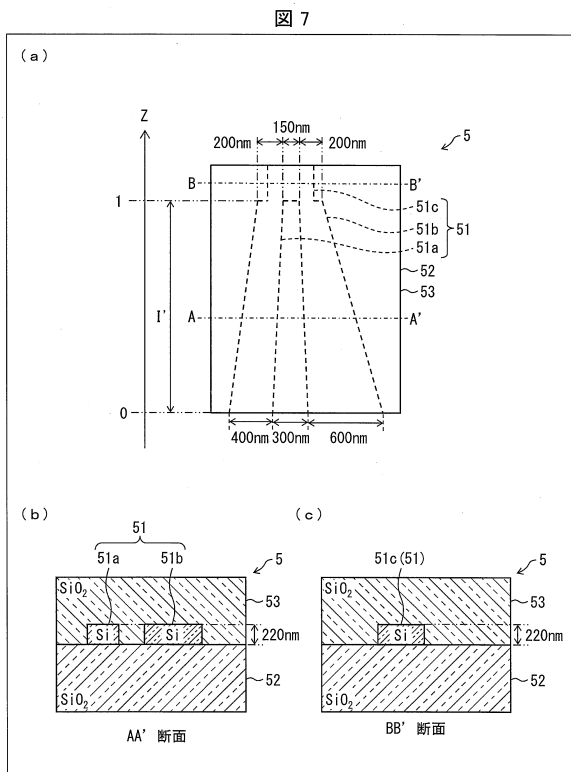
【 図 5 】



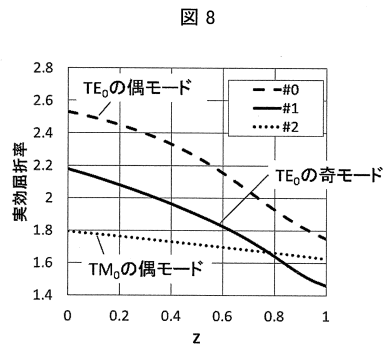
【 図 6 】



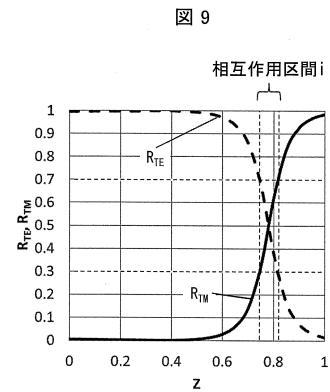
【 図 7 】



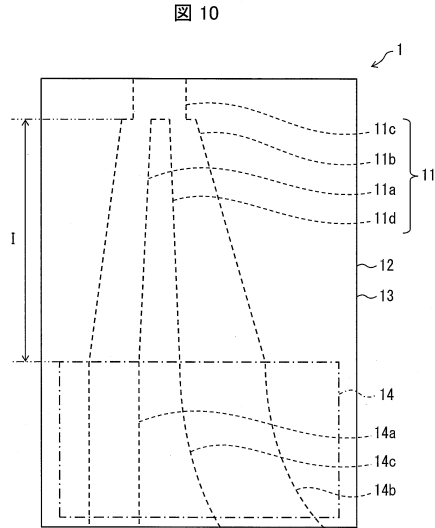
【 図 8 】



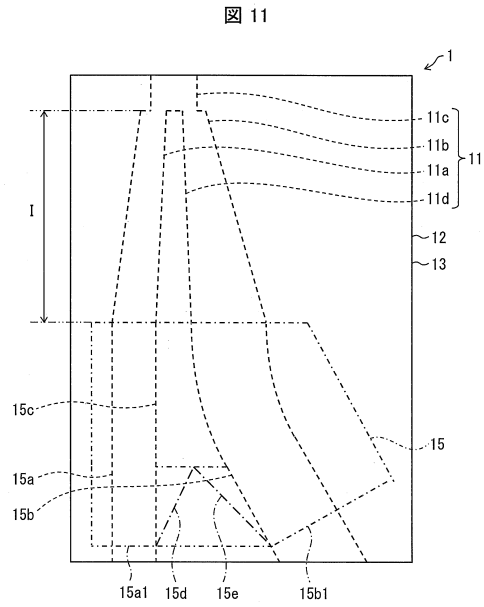
【 図 9 】



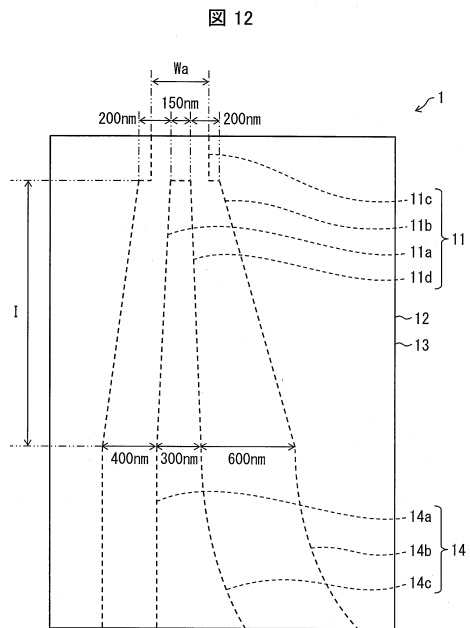
【図10】



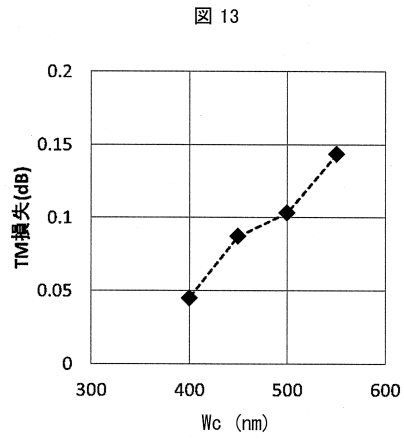
【図11】



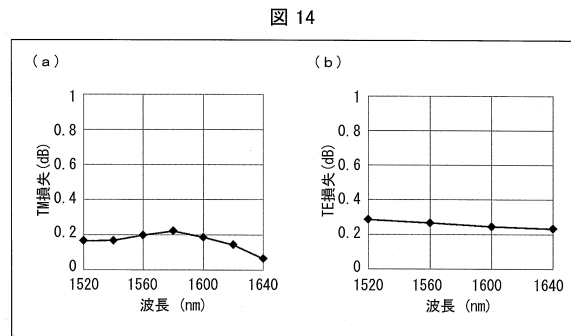
【図12】



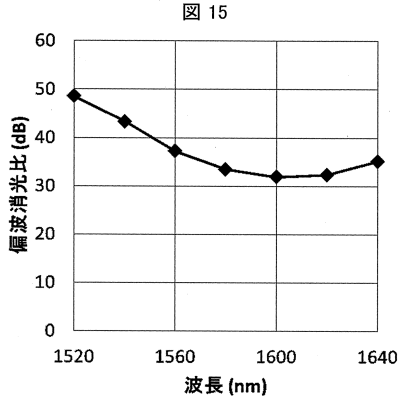
【図13】



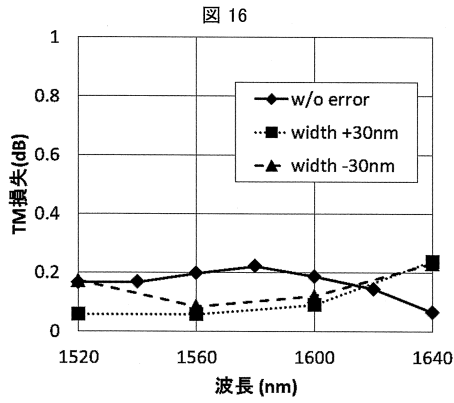
【図14】



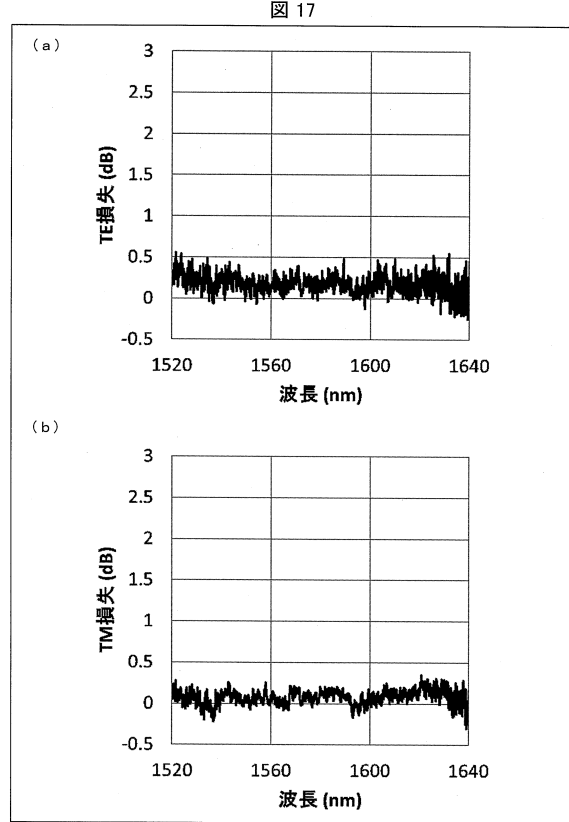
【 図 15 】



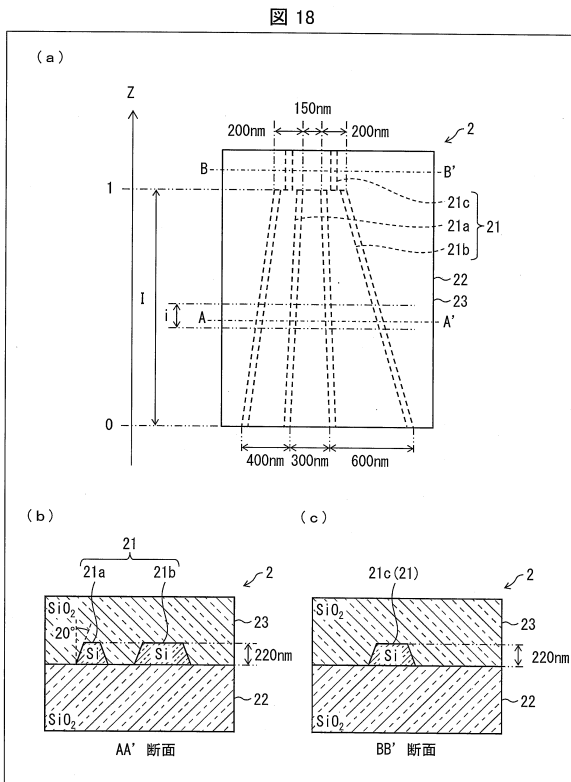
【 図 16 】



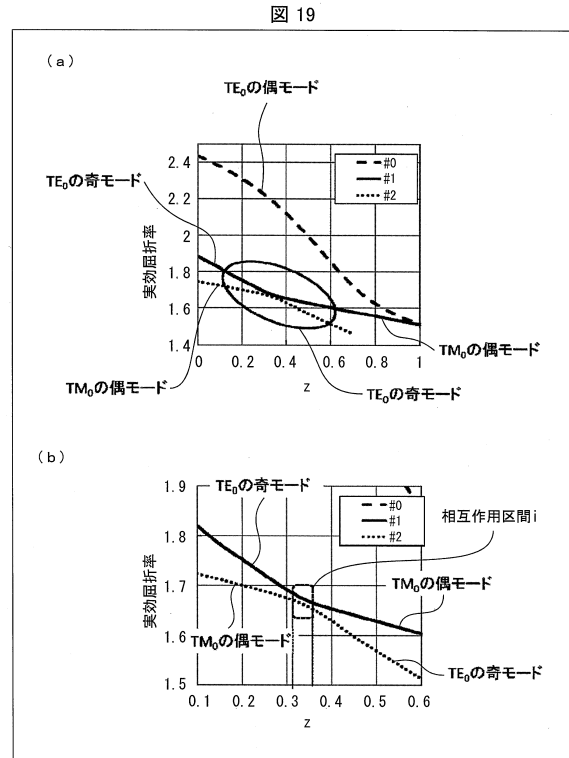
【 図 17 】



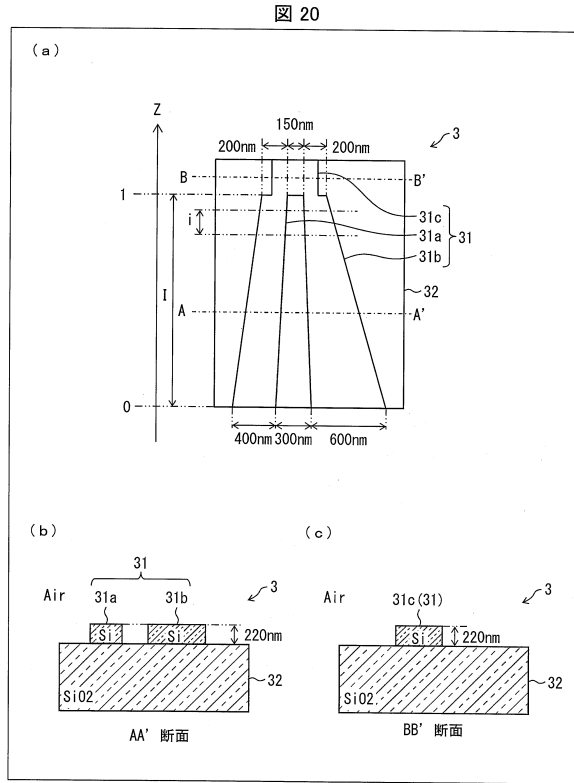
【 図 18 】



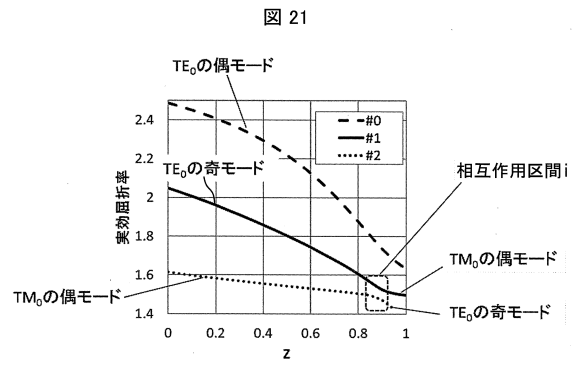
【 図 19 】



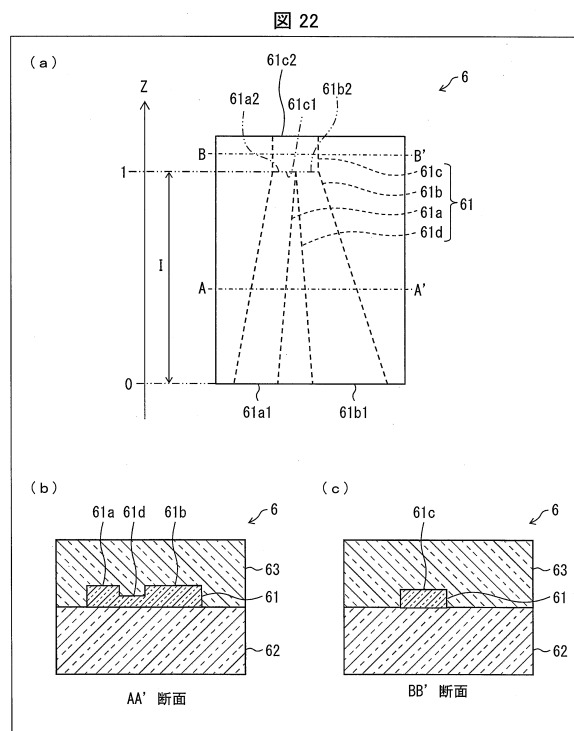
【図20】



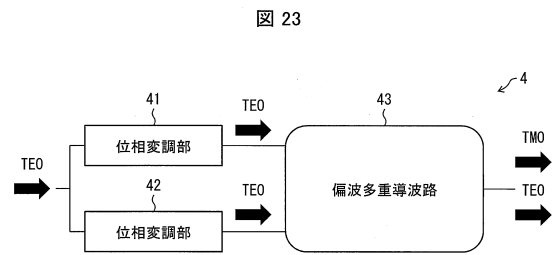
【図21】



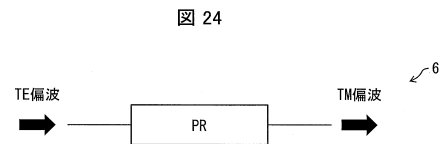
【図22】



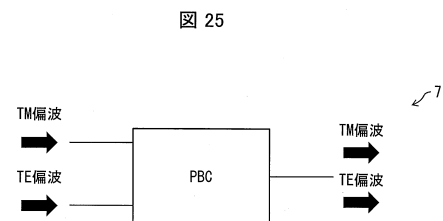
【図23】



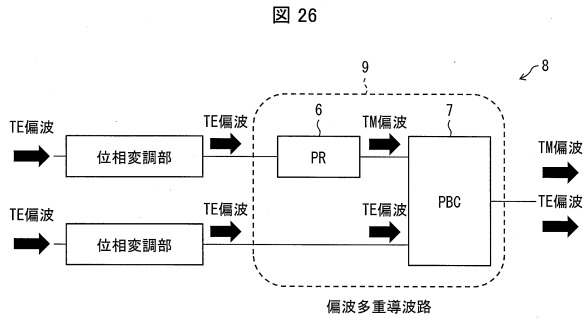
【図24】



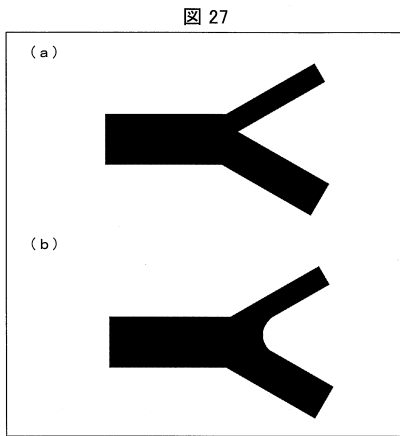
【図25】



【 図 2 6 】



【 図 2 7 】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特表2004-529377 (JP, A)

国際公開第2014/208601 (WO, A1)

Jing Wang, Ben Niu, Zhen Sheng, Aimin Wu, Wei Li, Xi Wang, Shichang Zou, Minghao Qi, and Fuwan Gan, Novel ultra-broadband polarization splitter-rotator based on mode-evolution tapers and a mode-sorting asymmetric Y-junction, OPTICS EXPRESS, 2014年 5月 29日, Vol. 22, No. 11, P.13565-13571

(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

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)

Science Direct

IEEE Xplore