

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年7月28日(28.07.2016)



(10) 国際公開番号

WO 2016/117533 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/126 (2006.01) G02B 6/14 (2006.01)
G02B 6/125 (2006.01) G02F 1/01 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/051376
- (22) 国際出願日: 2016年1月19日(19.01.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-008119 2015年1月19日(19.01.2015) JP
- (71) 出願人: 株式会社フジクラ (FUJIKURA LTD.)
[JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場 1丁目5番
1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 岡 徹 (OKA, Akira); 〒2858550 千葉県佐
倉市六崎 1 4 4 0 番地 株式会社フジクラ佐倉
事業所内 Chiba (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 HARAKENZO W
ORLD PATENT & TRADEMA

R K (HARAKENZO WORLD PATENT & TRADE-
MARK); 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋 2 丁
目北 2 番 6 号 大和南森町ビル Osaka (JP).

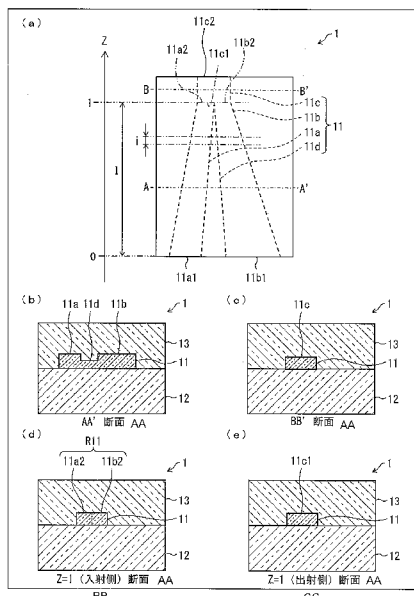
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,
BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,
CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN,
IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH,
PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,
SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,
MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユー
ロピア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,

[続葉有]

(54) Title: SUBSTRATE-TYPE OPTICAL WAVEGUIDE ELEMENT

(54) 発明の名称: 基板型光導波路素子

[図1]



AA Cross section
BB Incident side
CC Emission side

(57) Abstract: According to the present invention, the effective refractive index of a TM0 polarized wave guided through a first core (11a) when existing alone and the execution refractive index of a TE0 polarized wave guided through a second core (11b) when existing alone are continuous as a function of distance from a starting point of a parallel traveling section (I), a magnitude relation between the effective refractive index of the odd mode of the TE0 polarized wave guided through the parallel traveling section (I) and the effective refractive index of the even mode of the TM0 polarized wave guided through the parallel traveling section (I) is reversed at the starting point and the ending point of the parallel traveling section (I), the refractive index distribution in an interactive section (i) is vertically asymmetric, and an emission end surface (11a2) and an emission end surface (11b2) cover an incident end surface (11c1) without excess or deficiency.

(57) 要約: 単独で存在する場合に第1コア(11a)を導波するTM0偏波の実効屈折率、及び、単独で存在する場合に第2コア(11b)を導波するTE0偏波の実効屈折率は、並走区間(I)の始点からの距離の関数として連続であり、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TM0偏波の偶モードの実効屈折率との大小関係は、並走区間(I)の始点と終点とで逆転し、相互作用区間(i)においては、屈折率分布が上下非対称であり、出射端面(11a2)及び出射端面(11b2)は、入射端面(11c1)を過不足なく覆う。

WO 2016/117533 A1



MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, 添付公開書類:
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, — 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

明 細 書

発明の名称： 基板型光導波路素子

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。

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100Gbps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。

[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20は、PR6の構成を示すブロック図であり、図21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22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。

[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。

[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。

[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asymmetricY-junctionに対応)とリブ導波路構造のテーパー導波路(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。テーパー導波路では、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] 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ー導波路(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。テーパー導波路では、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

[0011] 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 splitterrotator 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-splitter s in standard active silicon photonics platforms", OPTICS EXPRESS, Vo

l.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

- [0012] 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。
- [0013] 非特許文献2に記載の基板型光導波路素子では、TE₀偏波をTE₁偏波に変換し、かつ、他方のTE₀偏波と多重する非対称Y分岐と、このTE₁偏波をTM₀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。
- [0014] 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。
- [0015] 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

- [0016] 上記の課題を解決するために、本発明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、上下非対称であり、上記第1コアの出射端面及び上記第2コアの出射端面は、上記第3コアの入射端面を過不足なく覆う、ことを特徴とする。

[0017] また、本発明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TMO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TEO偏波の奇モードと上記コアを導波するTMO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、上記第1コアの出射端面及び上記第2コアの出射端面は、上記第3コアの入射端面を過不足なく覆い、上記並走区間の始点においてTEO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TMO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。

発明の効果

[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) ~ (e) 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。

[図3] (a) ~ (d) 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TEO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) ~ (d) 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TEO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)～(e)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。

[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)～(e)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。

[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、デバイス長を80μm、幅W_aを400nmとした基板型光導波路素子における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14]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80μm、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。

[図15](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)～(e)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16] (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17] (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18] 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。

[図19] 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20] 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21] 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22] 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。

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)～(e)は、基板型光導波路素子1の構成を示す断面図であって、それぞれ、図1の(a)に示すA-A'線におけるA-A'断

面図、図1の(a)に示すB-B'線におけるBB'断面図、図1の(a)に示す並走区間Iの終点($z=1$)入射側における断面図、及び、図1の(a)に示す並走区間Iの終点($z=1$)出射側における断面図である。並走区間Iについては、後述する。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。

[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。

[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。

[0028] 基板型光導波路素子1は、以下の要件(1)～(5)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。

[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における屈折率分布が上下非対称である。

[0033] (5) 並走区間Iの終点において、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、第3コア11cの入射端面11c1を過不足なく覆う。

[0034] 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。

[0035] 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 1 1 a の高さ と 第 2 コア 1 1 b の高さ とを高さ 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 l 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。

[0036] また、要件 (3) を満たすコア 1 1 の形状は、並走区間 l を導波する TE 0 偏波の奇モードの実効屈折率及び並走区間 l を導波する TM 0 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。

[0037] また、各断面における第 1 コア 1 1 a 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 1 1 b 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 l 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 l 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。

[0038] 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 1 1 a と第 2 コア 1 1 b とを連通させるスラブ 1 1 d であって、第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b よりも高さの低いスラブ 1 1 d を設ける。

[0039] スラブ 1 1 d を備えていることによって、コア 1 1 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 1 2 及び上部クラッド 1 3 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 1 1 d を並走区間 l 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 1 1 d 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。

[0040] 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。

[0041] (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。

[0042] 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。

[0043] また、スラブ11dは、第1コア11aと第2コア11b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11d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11a及び第2コア11b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11aと第2コア11bとの間に生じる光結合は、強くならない。一方、コア11がスラブ11d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11a及び第2コア11bの各々からスラブ11d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11aと第2コア11bとの間に生じる光結合は、強くなる。

[0044] また、スラブ11d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11cに入射するときの効率を高めるという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11cに入射したTM₀偏波の偶モードは、第3コア11cを導波するTM₀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11cに入射したTE₀偏波の偶モードは、第3コア11cを導波するTE₀偏波に変換することができる。スラブ11d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 O 偏波の偶モード及び T E O 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。

[0045] また、本実施形態においては、要件（5）を満たすために、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 とが離間せずに、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 とが直接接触している。その上で、図 1 の（d）に示す領域 R 1 1 の形状と、図 1 の（e）に示す第 3 コア 1 1 c の入射端面 1 1 c 1 の形状とが合同となる構成を採用している。ここで、領域 R 1 1 は、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 とからなる領域である。

[0046] 領域 R 1 1 の形状と入射端面 1 1 c 1 の形状とが合同であることによって、第 1 コア 1 1 a の出射端面 1 1 a 2 及び第 2 コア 1 1 b の出射端面 1 1 b 2 は、第 3 コア 1 1 c の入射端面 1 1 c 1 を過不足なく覆う。すなわち、このように構成された基板型光導波路素子 1 は、要件（5）を満たす。

[0047] なお、本明細書においては、領域 R 1 1 が入射端面 1 1 c 1 を過不足なく覆っている状態とは、領域 R 1 1 の形状と入射端面 1 1 c 1 の形状とが、少なくとも巨視的に合同である状態を指す。すなわち、微視的に領域 R 1 1 の形状と入射端面 1 1 c 1 の形状とが合同でない場合であっても、巨視的に合同と見做せるならば、領域 R 1 1 が入射端面 1 1 c 1 を過不足なく覆っている状態と見做す。

[0048] 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 O 偏波は、コア 1 1 を導波する T E O 偏波の奇モードと見做すことができる。この T E O 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 O 偏波の奇モードから T M O 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TMO偏波の偶モードは、第3コア1 1 cを導波するTMO偏波と見做すことができる。第3コア1 1 cを導波するTMO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)。

[0049] 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TEO偏波は、コア1 1を導波するTEO偏波の偶モードと見做すことができる。このTEO偏波の偶モードは、並走区間IをTEO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TEO偏波の偶モードは、第3コア1 1 cを導波するTEO偏波と見做すことができる。第3コア1 1 cを導波するTEO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)。

[0050] 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TEO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TEO偏波をTMO偏波に変換すると共に、変換された該TMO偏波と第2の入射ポートに入射されたTEO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22に示す偏波多重導波路として機能する。

[0051] また、基板型光導波路素子1の出射ポートにTEO偏波とTMO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TEO偏波を出力し、第2の入射ポートからTEO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。

[0052] 更に、基板型光導波路素子1は、要件(5)を満たしているために、並走区間Iが導波するTEO偏波の偶モードと、第3コア1 1 cが導波するTEO偏波とは、連続的に接続し、並走区間Iが導波するTMO偏波の偶モードと、第3コア1 1 cが導波するTMO偏波とは、連続的に接続する。断熱変換による変換は、同じ偏波において、実効屈折率の大小関係が保存するよう

に行われるという理由から、上述の連続的な接続は、常に成立する。具体的には、並走区間Ⅰが導波するTE偏波のモードのうち、最も実効屈折率が高いモードがTE₀偏波の偶モードであり、第3コア11cが導波するTE偏波のモードのうち、最も実効屈折率が高いモードがTE₀偏波であるため、並走区間Ⅰが導波するTE₀偏波の偶モードと、第3コア11cが導波するTE₀偏波とは、連続的に接続する。並走区間Ⅰが導波するTM₀偏波の偶モードと、第3コア11cが導波するTM₀偏波についても同様である。

[0053] したがって、要件(5)を満たす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低減することができるという副次的な効果を奏する。この損失とは、並走区間Ⅰが導波するTM₀偏波の偶モードを第3コア11cが導波するTM₀偏波に変換するときには生じる変換損失と、並走区間Ⅰが導波するTE₀偏波の偶モードを第3コア11cが導波するTE₀偏波に変換するときには生じる変換損失とを指す。

[0054] 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11a、11b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11dを備えていることによって、第1コア11aと第2コア11b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11aと第2コア11bと間に生じる光結合は、相互作用区間ⅱ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。

[0055] なお、実際の製造工程においては、並走区間Ⅰの終点入射側に見られるような第1コア11aと第2コア11bとの間隔が無限小まで狭まるような構造において、第1コア11aと第2コア11bとが成す角が丸まらずに尖った角となる構造を作製することが難しい。これは、リソグラフィプロセスで使用する光の回折限界に起因する。また、リソグラフィプロセスにおけるア

ライメントずれに起因して、基板型光導波路素子 1 の構造に誤差が生じる場合もある。

[0056] 基板型光導波路素子 1 のコア 1 1 の構造が、以上のような製造誤差によって、意図した構造から変化した場合であっても、基板型光導波路素子 1 が要件 (1) ~ (5) を満たす限りにおいては、基板型光導波路素子 1 は、PBC として機能し、損失を低減することができる。意図した構造から変化したとしても、要件 (1) ~ (5) を満たすことによって、断熱変換による変換が実現されるためである。以上のことから、基板型光導波路素子 1 は、製造誤差が生じた場合であっても、その製造誤差の影響を受けにくく損失が増大することを防ぐことができる。

[0057] また、断熱変換においては、導波モードを光の進行方向に沿って、連続的に変換するため、波長が変化した場合でも、この連続性は維持され、損失への影響を抑制することができる。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損失を低減することができる。

[0058] 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 (Si) 製であることがより好ましい。例えば、SOI (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。SOI ウェハを用いる場合、(i) SOI 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、(ii) BOX 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。

[0059] また、この場合には、下部クラッド 1 2 として、SOI ウェハの BOX 層をなすシリカ (SiO₂) 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。

[0060] 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。

[0061] 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。

[0062] 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。

[0063] また、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、互いに合同であり、並走区間 I の終点入射側におけるコア 1 1 の断面、及び、並走区間 I の終点出射側におけるコア 1 1 の断面は、それぞれ左右対称な形状であることが好ましい。

[0064] ここで、並走区間 I の終点 ($z = 1$) におけるコア 1 1 の断面が左右対称な形状となるためには、出射端面 1 1 a 2 と出射端面 1 1 b 2 とが合同であり、スラブ 1 1 d 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 1 1 の断面は、コア 1 1 の高さ方向と平行な直線であって、コア 1 1 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。

[0065] また、入射端面 1 1 c 1 が左右対称な形状となるためには、入射端面 1 1 c 1 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 1 1 c 1 は、コア 1 1 の高さ方向と平行な直線であって、第 3 コア 1 1 c 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 1 1 の断面の上記対称軸と、第 3 コア 1 1 c の入射端面 1 1 c 1 の上記対称軸とは、互いに一致する。

- [0066] 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。
- [0067] 出射端面 1 1 a 2 と出射端面 1 1 b 2 とが互いに合同であることにより、隣接するコア 1 1 a, 1 1 b の間に生じる光結合が強まる。したがって、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、すなわちスラブ 1 1 d に浸み出す。なぜなら、出射端面 1 1 a 2 と出射端面 1 1 b 2 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）。
- [0068] 加えて、並走区間 I の終点入射側におけるコア 1 1 の断面、及び、並走区間 I の終点出射側におけるコア 1 1 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 1 1 の T E 0 偏波の偶モード及び T M 0 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。
- [0069] 更に、並走区間 I の終点入射側におけるコア 1 1 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 1 1 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 1 1 の T E 0 偏波の偶モードの電界分布及び T M 0 偏波の偶モードの電界分布は、それぞれ、第 3 コア 1 1 c の T E 0 偏波の電界分布及び T M 0 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 1 1 の導波モードと、第 3 コア 1 1 c 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。
- [0070] また、第 1 コア 1 1 a 及び第 2 コア 1 1 b において、第 1 の入力ポートに T E 0 偏波を入力したときに生じる T E 0 偏波の奇モードが並走区間 I において十分に T M 0 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 T E 0 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 T E 0 偏波の奇モードが並走区間 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TE₀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。

[0071] しかしながら、残留したTE₀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TE₀偏波の奇モードと第3コア11cのTE₀偏波との重なりは小さい。理論的には、(3)により、反対称なTE₀偏波の奇モードの電界分布と、対称なTE₀偏波の電界分布との重なりは、積分するとゼロになる。

[0072] したがって、並走区間Iを導波するTE₀偏波の奇モードと、第3コア11cのTE₀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。

[0073] 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。

[0074] シリコン製のコア11を形成する場合には、例えば、RIE（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11の側面と、下部クラッド12の表面に対する垂線との成す角が0°にならず、上記側面がわずかに（具体的には、±5°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11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。

[0075] 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°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° より大きく 90° 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。

[0076] 図1の(a)に示すように、第1コア11aと第2コア11b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、次第に狭まることが好ましい。換言すれば、並走区間Iの始点において、第1コア11aの入射端面11a1と第2コア11bの入射端面11b1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い。基板型光導波路素子1において、並走区間Iの終点において、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、直接接触するように構成されている。すなわち、並走区間Iの終点において、第1コア11aと第2コア11bとの間に間隔は形成されない。

[0077] 第1コア11aと第2コア11b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11aの導波モードと第2コア11b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11a, 11b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、TE0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11aのTE0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、TE0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11bのTE0偏波の電界分布に近づく。

[0078] 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TE0偏波を第1コア11a及び第2コア11b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TE0偏波を第1コア11a及び第2コア11b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。

[0079] なお、本実施形態では、要件（４）を満たすために、コア１１がスラブ１１ｄ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１１ｄに代えて、第１コア１１ａ及び第２コア１１ｂ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１２と上部クラッド１３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１２の屈折率と上部クラッド１３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１２及び上部クラッド１３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１２とは屈折率が異なる空気層を上部クラッド１３として用いる構成、すなわち、上部クラッド１３を積層しない構成を採用しても構わない。

[0080] また、本実施形態では、スラブ１１ｄ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１１ｄは、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ⅱに形成されていればよい。

[0081] （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ＴＥ０偏波は、コア１１、すなわち第１コア１１ａと第２コア１１ｂとを含む断面におけるＴＥ０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ＴＥ０偏波は、第１コア１１ａと第２コア１１ｂを含む断面におけるＴＥ０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ＴＥ０偏波は、コア１１を導波するＴＥ０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ＴＥ０偏波は、コア１１を導波するＴＥ０偏波の偶モードと見做せる。以下に、その理由を説明する。

[0082] 以下では、非特許文献４のpp. 526－531（13.9 THE EIGENMODES OF A COUPLEDWAVEGUIDE SYSTEM (supermodes)）を参考に行っている。

[0083] 非特許文献４によると、２つのコア１１ａ、１１ｂ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。

[0084] 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 O 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 O 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 O 偏波の電界分布に近くなる。

[0085] 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 O 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 O 偏波の電界分布に近づき、T E O 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 O 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 O 偏波は T E O 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 O 偏波は、T E O 偏波の偶モードとなる。

[0086] 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。

[0087] 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11b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11bよりも第1コア11a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。

[0088] 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TE₀偏波の奇モードは、断熱的に、接続面におけるTM₀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。

[0089] 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1'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、TE₀偏波の偶モード(#0)、TE₀偏波の奇モード(#1)、TM₀偏波の偶モード(#2)を示す。

[0090] 図8によれば、並走区間1'の始点($z=0$)と終点($z=1$)とで、TE₀偏波の奇モードとTM₀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。

[0091] また、並走区間1'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、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は、等しくなることが分かった。ここでは、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。

[0092] 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。

[0093] 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せている（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。

[0094] 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が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。

[0095] 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。

[0096] ここでは、次の2点に着目する。

[0097] 1点目は、基板型光導波路素子1におけるTE₀偏波の奇モードは、非特許文献5のTE_{2,1}に対応し、TM₀偏波の偶モードは、非特許文献5のTM_{1,1}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つのコアと見なした場合に、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TE₀偏波の奇モードは、同様に定義される非特許文献5のTE_{2,1}に対応する。また、TM偏波の中で最も実効屈折率が高いTM₀偏波の偶モードは、同様に定義される非特許文献5のTM_{1,1}に対応する。

[0098] 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。

[0099] 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。

[0100] 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。

[0101] 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。電界のコアー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、TEO 偏波の奇モードの実効屈折率と TMO 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。

[0102] 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。

[0103] 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。

[0104] また、(1) 並走区間 I の始点において TMO 偏波の偶モード及び TMO 偏波の奇モードの実効屈折率が、何れも、TEO 偏波の偶モード及び TEO 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。

[0105] (実施例)

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) ~ (e) 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って、それぞれ、図 5 の (a) に示した A-A' 線による A-A' 断

面図、図5の(a)に示したB-B'線によるBB'断面図、図5の(a)に示した並走区間Iの終点($z=1$)入射側における断面図、及び、図5の(a)に示した並走区間Iの終点($z=1$)出射側における断面図である。

[0106] 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。

[0107] 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。すなわち、コア11の幅は、並走区間Iの終点を境界として、その入射側及び出射側の何れであっても400nmである(図5の(d)及び(e)参照)。

[0108] 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。

[0109] 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($0 \leq z \leq 1$)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。

[0110] 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 TMO 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 TMO 偏波の偶モードにモード変換可能なことが分かった。

[0111] # 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。

[0112] 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。

[0113] [数1]

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

[0114] [数2]

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

[0115] 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。

[0116] 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。

[0117] 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。

[0118] 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。

[0119] 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。

[0120] （要件（５）を満たすことの効果）

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。

[0121] 突き合わ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。

[0122] [数３]

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

[0123] ここで、各パラメータは以下のとおり。

[0124] [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
 C : その他の係数

[0125] また、積分は接続面を含む平面内全てで行っている。

[0126] （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、Ｅｙ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、Ｅｘ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偏波に変換される。基板型光導波路素子1は、接続面において、第1コア11aと第2コア11bとの間に間隔が生じない、換言すれば、第1コア11aと第2コア11bとが接触するように構成されている。加えて、接続面において、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、第3コア11cの入射端面11c1を過不足なく覆うように構成されている。これらの構成、すなわち要件(5)を満たすことによれば、接続面において、第1コア11aと第2コア11bとを合わせた屈折率断面と、第3コア11cの屈折率断面とがほぼ一致する。その結果、接続面における突き合わせ結合の変換効率をほぼ100%とすることが可能となる。

[0127] 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。

[0128] 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。

[0129] (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。

[0130] 第1コア11a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1580nmであり、図には、電界のExとEyの両方を示している。図3の(a)～(c)は、第1コア11a、第2コア11b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)、図3の(d)は、 $z=1$ における第3コア11cのTM0偏波を示している。

[0131] 図3の(a)のTE₀偏波の奇モードの電界を見ると、第1コア11aに局在した電界分布、すなわち、第2コア11bが存在しない場合における第1コア11aのTE₀偏波の電界分布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11aに局在した電界分布を持つためである。図3の(a), (b)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11a, 第2コア11bにまたがった分布をもつ。図3の(c)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E_y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、図3の(d)すなわち $z=1$ では、第3コア11cのTM₀偏波となることが分かった。

[0132] 続いて、第2コア11b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1580nmであり、図には、電界のE_xのみを示している。図4の(a)~(c)は、第1コア11a, 第2コア11b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)、図4の(d)は $z=1$ における第3コア11cのTE₀偏波を示している。

[0133] 図4の(a)のTE₀偏波の偶モードの電界を見ると、第2コア11bに局在した電界分布、すなわち、第1コア11aが存在しない場合における第2コア11bのTE₀偏波の電界分布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11bに局在した電界分布を持つためである。図4の(a), (b)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11a, 第2コア11bにまたがった分布をもつ。図4の(c)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、図4の(d)に至るまでTE₀偏波の偶モードのまま導波する。変換されることなく相互作用区間iを経たTE₀偏波の偶モード

は、図4の(d)すなわち $z=1$ において、第3コア11cのTE0偏波となることが分かった。

[0134] 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。

[0135] 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。

[0136] (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。

[0137] 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。

[0138] 図10に示すように、基板型光導波路素子1は、並走区間1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1の始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる。

[0139] 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。

[0140] 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1における光の進行方向と平行な方向に第4

コア 1 4 a を延伸し、第 5 コア 1 4 b を緩く曲げる構成を採用している。

[0141] 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。

[0142] 本実施形態においては、第 4 コア 1 4 a と第 5 コア 1 4 b との間隔を次第に広げるために第 5 コア 1 4 b 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 1 4 a のみを曲げる構成を採用してもよいし、第 4 コア 1 4 a 及び第 5 コア 1 4 b の両方を曲げる構成を採用してもよい。

[0143] なお、第 5 コア 1 4 b を曲げる構成は、第 4 コア 1 4 a 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。

[0144] また、コア 1 1 がスラブ 1 1 d を含む場合、離間部 1 4 は、スラブ 1 4 c を更に含むことが好ましい。スラブ 1 4 c は、第 4 コア 1 4 a と第 5 コア 1 4 b との間に、第 4 コア 1 4 a と第 5 コア 1 4 b とを連通させるスラブであって、第 1 コア 1 1 a と第 2 コア 1 1 b とを連通させるスラブ 1 1 d と高さが共通のスラブである。

[0145] 離間部 1 4 がスラブ 1 4 c を含むことによって、並走区間 I の始点において離間部 1 4 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。

[0146] (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。

[0147] 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。

[0148] 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15を備えている。変換部15は、互いに離間して配置された第4コア15aと、第5コア15bと、スラブ15cとを含むコアである。スラブ15cは、第1の変形例に係るスラブ14cに対応する。

[0149] 第4コア15a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15b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5コア15bと第5コア15bとの間隔は、並走区間1の始点から遠ざかるにしたがって次第に広がる。

[0150] 変換部15は、第1のテーパ部15dと、第2のテーパ部15eとを更に含んでいる。

[0151] 第1のテーパ部15dは、スラブ11dと高さが共通であるテーパ部であって、スラブ14c及び第4コア15aの各々と連通し、第4コア15aの入射端面15a1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。

[0152] 第2のテーパ部15eは、スラブ11dと高さが共通であるテーパ部であって、スラブ14c及び第5コア15bの各々と連通し、第5コア15bの入射端面15b1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。

[0153] 図11に示すように、第5コア15b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15は、離間部14と同様の効果を奏する。

[0154] 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TE₀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TE₀偏波から変換されたTE₀偏波の奇モードとTE₀偏波の偶モードとの間に働く相互作用は、とても弱い。

[0155] 上記のように構成された第1のテーパ部15d及び第2のテーパ部15eの各々は、変換部15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1の始点に近づくにしたがって、上述したTE₀偏波の

奇モードとTE₀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。

[0156] (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（TE損失）、偏波消光比は以下に定義したとおり。

[0157] [数5]

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

[0158] [数6]

$$\text{偏波消光比} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{出力ポートから出力する } TM_0 \text{ のパワー}}{\text{出力ポートから出力する } TE_0 \text{ のパワー}} \right) \quad (5)$$

[0159] ただし、偏波消光比は、第1の入力ポートにTE₀偏波を入れた場合を想定する。第1コア11aは、TE₀偏波の奇モードからTE₀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。

[0160] 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12参照）。

[0161] 損失及び偏波消光比の波長依存性を計算した。デバイス長は80 μm、W₀ = 400 nmとした。結果を図13及び図14に示す。

[0162] 図13より、光通信で一般的に使用されるCバンド（波長範囲：1530 – 1565 nm）とLバンド（波長範囲：1565 – 1625 nm）を含む120 nmの非常に広い波長範囲において、損失は0.13 dB以下（97%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、TE₀偏波からTM₀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

、0.9 dB以下であり非常に小さい。

[0163] 図14より、偏波消光比は、同波長範囲において25 dB以上となることが分かる。これは、TE₀偏波を第1の入力ポートに入力した場合、出力されるTM₀偏波のパワーに対して、変換が不十分でTE₀偏波として出力されるパワーが、1/316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の意味している。

[0164] 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。

[0165] 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。

[0166] 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。

[0167] 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。

[0168] 〔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。

[0169] （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 15 を参照して説明する。図 15 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 15 の（b）～（e）は、基板型光導波路素子 2 の構成を示す断面図であって、それぞれ、図 15 の（a）に示す A－A' 線における A A' 断面図、図 15 の（a）に示す B－B' 線における B B' 断面図、図 15 の（a）に示す並走区間 I の終点（ $z = 1$ ）入射側における断面図、及び、図 15 の（a）に示す並走区間 I の終点（ $z = 1$ ）出射側における断面図である。

[0170] 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 2 1、下部クラッド 2 2、及び上部クラッド 2 3 を備えている。コア 2 1 は、シリコン製であり、下部クラッド 2 2 及び上部クラッド 2 3 は、シリカ製である。

[0171] コア 2 1 は、下部クラッド 2 2 上に形成されたコアであって、第 1 コア 2 1 a、第 2 コア 2 1 b、及び第 3 コア 2 1 c を備えたコアである。図 15 の（a）に示すように、第 1 コア 2 1 a、第 2 コア 2 1 b、及び第 3 コア 2 1 c は、基板型光導波路素子 1 の第 1 コア 1 1 a、第 2 コア 1 1 b、及び第 3 コア 1 1 c と同様に配置されている。

[0172] 図 15 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 2 1 a、第 2 コア 2 1 b、及び第 3 コア 2 1 c 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 2 1 a と第 2 コア 2 1 b 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。

[0173] 本実施形態においては、図 15 の（d）に示すように、並走区間 I の終点

において、第1コア21aと第2コア21bとが離間せずに、第1コア21aの出射端面と第2コア21bの出射端面とが直接接触する構成を採用している。その上で、図15の(d)に示す領域R21の形状と、図15の(e)に示す第3コア21cの入射端面の形状とが合同となる構成を採用している。したがって、基板型光導波路素子2は、要件(5)を満たすことができる。

[0174] 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。

[0175] 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る。

[0176] 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15の(a)～(e)参照)。

[0177] 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。

[0178] 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。

[0179] 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。

[0180] したがって、並走区間Iの終点入射側におけるコア21の幅は、400nmである(図15の(d)参照)。

[0181] 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である。並走区間Iの終点において、第1コア21aと第2コア21bとの間に間隔は形成されない。

[0182] 第3コア21cの幅は、400nmである(図15の(e)参照)。

[0183] 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。

[0184] ここでは、図15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。

[0185] 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。

[0186] 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。

[0187] 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。

[0188] 図16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16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16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分かった。

[0189] [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。

[0190] (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 3 の構成について、図 17 を参照して説明する。図 17 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 17 の (b) ~ (e) は、基板型光導波路素子 3 の構成を示す断面図であって、それぞれ、図 17 の (a) に示す A - A' 線における A A' 断面図、図 17 の (a) に示す B - B' 線における B B' 断面図、図 17 の (a) に示す並走区間 I の終点 ($z = 1$) 入射側における断面図、及び、図 17 の (a) に示す並走区間 I の終点 ($z = 1$) 出射側における断面図である。

[0191] 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 17 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。

[0192] 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 31 a、第 2 コア 31 b、及び第 3 コア 31 c を備えたコアである。図 17 の (a) に示すように、第 1 コア 31 a、第 2 コア 31 b、及び第 3 コア 31 c は、基板型光導波路素子 1 の第 1 コア 11 a、第 2 コア 11 b、及び第 3 コア 11 c と同様に配置されている。

[0193] 図 17 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 21 a と第 2 コア 21 b 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。

[0194] 本実施形態においては、図17の(d)に示すように、並走区間Iの終点において、第1コア31aと第2コア31bとが離間せずに、第1コア31aの出射端面と第2コア31bの出射端面とが直接接触する構成を採用している。その上で、図15の(d)に示す領域R31の形状と、図15の(e)に示す第3コア21cの入射端面の形状とが合同となる構成を採用している。したがって、基板型光導波路素子3は、要件(5)を満たすことができる。

[0195] 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る。

[0196] 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の各部は、以下のように構成されている(図17の(a)～(e)参照)。

[0197] 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。

[0198] 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。

[0199] したがって、並走区間Iの終点入射側におけるコア31の幅は、400nmである(図17の(d)参照)。

[0200] 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である。並走区間Iの終点において、第1コア31aと第2コア31bとの間に間隔は形成されない。

[0201] 第3コア31cの幅は、400nmである(図17の(e)参照)。

[0202] 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。

[0203] 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 1 のうち、少なくとも並走区間 1 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 1 の全域に渡って形成されていてもよい。

[0204] 図 1 8 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 1 8 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かった。

[0205] [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。

[0206] 本適用例に係る光変調器の構成について、図 1 9 を参照して説明する。図 1 9 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。

[0207] 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。

[0208] 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。

[0209] 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。

- [0210] 第1の位相変調部41が変調したTEO偏波の変調信号は、偏波多重導波路43の第1の入射ポートに入力され、第2の位相変調部42が変調したTEO偏波の変調信号は、偏波多重導波路43の第2の入射ポートに入力される。
- [0211] 偏波多重導波路43は、第1の入射ポートに入力されたTEO偏波をTMO偏波に変換するとともに、変換したTMO偏波と第2の入射ポートに入力されたTEO偏波とを多重する偏波多重導波路として機能する。
- [0212] 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43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43として利用する場合、基板型光導波路素子1の第1コア11a及び第2コア11bは、それぞれ、偏波多重導波路43の第1の入射ポート及び第2の入射ポートに対応する。
- [0213] したがって、第1コア11aの入射端面には、第1の位相変調部41が変調したTEO偏波が入力され、第2コア11bの入射端面には、第2の位相変調部42が変調したTEO偏波が入力される。
- [0214] 偏波多重導波路43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。
- [0215] なお、位相変調部41, 42がTEO偏波を変調する方式は、QPSK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OOK変調、QPSK変調、QAM変調などが挙げられる。
- [0216] また、位相変調部41, 42がTEO偏波を変調する変調方法として、リブ導波路にPN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を一括して製造することができる。なぜなら、

位相変調部 4 1, 4 2 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 4 1, 4 2 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。

[0217] 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。

[0218] [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 T E 0 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 T E 0 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 T M 0 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 T E 0 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 T E 0 偏波の奇モードの実効屈折率と、上記コアを導波する T M 0 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 T E 0 偏波の奇モード

と上記コアを導波するTMO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、上記第1コアの出射端面及び上記第2コアの出射端面は、上記第3コアの入射端面を過不足なく覆う、ことを特徴とする。

[0219] 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TEO偏波を入射する。この場合、第1コアに入射したTEO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TEO偏波の奇モードと見做すことができる。コアを導波するTEO偏波の奇モードは、並走区間Iを導波する過程においてTMO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TMO偏波の偶モードは、第3コアを導波するTMO偏波に変換される。第3コアを導波するTMO偏波は、外部に出力される。

[0220] 一方、第2コアに入射したTEO偏波は、コアを導波するTEO偏波の偶モードと見做すことができる。コアを導波するTEO偏波の偶モードは、並走区間IをTEO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TEO偏波の偶モードは、第3コアを導波するTEO偏波に変換される。第3コアを導波するTEO偏波は、外部に出力される。

[0221] したがって、上記の構成によれば、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TEO偏波をTMO偏波に変換すると共に、得られたTMO偏波を他方の入射ポートに入射したTEO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、TEO偏波をTMO偏波に変換する偏波ローテータとしての機能と、TMO偏波とTEO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。

[0222] また、上記の構成によれば、並走区間の終点における損失を低減することができるという副次的な効果を奏する。

[0223] 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。

[0224] 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る、ことが好ましい。

[0225] 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。

[0226] 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。

[0227] 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。

[0228] 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。

[0229] 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。

[0230] 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。

[0231] 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。

[0232] 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。

[0233] 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、TE₀ 偏波の奇モードとTE₀ 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。

[0234] 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。

[0235] 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。

[0236] 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。

[0237] 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。

[0238] また、上記基板型光導波路素子は、TE₀偏波を変調する第1の位相変調部と、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、ように構成されていてもよい。

[0239] 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。

[0240] 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、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、上記第 1 コアの出射端面及び上記第 2 コアの出射端面は、上記第 3 コアの入射端面を過不足なく覆い、上記並走区間の始点において T E 0 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 T M 0 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。

産業上の利用可能性

[0241] 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。

符号の説明

[0242] 1, 2, 3 基板型光導波路素子
 1 1, 2 1, 3 1 コア
 1 1 a, 2 1 a, 3 1 a 第 1 コア
 1 1 a 1 入射端面
 1 1 a 2 出射端面
 1 1 b, 2 1 b, 3 1 b 第 2 コア
 1 1 b 1 入射端面
 1 1 b 2 出射端面
 1 1 c, 2 1 c, 3 1 c 第 3 コア
 1 1 c 1 入射端面
 1 1 c 2 出射端面
 1 1 d, スラブ
 l 並走区間
 i 相互作用区間
 1 2, 2 2, 3 2 下部クラッド
 1 3, 2 3 上部クラッド
 1 4 離間部

1 4 a	第 4 コア
1 4 b	第 5 コア
1 4 c	スラブ
1 5	変換部
1 5 a	第 4 コア
1 5 a 1	入射端面
1 5 b	第 5 コア
1 5 b 1	入射端面
1 5 c	スラブ
1 5 d	第 1 のテーパー部
1 5 e	第 2 のテーパー部

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、上下非対称であり、

上記第1コアの出射端面及び上記第2コアの出射端面は、上記第3コアの入射端面を過不足なく覆う、
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 又は 2 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

[請求項4] 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 ～ 3 の何れか 1 項に記載の基板型光導波路素子。

[請求項5] 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 4 に記載の基板型光導波路素子。

[請求項6] 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5に記載の基板型光導波路素子。

[請求項7] 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1～3の何れか1項に記載の基板型光導波路素子。

[請求項8] 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1～3の何れか1項に記載の基板型光導波路素子。

[請求項9] TEO偏波を変調する第1の位相変調部と、
TEO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TEO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TEO偏波が入力される、
ことを特徴とする請求項1～8の何れか1項に記載の基板型光導波路素子。

[請求項10] 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TEO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、

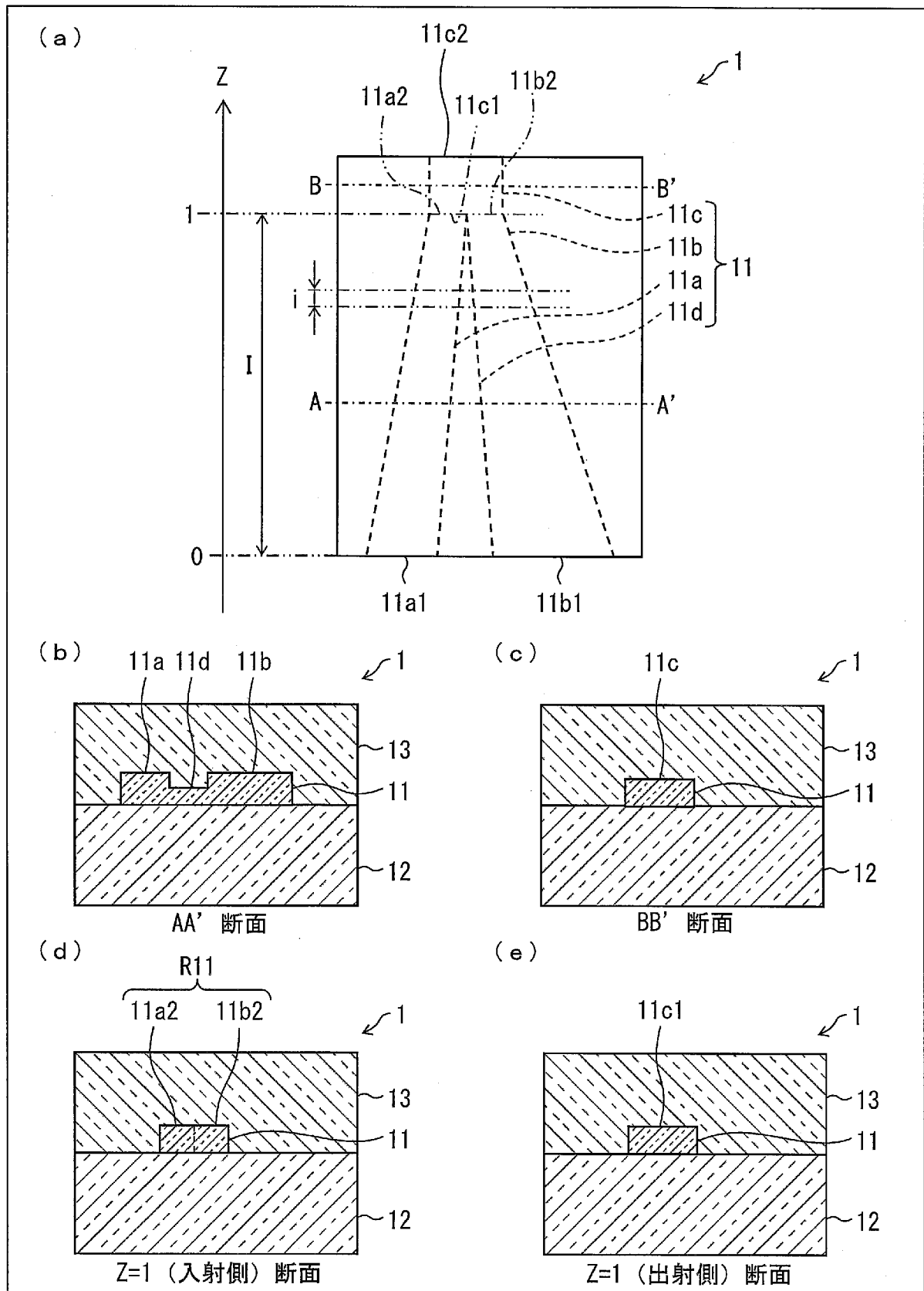
上記第1コアの出射端面及び上記第2コアの出射端面は、上記第3コアの入射端面を過不足なく覆い、

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。

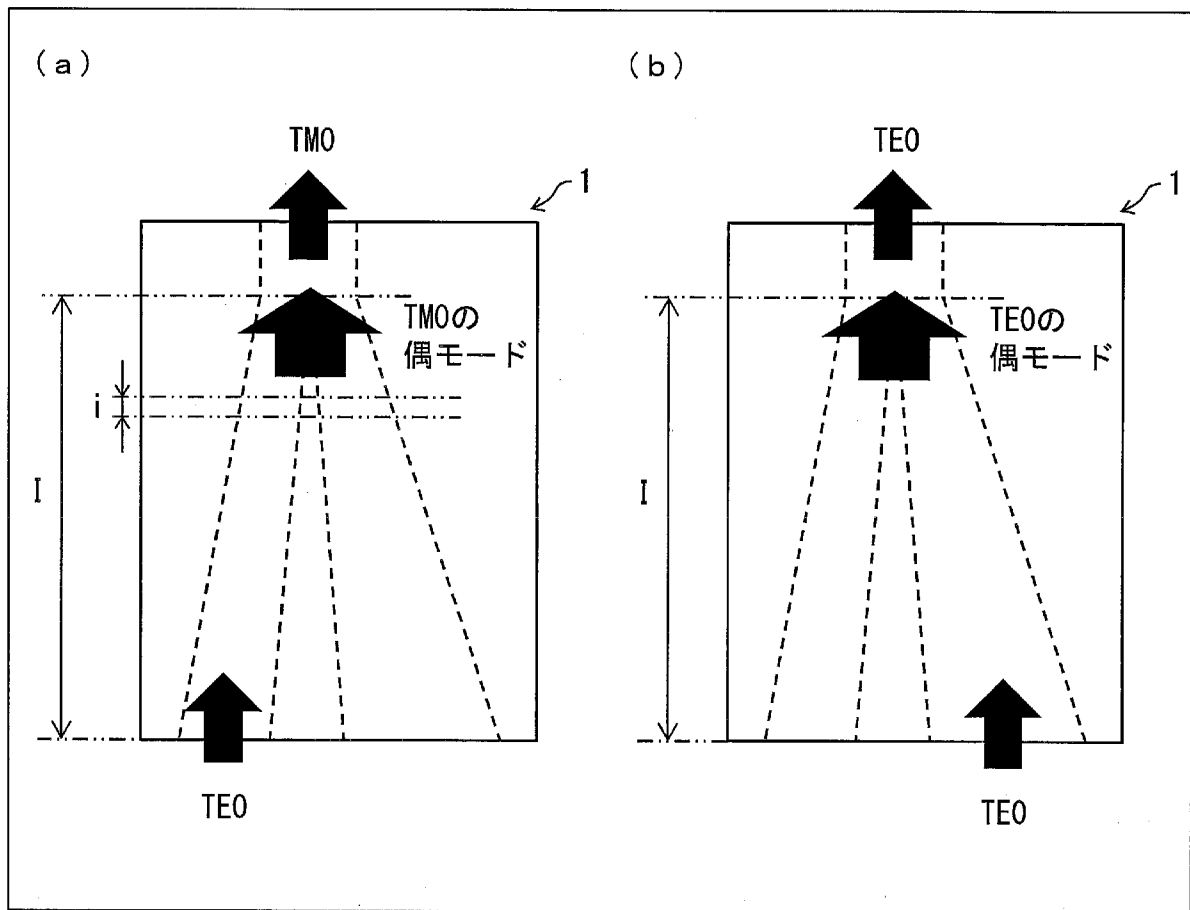
[図1]

図 1



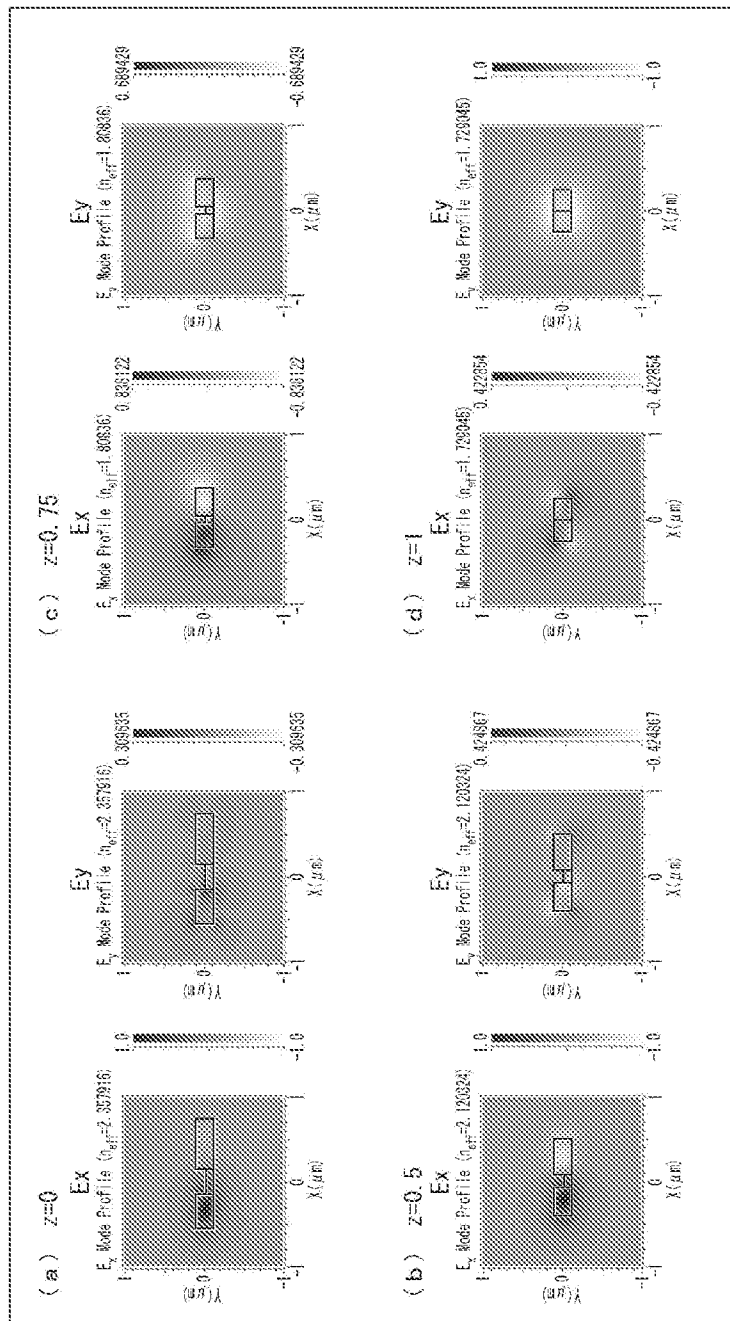
[図2]

図 2



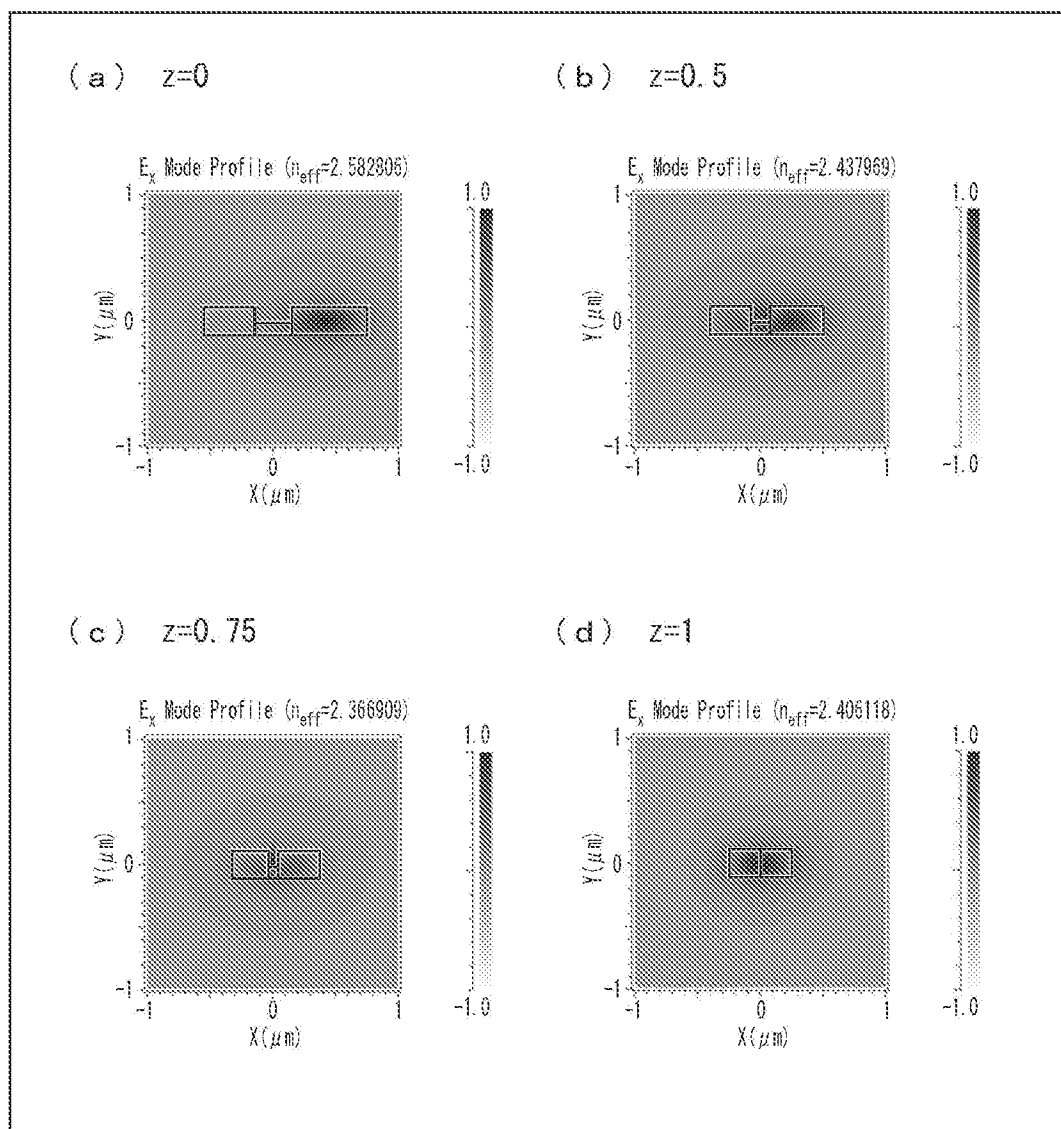
[図3]

図 3



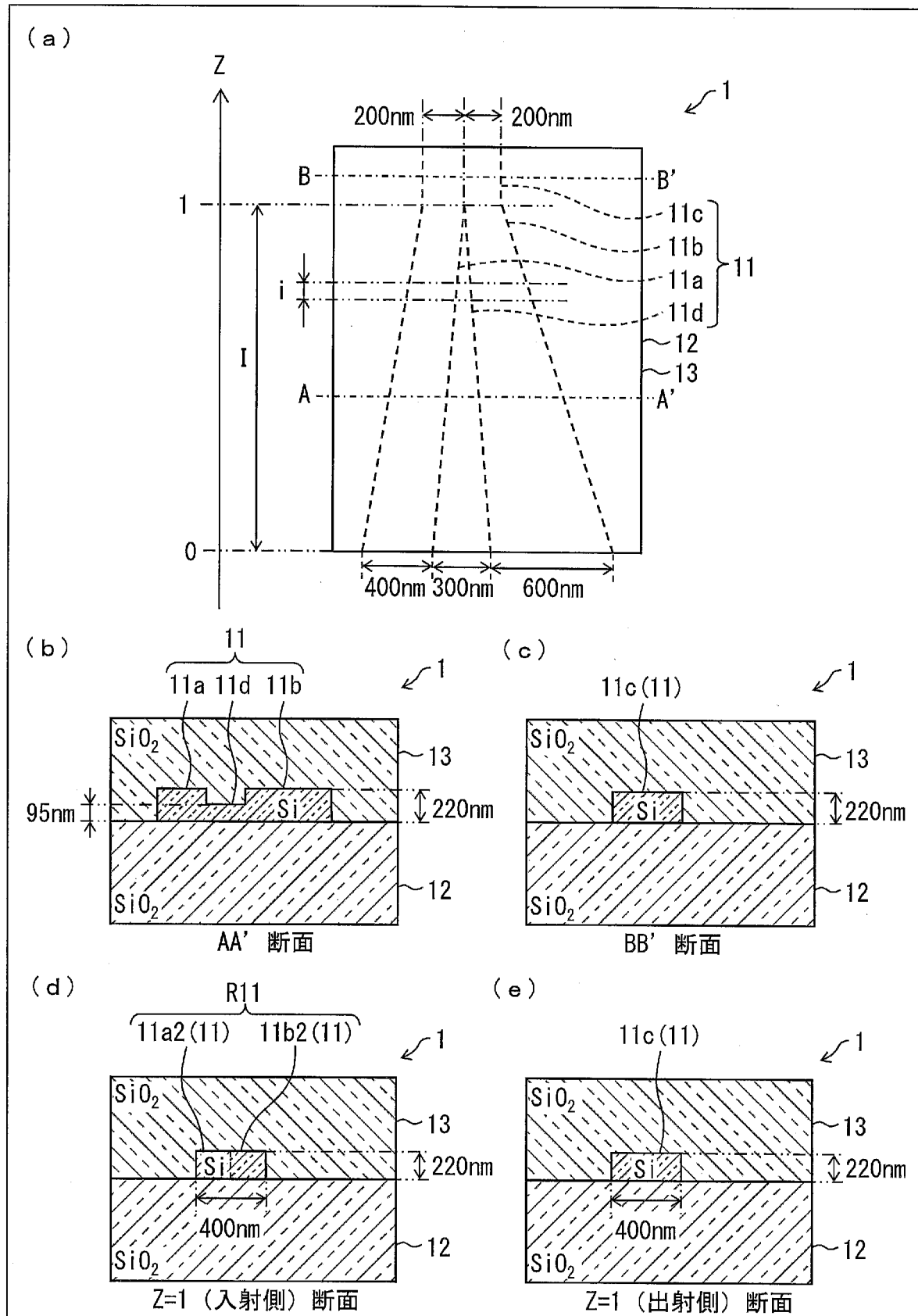
[図4]

図 4



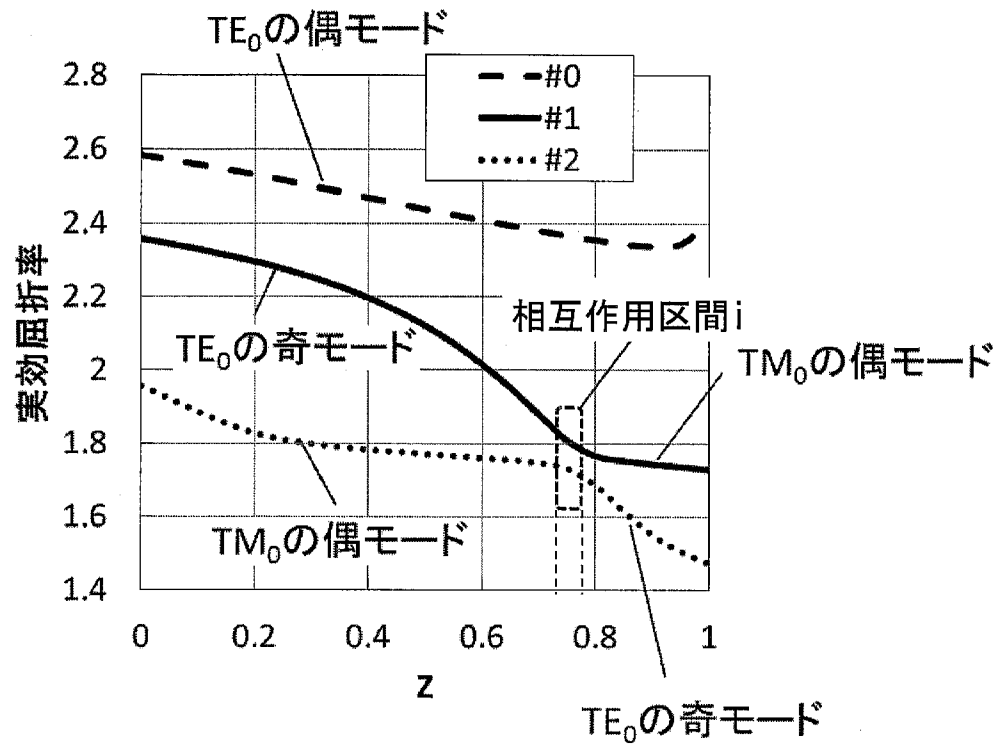
[図5]

図 5



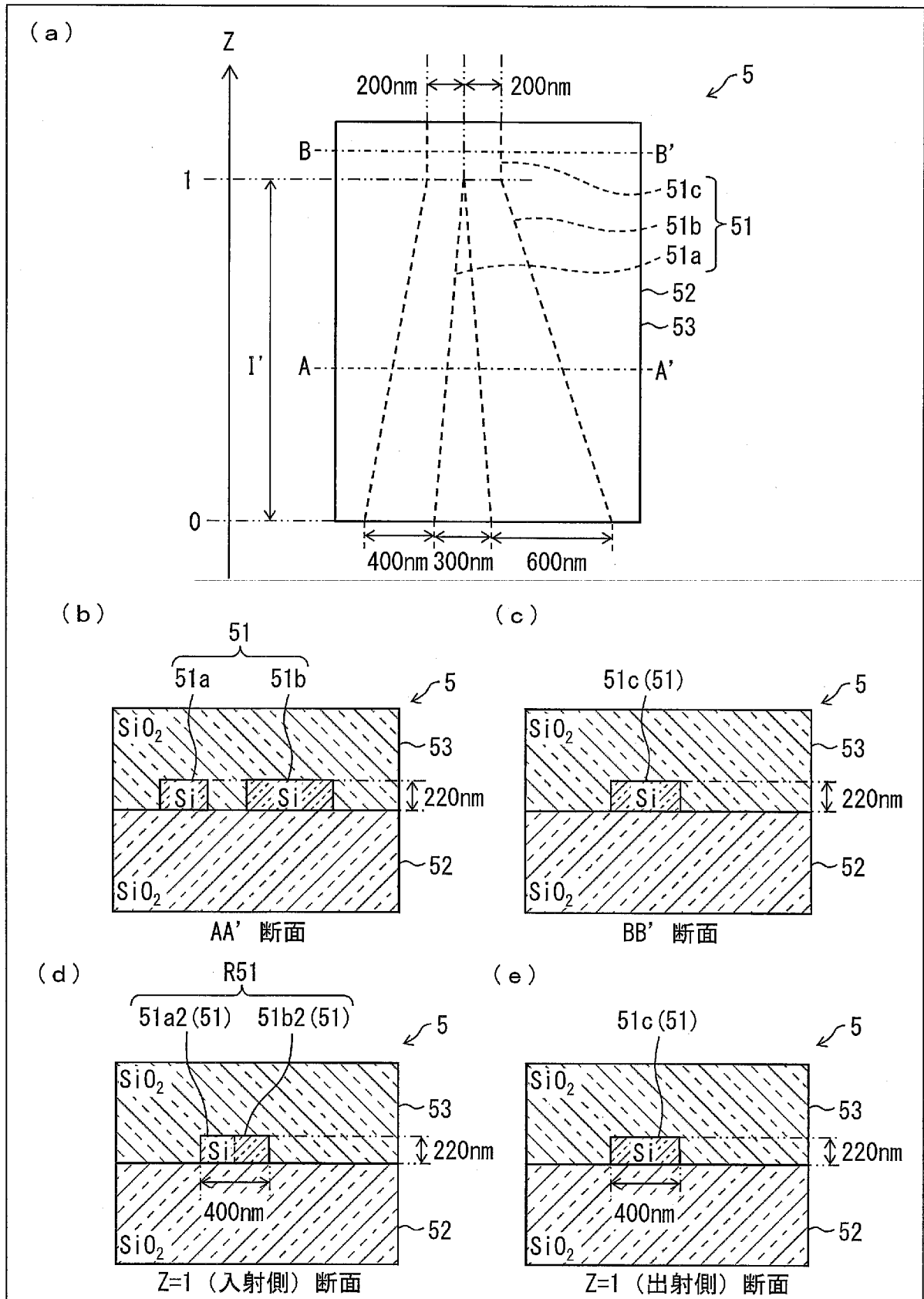
[図6]

図 6



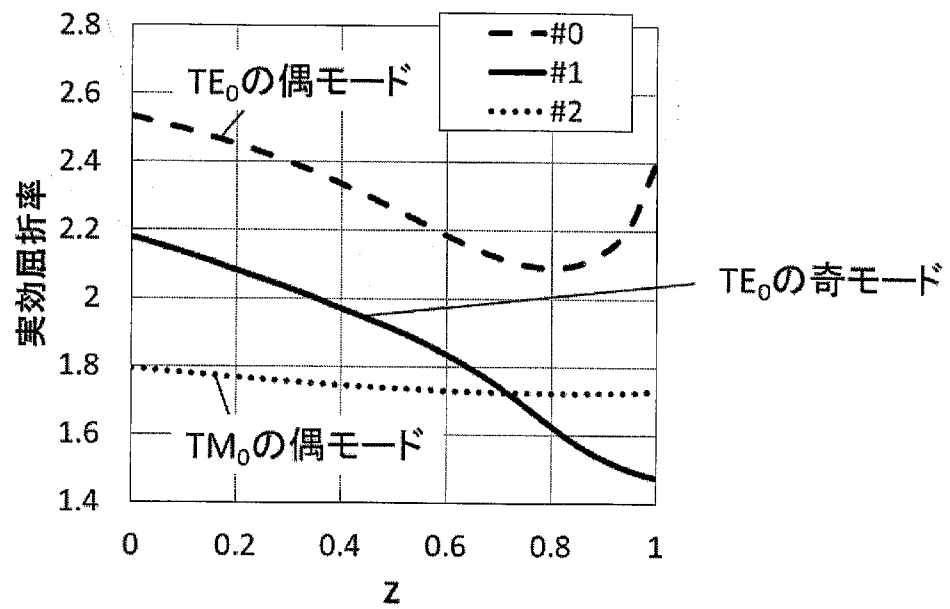
[図7]

図 7



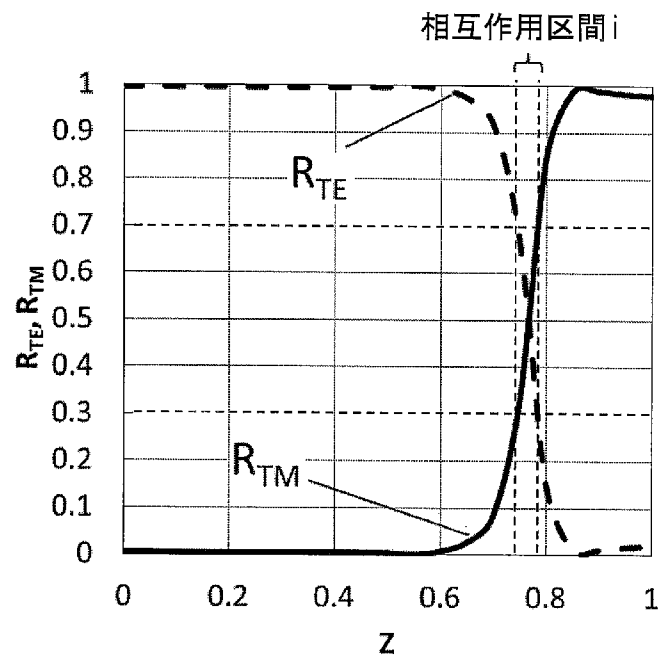
[図8]

図 8



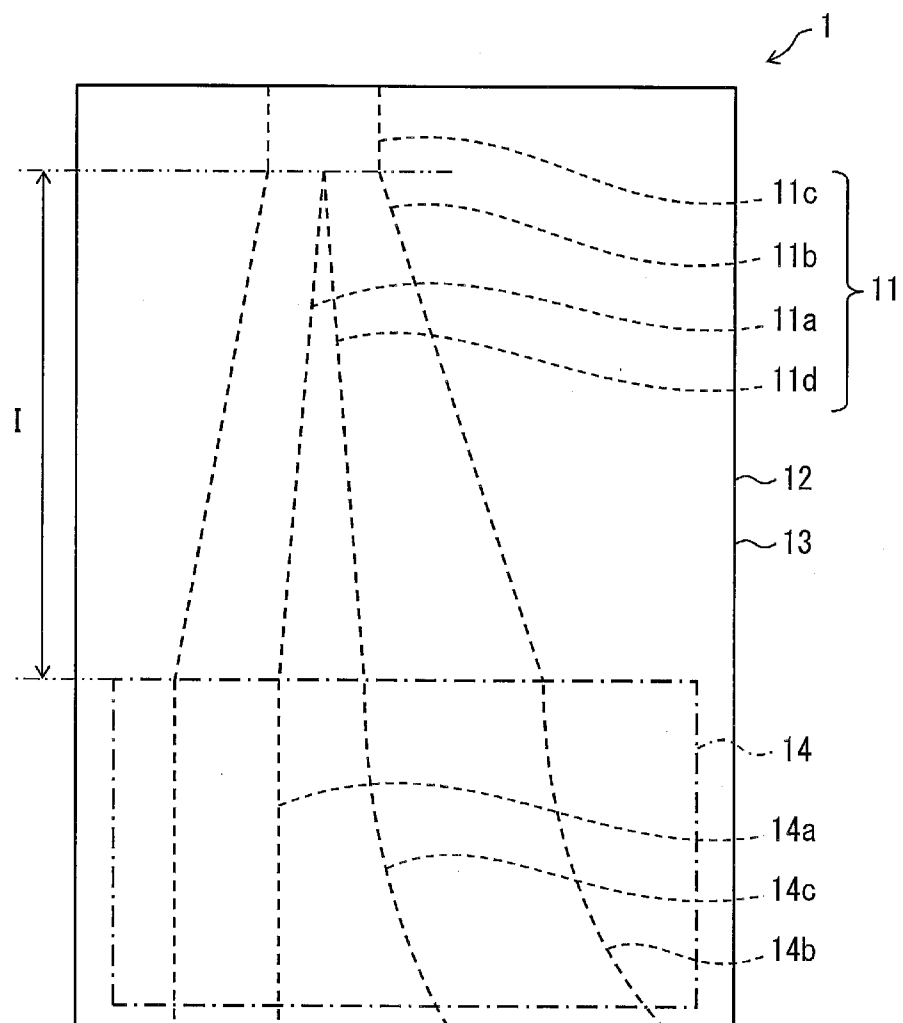
[図9]

図 9



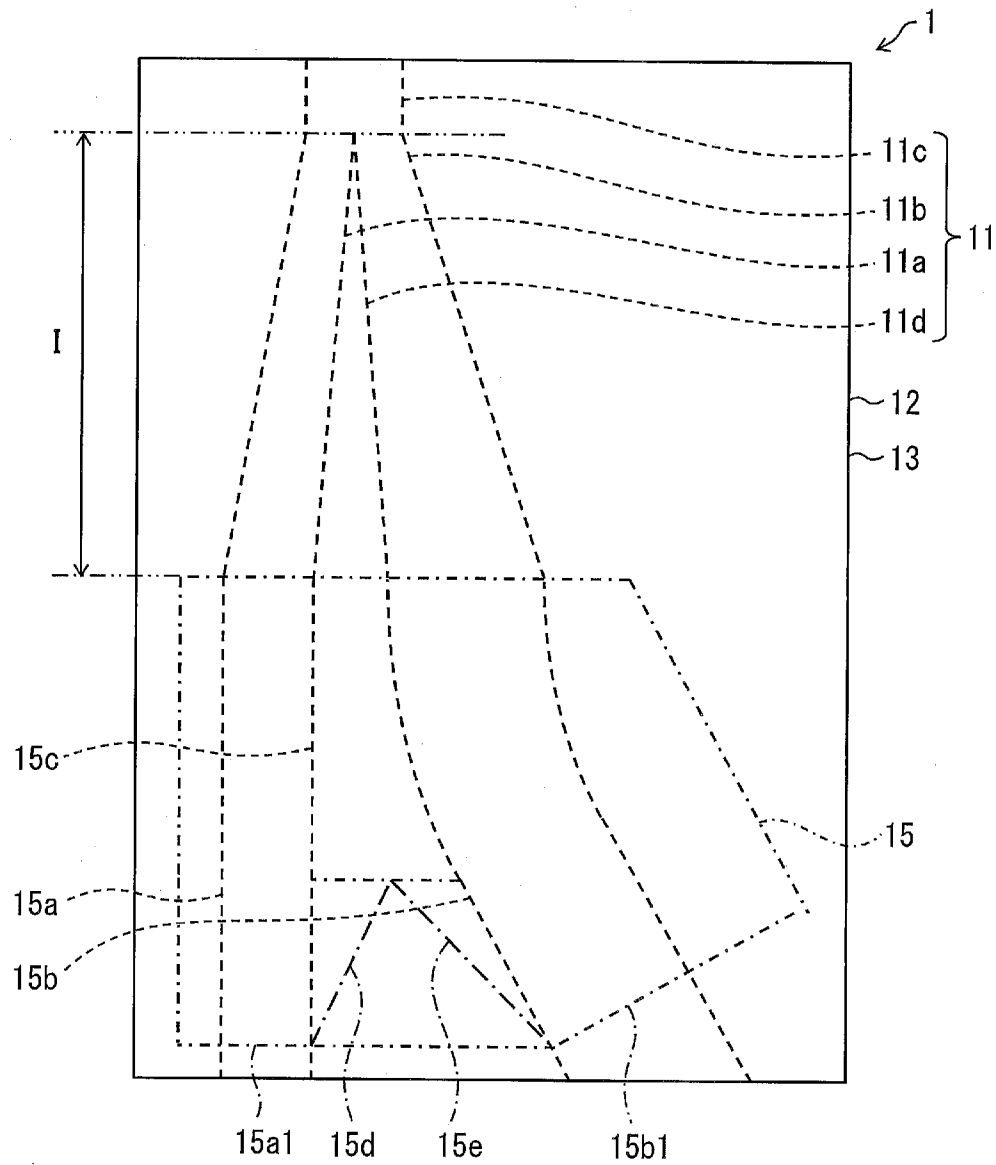
[図10]

図 10



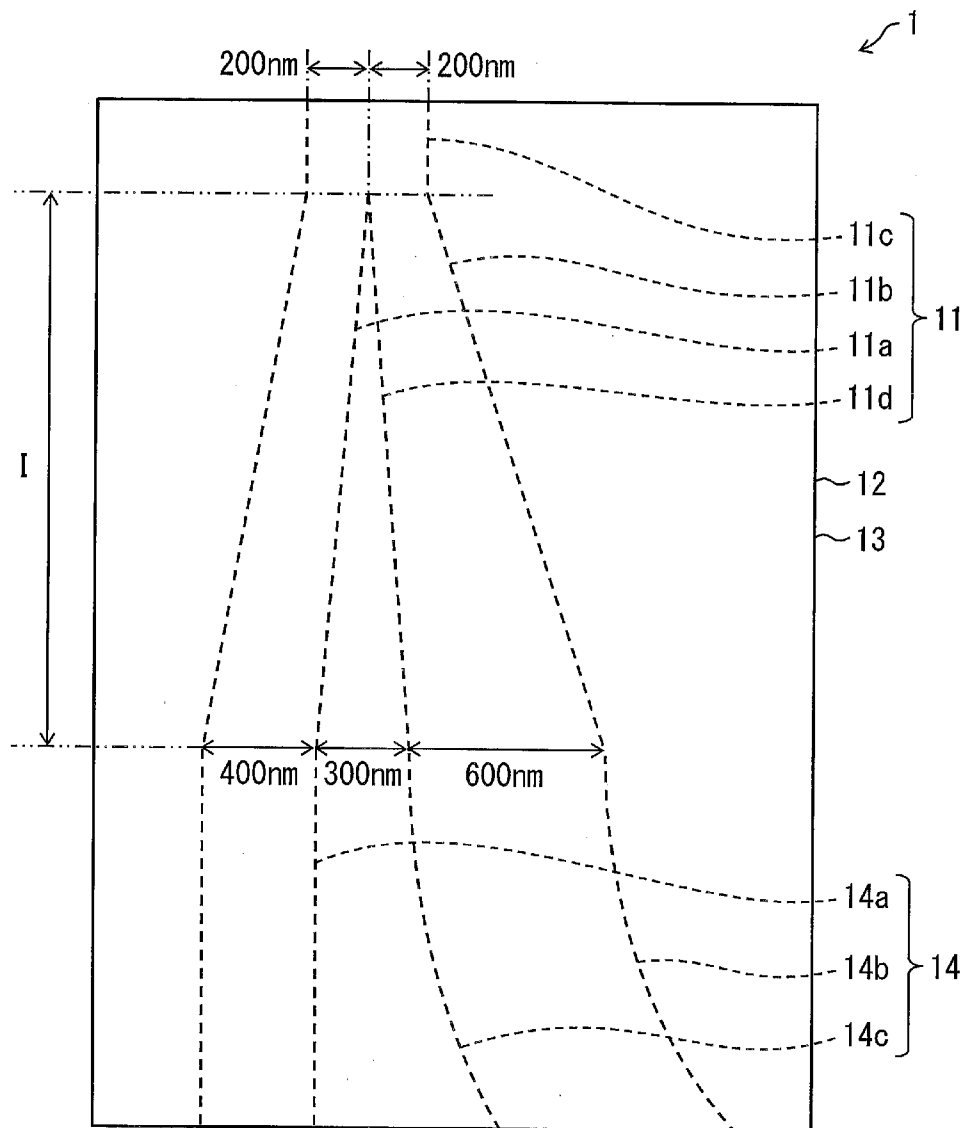
[図11]

図 11



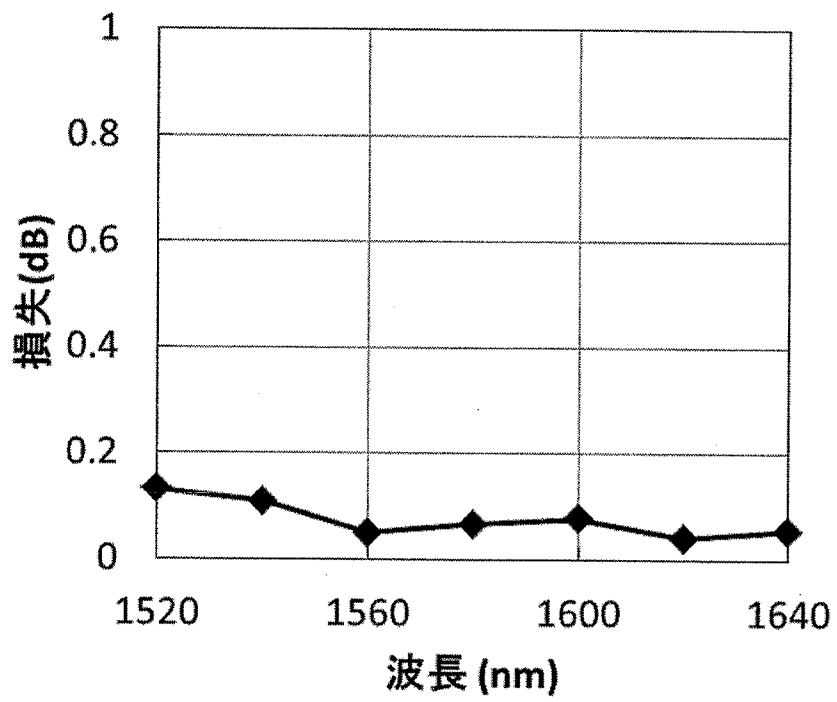
[図12]

図 12



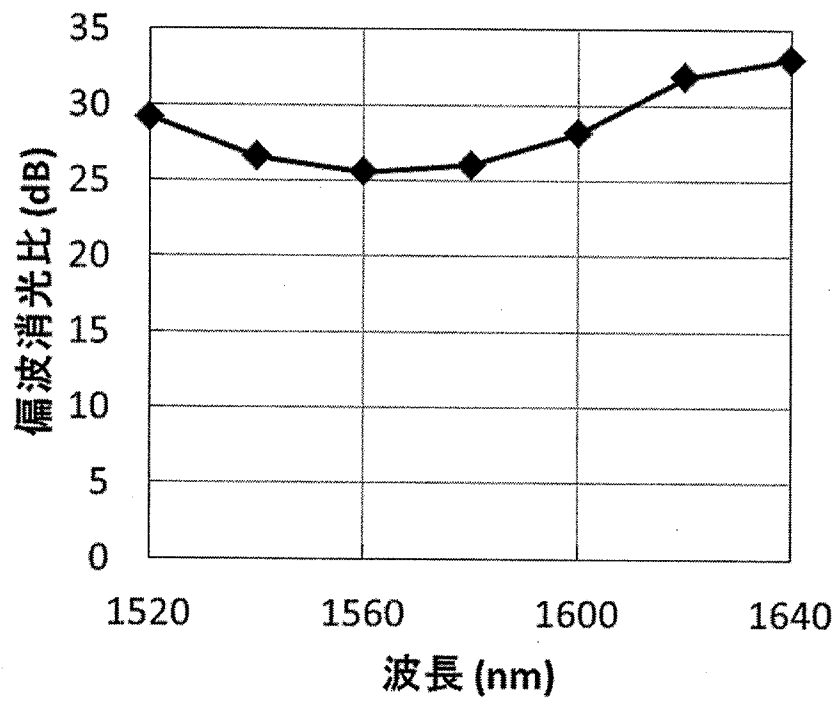
[図13]

図 13



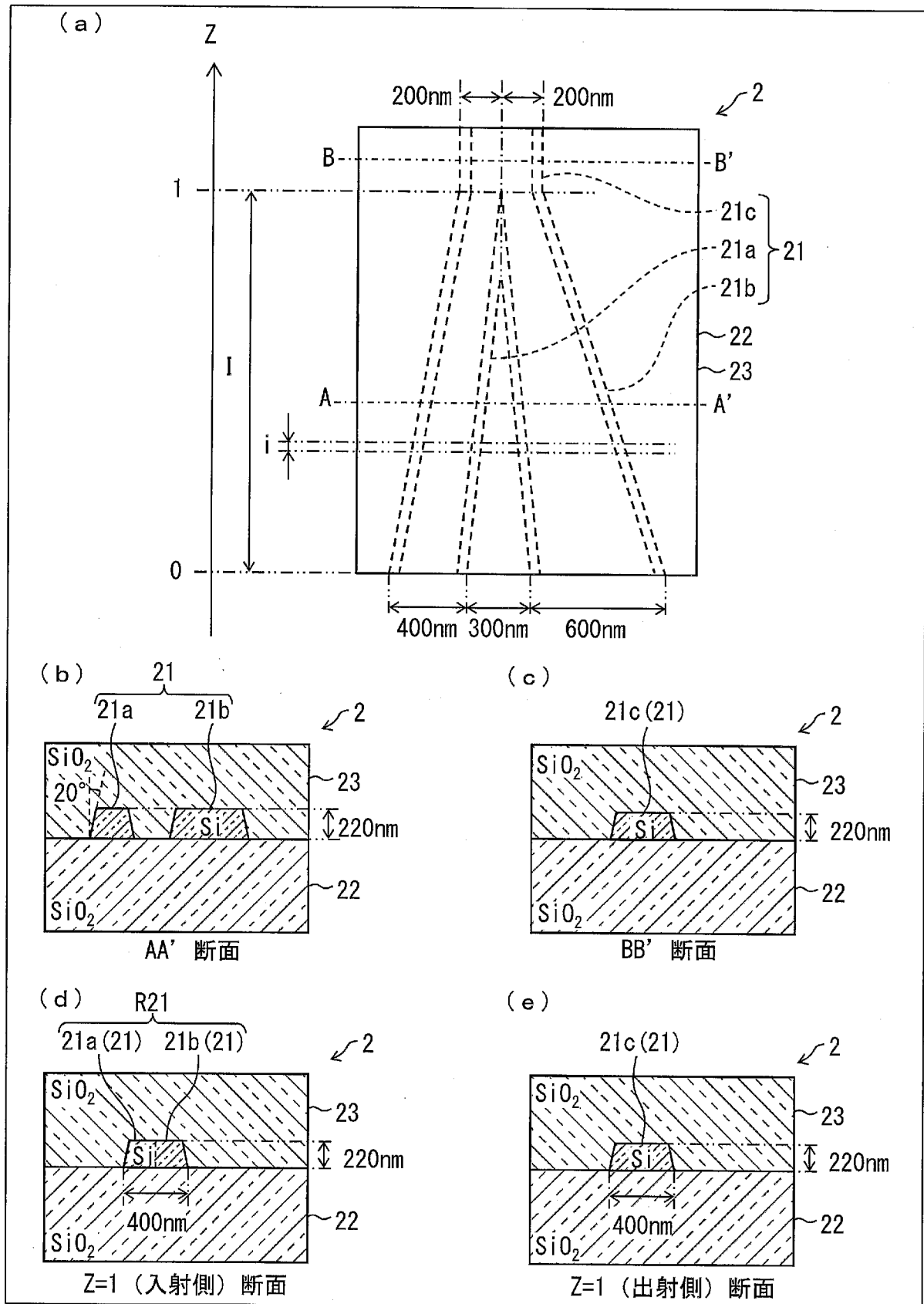
[図14]

図 14



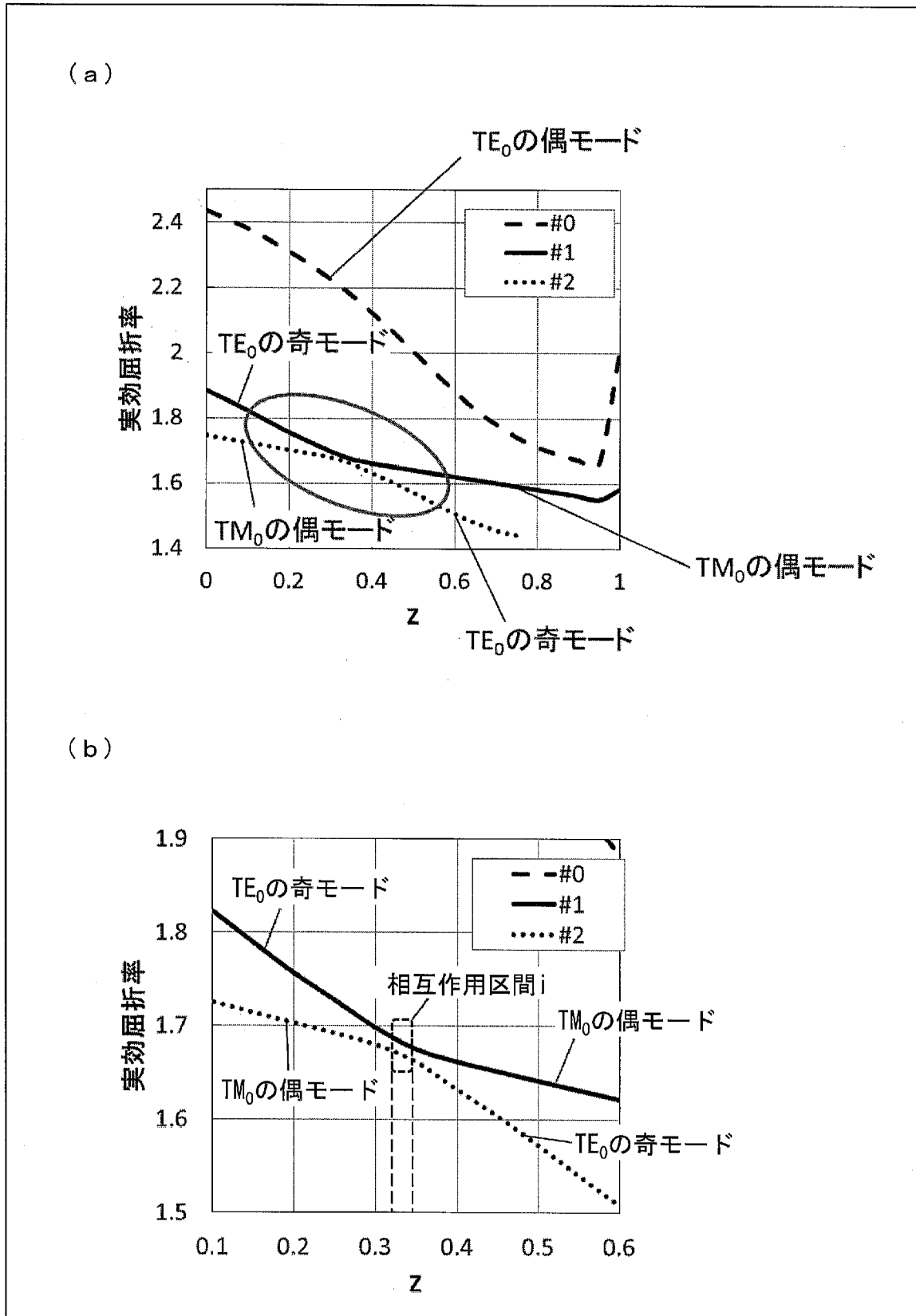
[図15]

図 15



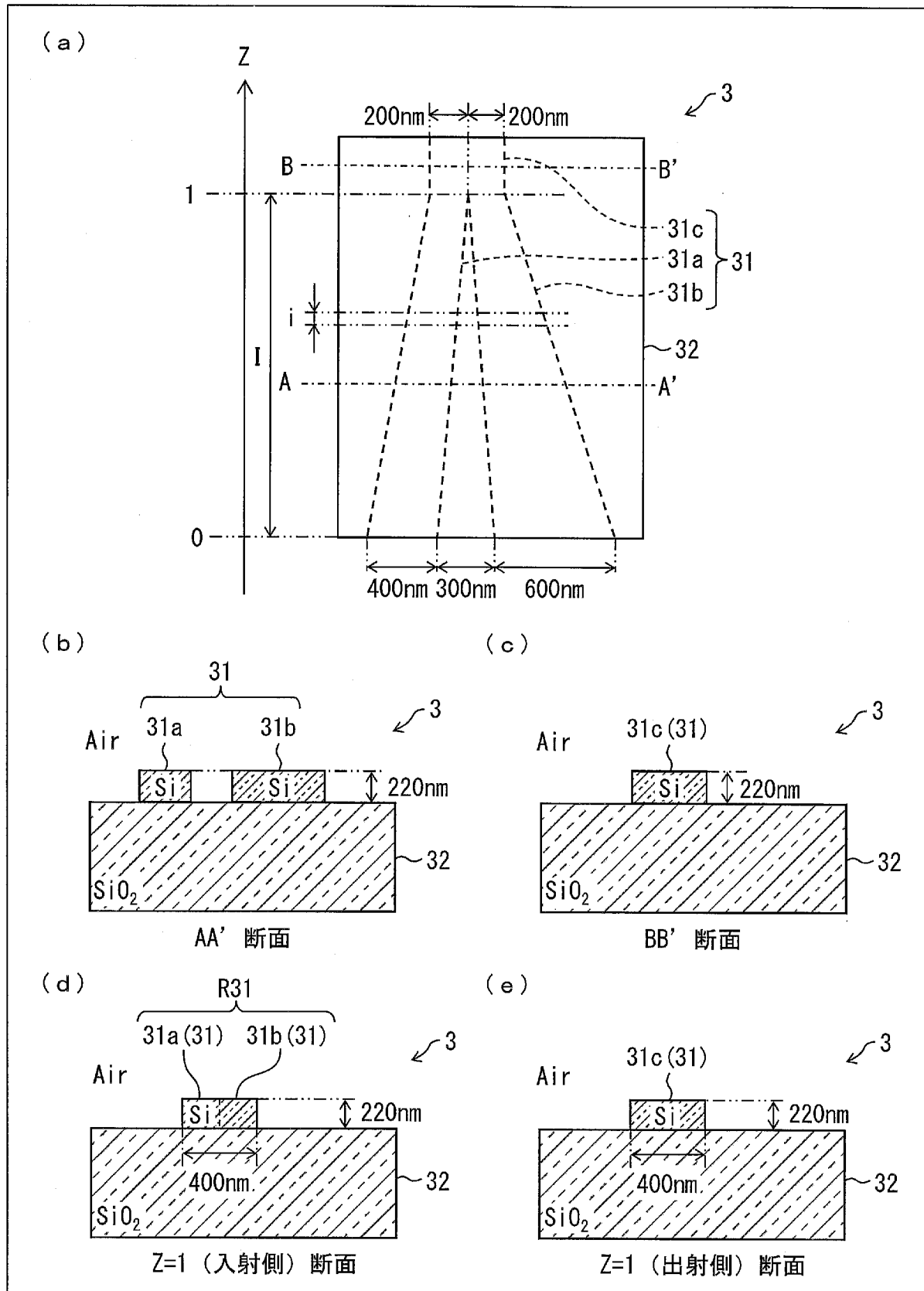
[図16]

図 16



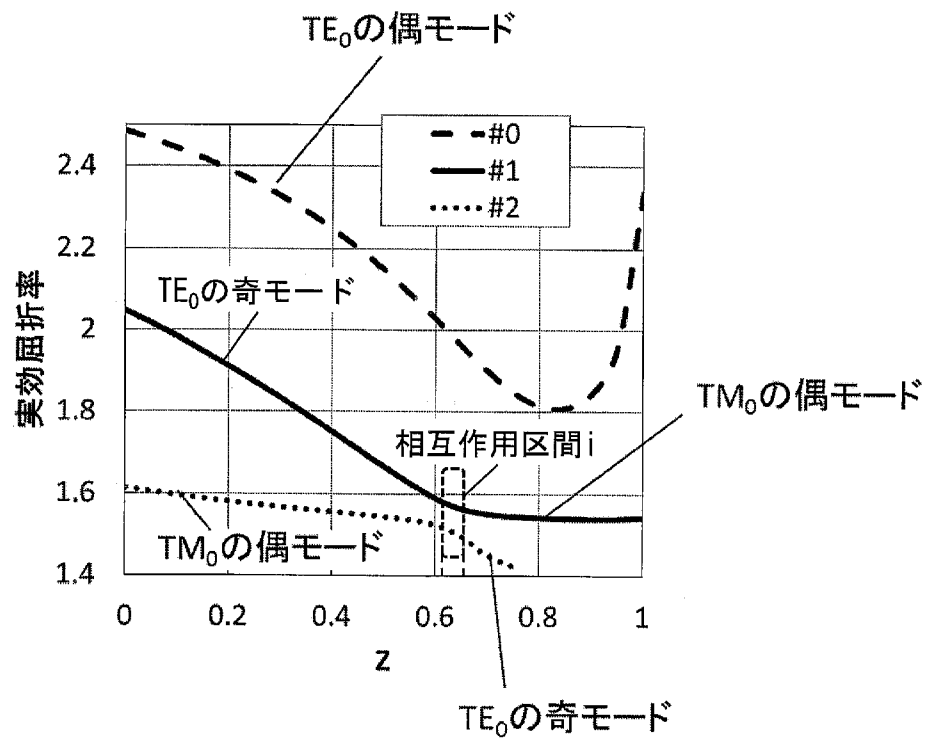
[図17]

図 17



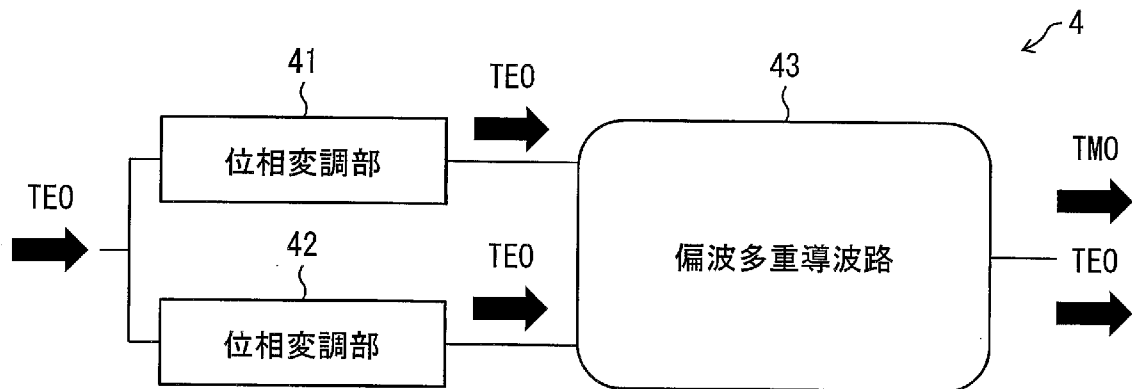
[図18]

図 18



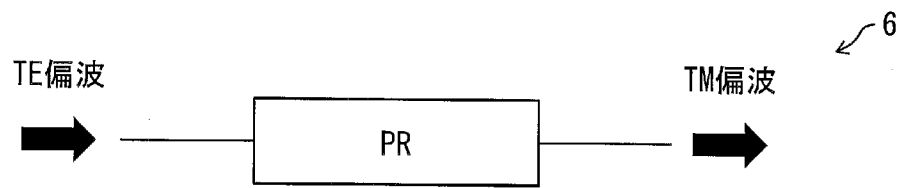
[図19]

図 19



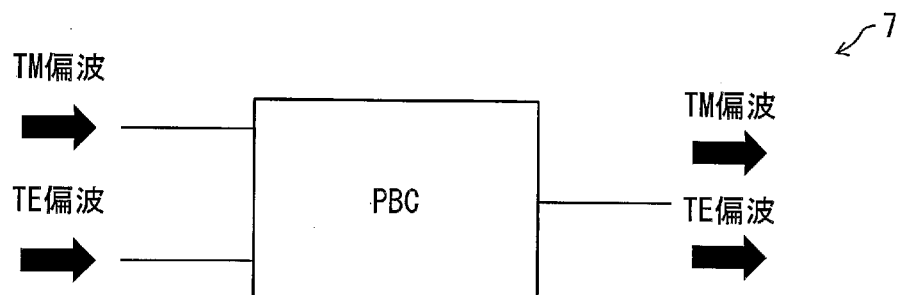
[図20]

図 20



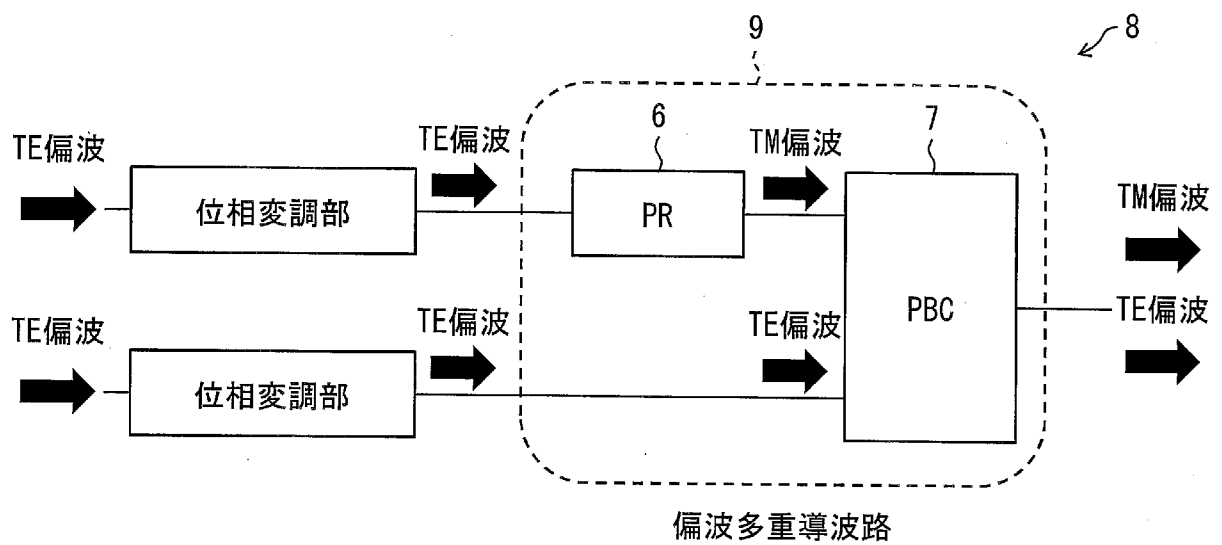
[図21]

図 21



[図22]

図 22



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/051376

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B6/126(2006.01)i, G02B6/125(2006.01)i, G02B6/14(2006.01)i, G02F1/01(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B6/126, G02B6/125, G02B6/14, G02F1/01

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	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, 2014.05.29, Vol. 22, No. 11, pp. 13565 - 13571	1-10
A	JP 2004-529377 A (Corning O.T.I. S.r.l.), 24 September 2004 (24.09.2004), abstract; paragraphs [0049] to [0057]; fig. 4 to 5 & US 2002/0186930 A1 & WO 2002/071112 A1 abstract; page 13, line 19 to page 16, line 18; fig. 4 to 5 & EP 1239311 A1 & CN 1503919 A	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
16 February 2016 (16.02.16)

Date of mailing of the international search report
23 February 2016 (23.02.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/051376

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2014/208601 A1 (Fujikura Ltd.), 31 December 2014 (31.12.2014), paragraph [0069]; fig. 15 & JP 5728140 B1	1-10

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02B6/126(2006.01)i, G02B6/125(2006.01)i, G02B6/14(2006.01)i, G02F1/01(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02B6/126, G02B6/125, G02B6/14, G02F1/01

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	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, 2014.05.29, Vol. 22, No. 11, pp. 13565 - 13571	1-10
A	JP 2004-529377 A (コーニング オーティイー エッセエツレエ ッレ) 2004.09.24, 【要約】, 段落【0049】-【0057】, F i g . 4 . - F i g . 5 . & US 2002/0186930 A1 & WO 2002/071112	1-10

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

16.02.2016

国際調査報告の発送日

23.02.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

吉田 英一

電話番号 03-3581-1101 内線 3294

2 X

9124

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	A1, A b s t r a c t, 1 3 頁 1 9 行－1 6 頁 1 8 行, F i g. 4.－F i g. 5. & EP 1239311 A1 & CN 1503919 A WO 2014/208601 A1 (株式会社フジクラ) 2014.12.31, 段落 [0 0 6 9], [図 1 5] & JP 5728140 B1	1-10