

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7477761号
(P7477761)

(45)発行日 令和6年5月2日(2024.5.2)

(24)登録日 令和6年4月23日(2024.4.23)

(51)国際特許分類	F I
G 0 2 B 6/14 (2006.01)	G 0 2 B 6/14
G 0 2 B 6/122(2006.01)	G 0 2 B 6/122 3 1 1
G 0 2 B 6/126(2006.01)	G 0 2 B 6/126

請求項の数 6 (全31頁)

(21)出願番号	特願2020-100352(P2020-100352)	(73)特許権者	309015134 富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22)出願日	令和2年6月9日(2020.6.9)	(74)代理人	100094525 弁理士 土井 健二
(65)公開番号	特開2021-196393(P2021-196393 A)	(74)代理人	100094514 弁理士 林 恒徳
(43)公開日	令和3年12月27日(2021.12.27)	(72)発明者	馬場 威 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社内
審査請求日	令和5年3月1日(2023.3.1)	審査官	堀部 修平

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 モード変換素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板と、前記基板上的クラッドと、前記クラッドにより囲われたコアとを有し、前記コアは前記クラッドより屈折率が高く、第1伝搬光を前記第1伝搬光とはモード次数が異なる第2伝搬光に変換するモード次数変換部と、前記第2伝搬光のモードを維持すると共に前記第2伝搬光を外部に出力するリブチャネル変換部とを含み、

前記モード次数変換部は、前記第1伝搬光が入力される入力側第1リブ部と、前記入力側第1リブ部に沿って延在し且つ前記入力側第1リブ部と反対側に下端から上端まで前記クラッドに接する平面状の側面を有する出力側第1リブ部と、前記入力側第1リブ部と前記出力側第1リブ部の間に配置され前記入力側第1リブ部および前記出力側第1リブ部より薄い第1スラブ部とを有し、

前記リブチャネル変換部は、前記出力側第1リブ部に接する一端と前記第2伝搬光を出力する他端とを有し前記一端から前記他端に向かう方向に沿って延在する出力側第2リブ部と、前記第1スラブ部と前記出力側第2リブ部の側面とに接し前記出力側第2リブ部より薄い第2スラブ部と、前記出力側第2リブ部の別の側面に接し前記出力側第2リブ部より薄い第3スラブ部とを有する

モード変換素子。

【請求項2】

前記第3スラブ部は、前記出力側第2リブ部の両端のうち前記出力側第1リブ部と反対側の一端に向かって幅が増加することを

特徴とする請求項 1 に記載のモード変換素子。

【請求項 3】

前記出力側第 2 リブ部は、前記出力側第 1 リブ部に接する内側領域と前記内側領域に接する外側領域とを有し、

前記第 2 スラブ部および前記第 3 スラブ部は、前記内側領域に接することを

特徴とする請求項 1 または 2 に記載のモード変換素子。

【請求項 4】

前記リブチャネル変換部は更に、前記第 2 スラブ部と前記外側領域の側面とに接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 4 スラブ部と、前記第 3 スラブ部および前記外側領域の別の側面に接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 5 スラブ部とを有し、

前記第 4 スラブ部および前記第 5 スラブ部それぞれの幅は、前記出力側第 2 リブ部の両端のうち前記出力側第 1 リブ部と反対側の一端に向かって減少することを

特徴とする請求項 3 に記載のモード変換素子。

【請求項 5】

前記出力側第 2 リブ部の中央の幅は、前記出力側第 2 リブ部の両端の幅より広いことを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【請求項 6】

前記第 1 伝搬光は、電界方向が前記基板と平行になるように偏光し実効屈折率が基本モードより高い高次 TE 光であり、

前記第 2 伝搬光は、電界方向が前記基板と平行になるように偏光し実効屈折率が前記高次 TE 光より低い低次 TE 光であり、

更に、電界方向が前記基板と直交するように偏光した TM 光が入力され、入力された前記 TM 光を前記高次 TE 光に変換する偏波回転部を有することを

特徴とする請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、モード変換素子に関する。

【背景技術】

【0002】

非対称方向性結合器を用いて、TE₁モードの伝搬光（以下、TE₁光と呼ぶ）をTE₀モードの伝搬光（以下、TE₀光と呼ぶ）に変換するモード変換素子が提案されている（例えば、特許文献 1 ~ 4、非特許文献 1 ~ 2 参照）。このモード変換素子と上下非対称なテーパ導波路とにより、TM₀モードの伝搬光（以下、TM₀光と呼ぶ）をTE₀光に変換する偏波回転素子が提案されている（例えば、特許文献 1 ~ 4、非特許文献 1 ~ 2 参照）。

【0003】

非対称方向性結合器のTE₁光からTE₀光への変換効率は、屈折率がクラッドより高い薄層（以下、スラブ層と呼ぶ）を非対称方向性結合器の光導波路の間に設けることで改善できる（例えば、特許文献 1 ~ 4 参照）。

【0004】

なお、導波路間に先端がV字型のスラブ層を設けることで、矩形導波路に入力される伝搬光の反射損失を抑制する技術が提案されている（特許文献 2 ~ 5 参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】特開 2015 - 90449 号公報

【文献】特開 2015 - 197664 号公報

【文献】米国特許第 9,851,504 号明細書

【文献】国際公開第 2014 / 208601 号

【文献】特開平 3 - 171119 号公報

10

20

30

40

50

【非特許文献】

【0006】

【文献】Daoxin Dai and John E. Bowers, "Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires," Optics Express, Vol. 19, No. 11, pp. 10940 (2011)

【文献】Daoxin Dai, Yongbo Tang, and John E Bowers, "Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides," Optics Express, Vol. 20, No. 12, pp. 13425-13439 (2012)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0007】

しかし、非対称方向性結合器の導波路の間にスラブ層を設けると、チャンネル導波路（例えば、矩形導波路）に TE_0 光を出力する際に反射損失が発生する。そこで、本発明は、このような問題を解決することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記の問題を解決するために、モード変換素子は、基板と前記基板上のクラッドと前記クラッドにより囲われたコアとを有し、前記コアは前記クラッドより屈折率が高く、第1伝搬光を前記第1伝搬光とはモード次数が異なる第2伝搬光に変換するモード次数変換部と、前記第2伝搬光を外部に出力するリブチャンネル変換部とを含み、前記モード次数変換部は、前記第1伝搬光が入力される入力側第1リブ部と、前記入力側第1リブ部に沿って延在し前記入力側第1リブ部と反対側の側面が下端から上端に亘って前記クラッドに覆われた出力側第1リブ部と、前記入力側第1リブ部と前記出力側第1リブ部の間に配置され前記入力側第1リブ部および前記出力側第1リブ部より薄い第1スラブ部とを有し、前記リブチャンネル変換部は、前記出力側第1リブ部に接し前記第2伝搬光を出力する出力側第2リブ部と、前記第1スラブ部と前記出力側第2リブ部の側面とに接し前記出力側第2リブ部より薄い第2スラブ部と、前記出力側第2リブ部の別の側面に接し前記出力側第2リブ部より薄い第3スラブ部とを有する。

20

【発明の効果】

【0009】

30

一つの側面では、本発明によれば、高次モードの伝搬光（例えば、 TE_1 光）を低次モードの伝搬光（例えば、 TE_0 光）に変換する非対称方向性結合器等を含むモード変換素子とチャンネル導波路の境界における反射損失を抑制することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】図1は、実施の形態1のモード変換素子2の一例を示す平面図である。

【図2】図2は、図1のII-II線に沿った断面図である。

【図3】図3は、図1のIII-III線に沿った断面図である。

【図4】図4は、図1のIV-IV線に沿った断面図である。

【図5】図5は、モード変換素子2の機能を説明する平面図である。

40

【図6】図6は、リブチャンネル変換部10の平面図である。

【図7】図7は、テーパ部14を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。

【図8】図8は、図1のテーパ部14から第6～7スラブ部24f, 24gを取り除いた光導波路を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。

【図9】図9は、対称テーパ導波路114の横断面を示す図である。

【図10】図10は、非対称方向性結合器42の一例を示す平面図である。

【図11】図11は、図10のXI-XI線に沿った断面図である。

【図12】図12は、矩形導波路を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。

【図13】図13は、リブチャンネル変換部10（図5参照）における TE_0 光7の電界分

50

布の推移を示す図である。

【図 1 4】図 1 4 は、片側リブを用いたリブチャネル変換部 1 1 0 の一例を示す平面図である。

【図 1 5】図 1 5 は、スラブ先端部 1 2 4 e の右側部分 R と出力側第 2 リブ部 2 0 b が形成する片側リブ 2 1 を通過中の T E₀ 光 7 の電界分布 1 4 8 V を示す図である。

【図 1 6】図 1 6 は、リブチャネル変換部 1 0 の出力側第 2 リブ部 2 0 b の先端部分を伝搬する T E₀ 光 7 の電界分布 4 8 V を示す図である。

【図 1 7】図 1 7 は、モード変換素子 2 の水平方向のサイズの一例を示すための図である。

【図 1 8】図 1 8 は、モード変換素子 2 を適用したデジタルコヒーレント受信機 6 6 の一例を示すブロック図である。

10

【図 1 9】図 1 9 は変形例 1 のモード変換素子 M 1 の一例を示す平面図である。

【図 2 0】図 2 0 は変形例 3 のモード変換素子 M 3 の一例を示す平面図である。

【図 2 1】図 2 1 は変形例 4 のモード変換素子 M 4 の一例を示す平面図である。

【図 2 2】図 2 2 は、変形例 4 のモード次数変換部 1 0 8 の動作の一例を説明する図である。

【図 2 3】図 2 3 は変形例 5 のモード変換素子 M 5 の一例を示す平面図である。

【図 2 4】図 2 4 は、実施の形態 2 のモード変換素子 2 0 2 の一例を示す平面図である。

【図 2 5】図 2 5 は、実施の形態 2 のモード変換素子 2 0 2 の動作の一例を説明する図である。

【図 2 6】図 2 6 は、実施の形態 2 の変形例のモード変換素子 M 2 0 2 の一例を示す平面図である。

20

【図 2 7】図 2 7 は、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 の一例を示す平面図である。

【図 2 8】図 2 8 は、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 の動作の一例を説明する図である。

【図 2 9】図 2 9 は、モード変換素子 3 0 2 を用いたモード多重送信機 3 6 6 の一例を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0 0 1 1】

以下、図面にしたがって本発明の実施の形態について説明する。但し、本発明の技術的範囲はこれらの実施の形態に限定されず、特許請求の範囲に記載された事項とその均等物まで及ぶものである。図面が異なっても同じ構造を有する部分等には同一の符号を付し、その説明を省略する。

30

【0 0 1 2】

(実施の形態 1)

(1) 構造

図 1 は、実施の形態 1 のモード変換素子 2 の一例を示す平面図である。

図 2 は、図 1 の II-II 線に沿った断面図である。図 3 は、図 1 の III-III 線に沿った断面図である。図 4 は、図 1 の IV-IV 線に沿った断面図である。

【0 0 1 3】

図 2 ~ 4 に示すようにモード変換素子 2 は、基板 1 1 と、基板 1 1 上のクラッド 6 と、横断面がクラッド 6 により囲われたコア 4 とを有する。コア 4 の屈折率は、クラッド 6 の屈折率より高い。クラッド 6 は例えば、基板 1 1 上の下部クラッド 6 l および下部クラッド 6 l 上の上部クラッド 6 u を有する。基板 1 1 は例えば、S i 基板である。下部クラッド 6 l および上部クラッド 6 u は例えば、S i O₂ 層である。

40

【0 0 1 4】

図 1 に示すようにコア 4 (図 1 では実線で区画された領域) は、モード次数変換部 8、リブチャネル変換部 1 0、および偏波回転部 1 2 を有する。図 5 は、モード変換素子 2 の機能を説明する平面図である。偏波回転部 1 2 は、T M₀ モードの伝搬光 3 (すなわち、T M₀ 光) が入力され、入力された T M₀ 光を T E₁ モードの伝搬光 5 (すなわち、T E₁ 光) に変換して、モード次数変換部 8 に入力する。伝搬光とは、光導波路を伝搬する光の

50

ことである。モード次数変換部 8 は入力された TE_1 光 5 を TE_0 モードの伝搬光 7 (TE_0 光) に変換して、伝搬光 7 をリブチャネル変換部 10 に入力する。

【0015】

リブチャネル変換部 10 は、入力された TE_0 光 7 をチャネル導波路 9 に出力する。この際リブチャネル変換部 10 は、 TE_0 光 7 の電界分布をチャネル導波路 9 の TE_0 モードの電界分布に整合するように修正する。チャネル導波路 9 は、モード変換素子 2 と他の光素子を接続する矩形導波路である。

【0016】

モード次数変換部 8 (図 1 参照)

モード次数変換部 8 は、 TE_1 光 5 (図 5 参照) が入力される入力側第 1 リブ部 18 a (図 1 参照)、入力側第 1 リブ部 18 a に沿って延在する出力側第 1 リブ部 20 a、および入力側第 1 リブ部 18 a と出力側第 1 リブ部 20 a との間に配置された第 1 スラブ部 24 a を有する。

10

【0017】

出力側第 1 リブ部 20 a の側面のうち入力側第 1 リブ部 18 a とは反対側の側面は、下端 LE_1 (図 2 参照) から上端 UE_1 に亘ってクラッド 6 に覆われている。同様に、入力側第 1 リブ部 18 a の側面のうち出力側第 1 リブ部 20 a とは反対側の側面は、下端 LE_2 (図 2 参照) から上端 UE_2 に亘ってクラッド 6 に覆われている。第 1 スラブ部 24 a は、入力側第 1 リブ部 18 a および出力側第 1 リブ部 20 a より薄い層である。

【0018】

モード次数変換部 8 は、入力側第 1 リブ部 18 a の幅が出力側第 1 リブ部 20 a の幅より広い非対称方向性結合器である。

20

【0019】

リブチャネル変換部 10 (図 1 参照)

リブチャネル変換部 10 は、出力側第 1 リブ部 20 a に接する出力側第 2 リブ部 20 b、および出力側第 2 リブ部 20 b に沿って延在し入力側第 1 リブ部 18 a に接する入力側第 2 リブ部 18 b を有する。出力側第 2 リブ部 20 b は例えば、コアの横断面が矩形のチャネル導波路 9 (図 5 参照) に接続される。この場合、出力側第 2 リブ部 20 b は、チャネル導波路 9 に TE_0 光 7 を出力する。出力側第 2 リブ部 20 b の両端のうちチャネル導波路 9 に接する一端の幅は好ましくは、チャネル導波路 9 のコアの幅と同じである。

30

【0020】

図 6 は、リブチャネル変換部 10 の平面図である。図 6 に示すように、入力側第 2 リブ部 18 b と出力側第 2 リブ部 20 b の間隔 G は、モード次数変換部 8 に接する接続領域 36 では、出力側第 2 リブ部 20 b の両端のうち出力側第 1 リブ部 20 a と反対側の一端 32 に向かって増加する。すなわち、接続領域 36 の両端の間隔 G_1 、 G_2 のうち出力側第 2 リブ部 20 b の先端 (すなわち、一端 32) 側の間隔 G_2 は、出力側第 1 リブ部 20 a 側の間隔 G_1 より広い。接続領域 36 は、リブチャネル変換部 10 の領域である。

【0021】

出力側第 2 リブ部 20 b (図 1 参照) は、出力側第 1 リブ部 20 a に接する内側領域 20_{in} および内側領域 20_{in} に接する外側領域 20_{out} を有する。リブチャネル変換部 10 は更に、第 1 スラブ部 24 a と (出力側第 2 リブ部 20 b の) 内側領域 20_{in} の側面と入力側第 2 リブ部 18 b の側面とに接する第 2 スラブ部 24 b、および内側領域 20_{in} の別の側面に接する第 3 スラブ部 24 c を有する。

40

【0022】

リブチャネル変換部 10 は更に、第 2 スラブ部 24 b と (出力側第 2 リブ部 20 b の) 外側領域 20_{out} の側面とに接する第 4 スラブ部 24 d、および第 3 スラブ部 24 c と外側領域 20_{out} の別の側面とに接する第 5 スラブ部 24 e を有する。第 2 スラブ部 24 b ~ 第 5 スラブ部 24 e は、入力側第 2 リブ部 18 b および出力側第 2 リブ部 20 b より薄い部材である。

【0023】

50

第3スラブ部24c(図6参照)の幅は、出力側第2リブ部20bの先端32に向かって幅が増加する。一方、第4スラブ部24dおよび第5スラブ部24eそれぞれの幅は、出力側第2リブ部20bの先端32に向かって減少する。

【0024】

図1等に示す例では第3スラブ部24cは、出力側第2リブ部20bの先端32に向かって幅が増加するテーパ領域30と幅が一定の矩形領域31とを有する。しかし第3スラブ部24cは、矩形領域31を有さなくても良い。

【0025】

偏波回転部12(図1参照)

偏波回転部12(図1参照)は、テーパ部14および接続部16を有する。テーパ部14は、モード次数変換部8に向かって幅が広がる入力側第3リブ部18c、入力側第3リブ部18cの側面の一方に接する第6スラブ部24f、および入力側第3リブ部18cの側面の他方に接する第7スラブ部24gを有する。

10

【0026】

入力側第3リブ部18cは、側面がなす角度(すなわち、テーパ角度)が異なる複数の領域を有する。図1に示す例では、入力側第3リブ部18cは、接続部16側に配置されたテーパ角度が大きい領域、および接続部16と反対側に配置されたテーパ角度が小さい領域を有する。

【0027】

接続部16は、一端が入力側第3リブ部18cに接し他端が入力側第1リブ部18aに接する入力側第4リブ部18dを有する。入力側第4リブ部18dの幅は、入力側第3リブ部18cの右端の幅W2から入力側第1リブ部18aの幅W3まで徐々に変化する。なお「右端」とは、入力側第3リブ部18c等の図1等における右側の端である(後述する「左端」等についても、同様)。

20

【0028】

接続部16は更に、入力側第4リブ部18dの側面のうち出力側第1リブ部20a側の側面に接する第8スラブ部24hを有する。第6~第8スラブ部24f~24hは、入力側第3および第4リブ部18c, 18dより薄い部材である。

【0029】

図1に示す例では、入力側第3リブ部18cの右端の幅W2と入力側第1リブ部18aの幅W3は異なっている。しかし、入力側第3リブ部18cの右端の幅W2と入力側第1リブ部18aの幅W3は同じであっても良い。この場合には、偏波回転部12は接続部16を有さなくても良い。

30

【0030】

図1に示す例では、テーパ部14はテーパ角度が互いに異なる複数の領域を有している。テーパ角度が互いに異なる複数の領域を有することで、偏波回転の効率が高くなる。しかし、テーパ部14のテーパ角度は一定であっても良い。

【0031】

入力側第1~第4リブ部18a~18dおよび出力側第1~第2リブ部20a~20bそれぞれの厚さは、好ましくは互いに同じである。第1スラブ部24a~第8スラブ部24hそれぞれの厚さも、好ましくは互いに同じである。

40

【0032】

後述するようにコア4は極めて薄いので、コア4の伝搬光(TM₀光、TE₁光、TE₀光等)の電界分布のピーク数は、基板11に垂直な軸(例えば、図3等のy軸)上では一つである。

【0033】

(2)動作

(2-1)偏波回転部12の動作

図7は、テーパ部14を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。縦軸は実効屈折率である。実効屈折率は、例えば有限要素法により算出される。横軸は、テー

50

パ部 1 4 の長手方向に沿った座標 z である。

【 0 0 3 4 】

座標 z の座標軸は、偏波回転部 1 2 (図 5 参照) の中心を貫く軸である。しかし図 5 では、図面が煩雑にならないように、座標 z の座標軸はテーパ部 1 4 の外部に図示されている。座標 z の原点は、伝搬光 (例えば、 TM_0 光 3) が入射する端面 3 8 上の点である。

L_{tp} (図 5 参照) は、テーパ部 1 4 の長さである。

【 0 0 3 5 】

図 7 の第 1 曲線 4 0 a は、実効屈折率が最も高い固有モードの実効屈折率を示している。第 2 曲線 4 0 b は、実効屈折率が 2 番目に高い固有モードの実効屈折率を示している。第 3 曲線 4 0 c は、実効屈折率が 3 番目に高い固有モードの実効屈折率を示している。図 7 には、第 3 リブ部 1 8 c のテーパ角度が一定の場合が示されている。図 8 についても同様である。

10

【 0 0 3 6 】

ところで、基板に垂直な方向のみで光を閉じ込める 2 次元光導波路 (すなわち、スラブ導波路) の固有モードは、 TE (Transverse Electric mode) モードまたは TM (Transverse Magnetic mode) モードである。 TE モードは光の伝搬方向の電界成分 E_z が零の固有モードあり、スラブ導波路の TE モードは H_z 、 H_y 、 E_x 以外の電磁界成分が零の固有モードである。 H_z は、光の伝搬方向 (例えば、図 5 の z 軸方向) の磁界成分である。 H_y は、基板 1 1 に垂直な方向 (例えば、図 4 の y 軸方向) の磁界成分である。 E_x は、基板に垂直な方向 (例えば、図 4 の y 軸方向) および光の伝搬方向 (例えば、図 5 の z 軸方向) に垂直な方向 (例えば、図 4 の x 軸方向) の電界成分である。

20

【 0 0 3 7 】

TM モードは H_z が零の伝搬光であり、スラブ導波路の TM モードは、 E_z 、 E_y 、 H_x 以外の電磁界成分が零の固有モードである。 E_z は、光の伝搬方向 (例えば、図 5 の z 軸方向) の電界成分である。 E_y は、基板 1 1 に垂直な方向 (例えば、図 4 の y 軸方向) の電界成分である。 H_x は、基板に垂直な方向 (例えば、図 4 の y 軸方向) および光の伝搬方向 (例えば、図 5 の z 軸方向) に垂直な方向 (例えば、図 4 の x 軸方向) の磁界成分である。

【 0 0 3 8 】

一方、光の伝搬方向に垂直な 2 方向 (例えば、図 4 の x 軸方向および y 軸方向) で光を閉じ込める 3 次元導波路 (例えば、矩形導波路) の固有モードは、 E_z および H_z のいずれも零とならない電磁界である。

30

【 0 0 3 9 】

3 次元光導波路の主な固有モードは、 TE -like モードおよび TM -like モードである。 TE -like モードは、 E_z および E_y が E_x に比べ十分に小さい固有モードである (すなわち、 $E_z, E_y \ll E_x$)。すなわち TE -like モードは、電界方向が基板と平行になるように偏光した固有モードである。 TE -like モードは、スラブ導波路の TE モードで近似できる。以下の説明では慣習に従って、 TE -like モードは TE モードと呼ばれる。

【 0 0 4 0 】

一方、 TM -like モードは、 E_z および E_x は E_y に比べ十分に小さい固有モードである (すなわち、 $E_z, E_x \ll E_y$)。すなわち TM -like モードは、電界の方向が基板と直交するように偏光した固有モードである。 TM -like モードは、スラブ導波路の TM モードで近似できる。以下の説明では慣習に従って、 TM -like モードは TM モードと呼ばれる。

40

【 0 0 4 1 】

3 次元光導波路の TE モードのうち実効屈折率が一番高い TE モード (すなわち、基本モード) は TE_0 モードと呼ばれ、実効屈折率が 2 番目に高い TE モードは TE_1 モードと呼ばれる。同様に、3 次元光導波路の TM モードのうち実効屈折率が一番目に高い TM モード (すなわち、基本モード) は TM_0 モードと呼ばれ、実効屈折率が 2 番目に高い T

50

Mモードは TM_1 モードと呼ばれる。

【0042】

図8は、図1のテーパ部14から第6～7スラブ部24f, 24gを取り除いた光導波路（以下、対称テーパ導波路と呼ぶ）を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。縦軸は実効屈折率である。横軸は、テーパ部14の長手方向に沿った座標zである。座標zの原点は、伝搬光が入射する端面38（図5参照）上の点である。

【0043】

図9は、対称テーパ導波路114の横断面を示す図である。図9に示されているように、対称テーパ部114は上下対称な光導波路である。このような3次元導波路の固有モードは、TEモードまたはTMモードである。

10

【0044】

第4曲線40d（図8参照）は、 TE_0 モードの実効屈折率を示している。第5曲線40eは、 TE_1 モードの実効屈折率を示している。第6曲線40fは、 TM_0 モードの実効屈折率を示している。実効屈折率 n_{eff} の座標zに対する変化率（ $= n_{eff} / z$ ）は、 TE_1 モードと TM_0 モードでは大きく異なっている（図8参照）。このため、 TE_1 モードの実効屈折率40eと TM_0 モードの実効屈折率40fは交差する。

【0045】

座標zは、対称テーパ導波路114のコア幅wに対応している。座標zが小さくコア幅wが狭い領域（例えば、 $z = 0$ の近傍）では、 TE_1 モードの実効屈折率40eは TM_0 モードの実効屈折率40fより小さい。しかし座標zが大きくなりコア幅が広い領域（例えば、 $z = L_{tp}$ の近傍）では、 TE_1 モードの実効屈折率40eは TM_0 モードの実効屈折率40fより大きい。従って図8に示すように、 TE_1 モードの実効屈折率40eと TM_0 モードの実効屈折率40fはある位置44で交差する。

20

【0046】

この位置44で対称テーパ部114の TE_1 モードと TM_0 モードは混じり合わずに、縮退する（すなわち、それぞれの実効屈折率が互いに一致する）。

【0047】

実施の形態1のテーパ部14は、スラブ部24g, 24fを有するので上下非対称である。上下非対称な3次元光導波路の固有モードは、コア幅が狭い領域ではTEモードまたはTMモードである。しかしコア幅がある程度広く実効屈折率が他の固有モードの実効屈折率と略同じ領域（例えば、図7の領域46）では、上下非対称な3次元光導波路の固有モードは、TEモードとTMモードとが混じり合ったハイブリッドモードである。コア幅が更に広い領域では、上下非対称な3次元光導波路の固有モードは再びTEモードまたはTMモードになる。但し、TEモードとTMモードとが入れ替わる（例えば、非特許文献2参照）。

30

【0048】

図7に示す例では曲線40aが示す固有モードは、 TE_0 モードである。曲線40bが示す固有モードは、座標zが領域46より小さい領域（すなわち、コア幅が狭い領域）では TM_0 モードであり、座標zが領域46より大きい領域（すなわち、コア幅が広い領域）では TE_1 モードである。曲線40cが示す固有モードは、座標zが領域46より小さい領域では TE_1 であり、座標zが領域46より大きい領域では TM_0 モードである。従って、例えばチャネル導波路19から端面38（図5参照）を介して入力された TM_0 光3は、テーパ部14により TE_1 光5に変換される。

40

【0049】

接続部16は TE_1 光5を、モード次数変換部8の入力側第1リブ部18aとビームサイズが一致するように修正して、入力側第1リブ部18aに入力する。

【0050】

（2-2）モード次数変換部8の動作

モード次数変換部8は、入力側第1リブ部18aに入力された TE_1 光5（図5参照）を TE_0 光7に変換して、出力側第1リブ部20aからリブチャネル変換部10の出力側

50

第2リブ部20bに入力する。

【0051】

図10は、非対称方向性結合器42の一例を示す平面図である。図11は、図10のXI-XI線に沿った断面図である。非対称方向性結合器42は、第1コア44a、第1コア44aより幅が狭い第2コア44b、および第1～第2コア44a、44bを囲むクラッド6を有する。図10の非対称方向性結合器42は、図1のモード次数変換部8とは、第1スラブ部24aを有さない点で異なる。

【0052】

図12は、矩形導波路を伝搬する固有モードの実効屈折率の一例を示す図である。縦軸は実効屈折率 n_{eff} である。横軸は、矩形導波路のコア幅 W である。矩形導波路は、コアの横断面が矩形の光導波路である。第7曲線40gは、 TE_0 モードの実効屈折率を示している。第8曲線40hは、 TE_1 モードの実効屈折率を示している。

10

【0053】

非対称方向性結合器42(図11参照)の第1～第2コア44a、44bの厚さは、図12に実効屈折率 n_{eff} が示された矩形導波路の厚さと同じとする。更に第1～第2コア44a、44bの屈折率は、図12に実効屈折率 n_{eff} が示された矩形導波路のコアの屈折率と同じとする。クラッド6の屈折率についても同様である。

【0054】

図12から明らかのように、あるコア幅 W_x における矩形導波路の TE_0 モードの実効屈折率 N_{eff} は、 W_x より広いコア幅 W_y における矩形導波路の TE_1 モードの実効屈折率と同じである。従って、非対称方向性結合器42(図10参照)の第2コア44bのコア幅が W_x であって第1コア44aのコア幅が W_y の場合、第2コア44bの TE_0 モードと第1コア44aの TE_1 モードとが位相整合する。この様な非対称方向性結合器42の第1コア44aに TE_1 光5が入力されると、第2コア44bから TE_0 光7が出力される。

20

【0055】

TE_0 モード5と TE_1 モード7とが位相整合し第1～第2コア44a、44bの長さが結合長と同じであれば理想的には、第2コア44bから出力される TE_0 光7の光強度(すなわち、光パワー)は第1コア44aに入力される TE_1 光5の光強度と同じになる。すなわち、非対称方向性結合器の結合効率(一方の光導波路から他方の光導波路に移行するパワーの割合)は理想的には、第1～第2コア44a、44bそれぞれの幅が互いに等しい方向性結合器(すなわち、対称方向性結合器)と同じである。

30

【0056】

しかし非対称方向性結合器42では、 TE_1 光5の波長が最適値からずれると、 TE_1 光5と TE_0 光7の結合効率が低下する。その結果、 TE_0 光7が TE_1 光5より弱くなる。

【0057】

TE_1 光5の波長を最適値に一致させることは容易ではない。更に TE_1 光5が波長多重されている場合には、複数の TE_1 光5の波長を最適値に一致させることは困難である。従って、非対称方向性結合器42によるモード変換では殆どの場合、光損失(以下、変換損失と呼ぶ)が発生する。この問題は第1コア44aと第2コア44bとの間に、スラブ層(例えば、図1の第1スラブ部24a参照)を設けることで抑制できる(例えば、特許文献1参照)。

40

【0058】

第1コア44aと第2コア44bの間にスラブ層を設けると、第1コア44aと第2コア44bの間へ TE_1 光5および TE_0 光7が大きく浸み出す。すると TE_1 光5の電界分布と TE_0 光7の電界分布の重なりが増加し、非対称方向性結合器の結合係数が増加する。すると、 TE_1 光5と TE_0 光7の結合効率が波長ずれに影響され難くなる。その結果、 TE_0 光7が強くなる(例えば、特許文献1参照)。

【0059】

50

実施の形態 1 のモード次数変換部 8 の入力側第 1 リブ部 1 8 a と出力側第 1 リブ部 2 0 a の間には第 1 スラブ部 2 4 a が配置されるので、実施の形態 1 によれば変換損失を抑制しつつ、 TE_1 光 5 を TE_0 光 7 に変換することができる。

【 0 0 6 0 】

(2 - 3) リブチャネル変換部 1 0 の動作

図 1 3 は、リブチャネル変換部 1 0 (図 5 参照) における TE_0 光 7 の電界分布の推移を示す図である。図 1 3 には、x 軸方向 (図 3 参照) に沿った TE_0 光の電界分布 4 8 I ~ 4 8 IV が示されている。

【 0 0 6 1 】

モード次数変換部 8 では、出力側第 1 リブ部 2 0 a の両側面の一方のみにスラブ層 (すなわち、第 1 スラブ部 2 4 a) が接続されている。このため、モード次数変換部 8 から入力される TE_0 光 7 の電界分布 4 8 I (図 1 3 参照) は、左右非対称である。リブチャネル変換部 1 0 は、この左右非対称な電界分布を対称な電界分布に修正して出力側第 2 リブ部 2 0 b から出力する。

【 0 0 6 2 】

TE_0 光 7 は先ず、モード次数変換部 8 に接する接続領域 3 6 の出力側第 2 リブ部 2 0 b を伝搬する。この接続領域 3 6 では、入力側第 2 リブ部 1 8 b と出力側第 2 リブ部 2 0 b の間隔 G (図 6 参照) は、モード次数変換部 8 から遠ざかるに従い徐々に広がる。このため、入力側第 2 リブ部 1 8 b と出力側第 2 リブ部 2 0 b の結合係数が徐々に減少し、接続領域 3 6 の終端 5 0 では無視できるまで小さくなる。従って、出力側第 2 リブ部 2 0 b を伝搬する TE_0 光 7 が、入力側第 2 リブ部 1 8 b の伝搬光に逆戻りすることはない。

【 0 0 6 3 】

接続領域 3 6 では、出力側第 2 リブ部 2 0 b の両側面の一方のみにスラブ層 (すなわち、第 2 スラブ部 2 4 b) が接続されている。従って、接続領域 3 6 の終端 5 0 における TE_0 光 7 の電界分布 4 8 II は左右非対称のままである。

【 0 0 6 4 】

接続領域 3 6 に続く領域 (内側領域 20_{in} のうち接続領域 3 6 に含まれない部分) では、出力側第 2 リブ部 2 0 b の両側面にスラブ層 (すなわち、第 2 スラブ部 2 4 b および第 3 スラブ部 2 4 c) が接続されている。このため TE_0 光 7 の電界分布は、左右対称な電界分布 4 8 III に修正される。

【 0 0 6 5 】

出力側第 2 リブ部 2 0 b の内側領域 20_{in} の終端 5 2 における TE_0 光 7 の電界分布 4 8 III は左右非対称ではあるが、スラブ層 (すなわち、第 2 ~ 第 3 スラブ部 2 4 b , 2 4 c) へ大きく浸み出している。従って電界分布 4 8 III は、チャンネル導波路 9 (すなわち、矩形導波路) における電界分布 4 8 IV とは大きく異なっている。

【 0 0 6 6 】

出力側第 2 リブ部 2 0 b の外側領域 20_{out} の両側面には、徐々に幅が狭まるスラブ層 (すなわち、第 4 ~ 第 5 スラブ部 2 4 d , 2 4 e) が接続されている。従って外側領域 20_{out} では、 TE_0 光 7 の電界分布はチャンネル導波路 9 に向かって徐々に狭まり、出力側第 2 リブ部 2 0 b に集中する。最終的には、外側領域 20_{out} の終端 5 4 の電界分布 4 8 IV は、チャンネル導波路 9 の TE_0 モードの電界分布と略一致する。従って、 TE_0 光 7 はモード変換素子 2 とチャンネル導波路の境界 (すなわち、終端 5 4) では殆ど反射されずに、チャンネル導波路 9 にそのまま入射する。

【 0 0 6 7 】

リブチャネル変換部 1 0 を介さずに直接、出力側第 1 リブ部 2 0 a にチャンネル導波路 9 を接続すると、電界分布の不整合 (電界分布 4 8 I および電界分布 4 8 IV 参照) により TE_0 光 7 が反射され反射損失が発生する。しかし実施の形態 1 のモード変換素子 2 は、リブチャネル変換部 1 0 を有するので、 TE_0 光 7 は殆ど反射されない。すなわち実施の形態 1 によれば、モード変換素子 2 から TE_0 光 7 が出力される際の反射損失が抑制される。なお図 1 3 等 に示された例では、第 3 スラブ部 2 4 c は接続領域 3 6 の外側に配置されて

10

20

30

40

50

いるが、第3スラブ部24cの先端は接続領域36の内部まで伸びていても良い。

【0068】

ところで、モード次数変換部8に入力されるTE₁光5のうちTE₀光7に変換されない部分(以下、非変換部分と呼ぶ)は、入力側第2リブ部18bに入力される。図1に示すように入力側第2リブ部18bの先端部37は、非変換部分のビーム径を拡大するため狭窄化されている。先端部37における非変換部分のビーム径が拡大すると、先端部37の実効屈折率とクラッド6の屈折率の差が縮小する。すると先端部37における非変換部分の反射率が低下し、非変換部分は殆ど反射されずにそのままクラッド6に排出される。

【0069】

(3)片側リブを用いたリブチャンネル変換部

10

出力側第2リブ部20b(図13参照)と第2~第3スラブ部24b, 24cは、スラブ層がスラブ層より厚いリブ部の両側面に接続された両側リブを形成している。この両側リブにより、入力側第2リブ部18b側に偏った電界分布48IIの重心が出力側第2リブ部20b側に移動し、左右対称な電界分布48IIIが形成される。

【0070】

しかし左右対称な電界分布の形成は、片側リブによっても可能である。図14は、片側リブを用いたリブチャンネル変換部110の一例を示す平面図である。

【0071】

図14のリブチャンネル変換部110は、入力側第2リブ部118b、出力側第2リブ部20b、およびV字型の先端部分124e(以下、スラブ先端部と呼ぶ)を備えたスラブ層124を有する。

20

【0072】

図14に示すように、出力側第2リブ部20bとスラブ層124とは、スラブ層がリブ部の片側面のみに接続された片側リブを形成している。スラブ先端部124eに達する前のTE₀光7の電界分布148I, 148II, 148IIIは、片側リブを伝搬するので左右非対称である。

【0073】

図14に示すように、スラブ先端部124eの右側部分Rの幅は、出力側第2リブ部20bの先端に向かって徐々に狭くなる。このため、TE₀光7のスラブ層124への浸み出しは徐々に縮小し、最終的にはTE₀光7の電界分布は左右対称になる(電界分布148IV参照)。しかし、片側リブを用いたリブチャンネル変換部110には、TE₀光7の散乱損失が大きいという問題がある。

30

【0074】

図15は、スラブ先端部124eの右側部分Rと出力側第2リブ部20bが形成する片側リブ21を通過中のTE₀光7の電界分布148Vを示す図である。図15に示すように、片側リブ21を通過するTE₀光7の電界分布148Vは、スラブ先端部124eに浸み出している。このため、スラブ先端部124eの側面(特に、右側部分Rの側面)における電界強度56は十分に減衰していない。

【0075】

このため、スラブ先端部124eの側壁荒れによってTE₀光7が散乱され、TE₀光7に大きな散乱損失が発生する。「側壁荒れ」とは、ドライエッチングによりSi層等の側面に発生する不均一な凹凸のことである。

40

【0076】

一方このような問題は、図1等を参照して説明した実施の形態1のリブチャンネル変換部10には生じない。図16は、リブチャンネル変換部10の出力側第2リブ部20bの先端部分(すなわち、外側領域20_{out})を伝搬するTE₀光7の電界分布48Vを示す図である。

【0077】

図16に示すように電界分布48Vは左右対称であり、第4~第5スラブ部24d, 24eそれぞれの側面における電界強度58, 60は十分に減衰している。このため、第4~

50

第5スラブ部24d, 24eの側壁荒れによるTE₀光の散乱は限定的であり、出力側第2リブ部20bを伝搬するTE₀光7に散乱損失は殆ど発生しない。

【0078】

なお、内側領域20_{in}におけるTE₀光7は第2スラブ部24bに大量に浸み出し、第3スラブ部24cにはあまり浸み出さない(図13の電界分布48II参照)。従って、第3スラブ部24cの側壁荒れによるTE₀光7の散乱損失は限定的である。

【0079】

(4) 製造方法および寸法

モード変換素子2は例えば、SOI(Silicon on Insulator)ウエハから形成される。まず、埋め込み酸化膜(Buried Oxide)上のSi層の表面にフォトリソグラフィ技術により、平面視においてコア4と略同形・同サイズのフォトレジスト膜を形成する。次に、フォトレジスト膜により覆われていない領域のSi層をドライエッチングにより除去しその後、フォトレジスト膜を除去する。

10

【0080】

フォトレジスト膜の除去により露出したSi層の上に再度、入力側第1~第4リブ部18a~18dおよび出力側第1~第2リブ部20a, 20bと平面視において略同形・同サイズのフォトレジスト膜を再度フォトリソグラフィ技術により形成する。

【0081】

次に、再形成されたフォトレジスト膜により覆われていない領域のSi層の上層部を、ドライエッチングにより除去する。このドライエッチングにより、第1~第8スラブ部24a~24hが形成される。更にフォトレジスト膜で覆われた領域には、入力側第1~第4リブ部18a~18dおよび出力側第1~第2リブ部20a, 20bが形成される。ここまでの工程により、コア4が形成される。

20

【0082】

その後、埋め込み酸化膜(Buried Oxide)およびコア4の上にSiO₂膜を堆積して、上部クラッド6uを形成する。埋め込み酸化膜(例えば、SiO₂膜)は、下部クラッド層6lとして利用される。

【0083】

入力側第1~第4リブ部18a~18dおよび出力側第1~第2リブ部20a~20bの厚さは好ましくは、0.1~0.5μm(例えば、0.22μm)である。第1~第8スラブ部24a~24hの厚さは好ましくは、0.05μm~0.2μm(例えば、0.1μm)である。

30

【0084】

図17は、モード変換素子2の水平方向のサイズの一例を示すための図である。入力側第3リブ部18cの左端の幅W1は好ましくは、0.2μm~0.8μm(例えば、0.4μm)である。入力側第3リブ部18cの長さL1は好ましくは、30μm~120μm(例えば、60μm)である。

【0085】

入力側第3リブ部18cは一定のテーパ角度で、幅W2まで広がる。幅W2は、好ましくは幅0.3μm~1.3μm(例えば、0.65μm)である。入力側第3リブ部18cは上記テーパ角度より大きいテーパ角度で、入力側第4リブ部18dの左端の幅W3まで広がる。幅W3は、好ましくは幅0.8μm~3.2μm(例えば、1.6μm)である。

40

【0086】

入力側第4リブ部18dの幅は、入力側第1リブ部18aの幅W4まで一定のテーパ角度で変化する。幅W4は好ましくは、0.5μm~2.3μm(例えば、1.11μm)である。入力側第4リブ部18dの長さL2は好ましくは、2μm~8μm(例えば、4μm)である。入力側第1リブ部18aの長さL3は好ましくは、4μm~16μm(例えば、8μm)である。

【0087】

50

入力側第2リブ部18bの幅は、一定のテーパ角度で入力側第1リブ部18aの幅W4から幅W5まで減少する。幅W5は好ましくは、 $0.1\ \mu\text{m} \sim 0.6\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.3\ \mu\text{m}$ ）である。幅W5まで減少した入力側第2リブ部18bの幅は、入力側第2リブ部18bの右端まで一定に保たれる。

【0088】

出力側第1リブ部20aの幅W6は好ましくは、 $0.2\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.46\ \mu\text{m}$ ）である。出力側第1リブ部20aの長さL4は好ましくは、 $4\ \mu\text{m} \sim 16\ \mu\text{m}$ （例えば、 $8\ \mu\text{m}$ ）である。

【0089】

出力側第2リブ部20bの幅は好ましくは、一定のテーパ角度で出力側第1リブ部20aの幅W6から一定の幅W7まで僅かに増加する。幅W7は好ましくは、 $0.2\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.48\ \mu\text{m}$ ）である。幅W7まで増加した出力側第2リブ部20bの幅は、出力側第2リブ部20bの右端まで一定に保たれる。幅W7は好ましくは、チャネル導波路9（図5参照）の幅である。接続領域36（図6参照）の長さL5は好ましくは、 $2\ \mu\text{m} \sim 8\ \mu\text{m}$ （例えば、 $4\ \mu\text{m}$ ）である。

10

【0090】

入力側第1リブ部18aと出力側第1リブ部20aの間隔は一定であり、好ましくは、 $0.08\ \mu\text{m} \sim 0.32\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.16\ \mu\text{m}$ ）である。

【0091】

第3スラブ部24cの左端の幅は好ましくは、 $0\ \mu\text{m} \sim 0.1\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.05\ \mu\text{m}$ ）である。第3スラブ部24cの右端の幅W8は、好ましくは、 $0.15\ \mu\text{m} \sim 0.6\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.3\ \mu\text{m}$ ）である。

20

【0092】

第5スラブ部24eの左端の幅は好ましくは、 $0.15\ \mu\text{m} \sim 0.6\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.3\ \mu\text{m}$ ）である。第5スラブ部24eの右端の幅は好ましくは、 $0\ \mu\text{m} \sim 0.1\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.05\ \mu\text{m}$ ）である。第4スラブ部24dの幅は、好ましくは第5スラブ部24eの幅と同じである。

【0093】

（5）応用例

図18は、モード変換素子2を適用したデジタルコヒーレント受信機66の一例を示すブロック図である。デジタルコヒーレント受信機66は例えば、SOI基板上に光素子が集積されたシリコンフォトニクスデバイスの素子間通信（すなわち、インターコネクション）に用いることができる。

30

【0094】

デジタルコヒーレント受信機66は、偏波多重位相変調された信号光67を、方向性結合器72により TM_0 光3と TE_0 光68光とに分波する。デジタルコヒーレント受信機66は更に、半導体レーザ76から出力されるレーザ光77を、光スプリッタ80により第1局発光78aと第2局発光78bに分割する。

【0095】

方向性結合器72により分波された TE_0 光68と第1局発光78aとは第1の 90° 光ハイブリッド74aにより合波されて、位相が互いに 180° 異なる干渉光82に変換される。干渉光82はバランス検出器84により、電気信号86に光電変換される。非図示の集積回路により電気信号86から、 TE_0 光68の変調信号が復調される。

40

【0096】

なお第1の 90° 光ハイブリッド74aからは、位相が互いに 180° 異なる干渉光82が2組出力されるが、図面を簡単にするため図18には1組だけ示されている。第2の 90° 光ハイブリッド74bから出力される干渉光についても同様である。

【0097】

方向性結合器72により分波された TM_0 光3は、モード変換素子2により TE_0 光7に変換される。 TE_0 光7と第2局発光78bとは第2の 90° 光ハイブリッド74bに

50

より合波されて、位相が 180° 異なる干渉光 182 に変換される。干渉光 182 はバランス検出器 184 により、電気信号 186 に光電変換される。非図示の集積回路により電気信号 186 から、 TM_0 光 3 の変調信号が復調される。デジタルコヒーレント受信機 66 は以上の処理により、偏波多重位相変調された信号光 67 を復調する。

【0098】

モード変換素子 2 は方向性結合器 72 等と一緒に SOI 基板上に集積化可能なので、実施の形態 1 のモード変換素子 2 によれば、シリコンフォトニクスデバイス間の素子間通信のためのデジタルコヒーレント受信機 66 を実現できる。

【0099】

(6) 変形例

(6-1) 変形例 1

図 19 は変形例 1 のモード変換素子 M1 の一例を示す平面図である。モード変換素子 M1 の構造は、第 4 ~ 第 5 スラブ部 24d, 24e を有さないこと以外は図 1 を参照して説明したモード変換素子 2 と略同じである。

【0100】

モード変換素子 M1 は第 4 ~ 第 5 スラブ部 24d, 24e を有さないので、出力側第 2 リブ部 20b を伝搬する TE_0 光 7 は、第 2 スラブ部 24b の内側領域 20in から出射される際に反射される。しかし、素子構造 (例えば、コア 4 の各領域の幅や厚さ) を最適化することで、内側領域 20in から出射される TE_0 光 7 の反射を抑制できる。例えば「(4) 製造方法および寸法」で括弧内に例示した寸法 (例えば、出力側第 1 ~ 第 2 リブ部 20a ~ 20b の厚さ $0.22\ \mu\text{m}$ 等) によれば、反射損失を $-30\ \text{dB}$ に抑制できる。

【0101】

ところで、出力側第 2 リブ部 20b の外側領域 20out およびチャネル導波路 9 (図 5 参照) それぞれの構造 (すなわち、幅および厚さ等) が互いに一致する場合には、外側領域 20out 自体を設けなくても良い。この場合、変形例 M1 のモード変換素子とチャネル導波路 9 とを接続した導波路構造は、外側領域 20out が設けられるか否かに拘わらず実質的に同じある。従って外側領域 20out を設けずに、出力側第 2 リブ部 20b の内側領域 20in にチャネル導波路 9 を直接接続しても良い。

【0102】

変形例 1 によれば素子構造を単純化できるので、製造工程を簡素化できる。

【0103】

(6-2) 変形例 2

図 1 を参照して説明した第 3 スラブ部 24c の幅は、出力側第 2 リブ部 20b の先端 32 に向かって徐々に増加する。しかし、第 3 スラブ部 24c の幅は徐々に増加しなくても良い。例えば第 3 スラブ部 24c の幅は、階段状に増加しても良い。或いは第 3 スラブ部 24c は、幅が一定の矩形のスラブ層であっても良い。この様な構造であっても、出力側第 2 リブ部 20b を伝搬する TE_0 光 7 の電界分布を左右対称にすることは可能である。

【0104】

変形例 2 によれば素子構造を単純化できるので、製造工程を簡素化できる。

【0105】

(6-3) 変形例 3

図 20 は変形例 3 のモード変換素子 M3 の一例を示す平面図である。図 20 に示すように、出力側第 2 リブ部 20b の外側領域 20out は、出力側第 1 リブ部 20a より細い。この点以外は、変形例 3 のモード変換素子 M3 の構造は、図 1 を参照して説明したモード変換素子 2 の構造と略同じである。

【0106】

出力側第 2 リブ部 20b の先端の幅は好ましくはチャネル導波路 9 (図 5 参照) の幅なので、チャネル導波路 9 が出力側第 1 リブ部 20a より細い場合には、外側領域 20out は出力側第 1 リブ部 20a より細くても良い。図 20 に示す例では、出力側第 2 リブ部 20b の幅は、内側領域 20in でチャネル導波路 9 の幅まで細くなっている。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 7 】

変形例 3 によれば、チャネル導波路 9 が出力側第 1 リブ部 2 0 a より細い場合にも、モード変換素子 M 3 とチャネル導波路の境界における反射損失を抑制できる。

【 0 1 0 8 】

(6 - 4) 変形例 4

図 2 1 は変形例 4 のモード変換素子 M 4 の一例を示す平面図である。図 1 を参照して説明したモード変換素子 2 のモード次数変換部 8 は、互いに幅が異なる 2 つのリブ部（すなわち、入力側第 1 リブ部 1 8 a および出力側第 1 リブ部 2 0 a）を有する方向性結合器である。一方、変形例 4 の方向性結合器では、入力側第 1 リブ部 1 1 8 a の幅 $W_{in}(z)$ が入力側第 2 リブ部 1 1 8 b に向かって減少し、出力側第 1 リブ部 1 2 0 a の幅 $W_{out}(z)$ が出力側第 2 リブ部 1 2 0 b に向かって増加する（相違点 1）。 z は、入力側第 1 リブ部 1 1 8 a および出力側第 1 リブ部 1 2 0 a に沿った座標である。図 2 2 に示す例では、 $W_{in}(z)$ および $W_{out}(z)$ は z の 1 次関数である。入力側第 1 リブ部 1 1 8 a と出力側第 1 リブ部 1 2 0 a の間隔は一定である。

10

【 0 1 0 9 】

図 1 を参照して説明したモード変換素子 2 のリブチャネル変換部 1 0 は、入力側第 2 リブ部 1 8 b と出力側第 2 リブ部 2 0 b の間隔 G （図 6 参照）が出力側第 2 リブ部 2 0 b の先端に向かって増加する接続領域 3 6 を有する。一方、変形例 4 のリブチャネル変換部 1 1 0 は、その様な領域を有さない。すなわち、入力側第 2 リブ部 1 1 8 b と出力側第 2 リブ部 1 2 0 b の間隔 G_{M4} は一定である（相違点 2）。

20

【 0 1 1 0 】

- 動作

図 2 2 は、変形例 4 のモード次数変換部 1 0 8 の動作の一例を説明する図である。変形例 4 のモード次数変換部 1 0 8 は、入力側第 1 リブ部 1 1 8 a を伝搬する TE_1 光 5 の実効屈折率と出力側第 1 リブ部 1 2 0 a を伝搬する TE_0 光 7 の実効屈折率が中央で一致するように構成されている。

【 0 1 1 1 】

入力側第 1 リブ部 1 1 8 a を伝搬する TE_1 光 5 および出力側第 1 リブ部 1 2 0 a を伝搬する TE_0 光 7 それぞれの実効屈折率が互いに一致する位置（以下、整合位置と呼ぶ）の座標を z_c とする。整合位置 z_c における入力側第 1 リブ部 1 1 8 a の幅 $W_{in}(z_c)$ は、図 1 2 を参照して説明した W_y である。整合位置 z_c における出力側第 1 リブ部 1 2 0 a の幅 $W_{out}(z_c)$ は、図 1 2 を参照して説明した W_x である。

30

【 0 1 1 2 】

整合位置 z_c を含む特定の領域 6 4（以下、整合領域と呼ぶ）では、 TE_1 光 5 の実効屈折率と TE_0 光 7 の実効屈折率は略一致し、 TE_1 光 5 は TE_0 光 7 に変換される。

【 0 1 1 3 】

一方、整合領域 6 4 の左側の領域では、 TE_1 光 5 と TE_0 光 7 の実効屈折率の差異が大きく、 TE_1 光 5 は TE_0 光 7 に殆ど変換されない。変形例 4 では、 $W_{in}(z)$ の変化率（ $= dW_{in}(z) / dz < 0$ ）の符号と $W_{out}(z)$ の変化率（ $= dW_{out}(z) / dz > 0$ ）の符号が逆なので、この様な整合領域 6 4 が形成される。

40

【 0 1 1 4 】

整合領域 6 4 の右側の領域でも、 TE_1 光 5 と TE_0 光 7 の実効屈折率の差異が大きいため、 TE_0 光 7 が入力側第 1 リブ部 1 1 8 a の TE_1 光 5 に逆戻りすることはない。従ってリブチャネル変換部 1 1 0 で入力側第 2 リブ部 1 1 8 b と出力側第 2 リブ部 1 2 0 b の間隔が広がらなくても、 TE_0 光 7 が出力側第 2 リブ部 1 1 8 b の TE_1 光に逆戻りすることはない。このため変形例 4 では、入力側第 2 リブ部 1 1 8 b と出力側第 2 リブ部 1 2 0 b の間隔 G_{M4} は一定となっている（相違点 2 参照）。

【 0 1 1 5 】

入力側第 1 リブ部 1 1 8 a および出力側第 1 リブ部 1 2 0 a の長さは、好ましくは $25 \mu m \sim 100 \mu m$ （例えば、 $50 \mu m$ ）である。入力側第 1 リブ部 1 1 8 a と出力側第 1

50

リブ部 120 a の間隔は、好ましくは $0.08 \mu\text{m} \sim 0.32 \mu\text{m}$ (例えば、 $0.16 \mu\text{m}$) である。入力側第 1 リブ部 118 a の左端の幅は好ましくは、 $0.7 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ (例えば、 $1.5 \mu\text{m}$) である。入力側第 1 リブ部 118 a の右端の幅は好ましくは、 $0.15 \mu\text{m} \sim 0.6 \mu\text{m}$ (例えば、 $0.3 \mu\text{m}$) である。

【0116】

出力側第 1 リブ部 120 a の左端の幅は好ましくは、 $0.1 \mu\text{m} \sim 0.4 \mu\text{m}$ (例えば、 $0.2 \mu\text{m}$) である。出力側第 1 リブ部 120 a の右端の幅は好ましくは、 $0.2 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ (例えば、 $0.48 \mu\text{m}$) である。

【0117】

これらのサイズを除き、変形例 4 のモード変換素子 M4 の各部分のサイズは好ましくは、図 1 を参照して説明したモード変換素子 2 の各部分のサイズと同じである。

10

【0118】

- モード変換効率劣化の抑制

製造誤差により、入力側第 1 リブ部 118 a および出力側第 1 リブ部 120 a の幅が設計値から変化した場合を考える。ここでは説明を簡単にするために、入力側第 1 リブ部 118 a の幅 $W_{in}(z)$ および出力側第 1 リブ部 120 a の幅 $W_{out}(z)$ が z の 1 次関数の場合を考える。

【0119】

製造誤差により変化した入力側第 1 リブ部 118 a の幅を $W'_{in}(z)$ とする。同様に、製造誤差により変化した出力側第 1 リブ部 120 a の幅を $W'_{out}(z)$ とする。 $W'_{in}(z)$ および幅 $W'_{out}(z)$ は、式 (1) ~ (2) で表される。

20

【0120】

$$\begin{aligned}
 W'_{in}(z) &= W_{in}(z) + \\
 &= W_{in}(z_c) - k(z - z_c) + \\
 &= W_{in}(z_c) - k\{(z - /k) - z_c\} \\
 &= W_{in}(z - /k) \dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W'_{out}(z) &= W_{out}(z) + \\
 &= W_{out}(z_c) - k(z - z_c) + \\
 &= W_{out}(z_c) - k\{(z - /k) - z_c\} \\
 &= W_{out}(z - /k) \dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

30

ここで k は、正の係数である。

【0121】

式 (1) ~ (2) によれば、 $W'_{in}(z) = W_{in}(z - /k)$ および $W'_{out}(z) = W_{out}(z - /k)$ である。従って、入力側第 1 リブ部 118 a および出力側第 1 リブ部 120 a の幅が製造誤差により変化すると、整合領域 64 (TE₁光 5 と TE₀光 7 の実効屈折率は略一致する領域) が z 軸に沿って $/k$ だけ平行移動する。

【0122】

整合領域 64 がこの平行移動によりモード次数変換部 108 から食み出さなければ、TE₁光 5 から TE₀光 7 へのモード変換効率は劣化しない。

【0123】

40

整合領域 64 のモード次数変換部 108 からの食み出しは、モード次数変換部 108 を長くすることで容易に実現できる。従って変形例 4 によれば、製造誤差によるモード変換効率の劣化を抑制することができる。

【0124】

(6-5) 変形例 5

図 23 は変形例 5 のモード変換素子 M5 の一例を示す平面図である。図 1 及び 6 を参照して説明したモード変換素子 2 のリブチャネル変換部 10 は、入力側第 2 リブ部 18 b と出力側第 2 リブ部 20 b の間隔 G (図 6 参照) が増加する接続領域 36 を有する。一方、変形例 5 のモード変換素子 M5 は、この様な領域を有さない。

【0125】

50

図 2 3 に示すように、変形例 5 の入力側第 2 リブ部 4 1 8 b は、上辺が傾斜し底辺が出力側第 2 リブ部 2 0 b に平行な四角形である。このため、入力側第 2 リブ部 4 1 8 b と出力側第 2 リブ部 2 0 b 側の間隔 G_{M5} は、略一定である。

【 0 1 2 6 】

図 2 3 に示すように入力側第 2 リブ部 4 1 8 b の幅は、入力側第 1 リブ部 1 8 a から遠ざかるに従い減少する。このため、入力側第 2 リブ部 4 1 8 b の TE_1 光の実効屈折率は入力側第 1 リブ部 1 8 a から遠ざかるに従い、出力側第 2 リブ部 2 0 b の TE_0 光の実効屈折率から乖離する。従って、出力側第 2 リブ部 2 0 b を伝搬する TE_0 光 7 が、入力側第 2 リブ部 4 1 8 b の TE_0 光に逆戻りすることはない。

【 0 1 2 7 】

(6 - 6) 変形例 6

図 1 ~ 2 3 を参照して説明した例では、モード次数変換部 8 は、 TE_1 光 5 を TE_0 光 7 に変換する。しかしモード次数変換部 8 は、 TE_1 光よりモード次数が高い伝搬光を TE_0 光 7 よりモード次数が高い伝搬光に変換しても良い。例えばモード次数変換部 8 は、 TE_2 モードの伝搬光を TE_1 モードの伝搬光に変換しても良い。この場合、偏波回転部 1 2 は例えば、 TM_1 モードの伝搬光を TE_2 モードの伝搬光に変換する。

【 0 1 2 8 】

すなわちモード次数変換部 8 は、電界方向が基板 1 1 と平行になるように偏光し実効屈折率が基本モードより高い高次 TE 光を、電界方向が基板 1 1 と平行になるように偏光し実効屈折率が上記高次 TE 光より低い低次 TE 光に変換して良い。実施の形態 2 ~ 3 についても同様である。

【 0 1 2 9 】

この場合、高次 TE 光は入力側第 1 リブ部 1 8 a を伝搬する伝搬光 (第 1 伝搬光) である。低次 TE 光は、出力側第 1 リブ部 2 0 a を伝搬する伝搬光 (第 2 伝搬光) である。偏波回転部 1 2 には、電界方向が基板 1 1 と直交するように偏光した TM 光が入力され、入力された TM 光を上記高次 TE 光に変換してモード次数変換部 8 に入力する。

【 0 1 3 0 】

変形例 5 によれば、 TE_1 光よりモード次数の高い TE 偏波をモード次数が低い別の TE 偏波に変換することができる。

【 0 1 3 1 】

以上の例では、リブチャネル変換部 1 0 , 1 1 0 , 4 1 0 は、入力側第 2 リブ部 1 8 b , 1 1 8 b , 4 1 8 b を有している。しかし非変換 TE_1 光 (「 (2 - 3) リブチャネル変換部 1 0 の動作」 参照) が十分に弱い場合には、リブチャネル変換部 1 0 , 1 1 0 , 4 1 0 は入力側第 2 リブ部 1 8 b , 1 1 8 b , 4 1 8 b を有さなくても良い。

【 0 1 3 2 】

この場合、非変換 TE_1 光は入力側第 1 リブ部 1 8 a の端面で部分的に反射される。しかし十分に弱い非変換 TE_1 光が反射されても、入力側第 1 リブ部 1 8 a を逆行する反射光は更に弱いので、反射光による障害は起き難い。

【 0 1 3 3 】

以上の例では、偏波回転部 1 2 は第 6 ~ 第 7 スラブ部 2 4 f , 2 4 g を有する。しかし、上部クラッド 6 u (図 4 参照) および下部クラッド 6 l それぞれの屈折率が互いに異なる場合には、偏波回転部 1 2 は第 6 ~ 第 7 スラブ部 2 4 f , 2 4 g を有さなくても良い。クラッドの屈折率が上下非対称な場合にも、 TM 光は TE 光に変換される (例えば、非特許文献 1 ~ 2 参照) 。

【 0 1 3 4 】

以上の例では、入力側第 2 リブ部 1 8 b の幅は変形例 4 を除き、入力側第 1 リブ部 1 8 a から遠ざかるに従って減少する。しかし、入力側第 2 リブ部 1 8 b の幅は減少しなくても良い。例えば、入力側第 2 リブ部 1 8 b と出力側第 2 リブ部 2 0 b の間隔が広がるように、入力側第 2 リブ部 1 8 b が上方に曲がる場合には、入力側第 2 リブ部 1 8 b の幅は減少しなくても良い。この場合も、入力側第 2 リブ部 1 8 b の TE_1 モードと出力側第 2 リ

10

20

30

40

50

ブ部 20b の TE_0 モードの結合係数が小さくなるので、出力側第 2 リブ部 20b の TE_0 光 7 が入力側第 2 リブ部 18b の TE_1 光に逆戻りすることはない。

【0135】

実施の形態 1 のモード変換素子 2 は、偏波回転部 12 を有することで光偏波回転素子として機能する。しかしモード変換素子 2 は、偏波回転部 12 を有さなくても良い。偏波回転部 12 を有さない場合、モード変換素子 2 は光偏波回転素子以外の光素子として用いることができる（例えば、実施の形態 3 参照）。

【0136】

実施の形態 1 によれば、出力側第 1 リブ部 20a とチャンネル導波路 9 の間に両側面にスラブ層が接する出力側第 2 リブ部 20b が設けられるので、入力側第 2 リブ部 18b 側に偏った TE_0 光の電界分布が左右対称に修正される。この修正により、モード変換素子 2 とチャンネル導波路 9 の境界における TE_0 光の電界分布の不整合が緩和され、モード変換素子 2 とチャンネル導波路 9 の境界における反射損失が抑制される。

【0137】

（実施の形態 2）

実施の形態 2 のモード変換素子は、実施の形態 1 のモード変換素子 2 に類似している。従って、実施の形態 1 と同じ構成等については、説明を省略または簡単にする。

【0138】

（1）構造および動作

図 24 は、実施の形態 2 のモード変換素子 202 の一例を示す平面図である。図 25 は、実施の形態 2 のモード変換素子 202 の動作の一例を説明する図である。

【0139】

実施の形態 1 のモード変換素子 2（図 1 参照）の出力側第 2 リブ部 20b の幅は、出力側第 1 リブ部 20a に接する接続領域 36（図 6 参照）を除き一定である。一方、実施の形態 2 の出力側第 2 リブ部 220b の中央（例えば、内側領域 220_{in} と外側領域 220_{out} の境界 B の近傍）の幅は、出力側第 2 リブ部 220b の両端の幅より広い。

【0140】

実施の形態 1 及び 2 いずれのモード変換素子 2, 202 でも、出力側第 2 リブ部 20b, 220b の先端 32, 232 の幅は好ましくは、チャンネル導波路 9（図 5 参照）の幅である。従って、実施の形態 2 の出力側第 2 リブ部 220b の幅は、中央（すなわち、境界 B の近傍）を含む広い領域で実施の形態 1 の出力側第 2 リブ部 20b の幅より広い。

【0141】

このため、実施の形態 2 の出力側第 2 リブ部 220b は、実施の形態 1 の出力側第 2 リブ部 20b より強力に TE_0 光 7 を閉じ込めることができる。従って実施の形態 2 によれば、第 3 ~ 第 5 スラブ部 24c ~ 24e 等の側壁による散乱損失を、実施の形態 1 のモード変換素子 2 より小さくできる。

【0142】

図 24 に示す例では、出力側第 2 リブ部 220b は、出力側第 1 リブ部 20a に向かって幅が減少する内側テーパ部 T_{in} と先端 232 に向かって幅が減少する外側テーパ T_{out} とを有する。内側テーパ部 T_{in} と外側テーパ T_{out} の境界 B_T における出力側第 2 リブ部 220b の幅は好ましくは、 $0.3\ \mu\text{m} \sim 1.3\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.65\ \mu\text{m}$ ）である。なお図 24 ~ 25 には、内側テーパ部 T_{in} と外側テーパ T_{out} の境界 B_T が出力側第 2 リブ部 220b の内側領域 220_{in} と外側領域 220_{out} の境界 B と一致する場合が示されている。しかし、境界 B_T と境界 B は一致しなくても良い。

【0143】

内側テーパ部 T_{in} の両端のうち境界 B_T と反対側の一端の幅は好ましくは、 $0.2\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.46\ \mu\text{m}$ ）である。外側テーパ部 T_{out} の両端のうち境界 B_T と反対側の一端（すなわち、出力側第 2 リブ部 220b の先端 232）の幅は好ましくは、 $0.2\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$ （例えば、 $0.48\ \mu\text{m}$ ）である。以上のサイズを除き、モード変換素子 202 の各部分のサイズは、図 17 を参照して説明した実施の形態 1 のモー

10

20

30

40

50

ド変換素子 2 の各部分のサイズと同じである。

【 0 1 4 4 】

(2) 変形例

図 2 6 は、変形例のモード変換素子 M 2 0 2 の一例を示す平面図である。モード変換素子 M 2 0 2 の構造は、第 4 ~ 第 5 スラブ部 2 4 d, 2 4 e を有さないこと以外は図 2 4 を参照して説明したモード変換素子 2 0 2 の構造と略同じである。

【 0 1 4 5 】

モード変換素子 M 2 0 2 は第 4 ~ 第 5 スラブ部 2 4 d, 2 4 e を有さないのので、出力側第 2 リブ部 2 2 0 b を伝搬する T E ₀ 光 7 は、内側領域 2 2 0 _{i n} から外側領域 2 2 0 _{o u t} に入射する際に反射される。しかし、素子構造（例えば、コア 4 の幅や厚さ）を最適化することで、この反射を抑制することは容易である（実施の形態 1 の「(6 - 1) 変形例 1」参照）。

10

【 0 1 4 6 】

変形例によれば素子構造を単純化できるので、製造工程を簡素化できる。

【 0 1 4 7 】

実施の形態 2 によれば、実施の形態 1 のモード変換素子 2 と同様チャンネルリブ変換部 2 1 0 により、モード変換素子 2 0 2 とチャンネル導波路 9 の境界における反射損失を抑制できる。更に実施の形態 2 によれば、幅広の出力側第 2 リブ部 2 2 0 b に T E ₀ 光 7 を確実に閉じ込めることができるので、第 3 ~ 第 5 スラブ部 2 4 c ~ 2 4 d 等の側壁による散乱損失を抑制できる。

20

【 0 1 4 8 】

(実施の形態 3)

図 2 7 は、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 の一例を示す平面図である。図 2 8 は、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 の動作の一例を説明する図である。実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 は、実施の形態 1 のモード変換素子 2 に類似している。従って、実施の形態 1 と同じ構成等については、説明を省略または簡単にする。

【 0 1 4 9 】

(1) 構造

図 2 7 に示すように、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 は、偏波回転部 1 2 を有さない。更にモード変換素子 3 0 2 のモード次数変換部 3 0 8 は、出力側第 1 リブ部 3 2 0 a の T E ₁ モードの実効屈折率が、入力側第 1 リブ部 1 8 a のいずれの T E モード（例えば、T E ₁ モード）の実効屈折率とも一致しないように構成されている。これらの点を除き、実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 の構造は、実施の形態 1 のモード変換素子 2 の構造と略同じである。

30

【 0 1 5 0 】

(2) 動作

実施の形態 3 のモード変換素子 3 0 2 には、T E ₁ 光 5（図 2 8 参照）および T E ₁ 光 5 とは異なる T E ₁ 光 3 0 5 が入力されて、T E ₁ 光 5 が変換された T E ₀ 光 7 と T E ₁ 光 3 0 5 とが多重化される。T E ₁ 光 5 および T E ₁ 光 3 0 5 は、T E ₁ モードの伝搬光である。T E ₀ 光 7 は、T E ₀ モードの伝搬光である。

40

【 0 1 5 1 】

T E ₁ 光 5 はチャンネル導波路 3 0 9 を介して、入力側第 1 リブ部 1 8 a に入力される。実施の形態 1 と同様、入力側第 1 リブ部 1 8 a おける T E ₁ 光 5 の実効屈折率は、出力側第 1 リブ部 2 0 a における T E ₀ 光 7 の実効屈折率と略同じである。従って T E ₁ 光 5 は、T E ₀ 7 光に変換され出力側第 2 リブ部 2 0 b からチャンネル導波路 9 に出力される。

【 0 1 5 2 】

T E ₁ 光 3 0 5 はチャンネル導波路 4 0 9 を介して、出力側第 1 スラブ部 3 2 0 a に入力される。上述したように、出力側第 1 リブ部 3 2 0 a の T E ₁ モードの実効屈折率は、入力側第 1 リブ部 3 1 8 a のいずれの T E モードの実効屈折率とも異なる。従って T E ₁ 光 3 0 5 は、出力側第 1 リブ部 3 2 0 a をそのまま通過して、出力側第 2 リブ部 2 0 b から

50

チャンネル導波路 9 に出力される。

【0153】

その結果、 TE_1 光 5 が変換された TE_0 光 7 と TE_1 光 305 とが多重化され、出力側第 2 リブ部 20b から一緒に出力される。なお図 28 示す例では、入力側のチャンネル導波路 309, 409 とモード次数変換部 308 との境界における反射損失を抑制するため、チャンネル導波路 309, 409 の間に先端が V 字形のスラブ層 324 (実施の形態 1 参照) が設けられている。

【0154】

以上のように実施の形態 3 のモード変換素子 302 によれば、モード次数の異なる TE 偏波を多重化することができる。

10

【0155】

(3) 応用例

図 29 は、モード変換素子 302 を用いたモード多重送信機 366 の一例を示すブロック図である。モード多重送信機 366 は例えば、SOI 基板上に光素子が集積されたシリコンフォトニクスデバイスの素子間通信 (すなわち、インターコネクション) に用いることができる。

【0156】

TE_1 光 368 (すなわち、 TE_1 モードの光) はモード多重送信機 366 に入力されると、光スプリッタ 80 により TE_1 光 5 と TE_1 光 305 とに分割される。 TE_1 光 5 および TE_1 光 305 はそれぞれ、光変調器 374a, 374b により変調される。

20

【0157】

変調された TE_1 光 5 は、モード変換素子 302 の入力側第 1 リブ部 18a に入力され TE_0 光 7 に変換される。一方、変調された TE_1 光 305 は、モード変換素子 302 の出力側第 1 リブ部 320a に入力され、そのまま出力される。従ってモード変換素子 302 からは、モード多重化された信号光 (すなわち、変調された TE_0 光 7 および変調された TE_1 光 305) が出力される。

【0158】

モード変換素子 302 は、モード多重送信機 366 以外の装置に適用されても良い。例えばモード変換素子 302 は、 TE_0 モードの伝搬光を TE_1 モードの光に変換するモード次数変換素子に適用されても良い。

30

【0159】

実施の形態 3 によれば、実施の形態 1 のモード変換素子 2 と同様チャンネルリブ変換部 10 によりモード変換素子 302 とチャンネル導波路 9 の境界における反射損失を抑制しつつ、伝搬光のモード次数を変換できる。

【0160】

以上、本発明の実施形態について説明したが、実施の形態 1 ~ 3 は、例示であって制限的なものではない。例えば、以上の例ではモード次数変換部は、高次 TE 光を低次 TE 光に変換している。しかしモード次数変換部は、低次 TE 光を高次 TE 光に変換しても良い。

【0161】

以上の例ではモード次数変換部は、 TE モードの伝搬光のモード次数を変換している。しかしモード次数変換部は、 TM モードの伝搬光のモード次数を変換しても良い。

40

【0162】

以上の例では、コア 4 の材料は Si である。しかしコア 4 の材料は、Si 以外の材料であっても良い。コア 4 の材料は例えば、InGaAs 等の化合物半導体であってもよい。

【0163】

以上の例では、クラッド 6 の材料は SiO_2 である。しかしクラッド 6 の材料は、 SiO_2 以外の材料であっても良い。クラッド 6 の材料は例えば、InP 等の化合物半導体であっても良い。

【0164】

以上の例では、基板 11 の材料は Si である。しかし基板 11 の材料は、Si 以外の材

50

料であっても良い。基板 11 の材料は例えば、I n P 等の化合物半導体であっても良い。

【0165】

以上の実施の形態 1 ~ 3 に関し、更に以下の付記を開示する。

【0166】

(付記 1)

基板と、前記基板上的クラッドと、前記クラッドにより囲われたコアとを有し、

前記コアは前記クラッドより屈折率が高く、第 1 伝搬光を前記第 1 伝搬光とはモード次数が異なる第 2 伝搬光に変換するモード次数変換部と、前記第 2 伝搬光を外部に出力するリブチャネル変換部とを含み、

前記モード次数変換部は、前記第 1 伝搬光が入力される入力側第 1 リブ部と、前記入力側第 1 リブ部に沿って延在し前記入力側第 1 リブ部と反対側の側面が下端から上端に亘って前記クラッドに覆われた出力側第 1 リブ部と、前記入力側第 1 リブ部と前記出力側第 1 リブ部の間に配置され前記入力側第 1 リブ部および前記出力側第 1 リブ部より薄い第 1 スラブ部とを有し、

前記リブチャネル変換部は、前記出力側第 1 リブ部に接し前記第 2 伝搬光を出力する出力側第 2 リブ部と、前記第 1 スラブ部と前記出力側第 2 リブ部の側面とに接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 2 スラブ部と、前記出力側第 2 リブ部の別の側面に接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 3 スラブ部とを有する

モード変換素子。

【0167】

(付記 2)

前記第 3 スラブ部は、前記出力側第 2 リブ部の両端のうち前記出力側第 1 リブ部と反対側の一端に向かって幅が増加することを

特徴とする付記 1 に記載のモード変換素子。

【0168】

(付記 3)

前記出力側第 2 リブ部は、前記出力側第 1 リブ部に接する内側領域と前記内側領域に接する外側領域とを有し、

前記第 2 スラブ部および前記第 3 スラブ部は、前記内側領域に接することを

特徴とする付記 1 または 2 に記載のモード変換素子。

【0169】

(付記 4)

前記リブチャネル変換部は更に、前記第 2 スラブ部と前記外側領域の側面とに接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 4 スラブ部と、前記第 3 スラブ部および前記外側領域の別の側面に接し前記出力側第 2 リブ部より薄い第 5 スラブ部とを有し、

前記第 4 スラブ部および前記第 5 スラブ部それぞれの幅は、前記出力側第 2 リブ部の両端のうち前記出力側第 1 リブ部と反対側の一端に向かって減少することを

特徴とする付記 3 に記載のモード変換素子。

【0170】

(付記 5)

前記出力側第 2 リブ部の中央の幅は、前記出力側第 2 リブ部の両端の幅より広いことを特徴とする付記 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【0171】

(付記 6)

前記第 1 伝搬光は、電界方向が前記基板と平行になるように偏光し実効屈折率が基本モードより高い高次 T E 光であり、

前記第 2 伝搬光は、電界方向が前記基板と平行になるように偏光し実効屈折率が前記高次 T E 光より低い低次 T E 光であり、

更に、電界方向が前記基板と直交するように偏光した T M 光が入力され、入力された前記 T M 光を前記高次 T E 光に変換する偏波回転部を有することを

10

20

30

40

50

特徴とする付記 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【0172】

(付記 7)

前記入力側第 1 リブ部は、前記第 1 伝搬光が入力され

前記出力側第 1 リブ部は、前記第 2 伝搬光を前記出力側第 2 リブ部に入力することを特徴とする付記 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【0173】

(付記 8)

前記出力側第 2 リブ部は、コアの横断面が矩形のチャネル導波路に接続されることを特徴とする付記 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

10

【0174】

(付記 9)

前記出力側第 2 リブ部に沿って延在し前記入力側第 1 リブ部に接する入力側第 2 リブ部を有し、

前記入力側第 2 リブ部と前記出力側第 2 リブ部の間隔は、前記モード次数変換部に接する領域で、前記出力側第 2 リブ部の両端のうち前記出力側第 1 リブ部と反対側の一端に向かって増加することを

特徴とする付記 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

【0175】

(付記 10)

前記モード次数変換部は、前記入力側第 1 リブ部の幅が前記出力側第 1 リブ部の幅とは異なる非対称方向性結合器であることを

特徴とする付記 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載のモード変換素子。

20

【0176】

(付記 11)

前記モード次数変換部は、前記入力側第 1 リブ部の幅が前記入力側第 2 リブ部に向かって減少し、前記出力側第 1 リブ部の幅が前記出力側第 2 リブ部に向かって増加する方向性結合器であることを

特徴とする付記 9 に記載のモード変換素子。

【符号の説明】

30

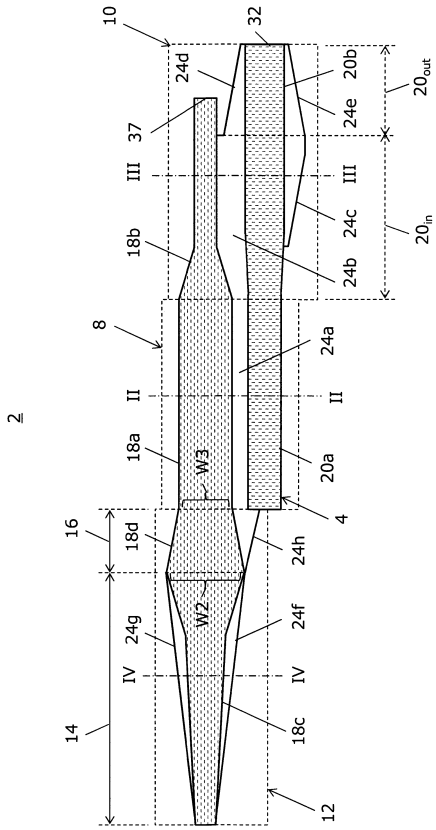
【0177】

- 2 : モード変換素子
- 4 : コア
- 6 : クラッド
- 8 : モード次数変換部
- 10 : リブチャネル変換部
- 11 : 基板
- 12 : 偏波回転部
- 18 a : 入力側第 1 リブ部
- 18 b : 入力側第 2 リブ部
- 20 a : 出力側第 1 リブ部
- 20 b : 出力側第 2 リブ部
- 24 a : 第 1 スラブ部
- 24 b : 第 2 スラブ部
- 24 c : 第 3 スラブ部
- 24 d : 第 4 スラブ部
- 24 e : 第 5 スラブ部

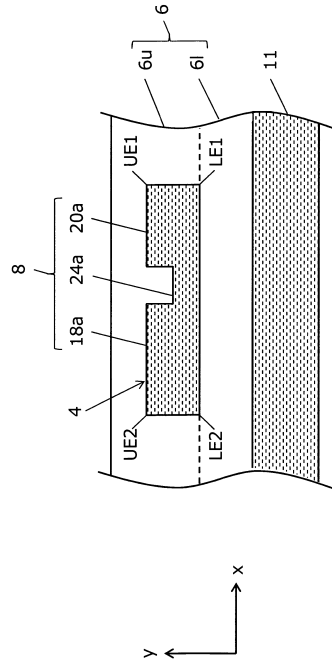
40

50

【図面】
【図 1】



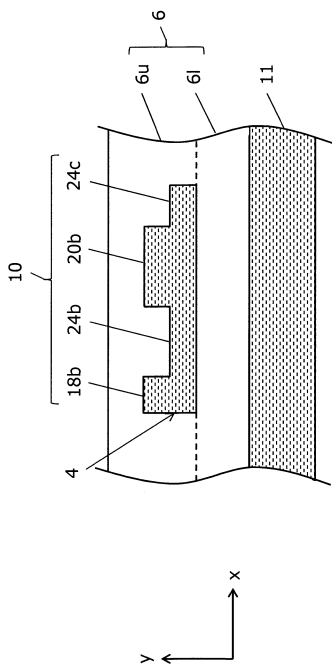
【図 2】



10

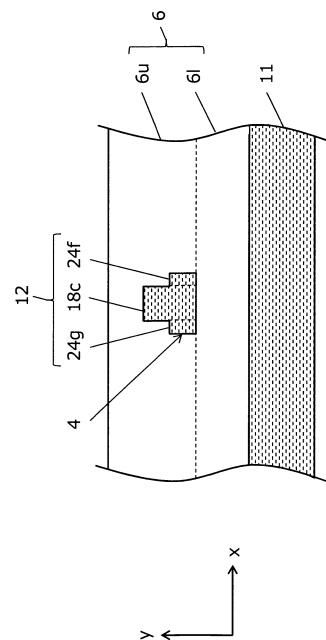
20

【図 3】



30

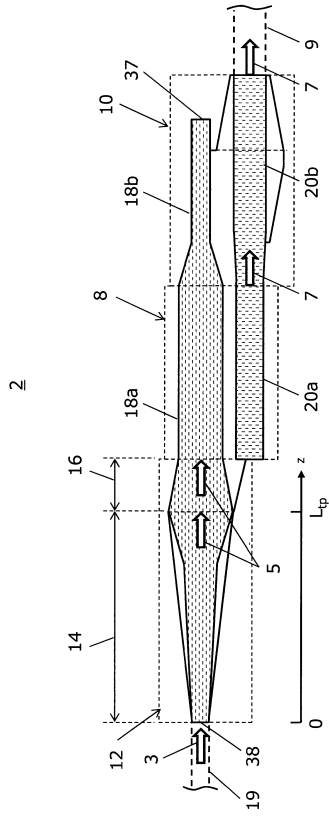
【図 4】



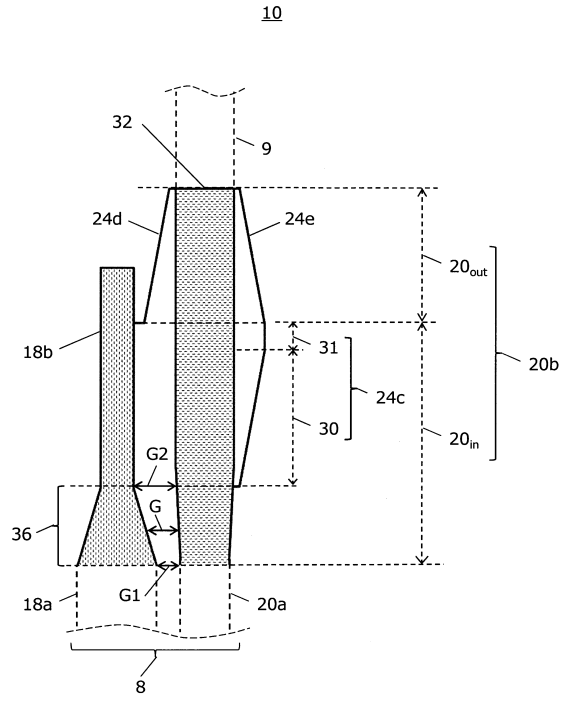
40

50

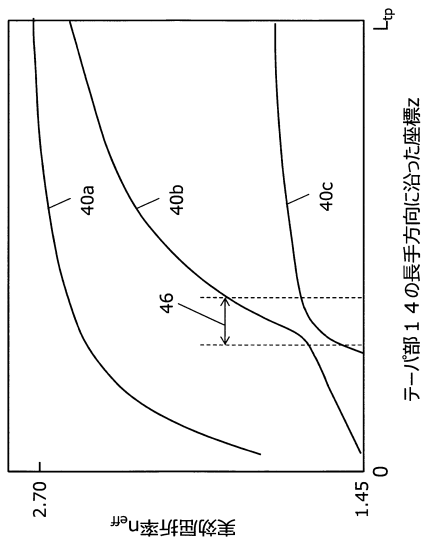
【図5】



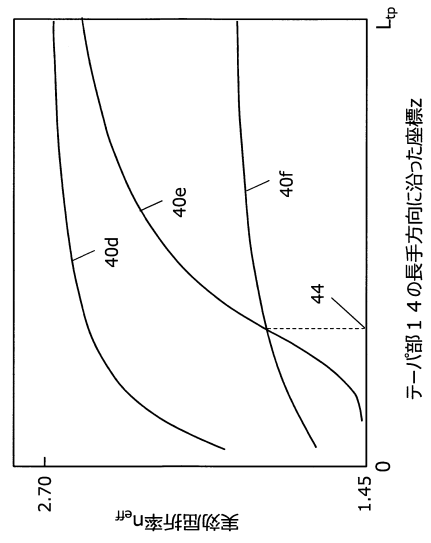
【図6】



【図7】



【図8】



10

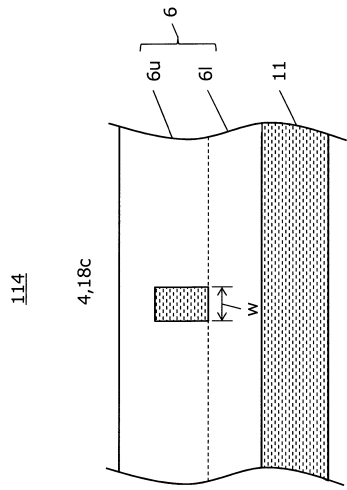
20

30

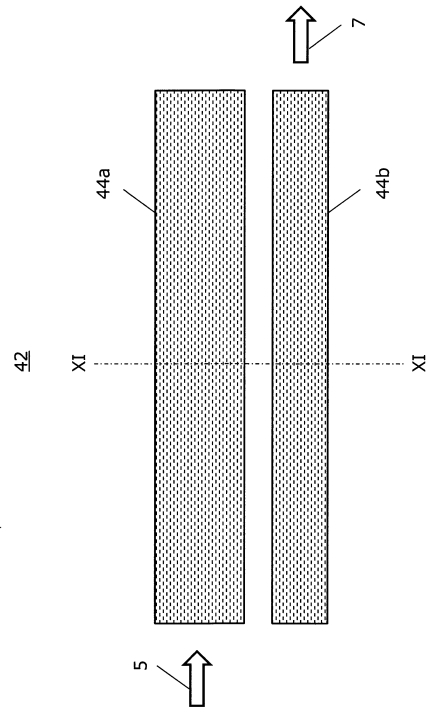
40

50

【図 9】



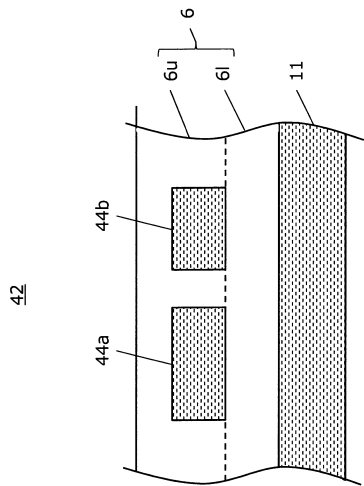
【図 10】



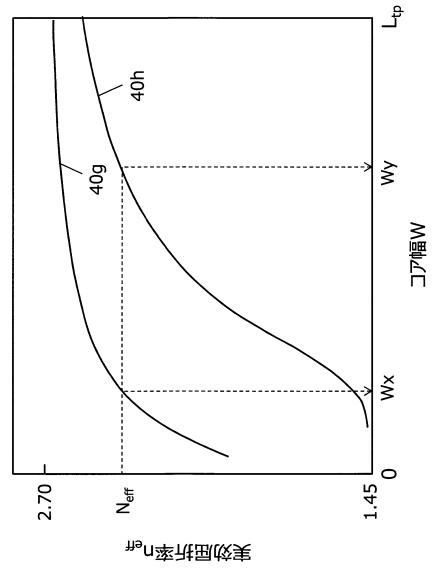
10

20

【図 11】



【図 12】

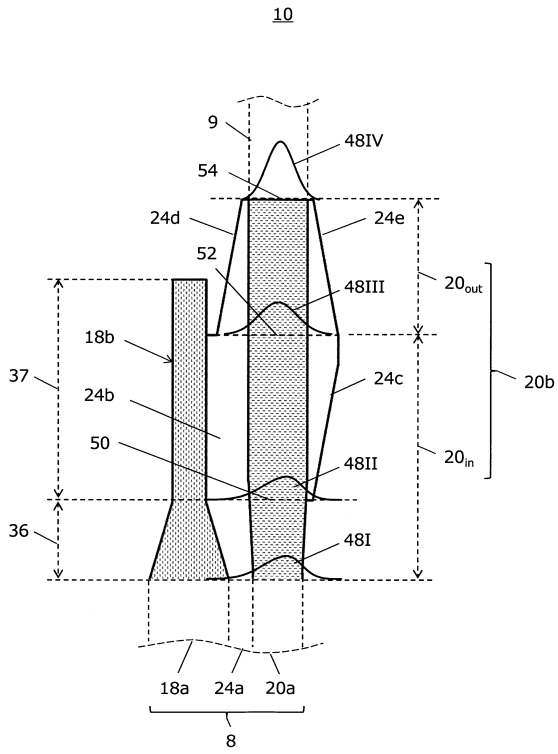


30

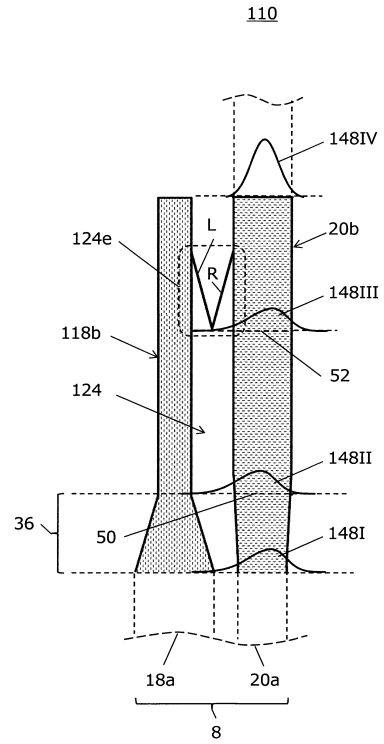
40

50

【 図 1 3 】



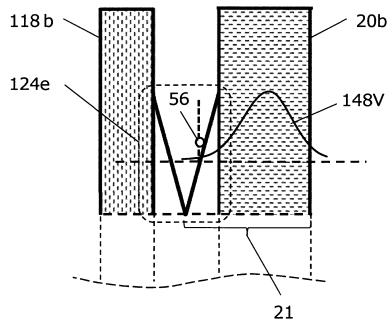
【 図 1 4 】



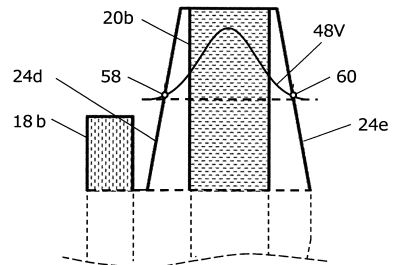
10

20

【 図 1 5 】



【 図 1 6 】

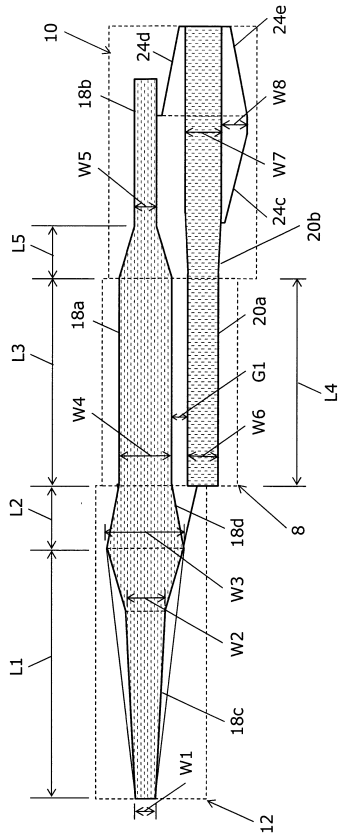


30

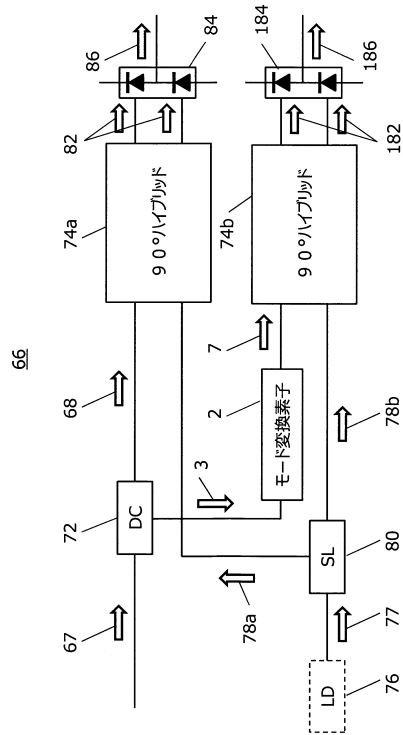
40

50

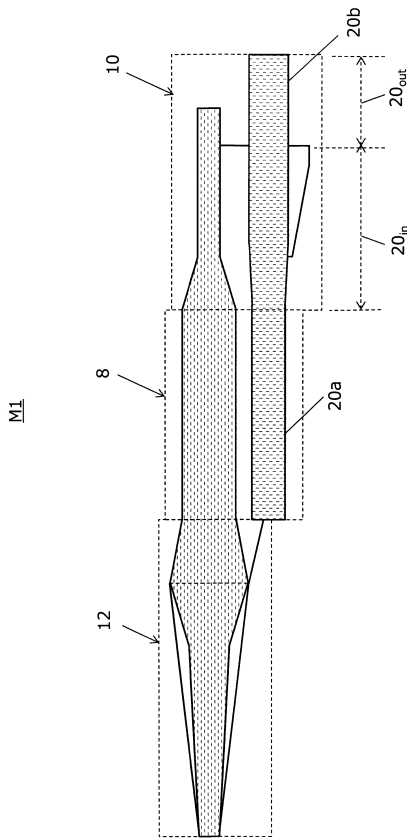
【図 17】



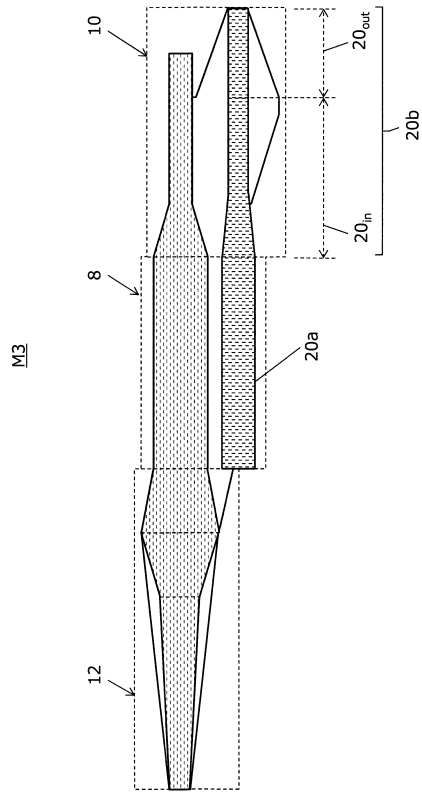
【図 18】



【図 19】



【図 20】



10

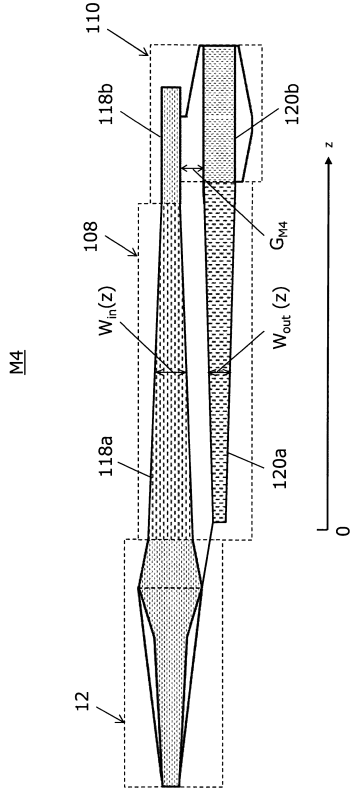
20

30

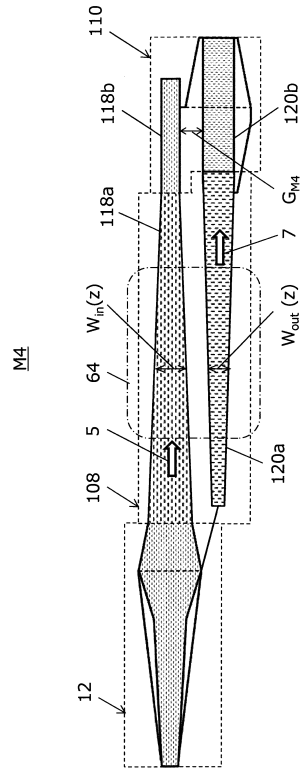
40

50

【 2 1 】



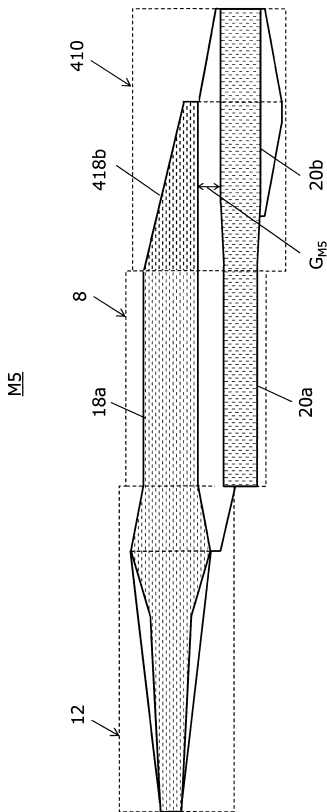
【 2 2 】



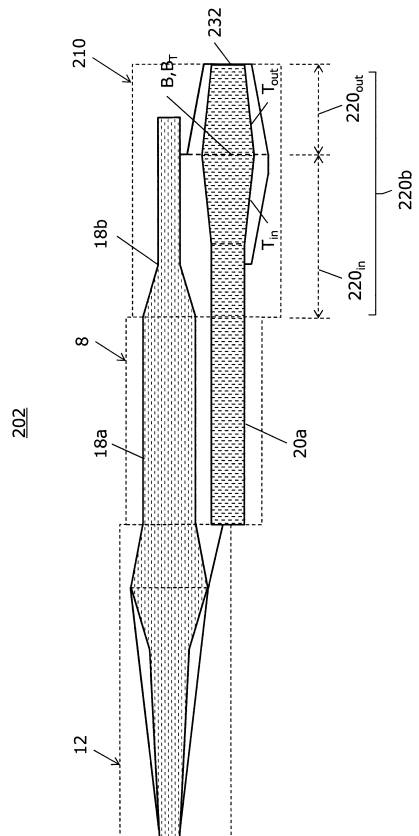
10

20

【 2 3 】



【 2 4 】

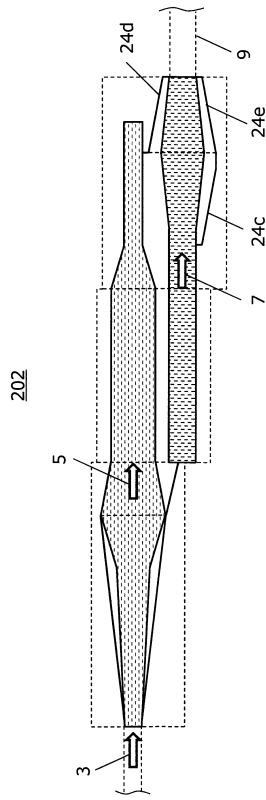


30

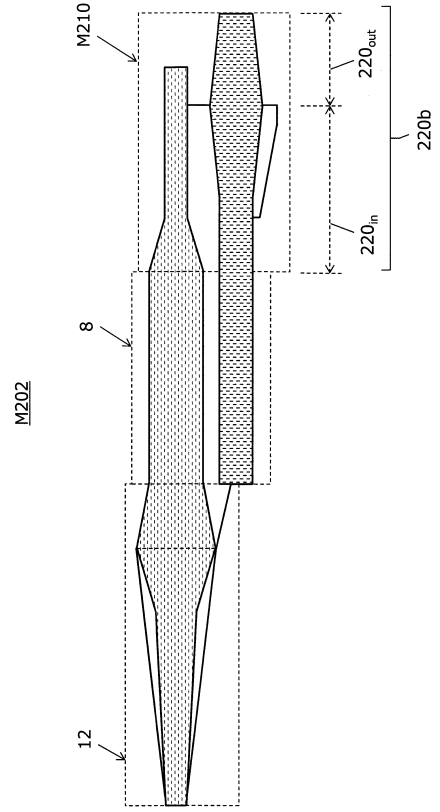
40

50

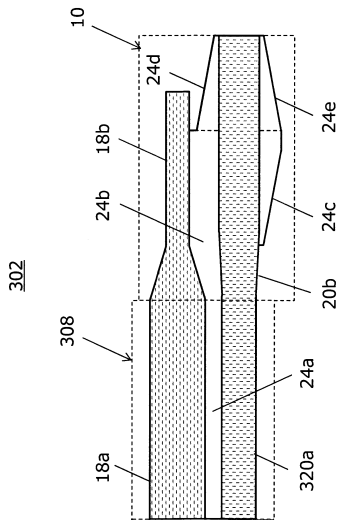
【 2 5 】



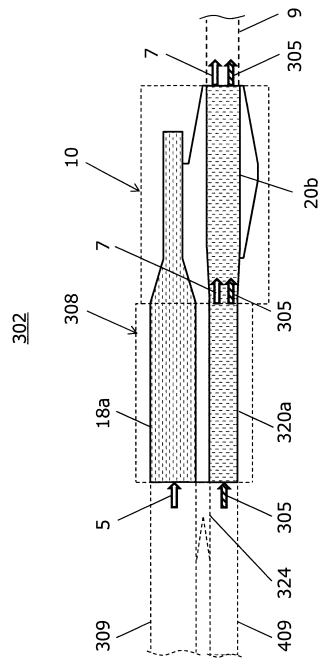
【 2 6 】



【 2 7 】



【 2 8 】



10

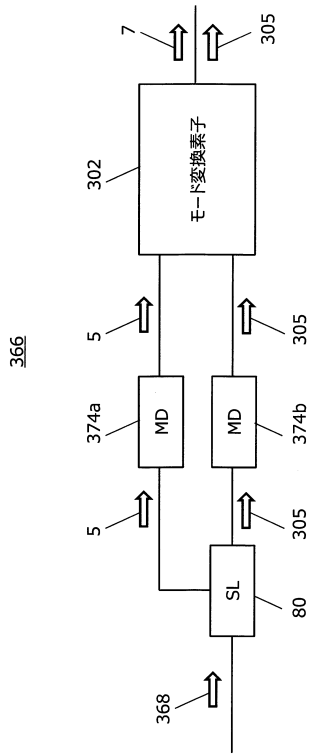
20

30

40

50

【 図 29 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 1 3 3 7 9 6 (U S , A 1)
特開 2 0 1 5 - 1 9 7 6 6 4 (J P , A)
米国特許出願公開第 2 0 1 7 / 0 0 0 3 4 5 1 (U S , A 1)
国際公開第 2 0 1 4 / 2 0 8 6 0 1 (W O , A 1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
G 0 2 B 6 / 1 2 - 6 / 1 4