

## 明 細 書

**発明の名称：光導波路素子及び光変調器**

### 技術分野

[0001] 本発明は、高速かつ低い光損失の光導波路素子、及びこれを備えた光変調器に関する。

本願は、2012年12月27日に、日本に出願された特願2012-283964号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

### 背景技術

[0002] 近年、基板型光導波路等の光集積回路を、光ファイバ通信用のデバイス、とりわけ長距離の波長多重光ファイバ通信に使用することが検討されている。

特許文献1には、横方向にPIN接合を有し、PIN接合中のキャリア密度を変化させて屈折率を制御する単一モードのシリコンリブ型導波路について開示されている。

特許文献2には、横方向にPNダイオードを有するシリコンリブ型導波路であり、P及びN領域のドーパント密度は一様でなく非線形的に変化しており、P及びN領域の各々の電極に隣接する部分でドーパント密度が最高値をとり、導波モードの中心でドーパント密度が最低値をとる光変調器が記載されている。

非特許文献1には、位相変調部として横方向にPNダイオードを有するシリコンリブ型導波路を有するマッハツェンダー型導波路を用いた10Gbps（ギガビット毎秒）の高速な光変調器が開示され、消光比が10dB以上、光損失が10.5dB以下であることが報告されている。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第95／08787号

特許文献2：米国特許第7085443号明細書

## 非特許文献

- [0004] 非特許文献1: Kensuke Ogawa, Kazuhiro Goi, Yong Tsong Tan, Tsung-Yang Liow, Xiaoguang Tu, Qing Fang, Guo-Qiang Lo, and Dim-Lee Kwong, "Silicon Mach-Zehnder modulator of extinction ratio beyond 10 dB at 10.0-12.5 Gbps", Optics Express, 2011年、第19巻、第26号、pp. B26-B31

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

- [0005] 特許文献1の電気光学素子は、単一モードのシリコン導波路における屈折率制御を利用している。しかし、コアの幅及び厚さがサブミクロンスケールのシリコン導波路を用いると、導波路コアの側壁ラフネスにより生じる光散乱のため、光損失が増大し、長距離の波長多重光ファイバ通信用の光集積回路に対して求められる低い光損失を実現することができない。
- [0006] 特許文献2が開示するPNダイオードのドーパント密度の分布に基づくと、導波路コアの側壁ラフネスによる光損失を低減するために、コア幅を広げた場合、高次モードが発生する。その結果、強度変調信号又は位相変調信号に高次モード成分が重畳すると、強度変調における消光比、又は位相変調におけるQ値(Q-factor)が低下して、ビットエラーレートが増大し、良好な光通信システムが構築されない。
- [0007] 非特許文献1が開示するPNダイオードを有するシリコンマッハツェンダー型導波路では、Cバンド(1530~1565nm)及びLバンド(1565~1625nm)を含む波長領域で光損失を10dBよりも低減することは困難である。よって、長距離の波長多重光ファイバ通信用の光部品に対して求められる低い光損失を実現することができない。
- [0008] 以上より、本発明は、長距離の波長多重光ファイバ通信に用いられる全波長領域において、強度変調における高い消光比、又は位相変調における高いQ値を有し、高速かつ低い光損失の光変調器等の光集積回路に好適な光導波路素子を提供する。

## 課題を解決するための手段

- [0009] 本発明の第1態様は、光導波路素子であって、リブ部と、リブ部を挟むようにリブ部の両側にそれぞれ接続された、第1スラブ部及び第2スラブ部を含む一对のスラブ部と、を有するコアを有するリブ型導波路を備え、リブ部は、予め定められた単一の偏光状態にある基本モード及び高次モードを伝搬可能な断面寸法を有し、さらに、PN接合を形成する第1P型半導体部及び第1N型半導体部を有し、第1スラブ部は、互いに接続された第2P型半導体部及びP型導体部を有し、第2P型半導体部は、リブ部の第1P型半導体部と接続され、第2スラブ部は、互いに接続された第2N型半導体部及びN型導体部を有し、第2N型半導体部は、リブ部の第1N型半導体部と接続され、第1及び第2P型半導体部は、P型ドーパントを含有する半導体材料からなり、第1及び第2N型半導体部は、N型ドーパントを含有する半導体材料からなり、P型導体部は、第1及び第2P型半導体部よりも高濃度にP型ドーパントを含有する半導体材料からなり、第1電極と電氣的に接続され、高次モードが伝搬される領域に配置され、N型導体部は、第1及び第2N型半導体部よりも高濃度にN型ドーパントを含有する半導体材料からなり、第2電極と電氣的に接続され、高次モードが伝搬される領域に配置されている。
- [0010] 本発明の第2態様は、第1態様に係る光導波路素子において、半導体材料がシリコンであることが好ましい。

本発明の第3態様は、第1又は第2態様に係る光導波路素子において、コアの周囲に配置され、第1及び第2電極が上面に形成されている上部クラッドと、第1電極とP型導体部及び第2電極とN型導体部との間を電氣的に接続し、上部クラッドを貫通する接続導体部と、をさらに備えることが好ましい。

本発明の第4態様は、第1～第3態様のいずれかに係る光導波路素子において、リブ型導波路のリブ部の幅が、500～600nmであることが好ましい。

[0011] 本発明の第5態様は、第1～第4態様のいずれかに係る光導波路素子において、リブ部と等しい幅及び厚さを有する矩形コア部を有する矩形導波路と、リブ型導波路の少なくとも1つの端と矩形導波路とを接続し、一对のスラブ部の幅がゼロから連続的に変化する遷移領域を有する、接続部と、をさらに備えることが好ましい。

本発明の第6態様は、第5態様に係る光導波路素子において、遷移領域における一对のスラブ部の幅が、光の伝搬方向に沿って線形的に変化することが好ましい。

本発明の第7態様は、第5態様に係る光導波路素子において、遷移領域における一对のスラブ部の幅が、光の伝搬方向に沿って二次関数的に変化することが好ましい。

本発明の第8態様は、第5～第7態様のいずれかに係る光導波路素子において、矩形導波路の接続部とは反対側の端部に接続される、先端に向かって幅が狭くなる逆テーパ型導波路をさらに備えることが好ましい。

本発明の第9態様は、第5～第7態様のいずれかに係る光導波路素子において、2つの $1 \times 2$ 光分岐部の間に2本のアーム部を有するマッハツェンダー型導波路をさらに備え、 $1 \times 2$ 光分岐部がマルチモード干渉計から構成され、2本のアーム部のそれぞれがリブ型導波路を有し、リブ型導波路と $1 \times 2$ 光分岐部との間が矩形導波路で接続されていることが好ましい。

本発明の第10態様は、第1～第9態様のいずれかに係る光導波路素子において、光導波路素子に対して光を入射させ、又は光導波路素子から光を出射させる端部では、先端に向かって幅が狭くなる逆テーパ型導波路が矩形導波路の端部に接続されることが好ましい。

[0012] 本発明の第11態様は、光変調器であって、上記第1～第10態様のいずれかに係る光導波路素子を備え、P型導体部に接続された第1電極と、N型導体部に接続された第2電極とに、一定の逆バイアス電圧を印加して、交流成分のみを含む電気信号を第1電極または第2電極いずれかに伝搬させることにより、光変調を行う。

## 発明の効果

[0013] 上記本発明の態様によれば、強度変調における高い消光比、又は位相変調における高いQ値を有し、高速かつ低い光損失の光変調器等の光集積回路に最適な光導波路素子を提供することができる。

## 図面の簡単な説明

[0014] [図1]本発明の一実施形態に係る光導波路素子におけるリゾ型導波路の一例を示す断面図である。

[図2]本発明の一実施形態に係る矩形導波路とリゾ型導波路との間の遷移領域の一例を示す斜視図である。

[図3A]本発明の一実施形態に係るマルチモード干渉計からなる1×2光分岐部の一例を示す平面図である。

[図3B]本発明の一実施形態に係るマルチモード干渉計からなる1×2光分岐部の一例を示す斜視図である。

[図4]本発明の一実施形態に係るツェンツェン型導波路の一例を示す平面図である。

[図5]それぞれ、リゾ部の幅に対する基本モード(N=1)及び高次モード(N=2)のモード計算の結果の一例を示す図である。

[図6]基本モード(N=1)のモード電界分布の一例を示す図である。

[図7]高次モード(N=2)のモード電界分布の一例を示す図である。

[図8]図6の矢印Rで示す面に沿った基本モード(N=1)の電界プロファイルの一例を示すグラフである。

[図9]図7の矢印Rで示す面に沿った高次モード(N=2)の電界プロファイルの一例を示すグラフである。

## 発明を実施するための形態

[0015] 以下、好適な実施形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。

図1に、本発明の光導波路素子におけるリゾ型導波路の断面構造の模式図を示す。図1の下部には、電極10、11間の等価回路を示している。

光導波路のコア12は、リゾ部22と、リゾ部22の両側にそれぞれ接続

された一对のスラブ部23, 24とを有する。リブ部22の厚さ $t_{rib}$ は、スラブ部23, 24の厚さ $t_{slab}$ より大きい。ここでは、スラブ部23, 24は、リブ部22の下部で側方（両側）に接続されており、下部クラッド2に面するリブ部22の下面と、下部クラッド2に面するスラブ部23, 24の下面とが同一面をなすよう構成されている。

[0016] コア12の周囲には、上部クラッド7及び下部クラッド2が設けられている。これらのクラッドは、コア12よりも屈折率の低い材料から構成される。コア12がシリコン（Si）等の高屈折率の半導体材料から構成される場合、クラッドは、シリカ（SiO<sub>2</sub>）、シリコン窒化物等から構成することができる。クラッドは、電気絶縁材料から構成することもできる。

[0017] なお、基板1は半導体基板でも絶縁体基板でもよいが、SOI（Silicon-on-insulator）ウェハを利用する場合、シリコン基板と埋め込み酸化物（BOX）層とSOI層のそれぞれから、基板1、下部クラッド2、コア12を構成することができる。この場合、基板1はアンドープシリコンでよく、コア12のシリコンは後述するようにドーパされる。

下部クラッド2は、例えば約2  $\mu$ m又は十分な厚さがあればよい。上部クラッド7は、例えば、CVD（化学気相成長法）等の製造方法により、シリカ（SiO<sub>2</sub>）等の化合物を合成して、1～2  $\mu$ m等の厚さでリブ部22及びスラブ部23, 24の上に堆積することにより形成することができる。

[0018] コア12には、PNダイオードを構成するP型半導体部3及びN型半導体部4が存在する。P型半導体部3及びN型半導体部4の境界には、電気容量C（図1の等価回路を参照）をPN接合13が形成される。P型半導体部3は、P型ドーパントを含有する半導体材料からなり、N型半導体部4は、N型ドーパントを含有する半導体材料からなる。

P型半導体部3のPN接合13とは反対側の端部には、P型導体部5が接続されている。同様に、N型半導体部4のPN接合13とは反対側の端部には、N型導体部6が接続されている。P型導体部5は、P型半導体部3よりも高濃度にP型ドーパントを含有する半導体材料からなり、N型導体部6は

、N型半導体部4よりも高濃度にN型ドーパントを含有する半導体材料からなる。

P型導体部5及びN型導体部6を構成する半導体材料は、P型半導体部3及びN型半導体部4と同じ半導体材料を用いることが好ましい。また、P型ドーパント及びN型ドーパントも、半導体部と導体部とで同じ材料を用いることが好ましい。

[0019] 半導体材料としては、例えば、シリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、シリコン・ゲルマニウム(SiGe)等のIV族半導体、AlN、GaP、GaAs、InP等のIII-V族半導体、ZnO、ZnS、ZnSe、CdTe等のII-VI族半導体が挙げられる。IV族半導体が好適であり、例えばシリコン(Si)を用いることができる。

IV族半導体の場合、P型ドーパントとしては、ホウ素(B)等のIII族元素が挙げられる。P型半導体部3及びP型導体部5を形成する方法としては、コア12を構成する半導体材料層に、P型ドーパントをイオン注入等により添加する方法が挙げられる。

また、IV族半導体のN型ドーパントとしては、リン(P)、ヒ素(As)等のV族元素が挙げられる。N型半導体部4及びN型導体部6を形成する方法としては、コア12を構成する半導体材料層に、N型ドーパントをイオン注入等により添加する方法が挙げられる。

[0020] リブ部22は、P型半導体部3a及びN型半導体部4aを有し、これらリブ部22内のP型半導体部3a及びN型半導体部4aがPN接合13を形成している。

一对のスラブ部の一方である第1スラブ部23は、互いに接続されたP型半導体部3b及びP型導体部5を有し、第1スラブ部23のP型半導体部3bとリブ部22のP型半導体部3aとが互いに接続されて、一体のP型半導体部3を形成している。

また、一对のスラブ部の他方である第2スラブ部24は、互いに接続されたN型半導体部4b及びN型導体部6を有し、第2スラブ部24のN型半導

体部 4 b とリブ部 2 2 の N 型半導体部 4 a とが互いに接続されて、一体の N 型半導体部 4 を形成している。

[0021] P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 は、P N ダイオードを構成する P 型半導体部 3 及び N 型半導体部 4 に電圧を印加するため、それぞれ電極 1 0, 1 1 と電氣的に接続されている。

図 1 に示す例では、電極 1 0, 1 1 は、リブ部 2 2 及びスラブ部 2 3, 2 4 (すなわちコア 1 2) の上部を覆う上部クラッド 7 の上面に形成されている。電極 1 0, 1 1 と P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 との間は、上部クラッド 7 を貫通する接続導体部 8, 9 により電氣的に接続されている。

[0022] 接続導体部 8, 9 及び電極 1 0, 1 1 は、金属等の導体をメッキ、蒸着等により堆積させることで形成することができる。例えば、フォトリソグラフィ等で上部クラッド 7 に形成した開口部に導体を充填することにより接続導体部 8, 9 が形成され、さらに、上部クラッド 7 の上面に導体を積層することにより電極 1 0, 1 1 が形成される。

図 1 に示す例では、接続導体部 8, 9 及び電極 1 0, 1 1 は、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 のそれぞれの上面 5 a, 6 a に接続されている。

[0023] P 型導体部 5 に接続された電極 1 0 と、N 型導体部 6 に接続された電極 1 1 との間に、一定の逆バイアス電圧を印加し、同時に、交流成分のみを含む電気信号をいずれかの電極に伝搬させることにより、光変調を行うことができる。変調に用いる電気信号は、直流成分を含まず、正負に振動する交流成分のみを含むことが好ましい。電気信号としては、高速動作のためには、例えば 1 G H z から 2 0 G H z 等の高周波信号を用いることが好ましい。

[0024] P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 は、高速動作を阻害する要因である電気抵抗を低減するように、高濃度にドーピングされている。例えば、P 型半導体部 3 及び N 型半導体部 4 におけるドーパント濃度が約  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  であるのに対して、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 におけるドーパント濃度は約  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  である。P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 の各々は、ほぼ等しい値の電気抵抗 R 及びインダクタンス L (図 1 の等価回路を参照) を有する。

[0025] 上述したように、シリコン等の半導体材料を用いた導波路では、例えばフォトリソグラフィを利用して導波路パターンを形成する際に生じ得る、導波路コアの側壁ラフネス（荒れ）により生じる光散乱が、導波路の光損失の大きな要因である。側壁ラフネスによる光損失を低減するには、コア幅を広げることより、コア側壁の位置を導波路の基本モードの中心より離すことが望ましい。

[0026] リブ型導波路の場合、リブ部22が基本モードを伝搬させるコア12の主要部である。このため、リブ部22の幅 $w_{rib}$ が広いほうが、導波路の光損失を低減することができる。例えば、リブ幅 $w_{rib}$ が、500～600 nmであることが好ましい。

表1に、シリコンコアを有するリブ型導波路のリブ幅に対する光損失を示す。

[0027] [表1]

| リブ幅       | 400 nm          | 500 nm          | 600 nm          |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cバンドでの光損失 | 1.07±0.15 dB/cm | 0.74±0.32 dB/cm | 0.57±0.24 dB/cm |
| Lバンドでの光損失 | 0.84±0.14 dB/cm | 0.71±0.32 dB/cm | 0.55±0.25 dB/cm |

[0028] しかしながら、リブ幅 $w_{rib}$ を広げると、導波路コアのリブ部22に高次モードがより強く局在する。つまり、リブ部22は、特定の偏光状態にある基本モード及び高次モードを伝搬可能な断面寸法を有する。基板型光導波路には、基板1、スラブ部23、24等に対して水平なTE成分と、垂直なTM成分とがあるが、一般に、導波に寄与するのはTE成分であり、TM成分の導波モードは寄与しない。これは、TM成分の基本モードの実効屈折率が、TE成分の高次モード（例えばN=2モード）の実効屈折率よりも低いためである。

[0029] 一例として、図5に、いくつかのリブ幅に対する基本モード（N=1）及び高次モード（N=2）のモード計算の結果（強度分布プロファイル）を示す。波長は1550 nm、偏光はTE成分である。コアにおけるシリコンの屈折率を3.5、クラッドにおけるシリカの屈折率を1.45とし、コア底

面からのリブ部の厚さ  $t_{rib}$  は  $220\text{ nm}$ 、側方のスラブ部の厚さ  $t_{slab}$  は  $95\text{ nm}$  とした。

リブ幅  $400\text{ nm}$  では、 $N=2$  の高次モードはスラブ側に局在するため、リブ型導波路は単一モード導波路であるが、表 1 より光損失は高いことがわかる。リブ幅が大きいほど光損失は小さく、しかし高次モードがリブ中央に局在する傾向を有する。リブ幅を最大  $700\text{ nm}$  まで大きくして同様のモード計算を実施したところ、 $N=2$  より高い次数の TE 成分のモードはリブ型導波路を伝搬しないことが確認された。

以下、「基本モード」は TE 成分の  $N=1$  モードを、「高次モード」は TE 成分の  $N=2$  モードを指す。

[0030] そこで、本実施形態の光導波路素子では、高次モードの伝搬による消光比、 $Q$  値等の低下を避けるため、基本モードを減衰させることなく、高次モードを減衰させる部材を設ける。これにより、コア断面の寸法では、高次モードが伝搬可能な多モード導波路でありながら、実質的に、単一モード導波路として機能する光導波路を構成することができる。

具体的には、スラブ部 23, 24 に P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 を設けている。従来技術では、スラブ部と電極との電氣的接続を良好にするため、スラブ部と電極との接続部の周辺にドーパント濃度の高い領域を設ける例がある（例えば特許文献 2 参照）。本発明では、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 の形成範囲をリブ部 22 の近くまで伸ばし、高次モードが伝搬される領域に設けている。

[0031] P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 では、キャリアとして各々正孔及び電子が高密度に分布しているため、自由キャリア吸収により光の減衰が生じる。自由キャリア吸収による光吸収係数は、キャリア密度に比例して増大することが知られている。

上述したように、高次モードはスラブ部 23, 24 にも広がっているため、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 での減衰は、高次モードに対して強く生じる。これにより、高次モードを選択的に減衰させることができる。よって、

本発明によるリブ型導波路は、リブ幅を広げて側壁荒れによる光損失の影響を低減し、かつ基本モードのみが伝搬する単一モード導波路としての透過損失を実現することができる。従って、変調における特性の劣化（例えば強度変調における消光比の低下や、位相変調におけるQ値の低下等）を避けることができる。

[0032] 自由キャリア吸収は、屈折率の変化を引き起こす。これは、一般にプラズマ分散 (plasma dispersion) 等の名称で知られている現象である。シリコン導波路を用いた光変調器では、プラズマ分散により、キャリア密度を高周波電気信号により変化させ、導波路の実効屈折率を高速で変調することができる。

[0033] 本実施形態の光導波路素子では、高周波信号を印加すると、導波路コア12のリブ部22に位置するPN接合13の周辺でキャリア密度が変化する。これにより、導波路の実効屈折率を高速で変調することができる。一方、P型導体部5及びN型導体部6の電気抵抗Rは小さく、P型導体部5及びN型導体部6での電圧降下は小さいので、P型導体部5及びN型導体部6のキャリア密度変化は無視できる。よって、高周波電気信号の印加時でも、時間的な変動がなく、高次モードの減衰を行うことができる。

[0034] リブ幅 $w_{rib}$ に応じて、P型導体部5とN型導体部6との間隔 $w_{PN}$ を最適化することが可能である。例えば、光損失ができるだけ小さくなり、かつ変調における特性（例えば強度変調における消光比や、位相変調におけるQ値等）ができるだけ向上するように、間隔 $w_{PN}$ を調節する。一つの手順を例示すると、強度変調器又は位相変調器を構成して、因子 $I_{ER}/I_{loss}$ 及び $I_{ER}/I_Q$ が最大になるように間隔 $w_{PN}$ を調節することで、間隔 $w_{PN}$ を最適化することが可能である。ここで、 $I_{ER}$ 、 $I_{loss}$ 及び $I_Q$ は、各々dBを単位とする消光比、Q値、光損失を表す。

[0035] 具体例としては、500～600nmのリブ幅 $w_{rib}$ に対して、P型導体部5とN型導体部6との間隔 $w_{PN}$ を約2 $\mu m$ （2000nm）とすることができる。例えば、間隔 $w_{PN}$ を、リブ幅 $w_{rib}$ の2～5倍程度としてもよい。リブ

幅方向（横方向）における間隔 $w_{PN}$ の中点は、概ねリブ部22の中央にある。高次モードの励起を抑圧するためには、PN接合13もおおむねリブ部22の中央に存在することが好ましい。これは、高次モードの電界プロファイルが横方向に非対称であるので、PN接合13の位置がリブ部22の中央からずれて横方向に非対称になるほど、高次モードの励起が容易になるためである。

図1の例では、PN接合13はコアの底面から概ね垂直に形成されている。PN接合をコアの底面に対して傾斜させたり、コアの底面と平行にしたりすることも考えられるが、図1に示すように横向き of PNダイオードが構成されることが望ましい。

また、高次モードの励起を抑圧するためには、P型導体部5及びN型導体部6のドーピング密度（ドーパント濃度）の分布は概ね一様であることが好ましい。ドーピング密度が不均一であると、高速の電気信号を印加した場合に、スラブ部23、24での強度変調により高次モードが励起されて、消光比、Q値等の特性の劣化につながるためである。

[0036] 導波路の作製では、作製精度の制約により位置ずれが存在するため、 $\pm 10\text{ nm}$ オーダーの誤差が存在する。また、各層の膜厚制御において、 $\pm$ 数十 $\text{ nm}$ オーダーの誤差が存在する。導波路の特性を評価するためには、同一の仕様で複数の導波路を用意し、平均値と標準偏差を求めることが望ましい。また、本明細書の記述において、導波路の寸法及び特性については、誤差の記載を省略するが、作製誤差等の誤差を考慮することが望ましい。

例えば、「横方向においてPN接合がリブ部の中央に存在すること」とは、PN接合の位置やリブ部両側の側壁の各々に作製誤差があり、P型半導体部及びN型半導体部のドーパントの添加範囲にも誤差がある。また、リブ部両側の側壁にラフネス（荒れ）も存在することから、長手方向の一定の区間等の基準のもとで平均的な位置において、誤差と同程度、例えば誤差の1倍から3倍程度の範囲内で条件を満たすことが望ましい。また、「横方向において $w_{PN}$ の中点がリブ部の中央に存在すること」についても、 $w_{PN}$ の両端と

なるP型又はN型の導体部と半導体部との境界の位置及びリソ部両側の側壁の位置の各々に誤差があり、同様に誤差を考慮に入れることが望ましい。

#### [0037] (電界プロファイルの計算例)

図6～9に、シリコン導波路の電界プロファイルをモード計算により求めた結果の一例を示す。

シリコン導波路の場合、コアはS<sub>1</sub>、クラッドはS<sub>2</sub>である。コア及びクラッドの材料屈折率は、おのおの3.5及び1.45である。この場合、コアとクラッドとの屈折率差が大きく、高コントラストである。図6及び図7に、 $W_{rib}=500\text{ nm}$ での基本モード( $N=1$ )及び高次モード( $N=2$ )のモード電界の分布を等高線で示す。また、図8及び図9には、スラブ部の厚さ方向の略中間の高さ(図6及び図7の等高線上に矢印Rで示す。)の水平線上に沿った電界プロファイルを示す。横軸に導波路上での位置をとり、縦軸に各々のプロファイルの電界の最大値で規格化した電界をとって表示している。また、図8及び図9では、 $W_{rib}=500\text{ nm}$ 、 $550\text{ nm}$ 、 $600\text{ nm}$ 、 $650\text{ nm}$ 、 $700\text{ nm}$ での電界プロファイルを重ねて表示している。

[0038] 基本モード(図8)では、異なる $W_{rib}$ に対して電界プロファイルはほとんど変化がない。一方、高次モード(図9)では電界プロファイルが大きく変化する。化し、 $W_{rib}$ が広くなるにつれてリソ中央により強く局在する傾向を示す。リソの水平方向での中心点は横軸の2.35  $\mu\text{m}$ に位置する。高次モード減衰がある。基本モードの強度減衰を1%以下にとどめるには、 $W_{PN}$ の最小値は $W_{rib}=500\text{ nm}$ では1500 nm、 $W_{rib}=600\text{ nm}$ では2000 nmである。PN接合への直列抵抗が増すことによる動作速度の低下を避けるには、 $W_{PN}$ が2500 nm以下であることが望ましい。 $W_{rib}=600\text{ nm}$ では、 $W_{PN}$ が2500 nmより広くても高次モード減衰の効果は得られるが、高速動作の向上も加味して、最小値を2000 nmとしてもよい。 $W_{rib}$ が広い方が基本モードの強度減衰を抑えることが容易になる。 $W_{rib}$ が500 nmか

ら600nmまでの間は、 $W_{rib}$ の最小値は線形に変化すると近似できる。

[0039] 比較のため、化合物半導体導波路の場合を同様に計算した。InGaAsP／InP系化合物半導体材料では、コアを $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ （ここで、 $x=0.33$ 、 $y=0.72$ ）、クラッドをInPとする組み合わせが可能である。この組み合わせでは、コアとクラッド間での格子不整合がなく歪の影響を除去できるので、クラッド厚みを500nm以上としてコアへの導波光の閉じ込めを確保できる。コア及びクラッドの材料屈折率は、おのこの3.45及び3.18である。Si系又は $SiO_2$ 系と比較して屈折率コントラストは低い。屈折率コントラストがシリコン系と比較して低いため、高次モードの強度中心は $W_{rib}=1100$ nm程度までスラブ側に局在する傾向を示す。よって、高次モードは伝搬モードとはならず、高次モードを減衰させる必要はない。 $W_{rib}$ が1100nmより広くなると、高次モードの強度中心はリブに局在して伝搬モードとなる。しかし、リブ内に強く局在するため、側方スラブの高ドープ領域における強度減衰の影響は非常に小さく、有効でない。なお、 $W_{rib}$ 以外の寸法はシリコン導波路の場合と同じとしている。GaAs系又はGaAlAs系化合物半導体でも同様の結果である。

よって、本実施形態の光導波路素子において、高次モード減衰による性能向上の効果は高屈折率コントラスト導波路に対して顕著である。特にシリコン系導波路（Siコア・ $SiO_2$ クラッド）に対して効果を発揮する。また、同様にコアとクラッドとの屈折率差（あるいは屈折率比）の大きい導波路でも本実施形態は有効と考えられる。

[0040]（光変調器）

10Gbps以上の高速の強度変調器及び位相変調器に利用可能な光導波路について詳しく説明する。図1の等価回路のように、電気的にはリブ型導波路がLRC直列共振回路となるため、LRC共振による高速性能の劣化を避ける必要がある。そこで、PN接合に一定の逆バイアス電圧を印加し、電気容量Cを低減させてLRC共振周波数を増大させることにより、高速動作させることができる。例えば、約1V以上の一定の逆バイアスを加えると、

L R C共振周波数を約20GHz以上に増大させることができる。逆バイアスを5V程度にすると、L R C共振周波数を約35GHz以上に増大させることができ、100Gbpsのデジタルコヒーレント伝送の位相変調器として利用することができる。同時に、電気容量が低減するため、ゼロバイアス時での40Ω以下という低インピーダンス状態を解消して、導波路のインピーダンスを50Ω以上に増加することができる。これにより、通常50Ωのインピーダンスを有する高速電気回路と導波路とのインピーダンス整合が可能になる。

[0041] 導波路長が3mm以上の場合、出力インピーダンス50Ωを有する電気信号発生器より交流成分のみからなる高速電気信号（出力パワー500～750mW）を、P型導体部に接続された電極、又はN型導体部に接続された電極の、いずれか一方の電極に沿って伝搬させる（他方の電極は接地する）と、位相変調振幅を $\pi$ 以上とすることができ、高い消光比の強度変調や高いQ値の位相変調が可能である。高速電気信号の出力パワーは波長に応じて調節される。光損失の増大や高速電気信号の波形の劣化を避けるには、導波路長は6mm程度又はそれ以下であることが好ましい。

前述のように、光損失を低減するためには、リブ幅 $w_{rib}$ は500nm以上とする必要がある。 $w_{rib}$ が600nmを超えると、高次モードはリブ部により強く局在するので、P型導体部及びN型導体部における高次モードの減衰が不十分となり、消光比やQ値が低減する。よって、リブ幅 $w_{rib}$ は概ね500～600nm以上の範囲にあることが好ましい。

[0042] （矩形導波路）

図1に示すようなリブ型導波路を用いて、光変調器等の光集積回路を構成するためには、リブ型導波路を矩形導波路と接続することが好ましい。図2に、矩形導波路と接続されたリブ型導波路の斜視図を模式的に示す。図2に示す矩形導波路21（図2のA）は、リブ型導波路（図2のC）のリブ部22と同じ幅及び厚さ（図1の $w_{rib}$ 及び $t_{rib}$ を参照）を有する。矩形導波路からリブ型導波路への遷移領域（図2のB）では、スラブ部23、24の幅

がゼロから連続的に変化する部分 25 を有する。遷移領域では、一对のスラブ部 23, 24 の幅が、光の伝搬方向に沿って線形的、あるいは二次関数的に変化することが好ましい。線形的に変化する場合は、設計が容易である。光損失をさらに低減するためには、スラブ部 23, 24 の幅を二次関数的に変化させることが好ましい。

遷移領域 B の長さは、光の波長よりも十分に長くすることが好ましく、特に限定されるものではないが、例えば、 $20\ \mu\text{m}$  程度が挙げられる。

[0043] 矩形導波路は、リブ型導波路と同様に、側壁荒れによる光損失を低減するため、高次モードを伝搬可能な断面寸法を有することが好ましい。従って、矩形導波路の幅をリブ幅と同じにしている。よって、矩形導波路においても高次モードが伝搬するが、矩形導波路を伝搬する高次モードは、上述の原理によりリブ型導波路において減衰させることができる。これにより、単一モード導波路で構成された光集積回路よりも低損失でありながら、消光比等の機能においては、単一モード導波路で構成された光集積回路と同等の性能を有する光集積回路を構成することができる。

[0044] 矩形導波路は、幅が端面（あるいは先端）に向かって徐々に狭くなる逆テーパ型導波路に接続することができる。この場合、逆テーパ型導波路は、幅が広い側の端部が、矩形導波路と接続され、矩形導波路に接続される側から先端に向かって逆テーパ型導波路の幅が狭くなる。逆テーパ型導波路が矩形導波路と接続される端部では、両導波路の幅が一致していてもよい。基板上の導波路を光ファイバと光結合する場合、逆テーパ型導波路の幅の狭い先端を光ファイバに向けて配置する。光結合の相手は光ファイバに限られず、モードフィールド径（MFD）が小さいシリコンコアの導波路を、モードフィールド径が大きい光ファイバ等の他の導波路と光結合する場合に、シリコン導波路の先端に逆テーパ型導波路を設けることが好ましい。矩形導波路や逆テーパ型導波路は、リブ型導波路と同様にシリコン等の半導体材料から構成することができる。矩形導波路や逆テーパ型導波路においては、P 型又は N 型のドーピングをしなくてもよい。

逆テーパー型導波路を用いると、光ファイバと矩形導波路とを光結合する際に、両者の端面の間でのモード不整合を低減し、光結合における損失を低減することができる。モード不整合を低減すると、高次モードの発生を低減でき、完全には除去できない。光集積回路を構成する場合、モード不整合が高次モードの発生の主要因となる。本実施形態によるリゾ型導波路は、高次モードを減衰させるために有効である。

なお、逆テーパー型導波路は、コアサイズを徐々に狭めることでモーフアイドルを拡大するスポットサイズ変換の構造の一例である。コアのサイズの拡大する向きとモーフアイドルのサイズの拡大する向きが逆であるため、「逆テーパー型」と呼ばれる。

[0045] リゾ型導波路及び矩形導波路の厚さがサブミクロンスケールであるので、逆テーパー型導波路の先端部は幅及び端面とも極微細である。よって、逆テーパー型導波路の端面付近において、高屈折率コアの断面積が入射する光に対する逆テーパー型導波路の端面における反射率を約−30dBにまで抑えることができる。その結果、低い光損失、高い消光比のみならず、高いリターンロス(反射損失の少ない) 光集積回路を構成することができる。

[0046] (ツッハーツェンダー型導波路)

本実施形態の光導波路素子は、光分岐・合波部として1×2のマルチモード干渉計(MMI)を用いたツッハーツェンダー型導波路を構成することもできる。図3A、Bに、1×2MMIの模式図を示す。図3Aが平面図、図3Bが斜視図である。MMI30では、片側に1本(符号31)、反対側の2本の矩形導波路32、33が接続されている。矩形導波路31、32、33の幅は、リゾ型導波路のリゾ幅と同じであることが好ましい。具体例としては、リゾ幅600nmに対して、矩形導波路31、32、33の幅を600nm、矩形導波路32、33の間隔を300nm、MMIの幅を1700nm、MMIの長さを2400nmとすることが例示される。この場合、矩形導波路32、33からMMI30の長辺までの間隔は、計算上100nmが確保される。

1×2MMIは、Y字型の光分岐・合波部よりも光損失を低減できるという利点がある一方、高次モードが放射モードではなく伝搬モードになるため、消光比が低下する。本実施形態の光導波路素子では、1×2MMIに入射する高次モードをリブ型光導波路により除去できるため、消光比の低下は解消される。

[0047] 図4にマッハツェンダー型導波路の模式図を示す。マッハツェンダー型導波路34は、2つのMMI30A、30Bの間に2本のアーム部35、36が設けられ、アーム部35、36が、図1に示すようなスラブ部23、24にP型導体部5及びN型導体部6（図1参照）を有するリブ型導波路である構成である。各アーム部35、36とMMI30A、30Bの分岐側の導波路32A、33A、32B、33Bの間は、リブ部22と同じ幅の矩形導波路21で接続されている。MMI30Aの入射側の導波路31A及びMMI30Bの出射側の導波路31Bの先端には、上述した逆テーパ型導波路（図示せず）を設けることもできる。

[0048] MMI30Aに左側の導波路31Aから入射した光は、右側の2本の導波路32A、33Aに分岐され、マッハツェンダー型導波路34のアーム部35、36を伝搬する。逆テーパ型導波路、MMI等で発生した高次モードは、アーム部35、36を伝搬する間に減衰され、消失する。両アーム部35、36から合波側のMMI30Bに左から入射するのは、基本モードのみ可能である。よって、リブ型導波路に高速電気信号を入力することにより、高い消光比で光変調された信号光が合波側のMMI30Bの右側の導波路31Bから出力される。これにより、低い光損失で高い消光比の光変調器に好適なマッハツェンダー型導波路を構成することができる。マッハツェンダー型導波路を用いると、光信号のチャープを制御することができ、長距離伝送に適する高速光変調器を構成することができる。

[0049] 以上、本発明を好適な実施形態に基づいて説明してきたが、本発明は上述の形態例に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の改変が可能である。

例えば、上記マッハツェンダー型導波路を用いた光変調器は、本発明の光導波路素子を用いた光集積回路の一例である。マッハツェンダー型導波路を多段に接続したり、複数のマッハツェンダー型導波路を並列に設けたり、 $N$ が3以上となる $1 \times N$ の光分岐・合波部（例えばMMI）を用いて多ポート光スイッチ等の光集積回路を構成することができる。

[0050] マッハツェンダー型導波路において、両アーム部のリブ型導波路におけるP型導体部及びN型導体部を設ける向き（極性）は特に限定されず、次のいずれでもよい。

- (1) 「P型ーリブ部ーN型ーアーム間の空間ーP型ーリブ部ーN型」
- (2) 「P型ーリブ部ーN型ーアーム間の空間ーN型ーリブ部ーP型」
- (3) 「N型ーリブ部ーP型ーアーム間の空間ーP型ーリブ部ーN型」
- (4) 「N型ーリブ部ーP型ーアーム間の空間ーN型ーリブ部ーP型」

[0051] P型導体部及びN型導体部と電極との間を接続する場合、P型導体部及びN型導体部の側面又は下面を電極に接続することもできる。

光集積回路の基板の面内に光源又は受光器を設け、本発明のリブ型導波路を有する導波路と接続することもできる。

光導波路素子に対して光を入射させ、又は光導波路素子から光を出射させる端部には、図2の矩形導波路21又は図4の導波路31A、31Bの端部に限らず、先端に向かって幅が狭くなる逆テーパ型導波路を接続することが好ましい。

## 実施例

[0052] 以下、実施例により本発明を具体的に説明する。

[0053] 図1に示す構成で、基板1、下部クラッド2、及びコア12の材料としてSOIウェハを用いた。厚さ $2\mu\text{m}$ のシリカからなるBOX層を下部クラッド2とし、その上のシリコンからなるSOI層に対してイオン注入によりP型及びN型のドーパントを添加し、P型半導体部3、N型半導体部4、P型導体部5、N型導体部6を形成した。また、コア12の一部をエッチングにより除去し、リブ部22とスラブ部23、24とを形成した。リブ幅 $w_{rib}$ は

500～600 nm、リブ厚さ  $t_{rib}$  は 220 nm、スラブ厚さ  $t_{slab}$  は 95 nm、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 の間隔  $w_{PN}$  は約 2  $\mu$ m とした。CVD 等により、シリカからなる上部クラッド 7 を 1～2  $\mu$ m 程度の厚さで堆積させた。また、上部クラッド 7 に形成した貫通穴に金属を充填して、P 型導体部 5 及び N 型導体部 6 の上面 5a, 6a に通ずる接続導体部 8, 9 を形成し、さらに上部クラッド 7 の上面に金属の電極 10, 11 を形成した。リブ型導波路の長さは、3～6 mm 程度とした。

電極 10, 11 に 1～5 V 程度の逆バイアス電圧を印加し、同時にいずれかの電極 (Signal 電極) に交流成分のみを含む高周波信号を伝搬させ、他方の電極 (GND) を接地することにより、10～100 Gbps の光ファイバ伝送に好適に利用可能な光変調器を構成した。

### 符号の説明

- [0054]
- |        |             |
|--------|-------------|
| A      | 矩形導波路       |
| B      | 遷移領域        |
| C      | リブ型導波路      |
| 1      | 基板          |
| 2      | 下部クラッド      |
| 3      | P 型半導体部     |
| 4      | N 型半導体部     |
| 5      | P 型導体部      |
| 6      | N 型導体部      |
| 7      | 上部クラッド      |
| 8, 9   | 接続導体部       |
| 10, 11 | 電極          |
| 12     | コア (半導体材料層) |
| 13     | PN 接合       |
| 20     | 光導波路素子      |
| 21     | 矩形導波路       |

- 2 2      リブ部
- 2 3      第 1 スラブ部
- 2 4      第 2 スラブ部
- 2 5      遷移領域のスラブ部
- 3 0, 3 0 A, 3 0 B      1 × 2 光分岐部 (MM I)
- 3 4      マッハ・ツェンダー型導波路
- 3 5, 3 6      アーム部

## 請求の範囲

[請求項1]           リブ部と、前記リブ部を挟むように前記リブ部の両側にそれぞれ接続された、第1スラブ部及び第2スラブ部を含む一対のスラブ部と、を有するコアを有するリブ型導波路を備え、

前記リブ部は、予め定められた単一の偏光状態にある基本モード及び高次モードを伝搬可能な断面寸法を有し、さらに、PN接合を形成する第1P型半導体部及び第1N型半導体部を有し、

前記第1スラブ部は、互いに接続された第2P型半導体部及びP型半導体部を有し、前記第2P型半導体部は、前記リブ部の第1P型半導体部と接続され、

前記第2スラブ部は、互いに接続された第2N型半導体部及びN型半導体部を有し、前記第2N型半導体部は、前記リブ部の第1N型半導体部と接続され、

前記第1及び第2P型半導体部は、P型ドーパントを含有する半導体材料からなり、

前記第1及び第2N型半導体部は、N型ドーパントを含有する半導体材料からなり、

前記P型半導体部は、前記第1及び第2P型半導体部よりも高濃度にP型ドーパントを含有する半導体材料からなり、第1電極と電気的に接続され、前記高次モードが伝搬される領域に配置され、

前記N型半導体部は、前記第1及び第2N型半導体部よりも高濃度にN型ドーパントを含有する半導体材料からなり、第2電極と電気的に接続され、前記高次モードが伝搬される領域に配置されている、光導波路素子。

[請求項2]           前記半導体材料がシリコンである、請求項1に記載の光導波路素子。

[請求項3]           前記コアの周囲に配置され、前記第1及び第2電極が上面に形成されている上部クラッドと、

前記第 1 電極と前記 P 型導体部及び前記第 2 電極と前記 N 型導体部との間を電氣的に接続し、前記上部クラッドを貫通する接続導体部と、

をさらに備える、請求項 1 又は 2 に記載の光導波路素子。

[請求項 4] 前記リブ型導波路の前記リブ部の幅が、500～600 nm である、請求項 1～3 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項 5] 前記リブ部と等しい幅及び厚さを有する矩形コア部を有する矩形導波路と、

前記リブ型導波路の少なくとも 1 つの端と前記矩形導波路とを接続し、前記一对のスラブ部の幅がゼロから連続的に変化する遷移領域を有する、接続部と、

をさらに備える、請求項 1～4 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項 6] 前記遷移領域における前記一对のスラブ部の幅が、光の伝搬方向に沿って線形的に変化する、請求項 5 に記載の光導波路素子。

[請求項 7] 前記遷移領域における前記一对のスラブ部の幅が、光の伝搬方向に沿って二次関数的に変化する、請求項 5 に記載の光導波路素子。

[請求項 8] 前記矩形導波路の前記接続部とは反対側の端部に接続される、先端に向かって幅が狭くなる逆テーパ型導波路をさらに備える、請求項 5～7 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項 9] 2 つの 1×2 光分岐部の間に 2 本のアーム部を有するマッハツェンダー型導波路をさらに備え、

前記 1×2 光分岐部がマルチモード干渉計から構成され、前記 2 本のアーム部のそれぞれが前記リブ型導波路を有し、前記リブ型導波路と前記 1×2 光分岐部との間が前記矩形導波路で接続されている、請求項 5～7 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項 10] 前記光導波路素子に対して光を入射させ、又は前記光導波路素子から光を出射させる端部では、先端に向かって幅が狭くなる逆テーパ型

導波路が矩形導波路の端部に接続される、請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項11]

請求項 1 ～ 10 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子を備え、

前記 P 型導体部に接続された第 1 電極と、前記 N 型導体部に接続された第 2 電極とに、一定の逆バイアス電圧を印加して、交流成分のみを含む電気信号を第 1 電極または第 2 電極いずれかに伝搬させることにより、光変調を行う  
光変調器。