

明 細 書

発明の名称：光導波路素子

技術分野

[0001] 本発明は、モードスプリッタを備える光導波路素子に関する。また、本発明は、マッハツェンダ型光変調器と、モードスプリッタとを備える光導波路素子に関する。

本願は、2012年8月22日に、日本に出願された特願2012-183306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] 光導波路での伝播モードに関して、直交するそれぞれの偏波においてモード数 n を実効屈折率の高い順から $0, 1, 2, \dots$ とするとき、 $n=0$ の伝播モードを基本モードと呼び、その他のモードをそれぞれのモード数 n に対応して n 次モードと呼ぶ。

また、 $n \geq 1$ 以上のモードを総称して高次モードと呼ぶ。

[0003] 近年、シリカ (SiO_2) をクラッドとし、シリコン (Si) をコアとした Si 光導波路は、高い屈折率差 (Si/SiO_2) を利用して光導波路の小型化が可能なこと、及び Si-LSI (大規模集積回路) 用の既存の製造設備を用いて比較的安価に製造できることから、注目と期待を集めている。

光導波路素子では、マルチモード干渉 (Multi-Mode Interferometer: MMI) 型合分波器または Y 型合分波器などの光合分波器 (カプラ・スプリッタ) 等を用いることで、マッハツェンダ (Mach-Zehnder: MZ) 型光変調器が構成される。MZ 型光変調器は、MZ 型導波路に沿って配置され、電圧を印加する変調電極を有する。MZ 型光変調器は、変調電極によって印加される印加電圧によって MZ 型導波路の分岐導波路 (アーム) 間の光位相を変化させ、出射側の合波器における干渉現象を利用して光の ON/OFF を制御している。合波器に入力される基本モードの光は、同位相で入力された場合、2 つの光が合波された光も基本モ

ードとなり、出力導波路に光が導波される（ON状態）。それに対し、2つの光が逆位相となった場合、合波された光は高次モードとなる。一般的なMZ型光変調器では、基本モードのみが導波されるように導波路幅が設定されているので、合波された光は導波路から外に放射される（OFF状態）。

[0004] MZ型光変調器では、合波器で発生した放射モードが基板を伝播して導波モードと結合し、消光比を劣化する問題がある。そこで、このような放射モード光を分離、除去（例えば特許文献1, 2）、または遮断（例えば特許文献3）する手法が知られている。

さらに、MZ型光変調器の分波器においても、高次モード光が混入すると、分岐比が劣化することにより、消光比が劣化する。この問題を解決するために、分波器への高次モードの混入を防ぐ方法として、特許文献4には、 LiNbO_3 等を対象とした導波路において、分波器の前段の導波路幅を細くすることで実効屈折率を低減させ、高次モードを除去することが開示されている。特許文献5には、石英系ガラス導波路を想定して、主導波路に沿ってテーパ構造を有する副導波路を配置し、断熱遷移を利用して高次モードを主導波路から除去することが開示されている。

[0005] Si/SiO_2 導波路に関する従来技術の1つとして、非特許文献1（2.2項、3.2項、Fig. 1、Fig. 4等）には、厚さ200nm、幅400nm、間隔480nmの2つのSi導波路からなる方向性結合器（directional coupler: DC）を利用した偏波モード分離器（Polarization Splitter: PS）により、10 μm ほどの長さで偏波モードの分離が可能であることが開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：日本国特開2011-164388号公報

特許文献2：日本国特開2011-186258号公報

特許文献3：日本国特開2006-301612号公報

特許文献4：日本国特開2011-257634号公報

特許文献5：日本国特開2006-235380号公報

非特許文献

[0007] 非特許文献1：Hiroshi Fukuda, Koji Yamada, Tai Tsuchizawa, Toshifumi Watanabe, Hiroyuki Shinojima, and Sei-ichi Itabashi, “Silicon photonic circuit with polarization diversity”, Optics Express, 2008年、第16巻、第7号、p. 4872-4880

非特許文献2：山内潤治監修、薮哲郎著、“光導波路解析入門”、森北出版株式会社、2007年9月、第四章

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 特許文献1～4では LiNbO_3 または石英系の導波路を用いた導波路を想定しており、導波路は基本モードのみが伝播するように設計されている。これらの構成では、高次モードは放射モードであるから、放射する光を分離、除去、又は遮断する。一方、 Si/SiO_2 導波路の比屈折率差は、 LiNbO_3 または石英系の導波路の比屈折率差に比べて格段に大きい。したがって、 LiNbO_3 または石英系の導波路を用いる場合とは状況が大きく異なり、特許文献1～4の技術を Si/SiO_2 導波路に適用することは困難である。すなわち、 Si/SiO_2 導波路において基本モードのみを導波するためには、例えばクラッドが SiO_2 で Si コアの厚さが220nmの導波路では、コア幅を450nm以下にする必要がある。しかし、導波路幅を小さくすると、エネルギー密度が上昇し、表面粗さの影響が大きくなるため導波路損失が増大する。本発明者らの検討によると、例えば、コア幅が500nmのとき導波路損失は0.16dB/mm程度であるのに対して、コア幅が400nmのとき導波路損失は0.40dB/mm程度となり、コア幅が400nmのときの導波路損失はコア幅が500nmのときの導波路損失の約2.5倍で

ある。つまり、コア幅が狭いほど導波路損失が上昇し、表面粗さに起因する導波路特性の劣化が起こりやすい。

[0009] 導波路内で基本モードのみが導波されるために実効屈折率を低下させるには、導波路幅を変化させることの他に、導波路中の不純物濃度、または導波路深さを変化させることなどが考えられる。しかし、不純物濃度の増加は光損失増加の原因となり、導波路深さを変化させることは製造プロセス上困難である。このように、 Si/SiO_2 導波路において、基本モードのみを導波するには、導波路特性又は製造プロセス上大きな障害を伴う。

[0010] 一方、特許文献5に開示されている技術によれば、断熱遷移による分岐（分波）において高い分岐特性を得るためには、なだらかなテーパ部分が必要になる。非特許文献2の第四章のシミュレーションを参考にすると、断熱遷移による1次モード分岐に必要な分岐部の長さは、波長 λ を単位としておよそ 1000λ である。入射光の波長を $1.55\mu\text{m}$ とすれば、テーパ部分の長さが約 1.5mm 必要になる。特許文献5の実施例1でも、入射光の波長 $1.5\mu\text{m}$ に対して 2mm のテーパ長が必要であることが開示されている。 Si/SiO_2 導波路のような比屈折率差の大きいデバイスは、高い屈折率差を利用した μm オーダーのデバイスによる光デバイスの小型化が大きな優位点であるから、特許文献5のテーパ部分のような mm サイズのデバイスを組み込むことはできない。

さらに、 Si/SiO_2 導波路の製造においても問題がある。特許文献5では基本モード光と1次モード光との分離を断熱遷移で行なうため、2つの導波路間隔は導波路幅に対して極めて小さくする必要がある。例えば、コア幅 500nm の Si/SiO_2 導波路の場合、導波路間隔によっては非常に製造が困難である。同様に、副導波路のテーパ構造をコア幅 500nm の Si/SiO_2 導波路で形成するのは製造上困難であるため、製造コストが大幅に上昇する。

なお、非特許文献1には、偏波モードの分離が可能なデバイスについて開示されているが、モード数 n の異なる伝播モードの分離（例えば基本モード

と高次モードとの分離)が可能なデバイスについては開示されていない。

[0011] 本発明は、上記のような問題に鑑み、モード分離が可能なモードスプリッタを備える光導波路素子を提供することを課題とする。また、2種類以上の伝播モードが導波可能な導波路から構成されたマッハツェンダ型光変調器を備える光導波路素子において、光導波路からモード分離が可能なモードスプリッタを備える光導波路素子を提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明の第1態様に係る光導波路素子は、少なくとも2種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能な主導波路と、方向性結合器を構成するように前記主導波路から一定の距離を空けて前記主導波路と平行に配置された結合部分を有してかつ、前記2種類以上の伝播モードのうち、少なくとも1種類の伝播モードを前記主導波路から分離可能な副導波路を有するモードスプリッタと、を備え、方向性結合器前記主導波路と前記副導波路とを構成する前記コアとクラッドとの屈折率比である n_{core}/n_{clad} が $1.01 \sim 2.50$ %の範囲内である。

前記方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差が、 $\pm 10\%$ 以内であってもよい。

前記方向性結合器における前記主導波路の厚さと前記副導波路の厚さとの差が、 $\pm 10\%$ 以内であってもよい。

前記方向性結合器を構成する前記副導波路が、前記結合部分の前段の端部に連続する開始部分をさらに有し、前記開始部分が前記前段の端部に近づくにつれて前記主導波路になだらかに接近してもよい。

前記副導波路が、前記結合部分の後段の端部に連続する終了部分をさらに有し、前記終了部分が前記後段の端部から離れるにつれて前記主導波路からなだらかに離れてもよい。

前記光導波路素子が、複数の前記モードスプリッタを備え、前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内であり、前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、及び前記

副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で等しくてもよい。

前記光導波路素子が、複数の前記モードスプリッタを備え、前記各々の方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内で前記主導波路と略同一の幅を有しあり、前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、又は前記副導波路が前記主導波路と平行に置かれた前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で異なってもよい。

前記コアの材料がSiであり、前記クラッドの材料が SiO_2 であってもよい。

前記副導波路が、高次モードを前記主導波路から分離させるように構成されていてもよい。

前記光導波路素子が前記副導波路の終了部分の先端に設けられ、不純物を高濃度でドーピングした光吸収層をさらに備えてもよい。

前記副導波路の終了部分の先端に設けられ、受光素子及びこの前記受光素子の電流を取り出すための電気配線をさらに備えてもよい。

[0013] また、本発明の第2態様に係る光導波路素子は、1つの入力光を2つの分波光に分波する分波部と、前記2つの分波光を1つの出力光に合波する合波部と、少なくとも2種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能でかつ、前記入力光と前記分波光と前記出力光とを導波する主導波路と、を有するマッハツェンダ型光変調器と、方向性結合器を構成するように前記主導波路から一定の距離を空けて前記主導波路と平行に配置された結合部分を有してかつ、前記2種類以上の伝播モードのうち、少なくとも1種類の伝播モードを前記主導波路から分離可能な副導波路を有する1以上のモードスプリッタと、を備え、方向性結合器前記主導波路と前記副導波路とを構成するコアとクラッドとの屈折率比である $n_{\text{core}}/n_{\text{clad}}$ が $1.01 \sim 2.50\%$ の範囲内である。

前記方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差が

± 10%以内であってもよい。

前記方向性結合器における前記主導波路の厚さと前記副導波路の厚さの差が、± 10%以内であってもよい。

前記副導波路が、前記結合部分の前段の端部に連続する開始部分をさらに有し、前記開始部分が前記前段の端部に近づくにつれて前記主導波路になだらかに接近してもよい。

前記副導波路が、前記結合部分の後段の端部に連続する終了部分をさらに有し、前記終了部分が前記後段の端部から離れるにつれて前記主導波路からなだらかに離れてもよい。

前記光導波路素子が、複数の前記マッハツェンダ型光変調器を内部に含む1つのマッハツェンダ型干渉計を備えてもよい。

前記光導波路素子が、複数の前記モードプリッタを備え、前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、± 10%以内であり、前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、及び前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で等しくてもよい。

複数の前記モードプリッタを備え、前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、± 10%以内であり、前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、又は前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で異なってもよい。

前記分波部及び前記合波部が、MMI型の光合分波器であってもよい。

前記分波部及び前記合波部が、Y型の光合分波器であってもよい。

前記コアの材料がSiであり、前記クラッドの材料がSiO₂であってもよい。

前記副導波路が、高次モードを前記主導波路から分離させるように構成されていてもよい。

前記光導波路素子が、前記副導波路の終了部分の先端に配置され、不純物を高濃度でドーピングした光吸収層をさらに備えてもよい。

前記副導波路の終了部分の先端に配置され、受光素子及びこの前記受光素子の電流を取り出す電気配線を備えてもよい。

発明の効果

[0014] 上記本発明の態様に係る光導波路素子によれば、モードスプリッタにより、モード分離が可能である。

また、上記本発明の態様に係る光導波路素子によれば、少なくとも２種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能な導波路を構成されるマッハツェンダ型光変調器において、光導波路から、モードスプリッタにより、モード分離が可能である。

図面の簡単な説明

[0015] [図1A]光導波路素子の第１実施形態を示す平面図である。

[図1B]図１ＡのMMI型の光合分波器を示す部分拡大平面図である。

[図1C]図１Ａのモードスプリッタを示す部分拡大平面図である。

[図1D]図１ＣのS－S線に沿う断面図である。

[図2A]モードスプリッタの形態が異なる光導波路素子を示す平面図である。

[図2B]モードスプリッタの形態が異なる光導波路素子を示す平面図である。

[図2C]モードスプリッタの形態が異なる光導波路素子を示す平面図である。

[図3]光導波路素子の第２実施形態を示す平面図である。

[図4]光導波路素子の第３実施形態を示す平面図である。

[図5]光導波路素子の第４実施形態を示す平面図である。

[図6]光導波路素子の第５実施形態を示す平面図である。

[図7]光導波路素子の第６実施形態を示す平面図である。

[図8A]光導波路素子の第７実施形態を示す平面図である。

[図8B]光導波路素子の第８実施形態を示す平面図である。

[図9]光導波路素子の第９実施形態を示す平面図である。

[図10]光導波路素子の第１０実施形態を示す平面図である。

[図11A]基本モードのE×電界の空間分布の一例を示すシミュレーション結果である。

[図11B] 1次モードのE × 電界の空間分布の一例を示すシミュレーション結果である。

[図12] 結合係数と導波路間隔との関係の一例を示すグラフである。

[図13] 結合長と導波路間隔との関係の一例を示すグラフである。

[図14] 複数の導波路間隔における基本モード光の強度と副導波路長との関係の一例を示すグラフである。

[図15] 複数の導波路間隔における1次モード光の強度と副導波路長との関係の一例を示すグラフである。

[図16] 光分波器の直前における1次モード光のパワーの波長依存性の一例を示すグラフである。

[図17] 基本モード光の損失の波長依存性の一例を示すグラフである。

[図18] 1次モードの除去による光分波器の分岐比の変化の一例を示すグラフである。

[図19] 各種のモードスプリッタにおける1次モード光の伝播の様子の一例を示すシミュレーション結果である。

[図20] 複数の曲率半径における分岐比と直線部との関係の一例を示すグラフである。

[図21] 分岐比と曲線部の曲率半径との関係の一例を示すグラフである。

[図22] モードスプリッタにおける基本モード光の伝播の様子の一例を示すシミュレーション結果である。

発明を実施するための形態

[0016] 以下、好適な実施の形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。図1A～図1Dに、本発明の第1実施形態に係る光導波路素子を示す。この光導波路素子10は、図1Dに示すように、基板1上にコア2及びクラッド3を有する光導波路（主導波路及び副導波路）を備える。図1A～図1Cでは、コア2に相当する部分のみを図示し、これを光導波路として説明する。

[0017] 図1Aに示すように、光導波路素子10は、マッハツェンダ型光変調器40を有する。マッハツェンダ型光変調器40は、1つの入力光を2つの出力

光（分波光）に分波する光分波部42と、2つの入力光（分波光）を1つの出力光に合波する光合波部46と、光変調部45を有する。光分波部42の1つの出力光は光変調部45を有する導波路43を介して光合波部46に入力され、光分波部42のもう1つの出力光は光変調部45を有しない導波路44を介して光合波部46に入力される。

光分波部42の前段に設けられる光導波路41から光分波部42に注入された光は2つに分波され、それぞれ別の導波路（アーム）43, 44を伝播する。光変調部45は、一般に位相変調器である。光変調部45を介して伝播された光と光変調部45を介さないで伝播された光とが所定の位相差を有して光合波部46に注入されると、光合波部46で合波された光は位相差に応じて変調される。例えば、光合波部46に注入する2つの光の位相差により光信号のon状態とoff状態との切り替えを制御する。2つの光が同位相で光合波部46に注入された場合、合波された光は後段の光導波路47を基本モードで伝播し、光信号がon状態になる。それに対し、2つの光が逆位相で光合波部46に注入された場合、合波された光は後段の光導波路47に対して1次モードで伝播し、光信号がoff状態になる。導波路（主導波路）41, 43, 44, 47として、マルチモード導波路のようにコア幅の広い導波路を用いると、表面粗さに起因する導波路特性の劣化が起こりにくいので好ましい。

[0018] また、図1A～Dの光導波路素子10は、マッハツェンダ型光変調器40の光合波部46の出力側である後段に設けられたモードスプリッタ20を備える。光合波部46の出力光は、出射側導波路47を介して、モードスプリッタ20に注入される。

マッハツェンダ型光変調器40の光分波部42及び光合波部46を構成する装置は、特に限定されないが、例えばMMI型の分波器もしくは合波器、Y型の分波器もしくは合波器、または方向性結合器等が挙げられる。図1Bに示すMMI（マルチモード干渉）型合分波器14は、所定の長さ L_{MMI} と導波路11, 12, 13の幅よりも広い所定の幅 W_{MMI} とを有する。

導波路 1 1, 1 2 から光を入力した場合、合分波器 1 4 の内部で各入力光をマルチモードで導波して干渉させることにより、各入力光を合波した光を導波路 1 3 から出力する。

また、導波路 1 3 から光を入力した場合、合分波器 1 4 の内部で入力光をマルチモードで導波して干渉させることにより、複数の出力光に分波して導波路 1 1, 1 2 から出力する。導波路 1 1, 1 2, 1 3 として、マルチモード導波路のようにコア幅の広い導波路を用いると、表面粗さによる導波路特性の劣化が起こりにくいので好ましい。

[0019] 図 1 C に示すように、モードスプリッタ 2 0 は、主導波路 2 1 と、主導波路 2 1 から離れて設けられた副導波路 2 2 とを有する。主導波路 2 1 は、少なくとも 2 種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能な導波路であることが望ましい。主導波路 2 1 として、マルチモード導波路のようにコア幅の広い導波路を用いると、表面粗さに起因する導波路特性の劣化が起こりにくい。

副導波路 2 2 は、主導波路 2 1 により導波可能な少なくとも 2 種類以上の伝播次数の異なる伝播モードのうち少なくとも 1 種類以上の伝播次数の異なる伝播モードを主導波路 2 1 から分離させる。そのため、主導波路 2 1 及び副導波路 2 2 は、一定の距離を空けて互いに平行に置かれた結合部分 2 1 b, 2 2 b を有し、これらの結合部分 2 1 b, 2 2 b により長さ L_0 の方向性結合器が構成される。さらに、図示例のモードスプリッタ 2 0 は、方向性結合器を構成する結合部分 2 1 b, 2 2 b の前段の端部に連続する開始部分 2 1 a, 2 2 a では、主導波路 2 1 及び副導波路 2 2 が互いになだらかに接近する構造をもつ。また、モードスプリッタ 2 0 は、結合部分 2 1 b, 2 2 b の後段の端部に連続する終了部分 2 1 c, 2 2 c では、主導波路 2 1 及び副導波路 2 2 が互いになだらかに離れる構造をもつ。副導波路 2 2 は、少なくとも 2 種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能な導波路であってもよい。

[0020] 本発明の第 1 実施形態に係るモードスプリッタについて、モード結合理論

に基づき、説明する。主導波路に近い位置に副導波路を平行に置くことで、方向性結合器を形成することができる。方向性結合器を形成すると、一般に主導波路のどのモードも副導波路のモードと結合する。主導波路のモードから副導波路のモードへの結合の強さは、下式（１）に示す結合係数 χ_{21} で表される。

[0021] [数1]

$$\chi_{21} = C \iint (n_{core}^2 - n_{clad}^2) E_2^* \cdot E_1 dx dy \quad (1)$$

[0022] 式（１）で、 C は規格化定数を含んだ定数であり、 n_{core} はコアの屈折率、 n_{clad} はクラッドの屈折率である。サブスクリプトの１と２とは、それぞれ主導波路及び副導波路の固有モード（ E_1 及び E_2 ）を表している。 x 及び y は導波路の幅方向及び厚さ方向であり、積分範囲は副導波路のコア断面内である。

[0023] 式（１）から分かるように、結合係数の大きさは、主導波路の固有モードの電磁界分布が副導波路のコア断面内にどれだけ広がっているかに依存する。一般に、基本モードと高次モードとを比較すると、基本モードはコアの中央を伝播するのに対し、高次モードは基本モードに比べて導波路の外側を伝播する（例えば、後述する実施例１の図１１Ａ及び図１１Ｂを参照）。そのため、１次モード等の高次モードは、基本モードに比べて、副導波路に結合しやすくなることが予想される。また、一般に、方向性結合器を形成する２つの導波路の間隔（例えば、図１Ｄの間隔 w_0 を参照）を広げていくと、基本モードと高次モードとは共に結合係数が小さくなるが、基本モードの結合係数は、１次モード等の高次モードの結合係数に比べて急激に減少する（例えば、後述する実施例１の図１２を参照）。

そのため、方向性結合器を形成する２つの導波路の間隔を適切に選ぶことにより、主導波路で導波可能な２種類以上の伝播モードの間で、結合係数 χ_2

β_1 の違いを十分に大きくすることができる。

[0024] 上述の式(1)によれば、コアの屈折率 n_{core} 及びクラッドの屈折率 n_{clad} に対して、結合係数 χ_{21} は $n_{core}^2 - n_{clad}^2$ に比例する。このため、モード間の結合係数の差を大きくするためには、屈折率差の大きい導波路構造を採用することが好ましい。例えば、 n_{core}/n_{clad} が 1.01 ~ 2.50% の範囲内であることが好ましい。

例えば、コアの材料が Si (屈折率 3.475 程度) であり、クラッドの材料が SiO_2 (屈折率 1.444 程度) の場合、SOI (Silicon On Insulator) 基板などの半導体向け材料を導波路材料に用いることができるので好ましい。

コアの材料としては、 SiO_x (屈折率 1.47)、SiON、SiN、または非シリコン系の半導体材料 (化合物半導体) などが挙げられる。

[0025] 方向性結合器では、2つの導波路構造 (材料、寸法、及び形状等) が完全に対称的であれば、最大パワー移行率は 100% である。逆に 2つの導波路構造が異なり、モードの伝播定数が異なる場合、最大パワー移行率は 100% より小さい。よって、1次モード等の高次モードを主導波路から副導波路へ効率よく移行させる場合、主導波路と副導波路との導波路構造 (材料、寸法、及び形状等) をなるべく同じにすることが望ましい。例えば、主導波路の幅と副導波路の幅 (例えば、図 1D の幅 w_1 及び w_2 を参照) が、略同一であることが好ましい。例えば Si 光導波路では、安価に製造するため、KrF (248 nm) を光源とする旧世代の露光機も用いられる。一般的な導波路コアの形成方法においては、露光マスクのアラインメント精度、またはエッチング精度等を起因とする誤差が生じるおそれがある。そこで、テーパ形状等 (従来技術を参照。) の意図的な導波路幅 (コア幅) の変更がない場合、例えば主導波路の幅と副導波路の幅との差が $\pm 10\%$ 以内であることが好ましい。

同様に、主導波路の厚さと副導波路の厚さとの差が、例えば $\pm 10\%$ 以内であることが好ましい。

[0026] 方向性結合器において、主導波路から副導波路へのパワーの移行が最大になるまでに要する方向性結合器の長さは結合長と呼ばれる。結合長は、結合係数 χ_{21} の強さに依存する。一般に、結合係数 χ_{21} が小さいほど、結合長は長くなる（例えば、後述する実施例 1 の図 12 と図 13 とを参照）。

例えば、基本モードの結合長が高次モードの結合長よりも十分長くなる条件下で、方向性結合器の長さを短くし（例えば方向性結合器の長さを高次モードの結合長と同程度又はそれ以下とする）、かつ基本モードの移行の割合が小さいまま、高次モードの移行の割合を十分に大きくすると、特定の高次モード（例えば 1 次モード）を主導波路から副導波路に分離させることが可能な構造のモードスプリッタを実現することができる。

方向性結合器の長さが高次モードの結合長よりも長い場合、高次モードが主導波路と副導波路との間を交互に移行する。そこで、例えば、方向性結合器の長さを基本モードの結合長と同程度とし、かつ高次モードが副導波路に移行している割合を小さくした場合には、基本モードを主導波路から副導波路に分離させることが可能な構造のモードスプリッタとなると考えられる。

[0027] モードスプリッタが、少なくとも基本モードと 1 次モードを伝播可能な主導波路に対して、副導波路が 1 次モードを主導波路から分離させる構造である場合、小型化も容易であり、好ましい。この場合、合波器後の主導波路に近い位置に、主導波路と平行に、主導波路と略同一の幅を有する副導波路を配置して方向性結合器を形成する。さらに、基本モード光と高次モード光との間で結合定数が著しく異なることを利用して、方向性結合器の長さ及び主導波路と副導波路との間隔を適切に設定する。それにより、基本モード光の損失を抑えたまま、高次モード光のみを主導波路から副導波路に分離させることができ、基本モード光のみを出力する合波器を構成することができる。

また、詳しくは後述するが、図 3 及び図 4 に示すように、分波器へつながる主導波路に近い位置に、主導波路と平行に、主導波路と略同一の幅を有する副導波路を配置して方向性結合器を形成する。さらに、基本モード光と高次モード光との間で結合定数が著しく異なることを利用して、方向性結合器

の長さ及び主導波路と副導波路との間隔を適切に設定する。それにより、基本モード光の損失を抑えたまま、高次モード光のみを主導波路から副導波路に分離させることができ、分波器に注入する光から、高次モード光のみを除去し、又は減少させ、分岐比の劣化を抑制することができる。

[0028] 以上、本発明を好適な実施の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。

図2Aに示す光導波路素子のモードスプリッタ20Aにおいて、副導波路は、方向性結合器を構成する部分である結合部分22bと、結合部分22bで分離したモードの光を取り出す終了部分22cを有するが、副導波路が主導波路になだらかに接近する構造の開始部分（図1Cの符号22a）を有さない。

図2Bに示す光導波路素子のモードスプリッタ30において、主導波路は、開始部分31aから結合部分31bを経て終了部分31cに至るまで全体が直線状である。

モードスプリッタ30の副導波路は、副導波路が主導波路になだらかに接近する構造の開始部分32aと、方向性結合器を構成する部分である結合部分32bと、結合部分32bで分離したモードの光を取り出す終了部分32cとを有する。

図2Cに示す光導波路素子のモードスプリッタ30Aにおいて、主導波路は、開始部分31aから結合部分31bを経て終了部分31cに至るまで全体が直線状である。モードスプリッタ30Aの副導波路は、方向性結合器を構成する部分である結合部分32bと、結合部分32bで分離したモードの光を取り出す終了部分32cとを有するが、副導波路が主導波路になだらかに接近する構造の開始部分（図2Bの符号32a）を有しない。

なお、後述する第2～第10実施形態等、他の実施形態においても、各モードスプリッタとして、図2A～図2Cに示す上述のモードスプリッタ20A、30、30Aと同様の装置を用いてよい。図2B及び図2Cでは、主導

波路 2 1 を直線とし、副導波路 2 2 を曲線とした。一方、主導波路 2 1 を曲線とし、副導波路 2 2 を直線とすることもできる。

[0029] 主導波路と副導波路との対称性の観点から、少なくとも方向性結合器に近い位置において、図 1 C に示すように、主導波路と副導波路とが対称的な平面形状を有することが好ましい。主導波路と副導波路との対称性の影響については、後述の実施例 2（特に図 1 9 の（a）及び図 1 9 の（b）の比較）において有限差分時間領域（Finite-Difference Time Domain: FDTD）法による電磁界シミュレーションにより比較検討されている。図 2 C に示す光導波路素子のモードスプリッタ 3 0 A の主導波路の終了部分 3 1 c を副導波路の終了部分 3 2 c と同様の曲げ構造で曲げることにより図 2 A に示す対称性を有するモードスプリッタ 2 0 A が得られる。同様に、図 2 B に示す光導波路素子のモードスプリッタ 3 0 の主導波路の開始部分 3 1 a を副導波路の開始部分 3 2 a と同様の曲げ構造で曲げ、主導波路の終了部分 3 1 c を副導波路の終了部分 3 2 c と同様の曲げ構造で曲げることにより図 1 C に示す対称性を有するモードスプリッタ 2 0 が得られる。

図 1 C のモードスプリッタ 2 0 では、方向性結合器を構成する結合部分 2 1 b、2 2 b の中間線を対称中心線（対称軸）として、主導波路の開始部分 2 1 a 及び副導波路の開始部分 2 2 a と、主導波路の結合部分 2 1 b 及び副導波路の結合部分 2 2 b と、主導波路の終了部分 2 1 c 及び副導波路の終了部分 2 2 c とがそれぞれ対称になるように設けられる。主導波路の曲線部分（2 1 a、2 1 c）の曲率半径が、副導波路の曲線部分（2 2 a、2 2 c）の曲率半径と等しいか、主導波路の曲率半径が副導波路の曲率半径より大きいか、主導波路の曲線部分（2 1 a、2 1 c）の曲率半径が副導波路の曲線部分（2 2 a、2 2 c）の曲率半径より小さいかは、適宜選択可能である。

主導波路と副導波路との間隔が十分に離れた箇所では、基板上で所望の配置をとるように導波路を延ばしたり、曲げたりすることができる。また、導波路の向き及び長さ等を自由に設定できる。主導波路及び副導波路の幅は、

方向性結合器に近い位置だけでなく、全体的に略同一の幅にすることもできる。

[0030] 副導波路が主導波路の基本モードに及ぼす影響は小さいが、副導波路が主導波路になだらかに接近する構造の開始部分を有する場合、損失をさらに低減することができ、好ましい。副導波路が主導波路の基本モードに及ぼす影響については後述の実施例2（特に図19の（b）及び図19の（c）の比較）においてFDTD法（上述）による電磁界シミュレーションにより比較検討されている。図2Cに示す光導波路素子のモードスプリッタ30Aの副導波路の開始部分を副導波路の終了部分32cと同様の曲げ構造で曲げることにより図2Bに示すなだらかな接近部分を有するモードスプリッタ30が得られる。同様に、図2Aに示す光導波路素子のモードスプリッタ20Aの副導波路の開始部分を副導波路の終了部分22cと同様の曲げ構造で曲げることにより図1Aに示すなだらかな接近部分を有するモードスプリッタ20が得られる。主導波路を通る光は、その近くに副導波路が不連続的に出現すると、光の反射または擾乱が発生しやすく、光の損失が増える。副導波路が主導波路になだらかに接近することで、これらの損失をさらに低下することができる。

同様に、副導波路が主導波路からなだらかに離れる構造の終了部分を有する場合、光の損失をさらに低減することができ、好ましい。

主導波路と副導波路とがなだらかに接近、又は離れる構造は、円弧、橢円弧、放物線、双曲線などの曲線に沿って構成されることが好ましい。曲線の曲率半径は、例えば $10\mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。直線の曲率半径は ∞ であることから、直線部と曲線部とが連続的に接続するための曲率半径に特に上限はないが、直線部に近接する曲線部の曲率半径として、例えば数十～数百 μm が挙げられる。

図1Cのモードスプリッタ20では、方向性結合器を構成する結合部分21b、22bに垂直な二等分線を対称中心線（対称軸）として、主導波路の開始部分21a及び主導波路の終了部分21cと、副導波路の開始部分22

a 及び副導波路の終了部分 22c とがそれぞれ対称となるように設けられている。開始部分の曲率半径が、終了部分の曲率半径と等しいか、開始部分の曲率半径が終了部分の曲率半径より大きいのか、開始部分の曲率半径が終了部分の曲率半径より小さいかは、適宜選択可能である。

[0031] 図 3 に、光導波路素子の第 2 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、ツッハツエント型光変調器 40 の光分波部 42 の前段の光導波路 41 にもモードスプリッタ 20 の主導波路 21 が接続されている。光分波部 42 に光が入力される前に 1 次モード光を副導波路 22 へ分離することにより、ツッハツエント型光変調器 40 の消光比の劣化を抑制することができる。

[0032] 図 4 に、光導波路素子の第 3 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、ツッハツエント型光変調器 40 の光分波部 42 の前段の光導波路 41 のみにモードスプリッタ 20 の主導波路 21 が接続されている。光分波部 42 に光が入力される前に 1 次モード光を副導波路 22 へ分離することにより、ツッハツエント型光変調器 40 の消光比の劣化を抑制することができる。

[0033] 図 5 に、光導波路素子の第 4 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、ツッハツエント型光変調器 40 の内部（光分波部 42 と光合波部 46 との間）の導波路 43、44 にもモードスプリッタ 20 の主導波路 21 が接続されている。光合波部 46 に光が入力される前に 1 次モード光を副導波路 22 へ分離することにより、ツッハツエント型光変調器 40 の消光比の劣化を抑制することができる。

[0034] 図 6 に、光導波路素子の第 5 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、ツッハツエント型光変調器 40 の光合波部 46 の後段に設けられたモードスプリッタ 20 の副導波路 22 の終了部分の先端に、不純物を高濃度でドーピングした光吸収層 23 を備える。光吸収層 23 で高次モード光を吸収することにより、高次モード光が主導波路 21 に再結合することを防ぐことができる。

モードプリッタ 20 が光分波部 42 の前段に設けられた場合（図 3，4 参照）、またはマッハツェンダ型光変調器 40 の内部の導波路 43，44 に設けられた場合（図 5 参照）等、他の実施形態においても、副導波路 22 の終了部分の先端に、光吸収層 23 を設けてもよい。

[0035] 図 7 に、光導波路素子の第 6 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、マッハツェンダ型光変調器 40 の光合波部 46 の後段に設けられたモードプリッタ 20 の副導波路 22 の終了部分 22c の先端部 22d に、受光素子（PD: Photo Detector）24 及び PD 24 の電流を取り出すための電気配線 25 を備える。PD 24 の設置により、副導波路 22 に分岐する高次モードの光の光量をモニタリングすることができる。このモニタリングにより、例えば経年劣化、または駆動中の温度等の環境変化による動作のずれを検出することができる。

モードプリッタ 20 が光分波部 42 の前段に設けられた場合（図 3，4 参照）、またはモードプリッタ 20 がマッハツェンダ型光変調器 40 の内部の導波路 43，44 に設けられた場合（図 5 参照）等、他の実施形態においても、副導波路 22 の終了部分 22c の先端に、PD 24 及び電気配線 25 を設けてもよい。マッハツェンダ型光変調器 40 においては、PD 24 を用いてモニタリングした結果を用いて、制御部により、光変調部 45 の動作条件（例えば電気制御の場合は印加電圧など）を調整してフィードバックすることができる。

PD は、基板上に配置することが好ましいため、PD を基板上に実装してもよい。半導体基板を用いた場合には、PD を半導体素子として、光導波路と同一の基板上に集積することもできる。 Si/SiO_2 導波路を有する Si 基板上に集積可能な PD としては、例えばゲルマニウム（Ge）PD 等の III-V 族半導体 PD、インジウムリン（InP）系の PD 等、またはガリウム砒素（GaAs）等の III-V 族化合物半導体 PD が挙げられる。

電気配線 25 は、例えば基板上に（必要であれば絶縁層を介して）、1 つの PD 24 につき平行に 2 本設けるなど、PD 24 に必要な本数設けること

ができる。

図 7 に示す例では、副導波路 2 2 と主導波路 2 1 とが互いになだらかに離れる構造の終了部分 2 1 c, 2 2 c を有する。副導波路の終了部分 2 2 c の先端部 2 2 d の曲率半径は、PD 2 4 に向かって徐々に増大し、最終的には直線状となった導波路が PD 2 4 に接続されている。

[0036] モニター PD への導波光を増大するために、副導波路の終了部分 2 2 c での曲率半径を大きくすることで、副導波路の終了部分 2 2 c での高次モード光の曲げ損失を低減させることができる。特に曲げ損失を完全になくすためには、主導波路 2 1 の終了部分 2 1 c の曲線部を残したまま副導波路の終了部分 2 2 c を直線とすることで可能となる。この場合、方向性結合器が対称性を持たなくなり主導波路 2 1 の高次モードの除去率は下がるが、分離した高次モード光の曲げ損失を低下することが可能である。この場合、副導波路の開始部分 2 2 a は図 7 に示したように曲げたまま、終了部分 2 2 c を、結合部分 2 2 b の延長線上に延ばしてもよい。また、副導波路の終了部分 2 2 c のうち、結合部分 2 2 b に近い部分は主導波路 2 1 からある程度離れるまで曲げ、主導波路 2 1 からある程度離れた先は PD 2 4 まで直線とする（結合部分 2 2 b の延長線に対して傾斜させる）ことも可能である。

[0037] 図 6 及び図 7 に示すように、副導波路 2 2 の終了部分に、光吸収層 2 3 又は PD 2 4 を設ける場合、副導波路 2 2 の終了部分は、光吸収層 2 3 又は PD 2 4 に至るまで、略同一の幅で形成されることが好ましい。これにより、光吸収層 2 3 又は PD 2 4 を基板上で所望の位置に配置できる上、副導波路 2 2 に分岐された高次モード光が、副導波路 2 2 から基板内に漏れることを抑制できる。

図 3、図 5、図 8 A、図 8 B、図 9 に示すように、光導波路素子が 2 本以上の副導波路 2 2 を有する場合、少なくとも 1 本以上の副導波路 2 2 の終了部分の先端に、光吸収層 2 3 又は PD 2 4 を設けることができる。いずれかの副導波路 2 2 の終了部分の先端に光吸収層 2 3 を設け、さらに別の副導波路 2 2 の終了部分の先端に PD 2 4 を設ける等、任意に設計することが可能

である。

[0038] 図8Aに、光導波路素子の第7実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、光合波部46の後段において、副導波路22が主導波路21の長手方向の異なる位置に2本以上あり、各々の副導波路22の幅は、主導波路21の幅との差が $\pm 10\%$ 以内であり、主導波路21の幅と略同一である。副導波路22と主導波路21との間隔（図1Dの間隔 w_0 ）、及び副導波路22が主導波路21と平行に置かれた部分の長さ（図1Cの結合部分21b, 22bの長さ L_0 ）が等しく、各副導波路22が主導波路21に沿った部分に、同等の波長特性を有するモードスプリッタ20が構成される。これにより、副導波路22に分離すべき光（例えば1次モード光）の除去率を高めることができる。

[0039] 図8Bに、光導波路素子の第8実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子では、光合波部46の後段において、副導波路22が主導波路21の長手方向の異なる位置に2本以上設けられ、各々の副導波路22の幅は、主導波路21の幅との差が $\pm 10\%$ 以内であり、主導波路21の幅と略同一である。副導波路22と主導波路21との間隔、または副導波路22が主導波路21と平行に置かれた部分の長さ等が異なり、各副導波路22が主導波路21に沿った部分に、異なる波長特性を有するモードスプリッタ20, 200がそれぞれ形成される。これにより、副導波路22に分離すべき光（例えば1次モード光）の除去される波長帯域を広げることができる。例えば、図8Bの例では、モードスプリッタ200はモードスプリッタ20と比べて、副導波路22と主導波路21との間隔を広くしているが、本発明は特にこれに限定されない。

[0040] 図8A及び図8Bに示す例では、光合波部46の後段において、副導波路22が主導波路21の長手方向の異なる位置に2本以上設けられる。しかしながら、光分波部42の前段にモードスプリッタ20を設ける場合（図3, 4参照）、またはマッハツェンダ型光変調器40の内部の導波路43, 44にモードスプリッタ20を設ける場合（図5参照）等、他の実施形態でも同

様に、副導波路 22 を主導波路 21 の長手方向の異なる位置に 2 本以上設けることができる。その場合も、各々の副導波路 22 の幅は、主導波路 21 の幅と $\pm 10\%$ 以内の差であることが好ましい。同等の波長特性を有する複数のモードスプリッタ 20 を構成した場合、副導波路 22 に分離すべき光（例えば 1 次モード光）の除去率を高めることができる。異なる波長特性を有する複数のモードスプリッタ 20、200 を構成した場合、副導波路 22 に除去される波長帯域を広げることができる。

[0041] 図 9 に、光導波路素子の第 9 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子は、複数のマッハツェンダ型光変調器 40A、40B を有する。これらのマッハツェンダ型光変調器 40A、40B では、光導波路素子は、複数のマッハツェンダ型光変調器 40A、40B を有する。これらのマッハツェンダ型光変調器 40A、40B の前段に 1×2 （1 入力 2 出力）の光分波部 48 を配置して、光分波部 48 に注入された光は 2 つに分波され、それぞれ別のマッハツェンダ型光変調器 40A、40B に注入される。さらに、マッハツェンダ型光変調器 40A、40B の後段に 2×1 （2 入力 1 出力）の光合波部 49 を配置して、それぞれのマッハツェンダ型光変調器 40A、40B の主力を合波して出力することができる。このように、光分波部 48 と光合波部 49 とで構成される 1 つのマッハツェンダ型干渉計の内部に複数のマッハツェンダ型光変調器 40A、40B が含まれる構成にも、本発明の上記各実施形態に係るモードスプリッタ 20 を設けることができる。

[0042] 図 10 に、光導波路素子の第 10 実施形態を示す。本実施形態に係る光導波路素子 100 では、マッハツェンダ型光変調器 400 の光分波部 42 及び光合波部 46 に用いる合分波器として、Y 型合分波器 15 を有するほかは、図 1A の光導波路素子 10 と同様に構成される。また、図 2A～図 9 に示す光導波路素子等、他の実施形態においても、MMI 型合分波器 14 の代わりに Y 型合分波器 15 を用いることができる。

実施例

[0043] 以下、実施例を用いて本発明を具体的に説明する。なお、本発明は、これ

らの実施例のみに限定されるものではない。

[0044] <実施例 1>

光導波路と光分波部及び光合波部とにおいて、クラッド領域は S_1 、 O_2 で、

コア領域は S_1 でそれぞれ形成した。

導波路コア領域の厚さ (図 1D の t_0 参照) は 220 nm とし、導波路コア領域の幅 (図 1D の w_1 及び w_2 参照) は 500 nm とした。コアの上下には光がそれぞれ基板及び空気に触れないようにクラッドを設けた。クラッドの厚さ (図 1D の t_1 及び t_2 参照) はコアの上下にそれぞれ $2\text{ }\mu\text{ m}$ とした。クラッドは、コアの側方及び導波路間にも形成した。

[0045] 上記光導波路を 1 本単独に配置したときの、基本モード及び 1 次モードの

電磁界分布をシミュレーションにより解析した。電磁界分布の解析結果を図 11A 及び図 11B に示す。図 11A に示す基本モードはコアの中央を伝播するのに対し、図 11B に示す高次モードは基本モードに比べて導波路の外側を伝播することが分かった。

[0046] スワップエンタ型光変調器の光合波部及び光分波部には MM1 合分波器を

用いた。MM1 合分波器の幅 (図 1B の W_{MM1} 参照) は $1.5\text{ }\mu\text{ m}$ で、長さ (図 1B の L_{MM1} 参照) は $1.7 \sim 1.9\text{ }\mu\text{ m}$ とした。また、MM1 分波器の一端には 1 本の導波路を結合し、他端には、2 本の導波路を結合した。

光分波部の前段 (入射側) の導波路を主導波路とし、これと平行に、かつ間隔を空けて副導波路を置いた。副導波路への最大移行パワーをできる限り 100% に近づけるため、副導波路の導波路幅は主導波路と同じ幅にした。主導波路と副導波路との間隔 (導波路間隔) は、近すぎると主導波路から副導波路への基本モードの結合が強くなってしまい、基本モード光の損失が増大する。逆に副導波路を主導波路から離しすぎると、主導波路から副導波路への 1 次モードの結合が弱くなり、非常に長い副導波路長が必要になる。

[0047] 導波路間隔を求めるため、上記光導波路を 2 本配置した方向性結合器について、有限要素法によるモード解析の結果から結合係数を算出し、さらに、その結合係数から結合長を計算した。導波路間隔は、 $0.15 \sim 0.85\text{ }\mu\text{ m}$

mの範囲内で0.05 μm ごとに設定した。なお、この設定は、図12～15のすべてのモード解析に適用した。

結合係数と導波路間隔との関係を求めた結果を図12に示す。導波路間隔を広げていくと、基本モードと1次モードの結合係数 χ は共に小さくなっていくが、基本モードの結合係数 χ の減少が、1次モードの結合係数 χ の減少に比べて急であることが分かった。

また、結合長と導波路間隔との関係を求めた結果を図13に示す。導波路間隔を0.5 μm とすると、基本モードの結合長は504 μm であるが、1次モードの結合長は16 μm であった。導波路間隔によって、基本モード及び1次モードの結合効率及び結合長が決まるので、副導波路が主導波路に沿って平行となる部分の長さ（副導波路長）を1次モードの結合長と等しくした。主導波路と副導波路とが対称的であると仮定すると、副導波路長を1次モードの結合長と等しくすれば、1次モード光を100%副導波路に移行させることができる。また、このとき基本モード光が副導波路に移行する割合は、 $\sin^2(\pi/2 \times 16/504) = 0.0025$ 、すなわち0.25%の移行にとどまる。すなわち、この場合、0.01 dBの基本モード光の損失で、1次モードを完全に分離することができる。

[0048] さらに上述の副導波路長（bypass length）について検討するため、有限差分時間領域（Finite-Difference Time Domain: FDTD）法による電磁界シミュレーションを行った。光の波長は、光通信で一般的に用いられる1.55 μm とした。主導波路は直線状とし、副導波路には曲げ部を設けた。図14～15において、各データ系列（マーカー付き折れ線）と導波路間隔（0.15～0.85 μm ）との対応はグラフ右側の枠中に示す。

[0049] MMI型分波器の前段のモードスプリッタに基本モード光が注入される場合を想定し、複数の導波路間隔における基本モード光の強度と副導波路長との関係を求めた。その結果を図14に示す。なお、図14及び後述の図15では、右の枠内に表示される数値が導波路間隔（ μm ）を示している。この

結果から、導波路間隔が $0.4\ \mu\text{m}$ 以下では基本モードが副導波路へ強く結合し、大きな導波路損失を生じていることが分かった。

[0050] 逆に、MMI型分波器の前段のモードスプリッタに1次モード光が注入される場合を想定し、複数の導波路間隔における1次モード光の強度と副導波路長との関係を求めた。その結果を図15に示す。この結果から、導波路間隔が狭いと、結合係数が大きく、短い副導波路長で光の最大移行点を迎え、その後、副導波路から主導波路へ光が戻ってきていることが分かる。

図15から確認される1次モードの結合長は、有限要素法で計算した図13に示す結合長とほぼ一致する。

副導波路長が短い場合に最大パワー移行効率が小さいのは、副導波路の開始点と終点での非対称性が影響しているためと考えられる。導波路間隔が広いと、結合が小さくなり、副導波路長を長くしないと副導波路への移行が見られない。

[0051] 上述したように、導波路間隔が $0.4\ \mu\text{m}$ 以下では基本モード光の損失が大きいので、導波路間隔は $0.4\ \mu\text{m}$ より大きいことが好ましいと考えられる。

そこで、実施例1では、導波路間隔（図1Dの w_0 参照）を $0.5\ \mu\text{m}$ （ $500\ \text{nm}$ ）、副導波路長を $16\ \mu\text{m}$ とした。1次モード光を注入したときは、副導波路に移行した光に対して主導波路に残った光は $-12.5\ \text{dB}$ であった。また、基本モード光を注入したときは、主導波路に残った光に対して副導波路に移行した光は $-25\ \text{dB}$ であった。

[0052] 実施例1の光分波器では、前段のモードスプリッタとして方向性結合器を用いているため、波長変化による特性の変化を検証した。上述の条件下（導波路間隔 $0.5\ \mu\text{m}$ 、副導波路長 $16\ \mu\text{m}$ ）で入射波長を変化させ、光分波器の直前における1次モード光のパワーの波長依存性を計算した。その結果（波長 $1.53\sim 1.61\ \mu\text{m}$ ）を図16に示す。長波長側で、副導波路による1次モード光の除去率の低下が見られるが、それでも $-18\ \text{dB}$ 以下になるまで1次モード光を除去しており、C-band及びL-bandの

全域で 1 次モード光の除去効果があることが分かった。

さらに、実施例 1 で副導波路を設けたことによる基本モード光の損失 (Loss) を計算した。その結果 (波長 $1.53 \sim 1.61 \mu\text{m}$) を図 17 に示す。基本モード光の損失は、C-band 及び L-band の全域で 0.016 dB 以下であり、実用上問題にならないと考えられる。

[0053] 副導波路に移行した 1 次モード光が再度主導波路に戻らないように、副導波路の終了部分に、主導波路からなだらかに離れる曲げ部を設けた。曲げ部の曲率半径が小さいと 1 次モード光が副導波路から漏れてしまい、クラッドを経て主導波路と再結合する可能性がある。

そこで、1 次モード光の漏れが少なくなるように、曲げ部の曲率半径を $100 \mu\text{m}$ とした。

[0054] 1 次モードの除去による MMI 型分波器の分岐比の変化を、FDTD 法 (上述) による電磁界シミュレーションによって検討した。まず、基本モード光と 1 次モード光を種々の比率で MMI 型分波器に混入した場合の分岐比の変化の様子を図 18 のグラフに示す。

モードスプリッタがない MMI 型分波器の場合、わずか 2% 1 次モード光が混入することにより、分波器から右側のアームに対して左側のアームのパワーは -2.77 dB となった。

一方、実施例 1 で最適化したモードスプリッタ (導波路間隔 $0.5 \mu\text{m}$ 、副導波路長 $16 \mu\text{m}$) をもつ場合、両アームでの分岐比は 0.24 dB まで改善された。このようなモードスプリッタの有無による分岐比の違いは、消光比の低下を MMI 光分波器の分岐比不均等だけが原因と考えれば、消光比が 5.58 dB から 15.5 dB に改善されたことを意味する。したがって、マッハツェンダ型光変調器の分波部の前段にモードスプリッタを設けることにより、分岐比の大幅な改善が期待できる。

[0055] <実施例 2>

実施例 2 においても、実施例 1 と同様の光導波路構造を採用した。具体的には、クラッドの材料が SiO_2 、コアの材料が Si 、コアの厚さが 220 nm

m、コアの幅（導波路幅）が500 nm、クラッドの厚さがコアの上下にそれぞれ2 μ mである。

[0056] モードスプリッタの平面形状について、FDTD法（上述）による電磁界シミュレーションによって検討した。まず、モードスプリッタに1次モード光を注入した場合の光の伝播の様子を図19に示す。図19の（a）は、主導波路（図中の左側）が直線状で、副導波路（図中の右側）がその終点側で副導波路が主導波路からなだらかに離れる構造をもつモードスプリッタを示す。図19の（b）は、主導波路及び副導波路がそれぞれの終点側で相手側からなだらかに離れる構造をもつモードスプリッタを示す。図19の（c）は、主導波路及び副導波路が、それぞれの開始側では相手側になだらかに接近する構造をもち、それぞれの終点側では相手側からなだらかに離れる構造をもつモードスプリッタを示す。

いずれも1次モード光が副導波路に移行するが、詳しくは後述するように、図19の（a）で主導波路に残る1次モード光が若干ながら認められる。図19の（b）では主導波路に残る1次モード光は僅かであり、図19の（c）では主導波路に残る1次モード光は全く確認できない。

[0057] 図20に、図19の（c）に示される構造で、主導波路と副導波路とが平行に沿う直線部の長さに対して、分岐比がどのように変化するかを検討した結果を示す。ここでの分岐比とは、副導波路に移行する1次モード光のパワーと主導波路に残留する1次モード光のパワーとの比をデシベル（dB）表示にした値をいう。

方向性結合器となる直線部の前後に設けられる曲げ部の曲率半径は、40 μ m、60 μ m、100 μ mの3種類とした。それぞれ、図20のグラフ中では、「R=40」、「R=60」、「R=100」と表示する。

その結果、曲げ部の曲率半径を大きくした場合、直線部の長さを最適化したときの分岐比（各折れ線における分岐比の最大値）が良くなる傾向が示された。なお、ここでは、具体的な結果を示していないが、本発明者らの検討によれば、図19の（a）及び（b）に示される構造でも、同様に、曲げ部

の曲率半径を大きくした場合、直線部の長さを最適化したときの分岐比が良くなる傾向が認められた。

[0058] 図21に、図19の(a)、(b)、(c)に示される3種類の構造について、最適化された分岐比と曲線部の曲率半径との関係を検討した結果を示す。曲線部の曲率半径としては、 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の中から3～4種類を選択した。(a)の構造に比べて(b)の構造のほうが、さらに(c)の構造のほうが、分岐比がより良くなる結果が示された。

ここでの「最適化された分岐比」とは、各構造ごとに、直線部の長さを最適化したときの分岐比をいう。したがって、図21の(c)で示される分岐比は、図20で示される「最適化された分岐比」と同一の値である。

[0059] 図19～図21に示す、以上の検討に基づき、図19の(c)において、直線部の長さは $2\mu\text{m}$ 、曲げ部の曲率半径は $100\mu\text{m}$ としたモードスプリッタにおける基本モード光の伝播の様子を検討した。その結果を図22に示す。この結果では、副導波路に移行する基本モード光は全く見えず、基本モード光は全て主導波路を伝播した。具体的には、分岐比（損失）として -30.5dB であり、非常に低損失であった。

[0060] <実施例3>

クラッド領域を SiO_2 、コア領域をSiとして導波路及び合分波器を構成した。コアの厚さは 220nm とし、コアの幅（導波路幅）は 500nm とした。コアの上下には光がそれぞれ基板及び空気に触れないようにクラッドを設けた。クラッドの厚さはコアの上下にそれぞれ $2\mu\text{m}$ とした。クラッドは、コアの側方及び導波路間にも形成した。

マッハツェンダ型光変調器の光合波部及び光分波部にはMMI型の合分波器を用いた。合分波器の幅 W_{MMI} は $1.5\mu\text{m}$ で、長さ L_{MMI} は $1.8\mu\text{m}$ とした。合分波器の片側に2本の光導波路が結合する箇所では、並行する導波路の間隔を $0.3\mu\text{m}$ とした。

光合波部の後段（出射側）の導波路を主導波路とし、これと平行に、かつ

間隔を空けて副導波路を置いた（図1A参照）。副導波路への最大移行パワーをできる限り100%に近づけるため、副導波路の導波路幅は主導波路と同じ幅とした。実施例1, 2の検討に基づき、副導波路と主導波路との間隔は $0.5\mu\text{m}$ （ 500nm ）とした。

主導波路と副導波路とが接近及び離れる際に、急激な変化があると導波光の揺動を起こし、損失低下をもたらす。従って、主導波路と副導波路との接近及び離れはなだらかであることが好ましい。しかし、接近部及び離れ部でも高次モードの結合は弱いながらも行われる。従って、主導波路と副導波路との接近及び離れをなだらかにしすぎるのも適切ではない。そこで、実施例2の検討に基づき、図19の(c)及び図22に示すように、主導波路と副導波路とのそれぞれに、接近部及び離れ部の曲率半径を $100\mu\text{m}$ とし、直線部の長さを $2\mu\text{m}$ とした。これにより、高次モードが効率よく主導波路から副導波路に移行し、しかも基本モードの移行をほとんどなくすることができる。

[0061] <実施例4>

クラッド領域を SiO_2 、コア領域を Si として導波路及び合分波器を構成した。コアの厚さは 220nm とし、コアの幅（導波路幅）は 600nm とした。コアの上下には光がそれぞれ基板及び空気に触れないようにクラッドを設けた。クラッドの厚さはコアの上下にそれぞれ $2\mu\text{m}$ とした。クラッドは、コアの側方及び導波路間にも形成した。

マッハツェンダ型光変調器の光合波部及び光分波部にはMMI型の合分波器を用いた。

その幅 W_{MMI} は $1.7\mu\text{m}$ で、長さ L_{MMI} は $2.4\mu\text{m}$ とした。合分波器の片側に2本の光導波路が結合する箇所では、並行する導波路の間隔を $0.3\mu\text{m}$ とした。

光合波部の後段（出射側）の導波路を主導波路とし、これと平行に、かつ間隔を空けて副導波路を置いた（図1A参照）。

実施例1～3と同様に、 600nm の導波路幅でも最適な導波路間隔を検

討した結果、副導波路と主導波路との間隔は $0.5\mu\text{m}$ (500nm)とした。また、図19の(c)及び図22に示すように、主導波路と副導波路のそれぞれに、接近部及び離れ部の曲率半径を $100\mu\text{m}$ としたとき、最適な直線部の長さはシミュレーションにより $9\mu\text{m}$ と求められた。

これにより、高次モードが効率よく主導波路から副導波路に移行し、しかも基本モードの副導波路への移行をほとんどなくすることができる。

[0062] <実施例5>

実施例3, 4と同じ副導波路を、マッハツェンダ型光変調器の光合波部の後段（出射側）に配置する代わりに、光分波部の前段（入射側）に配置した（図4参照）。

また、実施例3, 4と同じ副導波路を、マッハツェンダ型光変調器の光分波部の前段、及び光合波部の後段の両方に配置した（図3参照）。

また、実施例3, 4と同じ副導波路を、マッハツェンダ型光変調器の内部にも配置した（図5参照）。

符号の説明

[0063] 1…基板、2…コア、3…クラッド、10, 100…光導波路素子、14, 15…光合分波器、20, 20A, 30, 30A, 200…モードスプリッタ、21…主導波路、22…副導波路、23…光吸収層、24…受光素子（PD）、25…電気配線、40, 40A, 40B, 400…マッハツェンダ型光変調器、42, 48…光分波部、45…光変調部、46, 49…光合波部。

請求の範囲

- [請求項1] 光導波路素子であって、
- 少なくとも2種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能な主導波路と、方向性結合器を構成するように前記主導波路から一定の距離を空けて前記主導波路と平行に配置された結合部分を有してかつ、前記2種類以上の伝播モードのうち、少なくとも1種類の伝播モードを前記主導波路から分離可能な副導波路を有するモードスプリッタと、
- を備え、
- 前記主導波路と前記副導波路とを構成するコアとクラッドとの屈折率比である n_{core}/n_{clad} が101～250%の範囲内であることを特徴とする光導波路素子。
- [請求項2] 前記方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路との幅との差が、±10%以内である請求項1に記載の光導波路素子。
- [請求項3] 前記方向性結合器における前記主導波路の厚さと前記副導波路との厚さとの差が、±10%以内である請求項1又は2に記載の光導波路素子。
- [請求項4] 前記副導波路が、前記結合部分の前段の端部に連続する開始部分をさらに有し、
- 前記開始部分が前記前段の端部に近づくにつれて前記主導波路になだらかに接近する請求項1～3のいずれか1項に記載の光導波路素子。
- [請求項5] 前記副導波路が、前記結合部分の後段の端部に連続する終了部分をさらに有し、
- 前記終了部分が前記後段の端部から離れるにつれて前記主導波路からなだらかに離れる請求項1～4のいずれか1項に記載の光導波路素子。
- [請求項6] 複数の前記モードスプリッタを備え、

前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内であり、

前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、及び前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で等しい請求項1～5のいずれか1項に記載の光導波路素子。

[請求項7] 複数の前記モードスプリッタを備え、

前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内であり、

前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、又は前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で異なる請求項1～5のいずれか1項に記載の光導波路素子。

[請求項8] 前記コアの材料がSiであり、前記クラッドの材料がSiO₂である請求項1～7のいずれか1項に記載の光導波路素子。

[請求項9] 前記副導波路が、高次モードを前記主導波路から分離させるように構成されている請求項1～8のいずれか1項に記載の光導波路素子。

[請求項10] 前記副導波路の終了部分の先端に配置され、不純物を高濃度でドーピングした光吸収層をさらに備える請求項9に記載の光導波路素子。

[請求項11] 前記副導波路の終了部分の先端に配置され、受光素子及び前記受光素子の電流を取り出す電気配線をさらに備える請求項9に記載の光導波路素子。

[請求項12] 光導波路素子であって、

1つの入力光を2つの分波光に分波する分波部と、前記2つの分波光を1つの出力光に合波する合波部と、少なくとも2種類以上の伝播次数の異なる伝播モードが導波可能でかつ、前記入力光と前記分波光と前記出力光とを導波する主導波路と、を有するマッハツェンダ型光変調器と、

方向性結合器を構成するように前記主導波路から一定の距離を空けて前記主導波路と平行に配置された結合部分を有してかつ、前記2種

類以上の伝播モードのうち、少なくとも 1 種類の伝播モードを前記主導波路から分離可能な副導波路を有する 1 以上のモードスプリッタと、

を備え、

前記主導波路と前記副導波路とを構成するコアとクラッドとの屈折率比である n_{core}/n_{clad} が 1.01 ~ 2.50 % の範囲内であることを特徴とする光導波路素子。

[請求項13] 前記方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差が $\pm 10\%$ 以内である請求項 12 に記載の光導波路素子。

[請求項14] 前記方向性結合器における前記主導波路の厚さと前記副導波路の厚さとの差が、 $\pm 10\%$ 以内である請求項 12 又は 13 に記載の光導波路素子。

[請求項15] 前記副導波路が、前記結合部分の前段の端部に連続する開始部分をさらに有し、

前記開始部分が前記前段の端部に近づくにつれて前記主導波路になだらかに接近する請求項 12 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項16] 前記副導波路が、前記結合部分の後段の端部に連続する終了部分をさらに有し、

前記終了部分が前記後段の端部から離れるにつれて前記主導波路からなだらかに離れる請求項 12 ~ 15 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項17] 複数の前記マッハツェンダ型光変調器を内部に含む 1 つのマッハツェンダ型干渉計をさらに備える請求項 12 ~ 16 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項18] 複数の前記モードスプリッタを備え、

前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内であり、

前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、及び前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で等しい請求項 12～17 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項19] 複数の前記モードスプリッタを備え、
前記各方向性結合器における前記主導波路の幅と前記副導波路の幅との差は、 $\pm 10\%$ 以内であり、

前記副導波路の前記結合部分と前記主導波路との間隔、又は前記副導波路の前記結合部分の長さがすべての前記方向性結合器間で異なる請求項 12～18 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項20] 前記分波部及び前記合波部が、MMI型の光合分波器である請求項 12～19 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項21] 前記分波部及び前記合波部が、Y型の光合分波器である請求項 12～19 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項22] 前記コアの材料がSiであり、前記クラッドの材料がSiO₂である請求項 12～21 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項23] 前記副導波路が、高次モードを前記主導波路から分離させるように構成されている請求項 12～22 のいずれか 1 項に記載の光導波路素子。

[請求項24] 前記副導波路の終了部分の先端に配置され、不純物が高濃度でドーピングされた光吸収層をさらに備える請求項 23 に記載の光導波路素子。

[請求項25] 前記副導波路の終了部分の先端に配置され、受光素子及び前記受光素子の電流を取り出す電気配線をさらに備える請求項 23 に記載の光導波路素子。