

明 細 書

発明の名称：光変調素子

技術分野

[0001] 本発明は、基板上に作製される光導波路素子の構造に関し、特に光変調素子の電極と導波路設計に関する。本願は、2012年12月27日に、日本に出願された特願2012-284723号、及び2012年12月27日に、日本に出願された特願2012-284724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] 現在、光通信で利用される情報量は増加の一途をたどっている。こうした情報量の増加に対応するため、バックボーン、メトロ、またはアクセスといった光通信ネットワークでは、信号速度の高速化及び波長多重通信によるチャネル数の増加などの対応が進められている。これに伴い、光通信に必要なシステムは複雑になり、大型化、高額化、及び消費電力増大などの課題を生じる。

また、近年増加しているデータセンタにおいても、ネットワークと同様に、情報量の増加への対応が求められている。データセンタ内のコンピュータ間の通信では、従来、主にメタルケーブルにより電気信号が伝送されていた。しかしながら、近年は、より一層の高速化や消費電力の低減の要請から、光ファイバを用いた光通信の利用が進められている。さらには、コンピュータのボード内及びCPU内などの各レベルにおいても、光通信の導入が課題となっている。

[0003] このような光通信ネットワークにおける課題の解決、さらには新規分野への光通信導入を実現する手段として、従来から石英（シリカ）製の平面型光回路（PLC）による光集積回路、及びリチウムナイオベート（LN）等の強誘電体による高速動作デバイス等が用いられてきた。近年ではそれに加え、シリコン、InP、GaAs等の高屈折率材料を用いた光デバイスも注目

を集めている。基板型光導波路素子（光デバイス）の研究開発が各所で進められている（例えば非特許文献 1 ～ 4 参照）。

[0004] 媒質中の光の波長はその媒質の屈折率に反比例するため、屈折率が約 3.5 と高いシリコンでは、光導波路のコア幅などの寸法が小さくなる。また、シリカのように、コアのシリコンに対して屈折率の大きく異なる媒質をクラッドに用いることで、閉じ込めの強い光導波路となる。この光導波路の特徴として、曲がり半径を小さくできることが挙げられる。これらの理由から、光導波路を用いた光デバイスそのものの小型化が可能になり、同じ機能であればより小型にし、同じ大きさであればより多くの機能を実現することができる。

また、電氣的な制御が可能な半導体材料であるシリコンを用いることにより、光変調器などのような特性が可変のデバイスを実現することができる。

さらに、シリコンを用いた光デバイスは、製造プロセスで使用する技術及び装置に関して、従来の CPU やメモリ等の半導体デバイスと共通要素が多いため、量産によりコストを低減できる。また、シリコンを用いた光デバイスは、従来の半導体デバイスと同一の基板上で光デバイスを集積することも可能である。この場合、従来のメタル配線で伝送される電気信号を、光導波路で伝送される光信号に置き換えることにより、さらなる機器の高速化や消費電力の削減の可能性がある。

[0005] このような状況の中、光変調器は、電気信号を光信号に変換する光通信における主要デバイスの一つであり、他のデバイスと同様、光集積デバイスの実現に向けた要素の一つとして、多くの機関により研究されている（例えば非特許文献 1 ～ 3 参照）。

先行技術文献

非特許文献

[0006] 非特許文献 1 : P. Dong, L. Chen, and Y. -kai Chen, "High-speed low-voltage sing le-drive push-pull silicon Mach-Ze

hnder modulators”、Optics Express、2012年、第20巻、第6号、p. 6163–6169

非特許文献2：P. Dong, C. Xie, L. Chen, L. L. Buhl, and Y.-K. Chen, “112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon”、European Conference and Exhibition on Optical Communication、2012年、Th. 3. B. 1

非特許文献3：T.-Y. Liow, K.-W. Ang, Q. Fang, J.-F. Song, Y.-Z. Xiong, M.-B. Yu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “Silicon Modulators and Germanium Photodetectors on SOI: Monolithic Integration, Compatibility, and Performance Optimization”、IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics、2010年、第16巻、p. 307–315

非特許文献4：T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda, T. Watanabe, J. Takahashi, M. Takahashi, T. Shoji, E. Tamechika, S. Itabashi, and H. Morita, “Microphotonic devices based on silicon microfabrication technology”、IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics、2005年、第11巻、p. 232–240

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] 半導体を用いたマッハツェンダ型光変調器では、光信号と電気信号との位相を合わせた進行波電極が用いられ、基板外より電圧が印加される。終端は、基板外で行われることもあるが、抵抗器を配置したり、プロセスで抵抗器を形成したりすることにより終端を基板上で行うこともある。一方、少なくとも電圧の入力に関しては、基板外から印加を行うことが多い。従来のLN変調器では、図2に示すようにマッハツェンダ干渉計120の前後の光導波路113, 115が光入射部112から光出射部114まで直線上に配置され、接地電極130G及び信号電極130Sの入力部131及び出力部132がマッハツェンダ干渉計120の側方に形成されている。外部から入力される電気信号は、ワイヤボンディング等により外部に接続された基板側方の入力部131を通じて基板上の電極に印加される。しかしながら、シリコン基板上の進行波電極は電気信号の伝播損失が大きいことが知られており、位相変調部124以外の部分の電極が長いと、電気信号のパワーの損失により変調効率が低下する、高周波でより損失が顕著になるために生じる変調帯域の低下を招く、という問題があった。

[0008] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、電極の位相変調部から素子端部までの間を短くすることが可能な光変調素子を提供することを課題とする。

また、本発明は、電極の位相変調部から素子端部までの間を短くすることができ、さらに基板の長手方向を短くして一層の小型化が可能な光変調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

[0009] 上記課題を解決するため、本発明の第1態様に係る光変調素子は、基板型光導波路から構成され、前記基板型光導波路に光を入射する光入射部と、前記光入射部に入射された光を分岐する第1の光分岐部と、前記第1の光分岐部で分岐された光を導波する2つのアーム部と、前記2つのアーム部に直線状にそれぞれ設けられた位相変調部と、前記2つのアーム部から導波された光を合波する第1の光合波部と、を有するマッハツェンダ干渉計と、前記第

1の光合波部で合波された光を前記基板型光導波路から出射する光出射部と、入力部と出力部とを有し、前記位相変調部に電圧を印加する進行波電極と、を備え、前記基板型光導波路は、平面視において前記位相変調部の長手方向の延長線とそれぞれ交差する2つの辺を含む輪郭を有し、前記入力部は、前記2つの辺のうちの一方に形成され、前記光入射部及び前記光出射部が、平面視で前記進行波電極が形成される領域とは異なる領域に位置する。

[0010] 前記位相変調部の長手方向が、前記2つの辺に対して垂直であってもよい。

前記位相変調部の長手方向が、前記2つの辺に対してそれぞれ 0° より大きく 90° 未満の角度で傾きを有していてもよい。

前記2つの位相変調部と前記2つの辺のうちの一方との距離が互いに等しく、かつ前記2つの位相変調部と前記2つの辺のうちの他方との距離が互いに等しくてもよい。

前記位相変調部が、互いに平行に配置されていてもよい。

前記出力部は、前記2つの辺のうちの他方に形成されてもよい。

前記進行波電極は、前記入力部から前記出力部まで直線状に形成されていてもよい。

前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、前記光入射部及び前記光出射部が、前記複数の辺のうち前記2つの辺とは異なる辺に配置されていてもよい。

前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、前記複数の辺のうちのいずれかに配置され、前記光入射部が配置された辺と前記光出射部が配置された辺とが異なる辺に配置されていてもよい。

前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、前記複数の辺のうちのいずれかに配置され、前記光入射部が配置された辺と前記光出射部が配置された辺とが同一であってもよい。

上記第 1 態様に係る光変調素子が、光ファイバを固定可能な溝部をさらに備え、前記溝部の一端は前記輪郭に形成され、前記溝部の他端に前記光入射部及び前記光出射部のうち少なくとも一方が形成されていてもよい。

前記光入射部及び前記光出射部が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記 2 つの辺に平行な方向に延長した 2 つの線の間の領域の外側に位置してもよい。

前記光入射部及び前記光出射部が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記 2 つの辺に平行な方向に延長した 2 つの線の間の領域に位置してもよい。

前記マッハツェンダ干渉計を構成する光導波路の一部が、2 つの前記位相変調部の前記延長線の間の領域の外側に位置してもよい。

[0011] 前記 2 つのアーム部のうち少なくとも一方が、低速位相変調部、モニタ用 PD、偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及び光可変減衰器の少なくとも一つを有する他の要素部品をさらに有し前記他の要素部品の少なくとも一部が、前記延長線の間の領域の外側に位置してもよい。

前記 2 つのアーム部のうち少なくとも一方が、低速位相変調部、モニタ用 PD、偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及び光可変減衰器の少なくとも一つを有する他の要素部品をさらに有し、前記他の要素部品の少なくとも一部が、前記延長線の間の領域の内側に位置してもよい。

前記第 1 の光分岐部及び前記第 1 の光合波部のうち少なくとも一方が、前記延長線の間の領域の外側に位置してもよい。

前記 2 つのアーム部の長さが互いに等しくてもよい。

前記第 1 の光分岐部及び前記第 1 の光合波部のうち少なくとも一方が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記 2 つの辺に平行な方向に延長した 2 つの線の間の領域に位置してもよい。

[0012] 前記基板型光導波路が複数の前記マッハツェンダ干渉計を含んでもよい。

上記第 1 態様に係る光変調素子が、前記光入射部から入射した光を分岐して前記複数のマッハツェンダ干渉計に出射する第 2 の光分岐部、及び、前記

複数のマッハツェンダ干渉計から出射された光を合波する第2の光合波部のうち少なくとも一方をさらに備えてもよい。

上記第1態様に係る光変調素子が、前記第2の光分岐部を備え、前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第2の光分岐部との間を接続する導波路の少なくとも一部が、前記複数のマッハツェンダ干渉計に含まれる各位相変調部の長手方向の延長線のうち、最も離れた2つの間の領域の外側に位置してもよい。

上記第1態様に係る光変調素子が、前記第2の光合波部を備え、前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第2の光合波部との間を接続する導波路の少なくとも一部が、前記複数のマッハツェンダ干渉計に含まれる各位相変調部の長手方向の延長線のうち、最も離れた2つの間の領域の外側に位置してもよい。

前記第2の光分岐部又は前記第2の光合波部の少なくとも一方が、前記最も離れた2つの線の間の領域の外側に位置してもよい。

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第2の光分岐部との間を接続する導波路の長さ、が互いに等しくてもよい。

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第2の光合波部との間を接続する導波路の長さが互いに等しくてもよい。

前記基板型光導波路がQP SK構造又はDP-QP SK構造を有してもよい。

前記第一光分岐器及び前記第一光合波器の少なくとも一方が、マルチモード干渉計からなってもよい。

前記第一光分岐器、前記第一光合波器、前記第二光分岐器、及び前記第二光合波器の少なくとも一つが、マルチモード干渉計からなってもよい。

前記進行波電極が、(1)前記2つのアーム部の間に信号電極を有し、前記2つのアーム部の外側にそれぞれ接地電極を有する、GSG構造、(2)前記2つのアーム部の間に接地電極を有し、前記2つのアーム部の外側にそれぞれ信号電極を有し、前記信号電極の外側にさらに接地電極を有する、G

S G S G構造、(3) 前記2つのアーム部の外側に、それぞれ接地電極及び信号電極を有する、G S構造、のいずれかの構造を有してもよい。また、前記2つのアームに対して独立して、内側に信号電極が配置され、そのさらに内側と、信号電極に対してアームを介して反対の位置とに配置される接地電極が配置されるように、独立したG S G構造を有してもよい。また、前記2つのアームに対して独立して、外側に信号電極が配置され、そのさらに外側と、信号電極に対してアームを介して反対の位置とに配置される接地電極が配置されるように、独立したG S G構造を有してもよい。

前記基板型光導波路上に光源及び受光器のうちの少なくとも一方が設けられてもよい。

[0013] 前記位相変調部を構成する光導波路が、リブ部と、前記リブ部の両側にそれぞれ接続された一对のスラブ部と、を有するリブ型導波路からなってもよい。

前記リブ型導波路の少なくとも一方の端には矩形導波路が接続され、前記リブ型導波路と前記矩形導波路との接続部において、前記一对のスラブ部の幅が前記矩形導波路と光結合するように連続的に変化する遷移領域を有してもよい。

前記基板型光導波路を構成するコアがシリコンからなってもよい。

前記基板型光導波路を構成する基板がシリコンからなってもよい。

前記基板型光導波路を構成するコアの上面と前記進行波電極との間にシリカからなるクラッドが設けられ、前記位相変調部以外の部分において前記コアと前記進行波電極とが上下に交差する位置において前記クラッドの厚みが $1\ \mu\text{m}$ 以上であってもよい。

[0014] また、本発明の第2態様に係る光変調素子モジュールは、上記第1態様に係る光変調素子と、前記光変調素子を収容するパッケージとを備える。

発明の効果

[0015] 上記本発明の態様によれば、電極の位相変調部から素子端部までの間を短くすることができる。これにより、電極上の電気信号の伝播損失による変調

効率の低下を抑制することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1A]本発明の第1実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。
 [図1B]本発明の第1実施形態に係る光変調素子の変形例であって、基板型光導波路が矩形形状の場合を示す平面図である。
 [図1C]本発明の第1実施形態に係る光変調素子の変形例であって、基板型光導波路が矩形形状の場合を示す平面図である。
 [図2]従来の光変調素子の一例を示す平面図である。
 [図3A]本発明の第2実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。
 [図3B]本発明の第2実施形態に係る光変調素子の変形例を示す平面図である。

[図4A]本発明の第3実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。
 [図4B]本発明の第3実施形態に係る光変調素子の変形例を示す平面図である。
 [図5A]本発明の第4実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。
 [図5B]本発明の第4実施形態に係る光変調素子の変形例を示す平面図である。

[図6A]本発明の第5実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。
 [図6B]本発明の第5実施形態に係る光変調素子の変形例を示す平面図である。
 [図7]位相変調部の断面構造の一例を示す断面図である。
 [図8]位相変調部の導波方向構造の一例を示す斜視図である。
 [図9]リゾ型導波路と矩形導波路との接続部の一例を示す斜視図である。

[図10A]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10B]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11]ツッパ型導波路の一例を示す平面図である。

[図12]図14A及び14BのA-A線に沿う断面図である。

[図13A]チップ端の電極構造の一例を示す平面図の全体図である。

[図13B]チップ端の電極構造の一例を示す平面図のX部の部分拡大図である。

[図13C]チップ端の電極構造の変形例の一例を示す平面図の全体図である。

[図13D]チップ端の電極構造の変形例の一例を示す平面図のX部の部分拡大図である。

[図14A]電極構造の下を光導波路が通過する構造を説明する平面図である。

[図14B]変形例の電極構造の下を光導波路が通過する構造を説明する平面図である。

[図15A]電極がG S G S G構造を有する光変調素子を例示する平面図である。

[図15B]変形例の電極がG S G S G構造を有する光変調素子を例示する平面図である。

[図16A]電極がG S構造を有する光変調素子を例示する平面図である。

[図16B]変形例の電極がG S構造を有する光変調素子を例示する平面図である。

[図17A]Q P S K用光変調器の第1例を示す平面図である。

[図17B]変形例のQ P S K用光変調器の第1例を示す平面図である。

[図18A]Q P S K用光変調器の第2例を示す平面図である。

[図18B]変形例のQ P S K用光変調器の第2例を示す平面図である。

[図19A]D P - Q P S K用光変調器の構成例を示す平面図である。

[図19B]変形例のD P - Q P S K用光変調器の構成例を示す平面図である。

[図20A]P Dを集積した構成例を示す平面図である。

[図20B]変形例のP Dを集積した構成例を示す平面図である。

[図21A]高次モード除去部とP Dを集積した構成例を示す平面図である。

[図21B]変形例の高次モード除去部とP Dを集積した構成例を示す平面図である。

[図22A]光入射部と光出射部を同じ側に配置した構成例を示す平面図である。

[図22B]変形例の光入射部と光出射部を同じ側に配置した構成例を示す平面図

である。

[図23A]光出射部が基板上に設けられた構成例を示す平面図である。

[図23B]光入射部が基板上に設けられた構成例を示す平面図である。

[図23C]変形例の光出射部が基板上に設けられた構成例を示す平面図である。

[図23D]変形例の光入射部が基板上に設けられた構成例を示す平面図である。

[図24A]2つのマッハツェンダ干渉計が並列に接続された構成例を示す平面図である。

[図24B]2つのマッハツェンダ干渉計が独立に設けられた構成例を示す平面図である。

[図24C]変形例の2つのマッハツェンダ干渉計が並列に接続された構成例を示す平面図である。

[図24D]変形例の2つのマッハツェンダ干渉計が独立に設けられた構成例を示す平面図である。

[図25A]位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第1の図である。

[図25B]変形例の位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第1の図である。

[図26A]位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第2の図である。

[図26B]変形例の位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第2の図である。

[図27A]位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第3の図である。

[図27B]変形例の位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第3の図である。

[図28A]位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する第4の図である。

[図28B]変形例の位相変調部の端部とボンディング接続部との距離を説明する

第４の図である。

[図29]光変調素子モジュールの一例を上側からみた断面図である。

[図30]図２９の光変調素子モジュールを横側からみた断面図である。

[図31]図２９の光変調素子モジュールのメタライズパターンを示す平面図である。

[図32]逆テーパ型導波路の一例を示す斜視図である。

[図33A]シミュレーションに用いたリブ型導波路の構造を説明する断面図である。

[図33B]シミュレーションに用いた矩形導波路の構造を説明する断面図である。

[図34]クラッド厚みと導波路の光損失の関係の一例を示すグラフである。

[図35]矩形導波路の電極による過剰な光損失の測定結果の一例を示すグラフである。

[図36]本発明の第６実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図37]本発明の第７実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図38]本発明の第８実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図39]本発明の第９実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図40A]本発明の第１０実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図40B]本発明の第１０実施形態に係る光変調素子の変形例を示す平面図である。

[図41]本発明の第１１実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図42A]本発明の第１２実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

[図42B]本発明の第１２実施形態に係る光変調素子を示す平面図である。

発明を実施するための形態

[0017] 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。

[0018] (第１実施形態)

図１Ａ～１Ｃに、本発明に係る第１実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子１０、１００、及び１１０は、マッハツェンダ干渉計２０を含む基

板型光導波路 1 1 で構成される。マッハツェンダ干渉計 2 0 は、 1×2 に分岐する光分岐部（第 1 の光分岐部）2 1 と、 2×1 に合波する光合波部（第 1 の光合波部）2 2 との間に 2 つのアーム部 2 3 を有する。光入射部 1 2 から光導波路 1 3 を経て光分岐部 2 1 に入射した光は、光分岐部 2 1 で 2 つのアーム部 2 3 に分岐される。その後、分岐された光は 2 つのアーム部 2 3 を経由して光合波部 2 2 で 1 つの光に合波され、合波された光は光導波路 1 5 を経て光出射部 1 4 から出射される。

なお、図 1 B 及び 1 C の光変調素子 1 0 0 及び 1 1 0 は図 1 A の光変調素子 1 0 の変形例であり、光変調素子 1 0 では、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して垂直であるのに対し、光変調素子 1 0 0 及び 1 1 0 では、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して傾斜している点で異なる。特に限定して説明していない限り、以下の説明は本実施形態のすべての図の光変調素子に共通し、以降の実施形態においても同様とする。

[0019] それぞれのアーム部 2 3 に直線状に位相変調部（第一位相調整部）2 4 が設けられている。また、基板型光導波路 1 1 上には、位相変調部 2 4 に電圧を印加する進行波電極 3 0 が設けられている。本実施形態の進行波電極 3 0 は、アーム部 2 3 の間に信号電極 3 0 S を有し、アーム部 2 3 の外側にそれぞれ接地電極 3 0 G を有する、G S G (Ground、Signal、Ground) からなるコプレーナ電極構造を有する。信号電極 3 0 S の入力部 3 1 から高周波電気信号（以下「高周波信号」という。）を印加することにより、位相変調部 2 4 では、各アーム部 2 3 を伝播する光に所定の位相差が付与され、光合波部 2 2 で合波された光は位相差に応じて変調される。信号電極 3 0 S の出力部 3 2 は、光変調素子 1 0 の外部に接続されて終端される。

[0020] 本実施形態では両方のアーム部 2 3 に位相変調部 2 4 が設けられているが、片方のアームのみに位相変調部を設けてもよい。しかしながら、0 でない位相差（例えば π ）を付与する場合に、両方のアームに位相変調部が設けら

れることで、各アームの導波光の位相を反対側に変調することができる。つまり、両方のアームに位相変調部が設けられることで一方では位相を進め、他方では位相を遅らせるというプッシュプル動作を行うことにより、周波数チャープを低減して、長距離伝送に適した光信号を出力として得ることができる。

[0021] 基板型光導波路 11 は、好適にはシリコン等の半導体をコアとし、シリカ等の絶縁体をクラッドとする。また、コアとその周囲を囲むクラッドからなる光導波路は、シリコン等からなる基板上に形成してもよい。シリコンを用いた光導波路は、コアとクラッドの屈折率差が大きいため、光の閉じ込めが強く、製造時に生じる側壁のラフネス等の微細構造により生じる光の伝播損失が大きい。一方、シリコンを用いた光導波路は、曲げ半径 $10\ \mu\text{m}$ 程度の急峻な曲げが可能である。そのため本実施形態で用いることが好ましい。

図 1 A ~ 1 C の基板型光導波路 11 は、4 つの辺 11 a, 11 b, 11 c, 11 d を有する矩形状である。なお、基板型光導波路 11 が矩形（長方形）などの四角形（四辺形）とすることは必須の要件ではなく、三角形、五角形、六角形、七角形、八角形などの種々の多角形であってもよい。多角形の角が丸みまたは面取りを有してもよい。つまり、基板型光導波路 11 が 2 つの辺 11 a, 11 b を含む輪郭を有していればよい。

[0022] 本実施形態では、位相変調部 24 の長手方向と進行波電極 30 の入出力方向とを一致させることにより、電極構造を最短化し、電気信号の伝播損失を抑制する。また、光入射部 12 と光分岐部 21 との間及び光合波部 22 と光出射部 14 との間で、光導波路 13, 15 に急峻な曲げを設ける。これにより、マッハツェンダ干渉計 20 の光分岐部 21 と進行波電極 30 の入力部 31 との間及び光合波部 22 と出力部 32 との間が短くても、光導波路 13, 15 を進行波電極 30 の側方に向かわせることができる。なお、本発明において、進行波電極 30 の側方とは、基板型光導波路 11 の平面視において電極が形成されていない領域であり、信号電極と接地電極との間の領域も側方と表すことがある。

図1A～1Cでは、進行波電極30は、入力部31から出力部32まで直線状に形成されている。この場合、電極の長さを最も短くすることができる。実際には、進行波電極30が全長に渡って一様な幅を持つとは限らず、一部において幅がテーパ状に変化したり、幅方向の中心線が曲がったりすることがあり得る。例えば、基板型光導波路11のもつ2つの辺11a, 11bが、位相変調部24の長手方向の両側で、この長手方向の延長線L1, L2とそれぞれ交差するとき、これら2つの辺11a, 辺11bに入力部31及び出力部32が配置されることが好ましい。

[0023] 2つの位相変調部24は、互いに平行であることが好ましい。また、前記2つの位相変調部24と基板端である辺11aとの距離が互いに等しく、また前記2つの位相変調部24と基板端である辺11bとの距離が互いに等しいことが好ましい。つまり、2つの位相変調部24の一方の端部24aと辺11aとの距離が互いに等しく、2つの位相変調部24の他方の端部24bと辺11bとの距離が互いに等しいことが好ましい。

また、電極の伝播方向に沿う、電極の入力部31から位相変調部24の入射側の端部24aまでの長さが、それぞれの位相変調部24に対し、等しいことが好ましい。

また、電極の伝播方向に沿う、位相変調部24の出射側の端部24bから電極の出力部31までの長さが、それぞれの位相変調部24に対し、等しいことが好ましい。

これにより、それぞれの位相変調部24に対して入力部31から入力する電気信号のタイミングを合わせることが容易になる。

[0024] 光入射部12及び光出射部14は、進行波電極30の側方に位置する。これにより、進行波電極30の入力部31及び出力部32やこれと電氣的に接続される構造物と、光入射部12及び光出射部14やこれと光結合される構造物とを、空間的に区分けして配置させることができる。

図1Aの光変調素子10では、上述の通り位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であり、光分岐部21又は光合波部22

から 90° 程度曲げることで、導波路13, 15を側方に向けることができる。また、図1B及び1Cの光変調素子100及び110では上述の通り、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜しており、光分岐部21又は光合波部22から 90° より小さい鋭角の角度で曲げることで、導波路13, 15を側方に向けることができる。

これら方向転換は、位相変調部24と辺11a, 11bとの間で、導波路13, 15の一部を進行波電極30の下部を通すことにより実現できる。急峻な曲げを利用して導波路13, 15の方向を変換することにより、位相変調部24と辺11a, 11bとの間を短くすることができ、高周波信号がシリコン基板上を伝播することによる減衰と、インピーダンス不整合による信号劣化とを低減することが可能である。

なお、図1B及び1Cの光変調素子100及び110において、位相変調部24の長手方向と2つの辺11a, 11bとの成す角度は、 0° より大きく 90° より小さい角度であればよい。ただし、2直線の成す角度は、 $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で定義されるものとする。例えば、 80° 以下でもよく、 70° 以下でもよい。これにより、基板の長さ（辺11aから辺11bまで距離）をより短くすることができる。一方、基板の幅（辺11cから辺11dまで距離）を短くしたい場合は、図1Aの光変調素子10のように位相変調部24の長手方向を2つの辺11a, 11bに対して垂直にすればよい。

[0025] 本実施形態によれば、チップ（基板）上での電極の接続を最短で行うことができ、電極上での電気信号のパワーの損失による変調効率の低下を避けることができる。また、チップ（基板）の長さを短くすることができる。

また、電極を複数本必要とする場合においても、各電極の長さがほとんど変わることがないので、スケラブルに電極を増やすことが可能である。従来技術である図2のように電極を曲げて配置する場合には、並行する電極の本数が増えると、外側ほど電極の長さが長くなり、また、電極の長さの差も大きくなってしまう。

また、光入射部12の光軸と光出射部14の光軸とが一直線上になく、ず

らして配置することにより、光入射部 1 2 において入射時に導波路 1 3 に結合しなかった漏れ光（迷光）が、光出射部 1 4 から混入することを避けることができる。これにより、消光状態での光パワーをより低減することができる、消光比を向上することができる。

[0026] 入力部 3 1 及び出力部 3 2 の配置される辺 1 1 a, 1 1 b の長さが十分に長い場合、光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 を辺 1 1 a, 1 1 b に配置することもできるが、図 1 A ~ 1 C では、光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 は、入力部 3 1 及び出力部 3 2 が配置される辺 1 1 a, 1 1 b とは異なる辺 1 1 c, 1 1 d に配置されている。これにより、基板型光導波路 1 1 をより小型化することができる。

チップ（基板）は、図 1 B に示すように長方形に切断されてもよく、また、図 1 C に示すように、入力部 3 1 及び出力部 3 2 の配置される辺 1 1 a, 1 1 b に対して、光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 の配置される辺 1 1 c, 1 1 d が斜めに切断されてもよい。図 1 C の場合、チップ面積を最小化し、取り数を増加できる。

さらに、辺 1 1 c, 1 1 d の両方を斜めにすることに限らず、片方のみを斜めにして台形状にすることもできる（後述する図 4 B 参照）。この場合、ウエハから一括してダイシングを行う代わりに、2 つのチップが斜辺を共有した長方形のブロックに切り分けた後で、斜辺を 2 つに切断してもよい。

基板形状が長方形でない場合は、チップの外部との接合部（光入射部 1 2 及び光出射部 1 4）に用いる後述の結合導波路（例えば図 3 2 の逆テーパ導波路 9 3）のチップ端面に対する向きは、垂直でなくともよい。結合導波路がチップ端面に対して垂直でない場合、端面の境界における屈折率差を考慮してチップ平面内で角度をつけることにより、所望の方向に出射したり、あるいは所望の方向から入射したりすることができ、高い結合を有するように設計することが可能である。

[0027] 図 1 B では、導波路 1 3, 1 5 を進行波電極 3 0 の側方に位置する光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 に向けて、光分岐部 2 1 又は光合波部 2 2 から 9 0

° より大きい鈍角の角度で曲げることで、導波路 13, 15 が側方に向かうことが示されている。この場合、後述の図 3 B と比べてチップ寸法も特に変わらず、チップの長さを短くできる上、入射から出射までに光がたどる導波路長をより短くすることができる。これにより、導波路長による光損失を低減することができる。

[0028] (第 2 実施形態)

図 3 A 及び 3 B に、本発明に係る第 2 実施形態の光変調素子を示す。なお、以降の説明において、すでに説明したものと共通する構成については、同一の符号を付して重複する説明を省略する。

本実施形態に係る光変調素子 10 A 及び 100 A は、第 1 実施形態の光変調素子 10, 100, 及び 110 と同様に、マッハツェンダ干渉計 20 を含む基板型光導波路 11 から構成される。また、本実施形態では、光入射部 12 及び光出射部 14 が、位相変調部 24 の長手方向における 2 つの端部 24 a, 24 b から、それぞれ 2 つの辺 11 a, 11 b に平行な方向に延長した 2 つの線 L a, L b の間の領域に位置している。

ここで、進行波電極 30 の入力部 31 が配置される辺が 11 a であり、出力部 32 が配置される辺が 11 b とであると定義する。また、位相変調部 24 の長手方向における光分岐部 21 側の端部 24 a から前記辺 11 a に平行な方向に延長した線が L a であり、位相変調部 24 の長手方向における光合波部 22 側の端部 24 b から前記辺 11 b に平行な方向に延長した線が L b であると定義する。なお、図 3 A の光変調素子 10 A では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11 a, 11 b に対して垂直であるのに対し、図 3 B の光変調素子 100 A では、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11 a, 11 b に対して傾斜している。

[0029] なお、図 1 A ~ 1 C の光変調素子 10, 100, 及び 110 の場合、図 3 A 及び 3 B の光変調素子 10 A 及び 100 A とは対照的に、光入射部 12 及び光出射部 14 が、線 L a と線 L b との間の領域より外側に位置している。具体的には、光入射部 12 が線 L a と辺 11 a との間の領域に位置し、光出

射部 1 4 が線 L b と辺 1 1 b との間の領域に位置している。

また、図 3 A では、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して垂直であり、「2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に平行な方向」は、「位相変調部 2 4 の幅方向」に一致する。従って、2 つの線 L a, L b を、2 つの端部 2 4 a, 2 4 b からそれぞれ位相変調部 2 4 の幅方向に延長した線と定義することもできる。

[0030] 光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 と、光ファイバまたはレンズ等の光学部品とを光結合させる場合、入力部 3 1 及び出力部 3 2 の配置される辺 1 1 a, 1 1 b の近傍に光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 を配置すると、光ファイバ及びレンズ等の光学部品が、入力部 3 1 及び出力部 3 2 から電極を接続する先の基板等及び光変調素子を収容するパッケージの端面と衝突する可能性が考えられる。

光入射部 1 2 又は光出射部 1 4 の近傍に光ファイバを配置する場合、光ファイバ自体に一般には $125\ \mu\text{m}$ 径のクラッドがあり、さらに被覆部を含めると外径はそれ以上（例えば $160\sim250\ \mu\text{m}$ ）となる。また、光ファイバを保持するためには、光ファイバを台座等の固定治具に固定する必要があり、固定治具の寸法は光ファイバの外径以上となる。

また、光入射部 1 2 又は光出射部 1 4 の近傍にレンズを配置する場合、レンズ径が数 mm に及ぶことが一般的である。特に、光変調素子がパッケージ端面に位置する場合、レンズをパッケージ内に配置できるように、端からクリアランスを設ける必要がある。

[0031] よって、図 3 A 及び 3 B に示すように、光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 の位置を光変調素子の端部、すなわち、辺 1 1 a, 1 1 b から距離を置くことが好ましい。これにより、実装時に、レンズ等とパッケージ等や中継基板等との干渉を避けることができる。従って、パッケージのスペースをより広くする必要がなく、大型化が避けられる。

図 3 A 及び 3 B では、マッハツェンダ干渉計 2 0 と光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 とを接続する光導波路 1 3, 1 5 の方向は、辺 1 1 a, 1 1 b に略

垂直、又は略平行な方向の直線導波路と、これらを接続する曲がり導波路の組み合わせを示している。導波路の長さを短くするために斜め方向の直線導波路及び曲率半径の大きな曲線導波路などを利用することもできる。

この手法によれば、基板寸法が異なる光変調素子を、同一のパッケージで取り扱う場合に、光入射部 1 2 と光出射部 1 4 との相対的な位置関係を同一にするなど、光入射部 1 2 と光出射部 1 4 を任意の位置に配置することができ、配置の自由度が向上する。

本実施形態においても、光入射部 1 2 の光軸と光出射部 1 4 の光軸とが一直線上になく、ずらして配置することが好ましい。これにより、第 1 実施形態と同様に迷光の混入を避けることができ、消光比を向上することができる。

[0032] (第 3 実施形態)

図 4 A 及び 4 B に、本発明に係る第 3 実施形態の光変調素子を示す。本実施形態に係る光変調素子 1 0 B 及び 1 0 0 B は、第 1 実施形態の光変調素子 1 0 及び 1 0 0 と同様に、マッハツェンダ干渉計 2 0 を含む基板型光導波路 1 1 から構成される。なお、図 4 A の光変調素子 1 0 B では位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して垂直であるのに対し、図 4 B の光変調素子 1 0 0 B では、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して傾斜している。

また、この実施形態では、マッハツェンダ干渉計 2 0 の各アーム部 2 3 に、位相変調部（第一位相調整部）2 4 とは異なる、電氣的に独立した位相調整部（第二位相調整部）2 5 を有する。位相調整部は、半導体型光変調器でも用いられる場合があるが、高周波信号に合わせて高速な変調を行う位相変調部の他に、アーム間で相対的に位相を調整する。この種の位相調整には位相変調部 2 4 で要求される高速応答は不要であり、数 μ s から数 m s 程度の応答速度（応答時間）でよい。位相調整部 2 5 の具体例としては、熱光学効果を利用した、例えばニクロム等の電氣的抵抗を有する材料を導波路の上部に配置したヒータ構造、またはドーパしたシリコンを抵抗体として位相変調

部 2 4 と同一工程により形成したヒータ構造を備える低速位相変調部が挙げられる。図 4 A 及び 4 B では、位相調整部 2 5 に電力を供給するための電極 3 5 (2 本の配線でもよい) は、進行波電極 3 0 と平行に、その出力部 3 2 が配置される辺 1 1 b に向けて配置されている。また、後述の第 1 0 実施形態のように電極 3 5 が設けられてもよい。

位相調整部に電流を流すためには、通常電圧側と GND 側の 2 本の電極が必要となる。

本実施形態では、2 本を独立に設けてもよいし、複数の位相調整部がある場合は GND を共通としてもよい。また、位相調整部の GND を、位相変調部に設けた GND と共通とすることも可能である。

アーム部 2 3 に設ける他の要素部品として、位相調整部 2 5 のほかにも、モニタ用 PD、偏波多重回路における偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及びスワップエンタング干渉計におけるアーム間の光パワーを均一化するための光可変減衰器 (VOA) 等が挙げられる。

他の要素は、両方のアームに設けてもよく、片方のアームのみに設けてもよい。

[0033] 位相変調部 2 4 とは別の構成要素は、高速な位相変調への影響を防ぐため、位相変調部及びそれに電圧を印加するための進行波電極を避けて配置することが好ましい。そこで、他の要素は、位相変調部 2 4 の延長方向からずらした位置に、特に、位相変調部 2 4 の長手方向をそれぞれ延長した 2 つの線 L 1, L 2 の間の領域より外側の領域に配置してもよい。これにより、位相変調部の電気特性に影響を与えず、所望の機能を実現することが可能である。

図 4 A 及び 4 B では、前記外側の領域 (線 L 1 と辺 1 1 c との間の領域、及び線 L 2 と辺 1 1 d との間の領域) にずらした導波路 2 3 a は、基板型光導波路 1 1 のチップ長 (辺 1 1 a, 1 1 b 間の距離) が短くなるように、導波路を曲げたり、光の伝播方向が位相変調部 2 4 とは反対の方向 (図 4 A 及び 4 B では下から上に向かう方向) となる部分を設けたりしてもよい。

[0034] また、図4 A及び4 Bでは、光出射部1 4が、位相変調部2 4の2つの端部2 4 a, 2 4 bからそれぞれ位相変調部2 4の幅方向に延長した2つの線L a, L bの間の領域より外側（線L bと辺1 1 bの間）の領域に位置するが、電極の出力部3 2が配置される辺1 1 bから十分に離れているので、光ファイバまたはレンズ等を配置するためのクリアランスが確保されている。

[0035] （第4実施形態）

図5 A及び5 Bに、本発明に係る第4実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子1 0 C及び1 0 0 Cは、第3実施形態と同様に、マッハツェンダ干渉計2 0の各アーム部2 3に、位相変調部2 4とは異なる、電氣的に独立した位相調整部2 5を有する。また、各アーム部2 3の途中で、前記外側の領域（線L 2と辺1 1 dとの間の領域）にずらした導波路2 3 aは、いずれも光出射部1 4が配置される辺1 1 dの側に延ばされている。また、マッハツェンダ干渉計2 0の光合波部2 2も前記外側の領域（線L 2と辺1 1 dとの間の領域）に位置し、光出射部1 4の近くに配置されている。これにより、導波路長を短縮して、光損失を低減することができる。

なお、図5 Aの光変調素子1 0 Cでは位相変調部2 4の長手方向が2つの辺1 1 a, 1 1 bに対して垂直であるのに対し、図5 Bの光変調素子1 0 0 Cでは、位相変調部2 4の長手方向が2つの辺1 1 a, 1 1 bに対して傾斜している。

[0036] 図1 A～1 Cに示すように、2つのアーム部2 3に位相変調部2 4のみが形成される構造では、マッハツェンダ干渉計2 0を対称に構成すると、2つのアーム部2 3の長さ（導波路長）は等しくなる。

また、図4 A及び4 Bに示すように、位相変調部2 4以外の要素（例えば位相調整部2 5）をアーム部2 3に配置する場合でも、左右対称（または点対称）に構成すると、2つのアーム部2 3の長さ（導波路長）は等しくなる。

一方、図5 A及び5 Bに示すように、他の要素を位相変調部2 4の片側のみに配置する、または別の場所に配置する場合は、図4 A及び4 Bに示した

対称の構成よりも導波路を短くでき、かつ電極の位置を集中できる。この場合、2つのアーム部23の長さ（導波路長）を等しくするため、各アーム部23（特に横にずらした導波路23a）において、異なる長さに曲げた等長化部23b、23cを設けることができる。図5A及び5Bの場合、位相変調部24と光合波部22との間の導波路23aが、チップの内側を周回するアームに長い等長化部23bを設け、チップの外側を周回するアームに短い等長化部23cを設けて、導波路長を調整している。等長化部23b、23cは、片方のアームのみに設けることもできる。

[0037] 2つのアームの長さを等しくすることにより、光変調器の波長依存性を解消することができる。また、位相変調部から光合波部までの導波路長を等しくすることにより、光合波部における波形の劣化を抑制することができる。例えば、10Gbpsで光通信を行う場合の1ビット当たりのタイムスロットは、100psであるが、これに対応する導波路長は、シリコン／シリカ光導波路の実効屈折率を考慮すると約1cmとなる。位相変調部後の導波路長に100μmの差があると、光合波部においては、適切なタイミングから1psずれることになり、設計時点でマージンが減ってしまう。また、2つのアームを伝搬したそれぞれの光が光合波部に入射するタイミングのずれがある場合、波形の歪と同時に、プッシュプル動作による周波数チャープを低減する効果も減少させてしまう。また、両アームの位相変調が同時に起こらないため、動作時に出力光の位相が変化して、周波数チャープを誘起してしまう。よって、2つのアームの長さを可能な限り等しくすることにより、マージンを最大化し、周波数チャープを低減する効果を最大にすることができる。

[0038] （第5実施形態）

図6A及び6Bに、本発明に係る第5実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子10D及び100Dは、第1実施形態の光変調素子10、100、及び110と同様に、マッハツェンダ干渉計20を含む基板型光導波路11から構成される。また、この実施形態では、また、マッハツェンダ干渉計

20の光分岐部21及び光合波部22が、位相変調部24の2つの端部24a, 24bからそれぞれ2つの辺11a, 11bに平行な方向に延長した2つの線の間La, Lbの領域に位置してもよい。

なお、図6Aの光変調素子10Dでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるのに対し、図6Bの光変調素子100Dでは、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜している。

また、図6Aでは、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であり、「2つの辺11a, 11bに平行な方向」は、「位相変調部24の幅方向」に一致する。そこで、2つの線La, Lbを、2つの端部24a, 24bからそれぞれ位相変調部24の幅方向に延長した線と定義することもできる。

[0039] 本実施形態によれば、位相変調部24からチップ端部の2つの辺11a, 11bまでの距離を、より短くすることができる。これにより、電極上の電気信号の伝播損失を低減し、高周波特性の向上が可能である。つまり、光分岐部21及び光合波部22を配置するには所定の長さが必要である。光分岐部21及び光合波部22を位相変調部24の内側に配置することにより、マッハツェンダ干渉計20の前後の導波路13, 15を、位相変調部24の端部24a, 24bにより近づけることができる。そのための手法として、例えば、位相変調部24の端部24a, 24bと光分岐部21又は光合波部22との間で、アーム部23の導波路を大きく曲げ、例えば90°を超える曲げ部を設けることが挙げられる。

光分岐部21を入力部31の配置される辺11aから離すことにより、マッハツェンダ干渉計20に入る前の導波路13を側方に逃がすためのスペースを削減できる。また、光合波部22を出力部32の配置される辺11bから離すことにより、マッハツェンダ干渉計20から出た導波路15を側方に逃がすためのスペースを削減できる。

[0040] (第6実施形態)

図36に、本発明に係る第6実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子10Gは、第1実施形態の光変調素子10と同様に、マッハツェンダ干渉計20を含む基板型光導波路11から構成される。

図36の光変調素子10Gは、光入射部12及び光出射部14が進行波電極30の出力部32と同一の辺11bに配置されている点で第1実施形態の光変調素子10と異なる。また、本実施形態において光入射部12及び光出射部14が進行波電極30の出力部32と同一の辺11bに配置されているが、光入射部12及び光出射部14が進行波電極30の入力部31と同一の辺11aに配置されていてもよい。さらに、光入射部12及び光出射部14が電極の入力部31及び出力部32より外側に配置されていれば、導波路13及び15の配置（配線の仕方）は限定されない。

本実施形態によれば、例えば、パッケージ等の制約から片側から入射出射を必要とする場合であってもマッハツェンダ干渉計20を適用することができる。

なお、図36の光変調素子10Gでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるが限定されず、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜していてもよい。

[0041] （第7実施形態）

図37に、本発明に係る第7実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子10Hは、第1実施形態の光変調素子10と同様に、マッハツェンダ干渉計20を含む基板型光導波路11から構成される。

図37の光変調素子10HにはV溝又はディープトレレンチなどの溝部34が設けられており、溝部34の端部に設けられる入射部12及び光出射部14を進行波電極30の側方の任意の位置に設けることができる点で、第6実施形態に係る光変調素子10Gと異なる。また、溝部の他端は基板型光導波路11の端部（基板型光導波路11の輪郭）に形成されている。

溝部34は光ファイバを固定することができ、また、光入射部12及び光出射部14と溝部34に固定された光ファイバとが位置決めされるように構

成されている。光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 は、モードフィールドコンバータ (MFC) またはスポットサイズコンバータ (SSC) 等を介して突合せ接合 (Butt Joint) によって溝部 3 4 に設置された光ファイバに接続される。なお、光変調素子 1 0 H では、V 溝 3 4 の端部が入射部 1 2 及び光出射部 1 4 の両方を構成しているが、溝部 3 4 がどちらか一方のみを構成してもよい。

本実施形態によれば、光ファイバを必要とする機能部品の近くに配置することができ、不要な引き回しを低減し、光損失をさらに抑制できる。また、本実施形態では光変調素子 1 0 H に V 溝が設けられているため光ファイバを固定することができ、容易に突合せ接合 (Butt Joint) をすることができる。

なお、図 3 7 の光変調素子 1 0 H では位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して垂直であるが限定されず、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して傾斜していてもよい。

[0042] (第 8 実施形態)

図 3 8 に、本発明に係る第 8 実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子 1 0 I は、第 1 実施形態の光変調素子 1 0 と同様に、マッハツェンダ干渉計 2 0 を含む基板型光導波路 1 1 から構成される。

図 3 8 の光変調素子 1 0 I は、光出射部 1 4 が進行波電極 3 0 の出力部 3 2 と同じ辺 1 1 b に、光入射部 1 2 が進行波電極 3 0 の側方の辺 1 1 c に配置されている点で第 1 実施形態の光変調素子 1 0 と異なる。また、本実施形態において光出射部 1 4 が進行波電極 3 0 の出力部 3 2 と同じ辺 1 1 b に、光入射部 1 2 が進行波電極 3 0 の側方の辺 1 1 c に配置されているが、光入射部 1 2 が進行波電極 3 0 の出力部と同じ辺 1 1 b に、光出射部 1 4 が進行波電極 3 0 の側方の辺 1 1 d に配置されていてもよい。また、光入射部 1 2 または光出射部 1 4 が進行波電極 3 0 の入力部 3 1 と同じ辺 1 1 a に設けられていてもよい。さらに、本実施形態において光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 が電極の入力部 3 1 及び出力部 3 2 より外側に配置されていれば、導波路

13及び15の配置（配線の仕方）は限定されない。

たとえば、変調器の前段にレーザが配置される場合、レーザを含めて1パッケージ化するには、光入射側と光出射側との方向が異なるレイアウトになる可能性があるが、本実施形態を用いることで、自由なレイアウトに対応できる。

なお、図38の光変調素子101では位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるが限定されず、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜していてもよい。

[0043] （第9実施形態）

図39に、本発明に係る第9実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子10Jは、第1実施形態の光変調素子10と同様に、マッハツェンダ干渉計20を含む基板型光導波路11から構成される。

図39の光変調素子10JにはV溝（又はディープトレンチ）36が設けられており、溝部の端部に設けられる光出射部14を進行波電極30の側方の任意の位置に設けることができる点で、第8実施形態の光変調素子101と異なる。また、第7実施形態と同様に、光出射部14は、モードフィールドコンバータ（MFC）またはスポットサイズコンバータ（SSC）等を用いて突合せ接続（Butt Joint）によって光ファイバに接続され、溝部34は光ファイバを固定することができる。なお、光変調素子10Jでは、溝部34の端部が光出射部14のみを構成しているが、溝部34が入射部12及び光出射部14の両方を構成してもよい。

本実施形態を用いることで、たとえば、異なるMFCを利用して光入出射部のうち、一方は突合せ接合（Butt Joint）、反対側はレンズ結合する場合などにも対応でき、自由なレイアウトに対応できる。

なお、図39の光変調素子10Jでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるが限定されず、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜していてもよい。

[0044] （第10実施形態）

図４０Ａ～４０Ｂに、本発明に係る第１０実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子１０Ｋ及び１００Ｋは、第１実施形態の光変調素子１０及び１００と同様に、マッハツェンダ干渉計２０を含む基板型光導波路１１から構成される。また、この実施形態では、第３実施形態の光変調素子１０Ｂと同様に、マッハツェンダ干渉計２０の各アーム部２３に、位相変調部２４とは異なる、電氣的に独立した位相調整部（例えば、低速位相変調部）２５を有する。光変調素子１０Ｂでは、位相調整部２５が２つの位相変調部２４の外側に設けられていたのに対し、光変調素子１０Ｋでは、位相調整部２５が２つの位相変調部２４の間（マッハツェンダ干渉計２０の内側）に設けられる。また、位相調整部２５の出力側にはモニタ用ＰＤ２５ａが設けられていてもよく、例えば、位相調整部２５がヒータ構造である場合に、位相調整部２５の温度を計測することができる。なお、図４０Ａ及び４０Ｂではモニタ用ＰＤ２５ａが一つ設けられているが、各位相調整部２５の信号を計測するようにモニタ用ＰＤ２５ａが２つ設けられていてもよい。

また、本実施形態において、位相調整部２５に電力を供給するための電極３５は基板型光導波路１１の内部において要素部品３６である位相調整部２５及びモニタ用ＰＤ２５ａに接続されており、図４０Ａ及び４０Ｂでは接地電極と信号電極の２本の電極の入出力部のみ示されている。なお、電極３５の配線方法は限定されず、図４Ａ及び４Ｂの電極３５のように配線されていてもよい。また、２つの位相調整部２５で共通の接地電極を用いてもよい。ただし低速位相調整器においては、図４０Ａ及び４０Ｂに示すように、高周波電極のように電極を基板型光導波路１１の辺まで引き回さずに、電極３５を各要素部品３６の近くに配置し、ワイヤボンディングまたは中継基板などを用いて外部と接続することが好ましい。

また、本実施形態における進行波電極３０の配置について、図４０Ａでは中央の接地電極３０Ｇの出力側が中抜きになっている。また、図４０Ｂでは中央の信号電極３０Ｓが二つに分割してそれぞれ独立している。なお、進行波電極３０の機能を失わずかつ位相調整部２５，モニタ用ＰＤ２５ａ，及び

電極 3 5 の動作、機能に支障がないように適宜配置されていれば特に限定されない。例えば、図 4 0 A の中央の進行波電極 3 0 G（を幅方向に 2 つに分割してそれぞれ独立させてもよい。

図 4 0 B は、本実施形態の電極が G S G S G 構造の場合に適用した変形例を示している。

アーム部 2 3 に設ける他の要素部品 3 6 として、位相調整部 2 5 及びモニタ用 P D 2 5 a のほかにも、偏波多重回路における偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及びマッハツェンダ干渉計におけるアーム間の光パワーを均一化するための光可変減衰器（V O A）等が挙げられる。

他の要素は、両方のアームに設けてもよく、片方のアームのみに設けてもよい。

本実施形態のように構成することで、高周波電素路の特性を劣化させずに、レイアウト上の自由度を高めることができる。

なお、図 4 0 A 及び 4 0 B の光変調素子 1 0 K では位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して垂直であるが限定されず、位相変調部 2 4 の長手方向が 2 つの辺 1 1 a, 1 1 b に対して傾斜していてもよい。

[0045]（第 1 1 実施形態）

図 4 1 に、本発明に係る第 1 1 実施形態の光変調素子を示す。この光変調素子 1 0 0 L は、マッハツェンダ干渉計 2 0 が二つ組み合わされた四位相偏移変調器（Q P S K 変調器）を有しており、共通の光分岐部（第 2 の光分岐部）1 6 によって分岐された光がマッハツェンダ干渉計 2 0 の導波路 1 7 に入射し、各マッハツェンダ干渉計 2 0 から光を出射する導波路 1 9 が共通の光合波部（第 2 の光合波部）1 8 に合波されている。光変調素子 1 0 L では、各マッハツェンダ干渉計 2 0 において、要素部品 3 6 である位相変調器（例えば、低速位相調整器）2 5 及びモニタ用 P D 2 5 a が 2 つの位相変調部 2 4 の内側に設けられ、さらに光の合波部 1 8 の手前にもう一つの要素部品 3 6 a が設けられている。つまり、各マッハツェンダ干渉計 2 0 に設けられた要素部品 3 6 はマッハツェンダ干渉計 2 0 の内側に配置され、二つのマッ

ハツェンダ干渉計 20 の合波部における要素部品 36 a は二つのマッハツェンダ干渉計 20 の間、つまり各マッハツェンダ干渉計 20 の外側に配置される構造を有する。

ここで、通常要素部品 36 a は各マッハツェンダ干渉計 20 からの光導波路の長さが等長となるように配置されることが好ましく、本実施形態の構成を有することで容易に各マッハツェンダ干渉計 20 から要素部品 36 a までの光導波路の長さを等長にすることができる。

従って、本実施形態のように構成することで、高周波電素路の特性を劣化させずに、レイアウト上の自由度を高めることができる。

なお、図 40 A 及び 40 B の光変調素子 10 K では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11 a, 11 b に対して垂直であるが限定されず、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11 a, 11 b に対して傾斜していてもよい。

[0046] (第 12 実施形態)

図 42 A 及び 42 B に、本発明に係る第 12 実施形態の光変調素子を示す。これらの光変調素子 10 M 及び 10 O M は、第 1 実施形態の光変調素子 10 及び 10 O と同様に、マッハツェンダ干渉計 20 を含む基板型光導波路 11 から構成される。また、この実施形態では、第 4 及び 10 実施形態の光変調素子 10 B 及び 10 K と同様に、マッハツェンダ干渉計 20 の各アーム部 23 に、位相変調部 24 とは異なる、電氣的に独立した位相調整部（例えば、低速位相変調部）25 を有する。光変調素子 10 B では、位相調整部 25 が 2 つの位相変調部 24 の外側または間に設けられていたのに対し、光変調素子 10 M では、各位相調整部 25 の長さ方向の出力側の延長線上に設けられる。つまり、位相調整部 24 と位相調整部 25 とが直線状に配置される。

また、本実施形態では、上記構成を可能とするため、位相変調部 24 より出力側の進行波電極 30 が曲がっている。これは、進行波電極において位相変調部と相互作用をする位置より出力側（後段部）は、電気信号に損失が生じて、すでに光との相互作用は完了しているため、出力される変調信号には影響は少ないためである。従って、本実施形態の進行波電極 30 におい

ては、進行波電極のうち入力部 31 から位相変調部と相互作用をする位置までが位相変調部 24 に沿って直線状に構成されていれば限定されない。

また、図 42A と図 42B とでは、出力部が設けられる辺が異なる点で相違している。なお、進行波電極 30 の後段部が低速位相変調部 25 を避けるように構成されていれば、出力部の位置は限定されない。

本実施形態を用いることで、進行波電極の後段部であれば曲げることで位相調整部 24 と位相調整部 25 とを直線状に配置することが可能であり、これにより光導波路設計のレイアウトが自由になる。特に、本実施形態では光導波路を短尺化することができ伝搬光の損失を低減できる。

[0047] (位相変調部の構成例)

図 7 に、位相変調部の断面構造の一例を示す。断面は、光の進行方向に垂直である。この構成例において、位相変調部 24 に用いられる光導波路 46 は、コア 44 がリブ部 40 とその両側にそれぞれ接続された一对のスラブ部 41, 42 とを有し、コア 44 の周囲にそれぞれ下部クラッド 43 と上部クラッド 45 を有する。電極 47, 48 の上部は上部クラッド 45 の上に形成され、電極 47, 48 の下部はスラブ部 41, 42 と電氣的に接続されている。

[0048] このような導波路構造は、 $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}$ の積層体からなる、SOI (Silicon on insulator) 基板をもとに製造することができる。中間のシリカ (SiO_2) 層を下部クラッド 43 とし、上部のシリコン (Si) 層をコア 44 として用いる。Si 層は、中央に厚みの大きいリブ部 40 を持つリブ型導波路であり、光はリブ部 40 を中心に分布する。上部クラッド 45 は、コア 44 のリブ構造を形成した後にシリカ (SiO_2) 等を堆積させることにより形成される。この上部クラッド 45 は必須の構成ではなく、コア 44 より屈折率の小さい材料が配置されればよく、例えば樹脂材料クラッドまたはエアクラッドを適用することも可能である。厚みの薄いスラブ部 41, 42 に接続される電極 47, 48 は、アルミ (Al) 等、コア 44 のシリコン材料とオーミックコンタクトを形成できる材料が好適である。

。電極 47, 48 はリブ部 40 から横方向に距離を置いて配置される。SOI 基板の下部の Si 層が光導波路 46 の下の基板 49 となる。

[0049] シリコンコア 44 は、一部は P 型、又は N 型にドーピングされている。この構成例では、片方のスラブ部 41 が P 型、もう片方のスラブ部 42 が N 型にドーピングされている。

半導体に導電性を付与するドーパント（不純物）は母体媒質に応じて適宜選択して用いることができる。例えば、本構成例のように母体媒質がシリコンのような IV 族半導体であれば、P 型ドーパントとしてホウ素（B）等の III 族元素が、また、N 型ドーパントとしてリン（P）や砒素（As）等の V 族元素が挙げられる。

[0050] ドーピング領域の配置として、この構成例では、スラブ部 41 とこれに接するリブ部 40 の一部が P 型に、スラブ部 42 とこれに接するリブ部 40 の一部が N 型にドーピングされている。P 型領域 51 と N 型領域 52 はリブ部 40 において接しており、その境界（PN 接合部）50 には空乏層が生じる。この PN 構造に電極 47, 48 を通じて外部から電圧を印加することで、PN 接合部 50 のキャリア分布が変動し、空乏層の幅に変化が生じる。シリコンの屈折率はキャリア密度によって変化することが知られている。これを利用して、キャリア分布の変化を通じて、電圧により光導波路の実効屈折率を制御し、位相変調部を出力する際の光の位相状態を制御することができる。

[0051] また、スラブ部 41, 42 のリブ部 40 から離れた一部は、他の箇所に比べてドーピング濃度を高くして、P+領域 53 及び N+領域 54 とする。これにより、電極 47, 48 とオーミックコンタクトを形成できる。P+領域 53 及び N+領域 54 は、少なくともスラブ部 41, 42 の上面（電極 47, 48 と接触する部分）に形成されればよいが、スラブ部 41, 42 の厚みやドーピング条件により、スラブ部 41, 42 の厚み方向の全体に及ぶこともできる。これにより、リブ部 40 の中央部にある PN 接合部 50 までの寄生抵抗を低減することができる。

[0052] 図8に、位相変調部の導波方向構造の一例を示す。位相変調部24は、図7に示す断面構造が長手方向に連続して続く構造を有する。必要な位相変化量及び印加する電圧等の条件から、位相変調部24の長手方向の長さが決められる。例えば、想定する動作電圧が4 V_{pp}で、この動作電圧における単位長さ（例えば1 mm）当たりの位相変化量が $\pi/4$ ラジアンするとき、位相変調部24全体で必要な位相変化量が $\pi/2$ ラジアンであれば単位長さの2倍（例えば2 mm）、必要な位相変化量が π ラジアンであれば単位長さの4倍（例えば4 mm）と決めることができる。

また、電極47、48は進行波電極を構成する。つまり、位相変調部24の長手方向にリブ型光導波路46と合わせ並走させ、光と同じ方向に電圧を伝播させる。例えば、光導波路に導波される光が図の手前から奥側に向かって伝播するとすれば、電極47、48の手前側に信号源を、奥側に終端を接続して電圧を印加する。伝播方向が奥から手前側の場合は、電極の奥側に信号源を、手前側に終端を接続して電圧を印加する。

[0053] （導波路構造の詳細）

位相変調部24とその他の要素（例えば光分岐部21や光合波部22）との接続及び基板上での導波路の引き回しには、リブ型導波路の他に、断面が矩形である矩形導波路（細線導波路）を利用できる。矩形導波路は、より強い電界の集中により、導波路側壁に製造上生じる微細な凹凸（側壁ラフネスの影響をより強く受けることから光損失が大きくなるというデメリットがあるが、強い閉じ込めにより曲げ半径をより小さくすることができる。また、後述するMMI及びMFC等も、矩形導波路を用いて構成される。

[0054] 図9に、リブ型導波路と矩形導波路との接続部の一例を模式的に示す。図示例では、矩形導波路55とリブ型導波路46のリブ部40とは同じ幅及び厚みを有するが、異なる幅を連続的に接続してもよい。矩形導波路55からリブ型導波路46への遷移領域56では、スラブ部41、42の幅が、ゼロから連続的に変化する。遷移領域56では、スラブ部41、42の幅は光の伝播方向（リブ部40の長手方向）に沿って線形に、又は二次関数的に増加

させてもよい。線形的変化をさせ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、二次関数的に変化させる方がよい。

遷移領域 56 の長さは光の波長（例えば約 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ）に比べて十分に長くする必要がある。遷移領域 56 の長さは特に限定されるものではないが、例えば、 $20 \mu\text{m}$ 程度を例示できる。

[0055] 矩形導波路を光ファイバと直接、又はレンズ等の光学部品を介して間接的に光結合させる場合、矩形導波路の先端部に、幅が端面に向かって徐々に狭くなる逆テーパー導波路（後述する図 32 参照）を設けることが好ましい。これにより、光ファイバと導波路端面でのモード不整合を低減することができる。光結合における光損失を低減することができる。

リゾ型導波路及び矩形導波路の厚みがサブミクロンスケールであるので、逆テーパー導波路の先端部は、幅及び厚みがごく微細である。よって、導波路端面付近において、高屈折率コアの断面積が入射光強度のモード分布の広がりに対して $1/100$ 以下であるので、光ファイバから入射する光に対する逆テーパー導波路端面での反射率を約 -30dB まで抑えることができる。その結果、低い光損失及び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。

[0056] 光分岐部及び光合波部としては、 1×2 のマルチモード干渉計（MM1）

を用いることもできる。図 10A 及び 10B に、 1×2 MM1 の模式図を示す。図 10A が平面図、図 10B が斜視図である。この MM1 57 では、片側に 1 本（符号 58）、反対側の 2 本（符号 55）の矩形導波路が接続されている。これらの矩形導波路 55、58 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 500nm （ $0.5 \mu\text{m}$ ）に対して、矩形導波路 55、58 の幅を $0.5 \mu\text{m}$ 、2 本の矩形導波路 55 の間隔を $0.3 \mu\text{m}$ 、MM1 の幅を $1.5 \mu\text{m}$ 、MM1 の長さを $1.8 \mu\text{m}$ として、計算上 $0.1 \mu\text{m}$ の間隔が確保される。

MM1 は、図 1A 等のスワップ干渉計 20 の光分岐部 21 及び光合

波部 22 のほか、基板型光導波路 11 に用いる光分岐部及び光合波部（例えば図 17A 及び 17B 等の光分岐部 16 及び光合波部 18 など）に採用することが好ましい。

[0057] 図 11 にマッハツェンダ型導波路 59 の模式図を示す。光分岐部 21 に左側の矩形導波路 58 から入射した光は、右側の 2 本の矩形導波路 55 に分岐され、マッハツェンダ型導波路 58 の両アーム部 23 を伝播する。位相変調部 24 を構成するリブ型光導波路 46 に高速電気信号を入力することにより、光変調された信号光が光合波部 22 の右側の矩形導波路 58 から出射される。マッハツェンダ型導波路 59 の前後の矩形導波路 58 は、図 1A～1C では光導波路 13, 15 に相当し、リブ型光導波路 46 と水平方向に 90° 曲げられ、前述の逆テーパ導波路からなる光結合部（図 1A～1C では光入射部 12 及び光出射部 14 に相当）に接続される。

以上により、低い光損失で、電気信号入力の変調を抑えた、光変調器に好適なマッハツェンダ型導波路 58（図 1A～1C のマッハツェンダ干渉計 20 に相当）を構成することができる。マッハツェンダ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、長距離伝送に適した高速な光変調器を構成することができる。

また、詳しくは後述するが、マッハツェンダ型導波路 58 を多段に接続することで、より複雑な変調方式に対応した光変調器を構成することができる。

[0058]（電極構造の詳細）

図 12 に、マッハツェンダ干渉計の 2 つのリブ型導波路を横断した断面図（図 14A 及び 4B の A-A 線に対応）を示す。リブ型導波路の断面構造は、図 7 及び図 8 と同様である。2 本の導波路コア 44 のそれぞれの PN 接合部 50 は、互いに PN の向きを反対にして配置されており、両方の N+領域 54 を同一の接地電極（GND）に接続している。

P+領域には、2 つの信号電極（Signal 1 及び Signal 2）により、別々の高周波信号を印加することができる。2 つの信号電極の外側には

、さらに接地電極 (GND) を配置して、GSGSGからなるコプレーナ電極を構成することができる。

[0059] スパッタエング干渉計を用いたフッシュユアル動作においては、Signal 1 及び Signal 2 には互いにオン・オフの反転した信号 (DATA, DAT) を印加する。

各々の寸法は、所望の特性インピーダンスに合わせ設計可能である。S 上のコプレーナ線路では、信号電極の幅 c と接地電極に対する間隔 b との比 $c : b$ を $2 : 1$ にすることで特性インピーダンスをおよそ 50Ω とできることが知られている。本構造では、シリコンリソ導波路の PN 構造に生じる接容量の影響を考慮して、 c/b を 2 よりも小さく設計することで、特性インピーダンスを調整することが可能である。一例として、電極厚さ $a = 2 \mu m$ 、GS 間隔 $b = 8 \mu m$ 、信号電極幅 $c = 10 \mu m$ が挙げられる。

[0060] 次にチップ端の電極の模式図を図 13A ~ 13D 及び図 14A, 14B に示す。図 13A, 13B 及び 14A では位相変調部の長手方向が 2 つの辺 1a, 11b に対して垂直である場合の電極の模式図であり、図 13C, 13D, 及び 14B では、位相変調部の長手方向が 2 つの辺 1a, 11b に対して傾斜している場合の電極の模式図である。

チップ端部においては、外部に位置するパッケージや中継基板等の上に作製された電極に対して、ボンディングにより電氣的接続を行う。接続方法としてはフリップチップやワイヤボンディング等が考えられる。十分な接触面積を確保するために、電極の端部には、例えば $100 \mu m$ 角のボンディング接続部を配置する。電極の端部から位相変調部 24 の電極に向けて、連続的に幅を変えて接続することで、特性インピーダンスの不整合による反射や減衰を低減している。光導波路 26 は、図 14A 及び 14B に示すように、電極の下部を通過することで、チップ端部のボンディング接続部から位相変調部 24 までの距離を低減することが可能である。なお、電極の下部に配置される光導波路 26 は、図 14A では、図 5A に示すように、図 14B では、図 5B に示すようにそれぞれ位相変調部 24 の外側に向かうアーム部 23 の一

部であつてもよく、マッハツェンダ干渉計 20 の前後の光導波路 13, 15 であつてもよい。

[0061] 図 13B 及は図 13A の X 部の部分拡大図であり、図 13D は図 13C の X 部の部分拡大図である。このとき電極の下部を通過する光導波路は、チップ端部に矩形に設定したボンディング接続部を避けることで、ボンディング時に生じる歪の影響を避けることができる。

図 13A～D の各要素の寸法としては、位相変調部上では図 12 と同様に GS 間隔 $b = 8 \mu\text{m}$ 、信号電極幅 $c = 10 \mu\text{m}$ が挙げられ、チップ端部では、信号電極幅 $d = 100 \mu\text{m}$ 、接地電極幅 $e = 200 \mu\text{m}$ が挙げられる。

[0062] 図 12～14B に示す例では電極が GSGSG 構造となっている。この場合の光変調素子の全体を図 15A 及び 15B に例示する。この光変調素子 10E 及び 100E では、進行波電極 30A が、マッハツェンダ干渉計 20 の 2 つのアーム部 23 の間に接地電極 30G を有し、2 つのアーム部 23 の外側にそれぞれ信号電極 30S を有し、これらの信号電極 30S の外側にさらに接地電極 30G を有する。

なお、図 15A の光変調素子 10E では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して垂直であるのに対し、図 15B の光変調素子 100E では、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して傾斜している。

また、図 16A 及び 16B に、電極が GS となっている光変調素子の一例を示す。GS 構造の電極は、例えば非特許文献 1 に記載されている。この光変調素子 10F では、進行波電極 30B が、マッハツェンダ干渉計 20 の 2 つのアーム部 23 の外側に、それぞれ接地電極 30G 及び信号電極 30S を有する。

なお、図 16A の光変調素子 10F では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して垂直であるのに対し、図 16B の光変調素子 100F では、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して傾斜している。

このように、電極がG S G構造でない場合でも、図1 A～1 Cまたは図3 A～図6 B等に応示構造とすることで、高周波電極における電気信号の低損失化や広帯域化が図れる。

[0063] (Q P S K用光変調器)

本発明に係る実施形態は、基板型光導波路が1つのマッハツェンダ干渉計を含む構成に限られず、複数のマッハツェンダ干渉計(M Z I)を含む構成も可能である。特に、多値化を行う場合に、複数のM Z Iに分岐したり、複数のM Z Iから合波したりする場合においても、各M Z Iの位相変調部から素子の端部までの距離を最小限に保つことができる。

一例として、図1 7 A, 1 7 B及び図1 8 A, 1 8 Bに、Q P S K用光変調器の構成例を示す。共通の光分岐部1 6によって分岐された光が各マッハツェンダ干渉計2 0の導波路1 7に入射し、各マッハツェンダ干渉計2 0から光を出射する導波路1 9が共通の光合波部1 8に合波されている。なお、図1 7 A及び1 8 Aでは位相変調部2 4の長手方向が2つの辺1 1 a, 1 1 bに対して垂直であるのに対し、図1 7 B及び1 8 Bでは、位相変調部2 4の長手方向が2つの辺1 1 a, 1 1 bに対して傾斜している。

[0064] それぞれのマッハツェンダ干渉計2 0に設けられる進行波電極3 0の電極構造は、G S G、G S G S G、G S等であってよい。2つのマッハツェンダ干渉計2 0がそれぞれG S G S G構造を持つ場合、それぞれが独立したG S G S G—G S G S G構造でもよく、隣接する接地電極を共通化したG S G S G S G S G構造でもよい。2つのマッハツェンダ干渉計2 0がそれぞれG S構造を持つ場合、向きが同じG S—G S構造でもよく、向きが反対のG S—S G構造でもよい。

[0065] Q P S K (quadrature phase shift keying) フォーマット用光変調器の場合、2つのマッハツェンダ干渉計2 0の出力の間で $\pi/2$ の位相変調を行う。そのための $\pi/2$ シフト調整部2 7は、上述した位相調整部2 5と同様な構成のヒータ型位相調整部で実現でき、図5 A及び5 Bに応示構成と同様に、他の要素を側部に配置することが可能で

ある。

各マッハツェンダ干渉計 20 と共通の光分岐部 16 との間を接続する導波路 17 の一部又は全部を側部に配置する場合、これらの導波路 17 の長さが互いに等しいことが好ましい。また、各マッハツェンダ干渉計 20 と共通の光合波部 18 との間を接続する導波路 19 の一部又は全部を側部に配置する場合、これらの導波路 19 の長さが互いに等しいことが好ましい。

[0066] 図 17A 及び 17B の場合、各マッハツェンダ干渉計 20 と共通の光合波部 18 との間を接続する導波路 19 が側部に配置されている。2つのマッハツェンダ干渉計 20 の間に他の要素を配置することもできるが、図 5A 及び 5B と同様に、マッハツェンダ干渉計 20 と基板側部との間のスペースに配置することが好ましい。この例では、4つのマッハツェンダ干渉計 20 の各位相変調部 24 の長手方向をそれぞれ延長した複数の線のうち、最も離れた2つの線 L1, L2 間の領域より外側、具体的には線 L2 と辺 11d との間の領域に、 $\pi/2$ シフト調整部 27 や共通の光合波部 18 を配置している。そして、導波路 19 の一方又は両方に等長化部 19b, 19c を設けている。

[0067] 図 18A 及び 18B の場合、各マッハツェンダ干渉計 20 の位相変調部 24 と光合波部 22 との間の導波路 23a を側方に引き出している。また、この導波路 23a にも等長化部 23b を設けている。導波路 19 上の $\pi/2$ シフト調整部 27 に給電する電極 37 は辺 11a に向けて配置し、導波路 23a 上の位相調整部 25 に給電する電極 35 は辺 11b に向けて配置している。また、この給電用電極 37 は、電極 35 と同じく辺 11b に配置してもよい。

この場合、給電は辺 11b の片側一方となり、外部に配置するパッケージにおいても、片側のみへの電極の引き出しが容易となる。また、電極 35, 37 の両方を辺 11a に配置しても同様の効果がある。図 18A 及び 18B では図 17A 及び 17B とは異なり、マッハツェンダ干渉計 20 の各アームに位相調整部 25 を設けている。これにより、例えば製造において生じる各

々のマッハツェンダ干渉計の各アーム間の差を調整することが可能となる。

ここで記載したQPSK用光変調器は、本実施形態の変調器で変調可能なマッハツェンダ干渉計に対して適切な電気信号を印加することで、任意の振幅・位相変調が可能である。例えば、入力電気信号に強度変化を持たせることで、16QAM及び64QAM変調に用いることができる。

[0068] (DP-QPSK用光変調器)

図19A及び19Bに示すように、QPSK用光変調器を2つ組み合わせることにより、DP (Dual polarization) - QPSK用光変調器を構成することも可能である。図19A及び19Bでは、マッハツェンダ干渉計(MZ 1) 20に設ける進行波電極の図示を省略している。図19Aでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるのに対し、図19Bでは、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜している。

光導波路を伝播する光は、通常、複数のモードの重ね合わせとして表されるが、シングルモードの場合、導波路を伝播する光は1つのモードのみからなる。しかしながら、導波路断面における高さ方向と幅方向の寸法が近い場合は、通常、主電界が幅方向のモード(ここでは便宜的にTEモードと呼ぶ)、及び主電界が高さ方向のモード(ここでは便宜的にTMモードと呼ぶ)の2つが存在する。

QPSK用光変調器は、上述したように2つのMZ 120と、入射光を2つのMZ 120に分岐する光分岐部16と、各MZ 120からの出射光を合波する光合波部18と、光合波部18の前段に配置された $\pi/2$ シフト調整部27を有する。

DP-QPSK用光変調器は、2つのQPSK用光変調器に共通する光分岐部16Aと、光分岐部16Aを各QPSK用光変調器の光分岐部16と接続する2つの光導波路17Aと、2つのQPSK用光変調器に共通する光合波部18Aと、この光合波部18Aを各QPSK用光変調器の光合波部18

と接続する2つの光導波路19Aを有する。

[0069] DP-QPSK用光変調器では、通常の導波路にTE/TMの2つのモードが存在できることを利用して、TE偏光で入力した光を分岐して、各々QPSK信号に変更した後、片方の偏光を回転させてTM偏光とし、さらに2つの偏光を偏光合成部（コンバイナ）で同一の導波路上に合成して、TE/TM両偏波に独立したQPSK信号を有するDP-QPSK変調を行う。偏波回転素子28は、QPSK用光変調器の光合波部18の後段の光導波路19Aに設けられている。偏波合成素子29は、DP-QPSK用光変調器の光合波部18Aと一体に成形され、光導波路19Aより入射した光を、TE、及びTMの二つの偏波状態としての後段の光導波路15に接続する。また、本実施形態では、偏波合成素子29と偏波回転素子28の位置は分離されているが、一体の機能を持つ偏波回転合成素子を設けることも可能である。

上述したものと同様の等長化部19b、19dを、QPSK用光変調器の光合波部18の前段の光導波路19（等長化部19b）や、DP-QPSK用光変調器の光合波部18Aの前段の光導波路19A（等長化部19d）に設けることが好ましい。

[0070] 図19A及び19Bでは、2か所に偏波回転素子28を設けることが可能であるが、通常は片側に配置させればよい。同じ光合波器に合波される2つの光導波路は、長さを等しくすることが好ましい。偏波回転素子28や偏波合成素子29としては、非特許文献2に記載されているものが挙げられる。偏波回転素子28及び偏波合成素子29に給電する電極38、39、又は図18A及び18Bと同様に位相調整部25に給電する電極35が必要であれば、適宜、辺11a又は辺11bに向けて配置することができる。

本実施形態によれば、複雑な構成を有する光変調器であっても、電極部を最短で位相変調部に到達させることができる。また、位相変調部への電気信号が素子の同一の方向から入力できるため、パッケージの高周波信号の入力口を同一方向に設けることができる。

[0071] (PD集積)

図20A及び20Bにフォトダイオード(PD)を集積した実施形態を示す。非特許文献3に記載されているように、シリコン導波路上にPD60を集積することも可能である。この実施形態では、側部(線L2と辺11dの間)に配置した光合波部22の後段にPD60を配置している。図20Aでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるのに対し、図20Bでは、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜している。

[0072] (両方の側部に他の要素を持つ例)

図21A及び21Bでは、光入射部12に近い側部(線L1と辺11cの間)に光分岐部21の前段に高次モード除去部61を設け、光出射部14に近い側部(線L2と辺11dの間)に配置した光合波部22の後段にPD60を配置している。ここで、高次モード除去部とは、本導波路をマルチモード導波路として設計した場合に適用可能な構造であり、不要な高次モードを導波路から取り除く構造を持つ。例えばシリコン上に集積することもできる。

本発明はこれに限られず、マッハツェンダ干渉計20の前後に、図5A及び5Bのような位相調整部25を設けることもできる。

[0073] (光入射部と光出射部を同じ側に配置した構成例)

これまで図示した実施形態(例えば図1A参照)は、光入射部12及び光出射部14がそれぞれ異なる辺11c、11dに配置されているが、図22A及び22Bに示すように、光入射部12及び光出射部14を同じ辺11eに配置することもできる。この配置によれば、ファイバアレイを利用して光入射部12と光出射部14を同時に調心することができる。なお、図22Aでは位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して垂直であるのに対し、図22Bでは、位相変調部24の長手方向が2つの辺11a, 11bに対して傾斜している。

[0074] (光入射部及び／又は光出射部を基板上に配置した構成例)

これまで図示した実施形態(例えば図1A参照)は、光入射部12及び光

出射部 14 がそれぞれ基板型光導波路 11 の端部に設けられ、外部の光ファイバと光結合させることができるものであるが、図 23A 及び C に示すように、受光器等の光出射部 14A を基板上に設けたり、図 23B 及び D に示すように、光源等の光入射部 12A を基板上に設けたりすることもできる。図 23A 及び C の場合、光出射部 14A は、進行波電極 30 とその側方の辺 11d との間に設けられているが、辺 11d には接していない。また、図 23B 及び D では、光入射部 12A は、進行波電極 30 とその側方の辺 11c との間に設けられているが、辺 11c には接していない。なお、図 23A および 23B では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して垂直であるのに対し、図 23C 及び 23D では、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して傾斜している。

[0075] (複数のマッハツェンダ干渉計を含む他の例)

図 24A 及び 24C に示すように、2 つのマッハツェンダ干渉計 20 を並列に接続したり、図 24B 及び D に示すように、2 つのマッハツェンダ干渉計 20 を独立に設けられたりすることもできる。図 24A および 24B では位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して垂直であるのに対し、図 24C 及び 24D では、位相変調部 24 の長手方向が 2 つの辺 11a, 11b に対して傾斜している。

なお、図 17A, 17B 及び図 18A, 17B も 2 つのマッハツェンダ干渉計 20 を並列に接続した例に該当するが、図 24A 及び 24C の場合、1 つの光入射部 12 から導波路 13 を、共通の光分岐部 16 により 2 つの導波路 17 に分岐し、それぞれを 2 つのマッハツェンダ干渉計 20 に接続している。また、それぞれのマッハツェンダ干渉計 20 の出力を合波することなく、導波路 15 を介して光出射部 14 から出射している。図 24A 及び 24C では、1 つの基板に光入射部 1 つと光出射部 2 つを設けているが、光入射部 1 つと光出射部 3 つ以上を設けてもよい。また、光入射部 2 つと光出射部 1 つを設けたり、光入射部 3 つ以上と光出射部 1 つとを設けたり、種々のバリエーションが可能である。

図 2 4 B 及び 2 4 D の場合、1 つの基板型光導波路 1 1 に、光入射部 1 2 及び光出射部 1 4 がそれぞれ複数設けられている。また、それぞれの光入射部 1 2 と光出射部 1 4 との間にマッハツェンダ干渉計 2 0 が設けられ、光入射部 1 2 から光出射部 1 4 に至る経路が独立に配置されている。

[0076] (シリコン導波路の曲げ半径)

非特許文献 4 によると、シリコン導波路では数 μm まで、光損失の増加なく曲げることが可能である。従って、位相変調部から、電極構造間の距離は、曲げ半径と、結合部の長さ、また、さらに、複数本導波路が並ぶ場合にはこの導波路間隔によることになる。

例えば、導波路の曲げ半径を $10\mu\text{m}$ とすると過剰な光損失なく曲げを構成することが可能である。また、簡単のため、図 1 0 A 及び 1 0 B に示す MM I 5 7 を光分岐部又は光合波部に用い、MM I 5 7 の配置に必要な長さも $10\mu\text{m}$ とする。

[0077] 図 2 5 A 及び 2 5 B は、図 1 A 及び 1 B のように一組のマッハツェンダ干渉計 2 0 からなる場合である。図 2 5 A の場合、位相変調部 2 4 からの 90° の曲げにつき $10\mu\text{m}$ の距離が必要となり、MM I 5 7 への曲げで $10\mu\text{m}$ 、MM I 5 7 に $10\mu\text{m}$ 、光導波路 2 6 への曲げ部で $10\mu\text{m}$ が必要であり、電極パッド 3 0 a までの距離を $10\mu\text{m}$ とすると、位相変調部 2 4 と電極パッド 3 0 a の間を $50\mu\text{m}$ で構成することが可能である。図 2 5 B の場合、位相変調部 2 4 からの 90° 前後の曲げにつき $10\mu\text{m}$ の距離が必要となり、MM I 5 7 への曲げで $10\mu\text{m}$ 、MM I 5 7 に $10\mu\text{m}$ 、光導波路 2 6 への曲げ部で $10\mu\text{m}$ が必要であり、電極パッド 3 0 a までの距離を $10\mu\text{m}$ とすると、位相変調部 2 4 と電極パッド 3 0 a の間を $50\mu\text{m}$ で構成することが可能である。

図 2 6 A 及び 2 6 B は、図 5 A 及び 5 B のように光合波部を側部に配置した場合である。この場合、位相変調部 2 4 からの曲げ半径 $10\mu\text{m}$ 、2 本の光導波路 2 6 の間隔 $10\mu\text{m}$ 、さらに電極パッド 3 0 a まで $10\mu\text{m}$ の間隔を取ると、位相変調部 2 4 と電極パッド 3 0 a の間隔を $30\mu\text{m}$ で構成する

ことが可能である。

[0078] 図27A及び27Bは、図17A、B、及び図24A及びCのように2本のマッハツェンダ干渉計20が組み合わされた場合である。図27Aの場合、図25Aと同じように、位相変調部24に接続された曲げが $10\mu\text{m}$ 、その後、光分岐部21又は光合波部22を経て 90° 曲げまでが $30\mu\text{m}$ 、さらに光導波路17、19を2本、光分岐部16又は光合波部18で合わせて曲げるまでに $30\mu\text{m}$ 、光導波路13、15から電極パッド30aまでの間隔を $10\mu\text{m}$ とすれば、位相変調部24と電極パッド30aの間隔は合計 $80\mu\text{m}$ で構成が可能である。

図27Bの場合、図25Bと同じように、位相変調部24に接続された曲げが $10\mu\text{m}$ 、その後、光分岐部21又は光合波部22を経て 90° 前後の曲げまでが $30\mu\text{m}$ 、さらに光導波路17、19を2本、光分岐部16又は光合波部18で合わせて曲げるまでに $30\mu\text{m}$ 、光導波路13、15から電極パッド30aまでの間隔を $10\mu\text{m}$ とすれば、位相変調部24と電極パッド30aの間隔は合計 $80\mu\text{m}$ で構成が可能である。

[0079] 図28A及び28Bは、図6A及び6Bのように光合波部を位相変調部の内側に向けて配置した場合である。図27A及び27Bと同様に、2本のマッハツェンダ干渉計20が組み合わされているが、位相変調部24と電極パッド30aの間隔を $40\mu\text{m}$ とすることも可能である。また、図1A～1Cのように一組のマッハツェンダ干渉計20からなる場合について考察すると、位相変調部24と電極パッド30aの間隔を $30\mu\text{m}$ とすることも可能である。

図28Aでは、図27Aに比べて光分岐部21又は光合波部22が $20\mu\text{m}$ 下方にずれており、光分岐部21又は光合波部22から 90° 曲げの $10\mu\text{m}$ の位置と、導波路23dから導波路17、19までの間隔 $10\mu\text{m}$ の位置とが、左右に揃っている。また、図28Bでは、図27Bに比べて光分岐部21又は光合波部22が $20\mu\text{m}$ 下方にずれており、光分岐部21又は光合波部22から 90° 前後の曲げの $10\mu\text{m}$ の位置と、導波路23dから導

波路 17, 19 までの間隔 $10\ \mu\text{m}$ の位置とが、左右に揃っている。

それゆえ、一組のマッハツェンダ干渉計 20 からなる場合では、図 25 A 及び 25 B の $50\ \mu\text{m}$ よりも $20\ \mu\text{m}$ 短い $30\ \mu\text{m}$ で済む。また、図 28 A 及び 28 B のように 2 本のマッハツェンダ干渉計 20 が組み合わせられた場合でも、図 27 A 及び 27 B の $80\ \mu\text{m}$ よりも $20\ \mu\text{m}$ の 2 倍だけ短い $40\ \mu\text{m}$ で済む。

なお、光分岐部 21 又は光合波部 22 の位置をさらに下方に（左右の位相変調部 24 の間に向けて）ずらしても、導波路 23 d を位相変調部 24 の端部から 90° または 90° 前後曲げるのに $10\ \mu\text{m}$ 必要で、さらにその位置から導波路 17, 19 までに間隔 $10\ \mu\text{m}$ が必要であるから、結果は同様となる。

[0080] さらに、図 25 A ~ 28 B において、曲げ半径 $10\ \mu\text{m}$ 、導波路間隔 $10\ \mu\text{m}$ というのは、前述のとおり実現可能な一例であるが、これに限らず、さらに狭めることも可能である。

上記例は矩形導波路について説明したが、リブ型導波路では、光損失の低減が図れる一方、曲げ半径が大きくなる、しかし、例えば曲げ半径を 2 倍にしても、電極パッドと位相変調部との間の距離は 2 倍以下であり、おおむね $100\ \mu\text{m} \sim 200\ \mu\text{m}$ の電極パッドー位相変調部間距離の実現が可能である。

なお、図 25 B, 26 B, 27 B, 及び 28 B において、位相変調部 24 の長手方向がチップの幅方向（上記図の左右方向）に対して傾斜している場合、例えば図 25 B の左側では位相変調部 24 から 90° 未満の曲げでよく、一方、右側では位相変調部 24 から 90° より大きい曲げが必要となる。この場合、光分岐部 21 又は光合波部 22 と位相変調部 24 との間において、2 つのアーム部 23 の導波路長が等しくなるように調整することが好ましい。

[0081] （光変調素子モジュール）

図 29 及び図 30 に光変調素子モジュールの実施形態を示す。図 30 は、

図 29 の M-M 線に沿う断面図である。パッケージ（筐体）の上部を覆う蓋は省略している。

この光変調素子モジュール 70 は、光変調素子チップ 71 をパッケージ 72 に收容する。パッケージ 72 は、例えばセラミック等の絶縁体からなる。光変調素子チップ 71 は、チップキャリア 73 の中央くぼみ部 73a に配置され、はんだ付け等で固定されている。チップキャリア 73 の長手方向の両側には、それぞれ、メタライズパターン 75 を形成したメタライズパターン形成部 76 と、終端回路基板 77 を配置した終端回路配置部 78 が設けられている。

[0082] メタライズパターン 75 は、図 31 に示すように、ストリップ線路 75a として G S G S G の電極パターンを有する。電極を構成する金属は特に限定されないが、例えば金（Au）が挙げられる。メタライズパターン 75 はワイヤ 74（図 30 参照）によって光変調素子チップ 71 の進行波電極の入力部（図 15 A 及び 15 B の入力部 31 参照）と電氣的に接続されている。信号入力線を外部のリード線の間隔に合わせるために、図 29 に示すように、光変調素子チップ 71 側では狭く、パッケージ 72 の端部に向かって広がる、逆 V 字型のパターンである。また、中心軸に対して左右対称である。

また、図 31 のメタライズパターン 75 は、光変調素子チップ 71 の内部に有する、フィードバック動作の PD への入出力配線のためのパッド 75b を、ストリップ線路 75a の左側で光変調素子チップ 71 の近傍に有する。

[0083] 終端回路基板 77 は、50Ω の終端回路を、中心軸に対して左右対称に、はんだ付け等で固定している。終端回路基板 77 はワイヤ 74（図 30 参照）によって光変調素子チップ 71 の進行波電極の出力部（図 15 A 及び 15 B の出力部 32 参照）と電氣的に接続されている。ワイヤ 74 としては、特に限定されないが、Au ワイヤが挙げられる。入力部及び出力部のそれぞれにつき、G S G S G の各 5 本をボンディングする。

[0084] 光結合系として、光入射部又は光出射部と光ファイバ 80 との間に、それ

ぞれ2つのレンズ81, 82が設けられる。第1レンズ81は、YAGレーザを用いた溶接によりチップキャリア73上の治具（図示せず）に固定され、光変調素子チップ71の左右にそれぞれ配置されている。第2レンズ82は、光ファイバ80とともにパッケージ72の外壁部72aに接続されている。

光変調素子チップ71の光入射部又は光出射部（図15A及び15Bの光入射部12、光出射部14参照）と、第1レンズ81、第2レンズ82、さらに光ファイバ80は、一直線上に配置されている。光変調素子チップ71は、チップキャリア73の中央部で、かつパッケージ72の中央部に配置されている。

[0085] 寸法の一例を下記に示す。横寸法は図29の左右方向、縦寸法は図29の上下方向、高さは図30の上下方向である。

パッケージ72の横寸法：18.2mm。

パッケージ72の縦寸法：14.8mm。

パッケージ72の高さ：6.7mm。

メタライズパターン75の縦寸法：3mm。

チップキャリア73の縦寸法：6mm。

終端回路配置部78の縦寸法：3mm。

リード線の間隔：1mm。

光変調素子チップ71の短尺面：1.4mm。

光変調素子チップ71の長尺面：4.9mm。

光導波路結合部の短尺面端からの距離（図15A及び15Bの辺11aから光入射部12まで、及び辺11bから光出射部14までに相当）：各1.55mm。

進行波電極の間隔：0.5mm。

Auワイヤの直径：25 μ m。

第1レンズの直径：2.5mm。

第1レンズ81を固定する治具の長さ：5mm。

[0086] (逆テーパ部構造)

モードフィールドコンバータ (MFC) で用いる逆テーパ部構造については、例えば図32 (非特許文献4のFig 2を参照) に示すような構造が提案され、実証されている。

図32において、光ファイバなどの外部のデバイスを、図の左奥に配置し、テーパ先端部に向かって、モードが広くなることを利用して高効率な光結合を実現することができる。

例えばシリカ等の下部クラッド91上にシリコンコアの矩形導波路92が配置され、矩形導波路92の先端部が逆テーパ導波路93となっている。逆テーパ導波路93の周囲は樹脂 (ポリマー) 等のクラッド94で覆われる。さらに、矩形導波路92の上などを含めて、上部クラッド95が設けられる。

[0087] (クラッドの厚み)

上述したように光導波路を電極の下部に通して両者が上下に交差する場合、電極に使用する金属により導波路の光損失 (以下、導波路損失という。) の増大を招くおそれがある。そのため、電極と導波路の間には適切な間隔を確保することが好ましい。

クラッドの厚みに関して、シミュレーションの結果を示す。メタルによる電極が光導波路の上部に配置される場合の導波路損失を、リブ型導波路及び矩形導波路についてそれぞれシミュレーションにより求めた。

[0088] シミュレーションに用いたモデルは、リブ型導波路については図33Aに示す構造であり、コア104はリブ部101及び両側のスラブ部102からなり、リブ部101の幅 $w_r = 500 \text{ nm}$ 、リブ部101の高さ $h_r = 220 \text{ nm}$ 、スラブ部102の高さ $h_s = 95 \text{ nm}$ 、下部クラッド103の厚さ $h_u = 2 \mu\text{m}$ とし、コア104の下面から電極106の下面までの高さ h を変数とした。矩形導波路については図33Bに示す構造であり、コア107の幅 $w_c = 500 \text{ nm}$ 、コア107の高さ $h_r = 220 \text{ nm}$ 、下部クラッド103の厚さ $h_u = 2 \mu\text{m}$ とし、コア107の下面から電極106の下面までの高さ h を変数とした。この場合、高さ h は上部クラッド105の厚みに相当する

。

クラッド103, 105の材料はシリカ(SiO_2)とし、コア104, 107の材料はシリコン(Si)とし、電極106の材料はアルミニウム(Al)とした。

[0089] シミュレーションでは、電極106もクラッド103, 105と同じくシリカから構成されると仮定して、シリコンのコア104, 107に対して求めた導波モードのうち、電極106の領域に存在する光パワーの割合を求めた。さらに、アルミの消光係数から電極106による実効的な光損失を計算した。得られた結果を図34に示す。

[0090] シミュレーション結果によると、 $h = 0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$ までの間で急激に光損失は減少し、 h が $1 \mu\text{m}$ 以上であれば、導波路長に対する導波路損失は 10 dB/cm 以下となる。する。電極の下に位置する導波路長は、電極のサイズから $100 \mu\text{m}$ 前後と想定される。このことから、クラッド厚が $1 \mu\text{m}$ 以上であれば、光導波路が電極の下を通過することによる過剰な光損失(以下、過剰損失という。)は 0.1 dB 以下となる。

シリコン導波路の光損失が $1 \sim 2 \text{ dB/cm}$ 程度であることを考慮すると、シリコン導波路の全長は 1 cm 以上と想定されることから、 0.1 dB 程度の過剰損失は $1/10$ 以下となり、影響は十分に小さくなる。

そこで、基板型光導波路のコアの上面と進行波電極との間にシリカからなるクラッド(図33A及び33Bの上部クラッド105)が設けられる場合、コアと進行波電極とが上下に交差する位置において、クラッドの厚み(図33A及び33Bの h)が $1 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。また、コアと進行波電極とが上下に交差する位置では、光導波路が位相変調部(リブ型導波路)以外の部分であることが好ましく、矩形導波路の部分であることが好ましい。

[0091] $h = 1.2 \mu\text{m}$ としたときの矩形導波路の電極による過剰損失の測定結果を図35に示す。ここで、電極による過剰損失とは、電極が矩形導波路の上部にある場合の光損失から、電極が矩形導波路の上部にない場合の光損失を

減じた差をいう。

通信波長 $1.55\ \mu\text{m}$ での過剰損失（図 35 の $WGLoss$ ）は $0.5\ \text{dB/cm}$ であり、電極の下部を光導波路が通過する影響（過剰損失）を小さく抑えたまま、高周波電極での高周波信号の減衰を抑えた光変調器を構成することが可能である。

[0092] 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。

それぞれの実施形態や構成例などで説明した特徴は、技術的に矛盾のない限り、それぞれ任意に組み合わせることが可能である。

[0093] 図 4 A, 4 B, 5 A, 及び 5 B では、位相調整部 25 等の他の要素を、アーム部 23 のうち、位相変調部 24 と光合波部 22 との間に挿入している。これと同様に、位相変調部 24 と光分岐部 21 との間に他の要素を挿入してもよい。また、図 5 A 及び 5 B のように構成する場合は、光分岐部 21 が前記外側の領域（線 $L1$ と辺 $11c$ との間の領域）に位置し、光入射部 12 の近くに配置されてもよい。

[0094] 第 2 実施形態（図 3 A 及び 3 B）や第 5 実施形態（図 6 A 及び 6 B）等において、2 つの線 $L a$, $L b$ を定義する際に、辺 $11 a$, $11 b$ が互いに平行でない場合、線 $L a$, $L b$ を独立に定義することもできる。例えば、位相変調部 24 の光分岐部 21 側の端部 24 a から延長する線 $L a$ は、入力部 31 が配置される辺 $11 a$ と平行にとり、位相変調部 24 の光合波部 22 側の端部 24 b から延長する線 $L b$ は、出力部 32 が配置される辺 $11 b$ と平行にとることもできる。

符号の説明

[0095] 10, 10 A, 10 B, 10 C, 10 D, 10 E, 10 F, 10 G, 10 H, 10 I, 10 J, 10 K, 10 M, 10 O, 110, 100 A, 100 B, 100 C, 100 D, 100 E, 100 F, 100 K, 100 L…光変調素子、11…基板型光導波路、12, 112…光入射部、14, 114…光

出射部、20, 120…マッハツェンダ干渉計、21…光分岐部、22…光合波部、23…アーム部、24, 124…位相変調部、30, 30A, 30B…進行波電極、30G, 130G…接地電極、30S, 130S…信号電極、31, 131…入力部、32, 132…出力部。

請求の範囲

- [請求項1] 基板型光導波路から構成される光変調素子であって、
前記基板型光導波路に光を入射する光入射部と、
前記光入射部に入射された光を分岐する第1の光分岐部と、前記第1の光分岐部で分岐された光を導波する2つのアーム部と、前記2つのアーム部に直線状にそれぞれ設けられた位相変調部と、前記2つのアーム部から導波された光を合波する第1の光合波部と、を有するマッハツェンダ干渉計と、
前記第1の光合波部で合波された光を前記基板型光導波路から出射する光出射部と、
入力部と出力部とを有し、前記位相変調部に電圧を印加する進行波電極と、を備え、
前記基板型光導波路は、平面視において前記位相変調部の長手方向の延長線とそれぞれ交差する2つの辺を含む輪郭を有し、
前記入力部は、前記2つの辺のうちの一方に形成され、
前記光入射部及び前記光出射部が、平面視で前記進行波電極が形成される領域とは異なる領域に位置する光変調素子。
- [請求項2] 前記位相変調部の長手方向が、前記2つの辺に対して垂直である請求項1に記載の光変調素子。
- [請求項3] 前記位相変調部の長手方向が、前記2つの辺に対してそれぞれ 0° より大きく 90° 未満の角度で傾きを有している請求項1に記載の光変調素子。
- [請求項4] 前記2つの位相変調部と前記2つの辺のうちの一方との距離が互いに等しく、かつ前記2つの位相変調部と前記2つの辺のうちの他方との距離が互いに等しい請求項1～3のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項5] 前記位相変調部が、互いに平行に配置されている請求項1～4のいずれか1項に記載の光変調素子。

- [請求項6] 前記出力部は、前記2つの辺のうちの他方に形成される請求項1～5のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項7] 前記進行波電極は、前記入力部から前記出力部まで直線状に形成されている請求項1～6のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項8] 前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、
前記光入射部及び前記光出射部が、前記複数の辺のうち前記2つの辺とは異なる辺に配置されている請求項1～7のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項9] 前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、
前記複数の辺のうちのいずれかに配置され、前記光入射部が配置された辺と前記光出射部が配置された辺とが異なる請求項1～8のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項10] 前記基板型光導波路の平面視における形状が前記2つの辺を含む複数の辺から構成される多角形であり、
前記複数の辺のうちのいずれかに配置され、前記光入射部が配置された辺と前記光出射部が配置された辺とが同一である請求項1～9のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項11] 光ファイバを固定可能な溝部をさらに備え、
前記溝部の一端は前記輪郭に形成され、前記溝部の他端に前記光入射部及び前記光出射部のうち少なくとも一方が形成されている請求項1～7のいずれか1項に記載の光変調素子。
- [請求項12] 前記光入射部及び前記光出射部が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記2つの辺に平行な方向に延長した2つの線の間の領域の外側に位置する請求項4に記載の光変調素子。
- [請求項13] 前記光入射部及び前記光出射部が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記2つの辺に平行な方向に延長した2つの線の間の領域に位

置する請求項 4 に記載の光変調素子。

[請求項14] 前記マッハツェンダ干渉計を構成する光導波路の一部が、2つの前記位相変調部の前記延長線の間の領域の外側に位置する請求項 1 ～ 13 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項15] 前記2つのアーム部のうち少なくとも一方が、低速位相変調部、モニタ用PD、偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及び光可変減衰器の少なくとも一つを有する他の要素部品をさらに有し、

前記他の要素部品の少なくとも一部が、前記延長線の間の領域の外側に位置する請求項 14 に記載の光変調素子。

[請求項16] 前記2つのアーム部のうち少なくとも一方が、低速位相変調部、モニタ用PD、偏波変換素子、偏波分離・結合素子、及び光可変減衰器の少なくとも一つを有する他の要素部品をさらに有し、

前記他の要素部品の少なくとも一部が、前記延長線の間の領域の内側に位置する請求項 14 に記載の光変調素子。

[請求項17] 前記第1の光分岐部及び前記第1の光合波部のうち少なくとも一方が、前記延長線の間の領域の外側に位置する請求項 14 又は 15 に記載の光変調素子。

[請求項18] 前記2つのアーム部の長さが互いに等しい請求項 1 ～ 17 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項19] 前記第1の光分岐部及び前記第1の光合波部のうち少なくとも一方が、前記位相変調部の両端部からそれぞれ前記2つの辺に平行な方向に延長した2つの線の間の領域に位置する請求項 1 ～ 18 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項20] 前記基板型光導波路が複数の前記マッハツェンダ干渉計を含む請求項 1 ～ 19 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項21] 前記光入射部から入射した光を分岐して前記複数のマッハツェンダ干渉計に出射する第2の光分岐部、及び、前記複数のマッハツェンダ干渉計から出射された光を合波する第2の光合波部のうち少なくとも

一方をさらに備える請求項 18 に記載の光変調素子。

[請求項22]

前記第 2 の光分岐部を備え、

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第 2 の光分岐部との間を接続する導波路の少なくとも一部が、前記複数のマッハツェンダ干渉計に含まれる各位相変調部の長手方向の延長線のうち、最も離れた 2 つの間の領域の外側に位置する請求項 21 に記載の光変調素子。

[請求項23]

前記第 2 の光合波部を備え、

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第 2 の光合波部との間を接続する導波路の少なくとも一部が、前記複数のマッハツェンダ干渉計に含まれる各位相変調部の長手方向の延長線のうち、最も離れた 2 つの間の領域の外側に位置する請求項 21 に記載の光変調素子。

[請求項24]

前記第 2 の光分岐部又は前記第 2 の光合波部の少なくとも一方が、前記最も離れた 2 つの線の間の領域の外側に位置する請求項 22 又は 23 に記載の光変調素子。

[請求項25]

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第 2 の光分岐部との間を接続する導波路の長さ、が互いに等しい請求項 21, 22, 及び 24 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項26]

前記複数のマッハツェンダ干渉計と前記第 2 の光合波部との間を接続する導波路の長さが互いに等しい請求項 21, 23, 及び 24 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項27]

前記基板型光導波路が QPSK 構造又は DP-QPSK 構造を有する請求項 20 ～ 26 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項28]

前記第一光分岐器及び前記第一光合波器の少なくとも一方が、マルチモード干渉計からなる請求項 1 ～ 27 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

[請求項29]

前記第一光分岐器、前記第一光合波器、前記第二光分岐器、及び前記第二光合波器の少なくとも一つが、マルチモード干渉計からなる請求項 21 ～ 27 のいずれか 1 項に記載の光変調素子。

- [請求項30] 前記進行波電極が、（１）前記２つのアーム部の間に信号電極を有し、前記２つのアーム部の外側にそれぞれ接地電極を有する、ＧＳＧ構造、（２）前記２つのアーム部の間に接地電極を有し、前記２つのアーム部の外側にそれぞれ信号電極を有し、前記信号電極の外側にさらに接地電極を有する、ＧＳＧＳＧ構造、（３）前記２つのアーム部の外側に、それぞれ接地電極及び信号電極を有する、ＧＳ構造、のいずれかの構造を有する請求項１～２９のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項31] 前記基板型光導波路上に光源及び受光器のうちの少なくとも一方が設けられた請求項１～３０のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項32] 前記位相変調部を構成する光導波路が、リブ部と、前記リブ部の両側にそれぞれ接続された一对のスラブ部と、を有するリブ型導波路からなる請求項１～３１のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項33] 前記リブ型導波路の少なくとも一方の端には矩形導波路が接続され、
前記リブ型導波路と前記矩形導波路との接続部において、前記一对のスラブ部の幅が前記矩形導波路と光結合するように連続的に変化する遷移領域を有する請求項３２に記載の光変調素子。
- [請求項34] 前記基板型光導波路を構成するコアがシリコンからなる請求項１～３３のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項35] 前記基板型光導波路を構成する基板がシリコンからなる請求項１～３４のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項36] 前記基板型光導波路を構成するコアの上面と前記進行波電極との間にシリカからなるクラッドが設けられ、前記位相変調部以外の部分において前記コアと前記進行波電極とが上下に交差する位置において前記クラッドの厚みが１μm以上である請求項１～３５のいずれか１項に記載の光変調素子。
- [請求項37] 請求項１～３６のいずれか１項に記載の光変調素子と、前記光変調

素子収容するパッケージとを備える光変調素子モジュール。