

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4485218号
(P4485218)

(45) 発行日 平成22年6月16日(2010.6.16)

(24) 登録日 平成22年4月2日(2010.4.2)

(51) Int.Cl.

G02F 1/035 (2006.01)

F 1

G02F 1/035

請求項の数 13 (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2004-31038 (P2004-31038)
 (22) 出願日 平成16年2月6日 (2004.2.6)
 (65) 公開番号 特開2005-221874 (P2005-221874A)
 (43) 公開日 平成17年8月18日 (2005.8.18)
 審査請求日 平成18年8月16日 (2006.8.16)

(73) 特許権者 309015134
 富士通オプティカルコンポーネンツ株式会
 社
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号
 (74) 代理人 100078330
 弁理士 笹島 富二雄
 (72) 発明者 杉山 昌樹
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号 富士通株式会社内
 (72) 発明者 中澤 忠雄
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号 富士通株式会社内
 審査官 林 祥恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】光変調器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電気光学効果を有する基板の表面にマッハツエンダ干渉計の構造を有する光導波路を形成し、該光導波路の分岐部および合波部の間に位置する一対の導波路に沿って信号電極および接地電極を設け、前記信号電極に電気信号を印加することにより前記光導波路を伝搬する光の変調を行うマッハツエンダ型の光変調器であって、

前記基板は、前記一対の導波路を伝搬する光と前記信号電極を伝搬する電気信号とが相互に作用する相互作用部について、一部の領域の分極方向を他の領域である非反転領域の分極方向に対して反転させて形成した分極反転領域と、前記一対の導波路の少なくとも片側に位置する部分を、当該導波路に沿った溝により形成したリッジ構造部と、を有し、

前記光導波路は、前記相互作用部に該当する部分に 90° 以上の折り返し角度を有する曲がり部を含み、

前記分極反転領域は、前記相互作用部のうちの前記曲がり部に対応した領域に形成される一方、前記曲がり部前もしくは後の、または隣り合う前記曲がり部同士を接続する前記光導波路の略直線部に対応した領域を、前記非反転領域とし、

前記信号電極は、前記相互作用部の分極反転領域内では前記一対の導波路のうちの一方の導波路近傍に配置され、前記相互作用部の非反転領域内では他方の導波路近傍に配置されることを特徴とする光変調器。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

10

20

前記基板が有する屈折率よりも低い屈折率を有するバッファ層を、少なくとも前記リッジ構造部の側面に形成することを特徴とする光変調器。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記リッジ構造部は、前記基板の表面の少なくとも前記曲がり部に対応した部分に形成されることを特徴とする光変調器。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記光導波路は、前記基板の表面に平行で光の伝搬方向に垂直な方向についての中心位置が、前記曲がり部において、前記リッジ構造部の中心からずれるように配置されることを特徴とする光変調器。 10

【請求項 5】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記光導波路は、前記曲がり部を 2 箇所以上有することを特徴とする光変調器。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記一対の導波路における光の伝搬方向について、前記相互作用部の全長の略 1 / 2 倍の長さを有し、前記光の伝搬方向に垂直な方向について、前記リッジ構造部の幅に略等しい長さを有することを特徴とする光変調器。 20

【請求項 7】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記基板は、Z - カットの結晶基板の表面に前記光導波路が形成され、該光導波路の形成された表面が前記分極反転領域において + Z 面となり、前記非反転領域において - Z 面となることを特徴とする光変調器。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の光変調器であって、

前記リッジ構造部は、前記分極反転領域に該当する部分の側面が前記基板の表面に対して略垂直な状態で形成されることを特徴とする光変調器。

【請求項 9】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記基板は、ニオブ酸リチウム基板であることを特徴とする光変調器。 30

【請求項 10】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記信号電極は、前記基板の表面に平行で電気信号の伝搬方向に垂直な方向についての幅の中心が、下方に位置する前記リッジ構造部の中心と一致するように配置されることを特徴とする光変調器。

【請求項 11】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記リッジ構造部は、前記光導波路の分岐部および合波部にそれぞれ近接する部分において、リッジ幅が徐々に変化するテーパー状に形成されることを特徴とする光変調器。 40

【請求項 12】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記相互作用部の光の伝搬方向についての中心を軸として対称な位置に配置されることを特徴とする光変調器。

【請求項 13】

請求項 1 に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記一対の導波路における光の伝搬方向について、波長チャープの要求値に応じて設定される長さを有し、前記光の伝搬方向に垂直な方向について、前記リッジ構造部の幅に略等しい長さを有することを特徴とする光変調器。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

【技術分野】

【0001】

本発明は光通信で用いられる光導波路デバイスに関し、特に、マッハツエンダ型の光変調器に関する。

【背景技術】

【0002】

例えば、ニオブ酸リチウム（LiNbO₃）やタンタル酸リチウム（LiTaO₃）などの電気光学結晶を用いた光導波路デバイスは、結晶基板上的一部に金属膜を形成して熱拡散させるか、或いは、パターニング後に安息香酸中でプロトン交換するなどして光導波路を形成した後、その光導波路の近傍に電極を設けることで形成される。このような電気光学結晶を用いた光導波路デバイスの1つとして、分岐干渉型の光導波路構造を有するマッハツエンダ型光変調器が知られている。

【0003】

図6は、一般的なマッハツエンダ型光変調器の構成を示す平面図である。このマッハツエンダ型光変調器においては、基板101上にチタン（Ti）膜を形成し、それをマッハツエンダ型の形状にパターニングした後に1050で7～10時間加熱して熱拡散させることによって、光導波路110が形成される。この光導波路110は、入射導波路111、分岐部112、平行導波路113A, 113B、合波部114および出射導波路115からなり、平行導波路113A, 113Bに沿って、信号電極121および接地電極122からなるコプレーナ電極120が設けられる。Z-カットの基板101を用いる場合には、Z方向の電界による屈折率の変化を利用するため、光導波路113Aの真上に信号電極121が配置される。また、信号電極121および接地電極122は、平行導波路113A, 113B中を伝搬する光の吸収を防ぐために、酸化シリコン（SiO₂）等からなる図示しないバッファ層を介して基板101上に形成されている。

【0004】

このような従来のマッハツエンダ型光変調器を高速で駆動する場合は、信号電極121の一端を図示しない抵抗を介して接地して進行波電極とし、信号電極121の他端からマイクロ波等の高周波の電気信号Mを印加する。このとき、信号電極121と接地電極122の間で発生する電界によって、平行導波路113A, 113Bの屈折率がそれぞれ変化するため、平行導波路113A, 113Bを伝搬する各光の位相差が変化して、強度変調された信号光が出射導波路115から出力されるようになる。

【0005】

上記のような従来のマッハツエンダ型光変調器については、信号電極121の断面形状を変化させてマイクロ波の実行屈折率を制御し、光とマイクロ波の伝搬速度を整合させることによって、広帯域の光応答特性が得られることが知られている。また、例えば図7や図8に示すように、光導波路110の一部に曲がり部110Aを設けて略U字型や略S字型の光導波路110を形成することによって、基板101の小型化（特に、長手方向の小型化）を図ることができるようになる。

【0006】

光導波路の一部に曲がり部を形成した場合には、その曲がり部で生じる光損失（放射損失）が問題となる。従来、光導波路の曲がり部における損失を抑えるものとして、曲がり部の外周に反射部を設けることにより、曲がり部で放射した光を光導波路に再結合させる技術が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

【特許文献1】特開平11-167032号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、上記のような従来のマッハツエンダ型光変調器については、次に示すような課題があった。

(1) 波長チャープに関する課題

10

20

30

40

50

従来のマッハツェンダ型光変調器では、信号電極 121 に対する配置の違いによって、各平行導波路 113A, 113B に印加される電界の強さが異なるようになるため、信号電極 121 に近い平行導波路 113A の屈折率の変化量 (n_s) の方が、信号電極 121 から遠い平行導波路 113B の屈折率の変化量 (n_g) よりも大きくなる。このため、平行導波路 113A, 113B を伝搬する各光の位相変化も絶対値が異なるようになり、信号が「0」から「1」または「1」から「0」に切り替わる時に、変調光の波長変化(波長チャーブ)が発生して伝送後の信号波形を劣化させるという問題がある。

【0008】

波長チャーブを低減するためには、例えば、X-カットの結晶基板を用いる方法や、2つの信号電極を各平行導波路上にそれぞれ配置して、マッハツェンダ型光変調器をプッシュプル駆動する方法などがある。

10

X-カットの結晶基板を用いる場合は、基板と平行な電界を利用して2つの平行導波路にそれぞれ +Z 方向と -Z 方向の電界を印加することで、波長チャーブが発生しない変調を行うことが可能になる。しかし、平行導波路を信号電極の直下に配置することができないため、信号電極と導波路の間の距離が長くなり、高い駆動電圧を印加する必要が生じるなどの欠点がある。

【0009】

また、2つの信号電極を用いてプッシュプル駆動を行う場合は、高周波の電気信号の入力コネクタが2つ必要になると共に、両方の信号電極に対してデータの反転した電気信号を位相を制御しながら印加することが必要になるため、駆動系の回路構成が複雑化するなどの欠点がある。

20

(2) 小型化に関する課題

マッハツェンダ型光変調器の小型化のために、光導波路の一部に曲がり部を形成し、さらに、上述した特許文献1の技術を適用して曲がり部で生じる光損失を抑えたとしても、光導波路の曲がり部の曲率を小さく設定することは困難なため、光変調器の小型化が制約されるという課題があった。例えば、光導波路の曲がり部の曲率を数mm程度に小さく設定した場合には、反射部による光の再結合が不十分となり、光損失が著しく増大してしまう。このように、光導波路の曲がり部の曲率を小さくできない場合には、光導波路全体を小さくすることが難しいため、光変調器の小型化にも限界が生じてしまう。

【0010】

30

なお、本願の発明者は、上記(1)の課題に対して、平行導波路を伝搬する光と信号電極を伝搬するマイクロ波とが相互作用する部分の一部に分極反転領域を形成し、分極反転領域内では一方の平行導波路上に信号電極を配置し、非反転領域内では他方の平行導波路上に信号電極を配置することによって、各平行導波路を伝搬する光の位相変化量の差が打ち消されるようにして、変調光に生じる波長チャーブの低減を図る技術を提案している(例えば、先願である国際出願番号 PCT/JP02/12824号等)。しかし、この先願発明は、前述したような光導波路の一部に曲がり部を形成した構成について具体的に示しておらず、光変調器の小型化に関して課題を残していた。

【0011】

また、上記(2)の課題に対しては、曲がり光導波路の両側に位置する基板を、曲がり部の形状に沿って掘り下げてリッジ構造部を形成し、そのリッジ構造部の少なくとも曲がり部に面する側面に、基板の有する屈折率よりも低屈折率の材料を用いてバッファ層を形成することによって、曲がり部の曲率が小さくても放射損失等を抑えることができるようにして、光デバイスの小型化を図る技術を提案している(例えば、先願の特願2003-079116号等)。しかし、この先願発明は、上述したような波長チャーブに関する課題を残していた。また、リッジ構造部を形成したことにより信号電極下の基板が斜めに傾いた側面を有するようになるため、光導波路を伝搬する光の速度と信号電極を伝搬するマイクロ波の速度とを整合させるための設計が複雑なものになるなどの課題も生じていた。

40

【0012】

本発明は上記の点に着目してなされたもので、変調光に生じる波長チャーブを低減する

50

と共に、小型で光損失を抑えることのできるマッハツエンダ型光変調器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

上記の目的を達成するため、本発明の光変調器は、電気光学効果を有する基板の表面上にマッハツエンダ干渉計の構造を有する光導波路を形成し、該光導波路の分岐部および合波部の間に位置する一対の導波路に沿って信号電極および接地電極を設け、前記信号電極に電気信号を印加することにより前記光導波路を伝搬する光の変調を行うマッハツエンダ型の光変調器である。前記基板は、前記一対の導波路を伝搬する光と前記信号電極を伝搬する電気信号とが相互に作用する相互作用部について、一部の領域の分極方向を他の領域である非反転領域の分極方向に対して反転させて形成した分極反転領域と、前記一対の導波路の少なくとも片側に位置する部分を、当該導波路に沿った溝により形成したリッジ構造部と、を有する。また、前記光導波路は、前記相互作用部に該当する部分に90°以上の折り返し角度を有する曲がり部を含み、前記分極反転領域は、前記相互作用部のうちの前記曲がり部に対応した領域に形成される一方、前記曲がり部前もしくは後の、または隣り合う前記曲がり部同士を接続する前記光導波路の略直線部に対応した領域を、前記非反転領域とする。前記信号電極は、前記相互作用部の分極反転領域内では前記一対の導波路のうちの一方の導波路近傍に配置され、前記相互作用部の非反転領域内では他方の導波路近傍に配置される。

【0014】

かかる構成の光変調器では、光導波路に入射された光は分岐部で2分岐されて一対の導波路にそれぞれ送られる。各導波路には、信号電極を伝搬する電気信号に応じて信号電極と接地電極の間で発生する電界が印加され、この電界による電気光学効果によって各導波路の屈折率が変化して、各導波路を伝搬する光の位相がそれぞれ変化する。このとき、相互作用部には分極方向が相反する分極反転領域および非反転領域が形成され、一対の導波路に対する信号電極の配置が各領域で変えられているので、各導波路を伝搬する光の位相変化量の差が打ち消され、合波部で合波される変調光に発生する波長チャーブが低減される。また、一対の導波路を伝搬する各光は、各々の伝搬方向に沿ってリッジ構造部が形成されていることで空気がクラッドとなるため、光の伝搬方向に対して垂直な方向についての屈折率差が大きくなり、放射損失が抑えられるようになる。さらに、光導波路に90°以上の折り返し角度を有する曲がり部が設けられることで、基板の小型化が可能となる。

【0015】

また、上記の光変調器については、基板が有する屈折率よりも低い屈折率を有するバッファ層を、少なくともリッジ構造部の側面に形成するようにしてもよい。これにより、リッジ構造部の側面の荒れによる散乱損失も抑えられるようになる。

さらに、上記のリッジ構造部は、基板の表面の少なくとも曲がり部に対応した部分に形成されるようにしてもよい。かかる構成によれば、光導波路の曲がり部に対応した部分にリッジ構造部が形成されることで、曲がり部の曲率が小さくても光導波路を伝搬する光の放射損失が抑えられるようになる。加えて、上記の曲がり部においては、基板の表面に平行で光の伝搬方向に垂直な方向について、光導波路の中心位置がリッジ構造部の中心からずれるように配置されるようにしてもよい。このような配置とすることにより、放射損失を効果的に抑えることが可能になる。

【0016】

また、上記の分極反転領域は、一対の導波路における光の伝搬方向について、相互作用部の全長の略1/2倍の長さを有し、光の伝搬方向に垂直な方向について、リッジ構造部の幅に略等しい長さを有するようにしてもよい。これにより、分極反転領域および非反転領域では、絶対値が略等しく符号が反転した位相変調が行われるようになるため、波長チャーブが略零の変調光が生成されるようになる。

【0017】

さらに、上述した光変調器の基板については、Z-カットの結晶基板の表面に光導波路

10

20

30

40

50

が形成され、該光導波路の形成された表面が分極反転領域において + Z 面となり、非反転領域において - Z 面となるようにするのがよい。このような構成において基板に溝を設けてリッジ構造部を形成することにより、分極反転領域におけるリッジ構造部の側面の垂直性が向上するようになって、放射損失がより効果的に抑えられるようになる。

【発明の効果】

【0018】

本発明の光変調器によれば、変調光に生じる波長チャープを低減させることができると共に、一対の導波路を伝搬する光の損失を抑えることが可能になる。特に、光導波路の曲がり部に対応させてリッジ構造部を設けることで、曲がり部の曲率が小さくても放射損失を効果的に抑えることができるので、光変調器の小型化を容易に実現することが可能になる。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

以下、本発明の光変調器を実施するための最良の形態について添付図面を参照しながら説明する。なお、全図を通して同一の符号は同一または相当部分を示すものとする。

図 1 は、本発明の一実施形態によるマッハツエンダ型光変調器の構成を示す平面図である。また、図 2 は、図 1 の各部における断面の要部構造を示す図であって、(A) は A - A' 断面図、(B) は B - B' 断面図である。

【0020】

図 1 および図 2 において、本実施形態のマッハツエンダ型光変調器は、電気光学効果を有する基板 1 と、その基板 1 の表面に形成された光導波路 10 と、基板 1 の表面にバッファ層 2 を介して形成されたコプレーナ電極 20 とを備える。

20

基板 1 は、例えば、Z - カットのニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 基板やタンタル酸リチウム (LiTaO₂) 基板などが用いられる。この基板 1 は、その - Z 面に対してチタン (Ti) 拡散またはプロトン交換などの公知の処理を施すことで光導波路 10 を形成した後、図 1 および図 2 (B) において点線で囲んだ領域 R の分極方向を他の領域の分極方向に対して反転させ、さらに、図 2 (A) (B) にあるように平行導波路 13A, 13B の両側の部分を掘り下げてリッジ構造部 30 を形成したものである。ここでは、分極反転された領域 R を分極反転領域と呼び、分極反転されていない他の領域を非反転領域と呼ぶことにする。

30

【0021】

上記の分極反転領域 R は、例えば、レジスト等でパターニングした後にパルス高電界を印加するなどして形成される。この分極反転領域 R の形状は、光導波路 10 を伝搬する光とコプレーナ電極 20 を伝搬するマイクロ波 M とが相互に作用する部分 (以下、相互作用部とする) の長手方向 (光の伝搬方向) の全長を L とした場合に、光の伝搬方向について約 L / 2 の長さを有する。また、光の伝搬方向に対して垂直な方向については、リッジ構造部 30 の幅 W に略等しい長さを有し、基板 1 の深さ方向については、相互作用部を十分にカバーできる長さ (ここでは基板 1 を貫通させている) を有するものとする。このような分極反転領域 R を形成することにより、図 2 (B) の実線矢印で表した結晶方位に示すように、光導波路 10 が形成された基板 1 の表面は、非反転領域が - Z 面、分極反転領域 R が + Z 面となる。

40

【0022】

リッジ構造部 30 は、例えば、一般的な反応性イオンエッチング (RIE : reactive ion etching) 等によって基板 1 をエッチングして形成される。リッジ構造部 30 の深さは、例えば光導波路 10 中を伝搬する光のパワーが基板 1 の表面から約 3 μm の位置で最大となる場合、3 μm 以上となるように設定される。このリッジ構造部 3 では、空気 (屈折率 1) がクラッド相当となり、光の伝搬方向に対して垂直な方向における基板 1 (屈折率 2.2) と空気との屈折率差が大きくなる。このため、光導波路 10 の曲がり部 10A の曲率を小さくしても光の放射損失を抑えることができるようになる。特に、分極反転領域 R に対応したリッジ構造部 30 については、基板 1 のエッチング速度が + Z 面と - Z 面で

50

相違することによりリッジ側面 30 A の垂直性が向上することが知られており（例えば、文献：Ian E. Barry et al., "Ridge waveguides in lithium niobate fabricated by differential etching following spatially selective domain inversion", APPLIED PHYSICS LETTERS, VOLUME 74, NUMBER 10, 8 MARCH 1999. 等参照）、放射損失をより効果的に抑えることが可能になる。

【0023】

なお、リッジ構造部 30 の幅 W（図 2（A）参照）については、側面 30 A により光のフィールドを閉じ込めるため、例えば 5 ~ 9 μm の幅 w を有する光導波路に対して + 6 μm 以下となるように設計するのが望ましい。また、リッジ構造部 30 の始点および終点、具体的には後述する光導波路 10 の分岐部 12 および合波部 14 に近接する部分に関しては、リッジ幅をテーパー状に変化させて結合損の発生を防ぐようになる。

10

【0024】

バッファ層 2 は、光導波路 10 中を伝搬する光がコプレーナ電極 20 によって吸収されるのを防ぐと共に、リッジ構造部 30 の側面 30 A の荒れによって生じる散乱損失を防ぐために、基板 1 の表面に形成される。このバッファ層 4 としては、基板 1 の屈折率より小さい屈折率を有する材質、例えば、酸化シリコン（ SiO_2 ）や酸化チタン（ TiO_2 ）を用いることができ、その厚さは 0.2 ~ 1 μm 程度とするのがよい。

【0025】

光導波路 10 は、前述の図 7 に示した従来の構成の場合と同様に、入射導波路 11、分岐部 12、平行導波路 13 A, 13 B、合波部 14 および出射導波路 15 を有し、マッハツェンダ干渉計を構成している。平行導波路 13 A, 13 B の中央部分には、円弧状に 180° の折り返し角度を有して折り返した形状の曲がり部 10 A が形成される。この曲がり部 10 A では、図 2（B）に示したように、各平行導波路 13 A, 13 B がリッジ構造部 30 の中央位置から外側（円弧の中心から離れる方向）にずらしてそれぞれ配置される。このような配置では、各平行導波路 13 A, 13 B の外周がリッジ構造部 30 の外側の側面 30 A に近接または接する一方、各平行導波路 13 A, 13 B の内周がリッジ構造部 30 の内側の側面 30 A から所定の距離だけ離れるようになる。なお、本実施形態では各平行導波路 13 A, 13 B をリッジ構造部 30 の外側方向にずらす構成としたが、内側方向にずらす構成としてもよい。

20

【0026】

このときのずらし量は、曲がり部 10 A を伝搬する光の放射損失を減らすことができる方向に対して所定量に設定される。一般に、光導波路において重要な光損失は、放射損失と散乱損失である。上記の構成において、リッジ構造部 30 の幅 W を小さくすると、放射損失の影響を少なくできるが、散乱損失の影響が大きくなる。一方、リッジ構造部 30 の幅 W を大きくすると、散乱損失の影響を小さくできるが、放射損失の影響が大きくなる。散乱損失は、リッジ構造部 30 の側面 30 A の荒れによって生じる。したがって、このような条件に基づいて、散乱損失の影響を受けずに放射損失を低く抑えることができるようなずらし量を適宜に設定すればよい。

30

【0027】

なお、曲がり部 10 A 以外の部分（以下、直線部と呼ぶことにする）における各平行導波路 13 A, 13 B の配置は、図 2（A）に示すように、リッジ構造部 30 の中央位置を通るように設計されている。この直線部に位置する各平行導波路 13 A, 13 B に関しては、後述するコプレーナ電極 20 の信号電極 21 の両端部分におけるコネクタ接続用の余裕長を大きくするために、入射導波路 11 側の部分と出射導波路 15 側の部分との間隔を近接させている。これに対応して、曲がり部 10 A 側に向いた約半分は直線状ではなく、曲がり部 10 A と直線部との間をつなぐ円弧状の形状としている。ただし、本発明における各平行導波路 13 A, 13 B のレイアウトは上記のような一例に限定されるものではない。

40

コプレーナ電極 20 は、信号電極 21 および接地電極 22 を有する。信号電極 21 は、例えば図 1 に示したように、基板 1 の非反転領域において平行導波路 13 A 上を通り、分

50

極反転領域 R において平行導波路 13B 上を通過する所要の形状にパターニングされている。一方、接地電極 22 は、信号電極 21 とは一定の距離を隔てて、基板 1 の非反転領域において平行導波路 13B 上を通り、分極反転領域 R において平行導波路 13A 上を通過する所要の形状にパターニングされている。上記の信号電極 21 は、その幅の中心が下方に位置するリッジ構造部 30 の幅の中心と一致するように配置されている。また、信号電極 21 は、図 1 において上側に位置する出力端がここでは図示しないが抵抗を介して接地されることにより進行波電極とされ、変調データに対応したマイクロ波 M が図 1 において下側に位置する入力端から印加される。

【0028】

次に、上記のような構成を備えたマッハツエンダ型光変調器の動作について説明する。

本光変調器では、外部から入射導波路 11 に入力された連続光が分岐部 12 で 2 分岐されて各平行導波路 13A, 13B にそれぞれ送られる。各平行導波路 13A, 13B には、信号電極 21 を進行するマイクロ波 M に応じて信号電極 21 と接地電極 22 の間で発生する電界が印加され、この電界による電気光学効果によって各平行導波路 13A, 13B の屈折率が変化する。これにより、各平行導波路 13A, 13B を伝搬する各々の光の位相がそれぞれ変化するようになる。

【0029】

このとき、相互作用部の長手方向（全長 L）について、非反転領域の長さ L1 と分極反転領域 R の長さ L2 とが略等しくなるように、すなわち、理想状態として $L_1 = L_2 = L/2$ の関係が成立立つように分極反転領域 R が形成されていると、平行導波路 13A を伝搬する光の位相は、次の（1）式に示す ϕ_A だけ変化し、平行導波路 13B を伝搬する光の位相は、次の（2）式に示す ϕ_B だけ変化するようになる。

【0030】

$$\begin{aligned}\phi_A &= (+ n_s) \cdot L_1 + (- n_g) \cdot L_2 \\ &= + (n_s + n_g) \cdot L/2 \quad \dots (1) \\ \phi_B &= (- n_g) \cdot L_1 + (+ n_s) \cdot L_2 \\ &= - (n_s + n_g) \cdot L/2 \quad \dots (2)\end{aligned}$$

ただし、 n_s は信号電極 21 の下に位置する平行導波路の屈折率変化量であり、 n_g は接地電極 22 の下に位置する平行導波路の屈折率変化量である。

【0031】

上記の（1）式および（2）式より明らかのように、各平行導波路 13A, 13B を伝搬する各々の光の位相は、非反転領域において $(+ n_s) \cdot L_1, (- n_g) \cdot L_1$ だけそれぞれ変化し、分極反転領域 R において $(+ n_g) \cdot L_2, (- n_s) \cdot L_2$ だけそれぞれ変化する。従って、各平行導波路 13A, 13B を通じて合波部 14 に到達する各々の光の位相は、 $+ (n_s + n_g) \cdot L/2, - (n_s + n_g) \cdot L/2$ だけ変化することになり、絶対値が等しく符号が反転した位相変調となる。そのため、従来、Z-カットの基板を用いたマッハツエンダ型光変調器において変調光に発生していた波長チャーブを略零にすることができる。

【0032】

図 3 は、非反転領域（または分極反転領域 R）の長さと発生する波長チャーブとの関係を例示した図である。ただし、ここでは相互作用部の全長 L ($= L_1 + L_2$) に対する非反転領域の長さ L1 の割合を横軸にとり、発生する波長チャーブを示す パラメータの値を縦軸にとっている。図 3 より、 $L_1/L = 0.5$ のとき、すなわち、非反転領域の長さ L1 と分極反転領域 R の長さ L2 が等しくなる場合に、パラメータの値が 0 となって波長チャーブの発生がなくなっていることが分かる。

【0033】

また、各平行導波路 13A, 13B を伝搬する光は、各々の伝搬方向に沿ってリッジ構造部 30 が形成されていることで空気がクラッドとなる。このため、リッジ構造部 30 が形成されておらず基板 1 がクラッドとなる場合に比べて、光の伝搬方向に対して垂直な方向についての屈折率差が大きくなるので、曲がり部 10A の曲率が小さくても放射損失を

10

20

30

40

50

効果的に抑えることができるようになる。さらに、曲がり部 10Aにおいては、各平行導波路 13A, 13B に沿って分極反転領域 R を形成してエッティングを行ったことでリッジ側面の垂直性が向上しているため、放射損失がより一層低減されるようになる。加えて、バッファ層 2 が形成されていることにより、リッジ構造部 30 の側面 30A の荒れによる散乱損失も抑えられるようになる。したがって、曲率の小さな曲がり部 10A を有する光導波路 10 を用いても光損失を確実に抑えることができるため、光変調器の小型化を図ることが可能になる。また、上記のようにリッジ側面の垂直性が向上することによって、光変調器の駆動電圧を低減できるようになると共に、光とマイクロ波の伝搬速度を整合させるための設計を容易に行うことも可能になる。

【0034】

10

なお、上記の実施形態では、相互作用部の長手方向の中央部分に長さ $L/2$ の分極反転領域 R を形成することで波長チャープの低減を図るようにしたが、分極反転領域 R を形成する位置は相互作用部の中央部分に限定されるものではなく、例えば、相互作用部の長手方向の前半部分（入射側）または後半部分（出射側）に分極反転領域 R を形成するようにしても、同様に波長チャープを略零にすることが可能である。ただし、一般に、コプレーナ線路に与えられる電気信号の伝搬損失は、その周波数が高くなるほど増大することが知られている。このため、コプレーナ電極 20 の信号電極 21 にマイクロ波 M を与えて本光変調器をより高速で駆動する場合には、マイクロ波 M が信号電極 21 を進行するにつれてその強度が減衰し、平行導波路 13A, 13B を伝搬する各光との相互作用の状態が入射側と出射側とでは相違するようになる。従って、上記のように分極反転領域 R を入射側または出射側に配置した構成では、非反転領域における光の位相変化と分極反転領域 R における光の位相変化とに差が生じ、波長チャープの発生を抑えることが難しくなってしまう可能性がある。この点を考慮すれば、上記実施形態の場合のように、分極反転領域 R が相互作用部の長手方向の中心について対称に配置されるようにするのが望ましい。

【0035】

20

また、上述したリッジ側面の垂直性向上による効果に関しては、本実施形態の構成では分極反転領域 R が形成される曲がり部 10A においてのみ得られることになるが、例えば図 4 に示すように、ストレート型のマッハツエンダ型光変調器に対して、各平行導波路 13A, 13B に沿って分極反転領域 R を設けてリッジ構造部を形成するようにしても、駆動電圧を 10% 程度低減させることができ、光とマイクロ波の速度整合や外部回路とのインピーダンスマッチングが実現し易くなるため、上記のようなストレート型への応用も有効である。

【0036】

30

さらに、上述した実施形態では、光導波路 10 を 1箇所で 180° 折り返した略 U 字型の構成を例に説明したが、本発明はこれに限らず、例えば図 5 に示すように光導波路 10 を 2箇所で 180° 折り返した略 S 字型の構成に応用することも可能であり、本発明は 90° の折り返しが任意の箇所で行われる構成に対して有効である。光導波路 10 の折り返し回数を増やすことにより、相互作用長 L を長く設定することができ、位相差の可変領域を増やすことができるようになる。また、2箇所以上で折り返しを行いチップ長（基板 1 の長さ）が 30mm 以下となるように設計した場合には、4インチウェハから採れるチップ数が増えるため、チップ単価を低減させる効果が大きくなり有効である。なお、図 5 の略 S 字型の構成においては、 180° の折り返しが行われる 2箇所の曲がり部 10A, 10A' にそれぞれ分極反転領域 R が形成され、各分極反転領域 R の長手方向の長さの和が相互作用部の全長 L の $1/2$ 倍となるように設計されている。このような構成とすることにより、前述したように分極反転領域 R が相互作用部の長手方向の中心について対称に配置されるようになるため、広帯域に亘って波長チャープを略零にすることが可能になっている。

【0037】

40

また、上述した実施形態およびその応用例では、非反転領域において平行導波路 13A 上に信号電極 21 を配置し、分極反転領域 R においては平行導波路 13B 上に信号電極 2

50

1を配置するようにしたが、非反転領域および分極反転領域Rにおける信号電極21の配置を上記とは逆にすることも勿論可能である。

さらに、非反転領域の長さL1と分極反転領域Rの長さL2とが略等しくなるようにして波長チャープの発生をなくすようにしたが、例えば、分極反転領域Rの電気光学定数が非反転領域の電気光学定数と異なる場合は、その差に応じて分極反転領域Rの長さL2を調節して波長チャープの発生が抑えられるようにすればよい。加えて、このような分極反転領域Rの長さの調節に関連した応用例として、波長チャープの要求値が零でないシステムに本光変調器が適用される場合に、その要求値に応じて、相互作用部の全長に対する非反転領域または分極反転領域の長さの割合を変えることにより、所望の波長チャープが発生した変調光を得ることができるようになることも容易である。

10

【0038】

以上、本明細書で開示した主な発明について以下にまとめる。

【0039】

(付記1) 電気光学効果を有する基板の表面にマッハツエンダ干渉計の構造を有する光導波路を形成し、該光導波路の分岐部および合波部の間に位置する一対の平行導波路に沿って信号電極および接地電極を設け、前記信号電極に電気信号を印加することにより前記光導波路を伝搬する光の変調を行うマッハツエンダ型の光変調器であって、

前記基板は、前記一対の平行導波路を伝搬する光と前記信号電極を伝搬する電気信号とが相互に作用する相互作用部について、一部の領域の分極方向を他の領域の分極方向に対して反転させて形成した分極反転領域と、前記一対の平行導波路の各両側に位置する部分を、当該平行導波路に沿って掘り下げて形成したリッジ構造部と、を有し、

20

前記信号電極は、前記相互作用部の分極反転領域内では前記一対の平行導波路のうちの一方の平行導波路近傍に配置され、前記相互作用部の分極反転されていない非反転領域内では他方の平行導波路近傍に配置されることを特徴とする光変調器。

【0040】

(付記2) 付記1に記載の光変調器であって、

前記基板が有する屈折率よりも低い屈折率を有するバッファ層を、少なくとも前記リッジ構造部の側面に形成することを特徴とする光変調器。

【0041】

(付記3) 付記1に記載の光変調器であって、

30

前記光導波路は、前記相互作用部に該当する部分に90°以上の折り返し角度を有する曲がり部を含み、

前記リッジ構造部は、前記基板の表面の少なくとも前記曲がり部に対応した部分に形成されることを特徴とする光変調器。

【0042】

(付記4) 付記3に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記相互作用部のうちの前記曲がり部に対応した領域に形成されることを特徴とする光変調器。

【0043】

(付記5) 付記3に記載の光変調器であって、

40

前記光導波路は、前記基板の表面に平行で光の伝搬方向に垂直な方向についての中心位置が、前記曲がり部において、前記リッジ構造部の中心からずれるように配置されることを特徴とする光変調器。

【0044】

(付記6) 付記3に記載の光変調器であって、

前記光導波路は、前記曲がり部を2箇所以上有することを特徴とする光変調器。

【0045】

(付記7) 付記1に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記一対の平行導波路における光の伝搬方向について、前記相互作用部の全長の約1/2倍の長さを有し、前記光の伝搬方向に垂直な方向について、前記

50

リッジ構造部の幅に略等しい長さを有することを特徴とする光変調器。

【0046】

(付記8) 付記1に記載の光変調器であって、

前記基板は、Z-カットの結晶基板の表面に前記光導波路が形成され、該光導波路の形成された表面が前記分極反転領域において+Z面となり、前記非反転領域において-Z面となることを特徴とする光変調器。

【0047】

(付記9) 付記8に記載の光変調器であって、

前記リッジ構造部は、前記分極反転領域に該当する部分の側面が前記基板の表面に対して略垂直な状態で形成されることを特徴とする光変調器。

10

【0048】

(付記10) 付記1に記載の光変調器であって、

前記基板は、ニオブ酸リチウム基板であることを特徴とする光変調器。

【0049】

(付記11) 付記1に記載の光変調器であって、

前記信号電極は、前記基板の表面に平行で電気信号の伝搬方向に垂直な方向についての幅の中心が、下方に位置する前記リッジ構造部の中心と一致するように配置されることを特徴とする光変調器。

【0050】

(付記12) 付記1に記載の光変調器であって、

前記リッジ構造部は、前記光導波路の分岐部および合波部にそれぞれ近接する部分において、リッジ幅が徐々に変化するテーパー状に形成されることを特徴とする光変調器。

20

【0051】

(付記13) 付記1に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記相互作用部の光の伝搬方向についての中心を軸として対称な位置に配置されることを特徴とする光変調器。

【0052】

(付記14) 付記1に記載の光変調器であって、

前記分極反転領域は、前記一対の平行導波路における光の伝搬方向について、波長チャーブの要求値に応じて設定される長さを有し、前記光の伝搬方向に垂直な方向について、前記リッジ構造部の幅に略等しい長さを有することを特徴とする光変調器。

30

【図面の簡単な説明】

【0053】

【図1】本発明の一実施形態によるマッハツェンダ型光変調器の構成を示す平面図である。

【図2】図1の各部における断面の要部構造を示す図であって、(A)はA-A'断面図、(B)はB-B'断面図である。

【図3】上記の実施形態における非反転領域の長さと波長チャーブの関係を例示した図である。

【図4】本発明をストレート型マッハツェンダ型光変調器に応用した構成例を示す平面図である。

40

【図5】上記の実施形態に関連した変形例の構成を示す平面図である。

【図6】一般的なマッハツェンダ型光変調器の構成を示す平面図である。

【図7】光導波路の一部に曲がり部を形成して小型化を図った従来の光変調器の構成例を示す平面図である。

【図8】光導波路の一部に曲がり部を形成して小型化を図った従来の光変調器の他の構成例を示す平面図である。

【符号の説明】

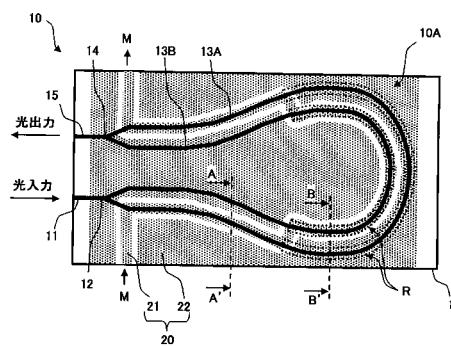
【0054】

1...基板

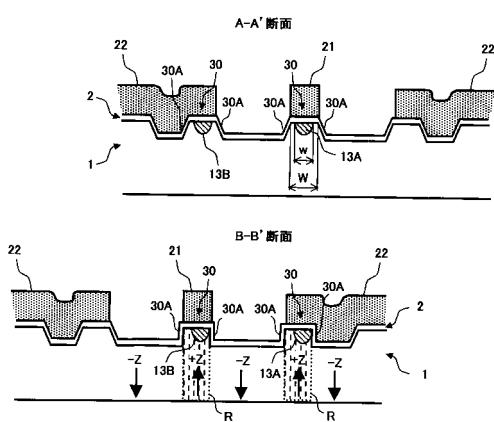
50

- 2 ... バッファ層
 10 ... 光導波路
 10A, 10A' ... 曲がり部
 11 ... 入射導波路
 12 ... 分岐部
 13A, 13B ... 平行導波路
 14 ... 合波部
 15 ... 出射導波路
 20 ... コプレーナ電極
 21 ... 信号電極
 21A, 21B ... パッド部
 22 ... 接地電極
 30 ... リッジ構造部
 30A ... リッジ側面
 R ... 分極反転領域
 M ... マイクロ波
- 10

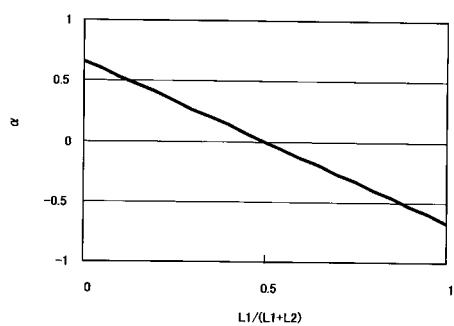
【図1】



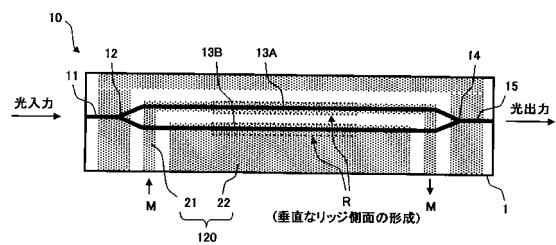
【図2】



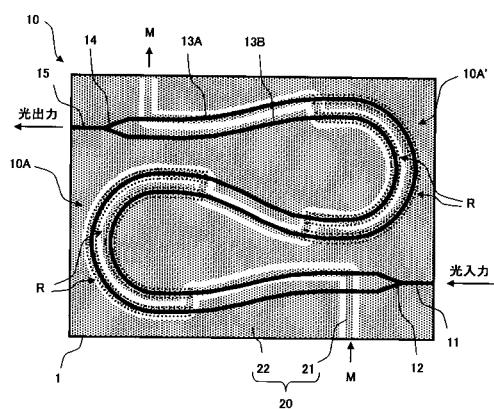
【図3】



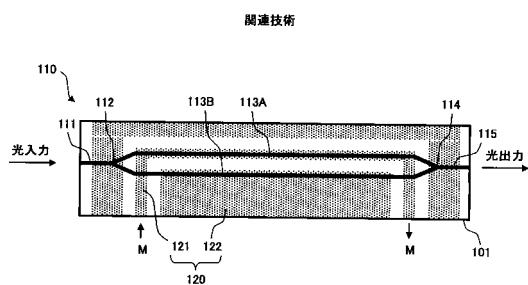
【図4】



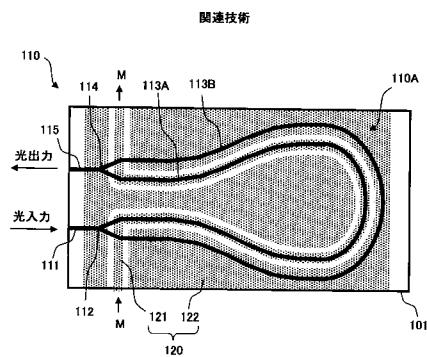
【図5】



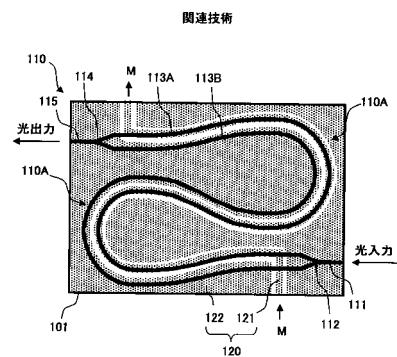
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2002-350796(JP,A)
特開平10-090638(JP,A)
特開2003-202530(JP,A)
特開平09-054291(JP,A)
特開平11-167032(JP,A)
特開平11-064654(JP,A)
特開平10-206810(JP,A)
特開2004-004589(JP,A)
特開2003-066394(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/29-1/39
G02F 1/00-1/125
G02B 6/12-6/14
JSTPlus (JDreamII)
JST7580 (JDreamII)