

(11) 特許出願公開番号

特開2010-60640

(P2010-60640A)

(43) 公開日 平成22年3月18日(2010.3.18)

(51) Int.Cl.
G02F 1/035 (2006.01)

F 1
G O 2 F 1/035

テーマコード (参考)
2H079

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2008-223670 (P2008-223670)	(71) 出願人	000000572
(22) 出願日	平成20年9月1日 (2008. 9. 1)		アンリツ株式会社
			神奈川県厚木市恩名五丁目 1 番 1 号
		(74) 代理人	100072604
			弁理士 有我 軍一郎
		(72) 発明者	河野 健治
			神奈川県厚木市恩名五丁目 1 番 1 号 アン
			リツ株式会社内
		(72) 発明者	川面 英司
			神奈川県厚木市恩名五丁目 1 番 1 号 アン
			リツ株式会社内
		(72) 発明者	佐藤 勇治
			神奈川県厚木市恩名五丁目 1 番 1 号 アン
			リツ株式会社内

[最終頁に続く](#)

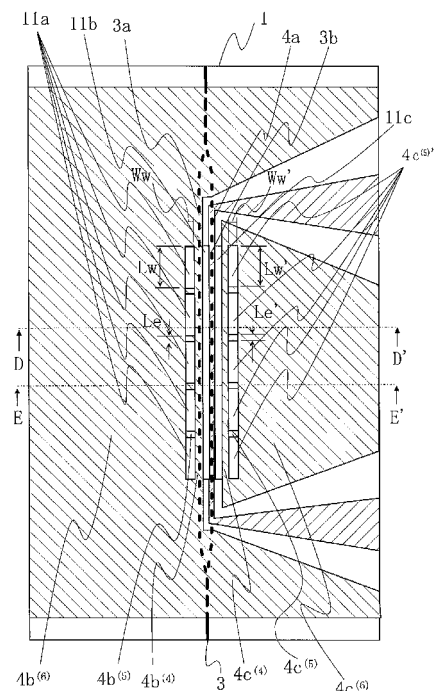
(54) 【発明の名称】 光変調器

(57) 【要約】

【課題】光変調特性が高性能で、安定性について改善された光変調器を提供する。

【解決手段】基板 1 と、進行波電極 4 と、凹部により構成される中心導体用リッジ部 8 a と接地導体用リッジ部 8 b を具備し、中心導体用リッジ部と接地導体用リッジ部に光導波路が各々形成される光変調器において、凹部は第 1 ～ 3 の凹部 9 a ～ 9 c でなり、第 1 の凹部に対して対称に第 2、3 の凹部が形成され、第 1、2 の凹部間に中心導体用リッジ部が形成され、第 1、3 の凹部の間に接地導体用リッジ部が形成され、第 1、2 の凹部の上方には接地導体が形成されておらず、第 3 の凹部の上方と、第 2 の凹部に隣接する中心導体用リッジ部でない側に形成された接地導体の中心導体に対して第 3 の凹部と対称となる位置とにて、一方に接地導体が形成された部分と形成されていない部分が交互に形成され、他方に中心導体よりも薄く形成された部分と中心導体と同じ厚みを持つ部分とが形成される。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電気光学効果を有する基板と、前記基板に形成された 2 本の光導波路と、前記基板の上に形成されたバッファ層と、該バッファ層の上方に配置された中心導体と接地導体からなる進行波電極と、前記進行波電極を伝搬する高周波電気信号の電界強度が強い領域における前記基板の少なくとも一部を掘り下げることにより形成した凹部により構成されるリッジ部とを具備し、該リッジ部は前記中心導体が上方に形成された中心導体用リッジ部と、前記接地導体が上方に形成された接地導体用リッジ部からなり、前記中心導体用リッジ部に前記 2 本の光導波路のうちの 1 本が形成され、前記接地導体用リッジ部にもう 1 本の光導波路が形成されている光変調器において、

10

前記凹部は第 1、第 2 及び第 3 の凹部でなり、前記第 1 の凹部の中心線に対して対称な位置に前記第 2 及び第 3 の凹部が形成されており、前記第 1 の凹部と前記第 2 の凹部との間に前記中心導体用リッジ部が形成され、前記第 1 の凹部と前記第 3 の凹部との間に前記接地導体用リッジ部が形成されており、

前記第 1 の凹部及び前記第 2 の凹部の上方には前記接地導体が形成されておらず、

前記第 3 の凹部の上方と、前記第 2 の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された前記接地導体の前記中心導体の中心線に対して前記第 3 の凹部と対称となる位置とにて、一方に前記接地導体が形成された部分と形成されていない部分とが接続用接地導体と空隙部として光導波路方向に交互に形成され、他方に前記中心導体の厚みよりも導体が薄く形成された部分と前記中心導体もしくは前記中心導体に相対向する接地導体とほぼ同じ厚みを持つ部分とが形成されていることを特徴とする光変調器。

20

【請求項 2】

電気光学効果を有する基板と、前記基板に形成された 2 本の光導波路と、前記基板の上に形成されたバッファ層と、該バッファ層の上方に配置された中心導体と接地導体からなる進行波電極と、前記進行波電極を伝搬する高周波電気信号の電界強度が強い領域における前記基板の少なくとも一部を掘り下げることにより形成した凹部により構成されるリッジ部とを具備し、該リッジ部は前記中心導体が上方に形成された中心導体用リッジ部と、前記接地導体が上方に形成された接地導体用リッジ部からなり、前記中心導体用リッジ部に前記 2 本の光導波路のうちの 1 本が形成され、前記接地導体用リッジ部にもう 1 本の光導波路が形成されている光変調器において、

30

前記凹部は第 1、第 2 及び第 3 の凹部でなり、前記第 1 の凹部の中心線に対して対称な位置に前記第 2 及び第 3 の凹部が形成されており、前記第 1 の凹部と前記第 2 の凹部との間に前記中心導体用リッジ部が形成され、前記第 1 の凹部と前記第 3 の凹部との間に前記接地導体用リッジ部が形成されており、

前記第 1 の凹部及び前記第 2 の凹部の上方には前記接地導体が形成されておらず、

前記第 3 の凹部の上方と、前記第 2 の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された前記接地導体の前記中心導体の中心線に対して前記第 3 の凹部と対称となる位置とにて、一方に前記接地導体が形成された部分と形成されていない部分とが接続用接地導体と空隙部として光導波路方向に交互に形成され、他方に前記接地導体が前記中心導体の厚みよりも薄い厚さで全面に形成されていることを特徴とする光変調器。

40

【請求項 3】

前記接続用接地導体が、前記中心導体もしくは前記接地導体の少なくとも一部とほぼ同じ厚みを持つことを特徴とする請求項 1 もしくは請求項 2 に記載の光変調器。

【請求項 4】

前記接続用接地導体が、前記中心導体の厚みよりも薄いことを特徴とする請求項 1 もしくは請求項 2 に記載の光変調器。

【請求項 5】

前記第 3 の凹部に隣接する前記接地導体用リッジ部でない側の基板上に形成された接地導体の、前記高周波電気信号の電磁界が小さくなった領域である前記第 3 の凹部から所定距離離れた領域における厚みを、当該領域以外の領域における接地導体の厚みよりも薄く

50

構成したことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 項に記載の光変調器。

【請求項 6】

前記第 2 の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された接地導体の、前記高周波電気信号の電磁界が小さくなった領域である前記第 2 の凹部から所定距離離れた領域における厚みを、当該領域以外の領域における接地導体の厚みよりも薄く構成したことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 5 の何れか 1 項に記載の光変調器。

【請求項 7】

前記基板がリチウムナイオベートからなることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 6 の何れか 1 項に記載の光変調器。

【請求項 8】

前記基板が半導体からなることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 6 の何れか 1 項に記載の光変調器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電気光学効果を利用して、光導波路に入射した光を高周波電気信号で変調して光信号パルスとして出射する光変調器に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、高速、大容量の光通信システムが実用化されている。このような高速、大容量の光通信システムに組込むための高速、小型、低価格、かつ高安定な光変調器の開発が求められている。

【0003】

このような要望に応える光変調器として、リチウムナイオベート (LiNbO_3) のように電界を印加することにより屈折率が変化する、いわゆる電気光学効果を有する基板（以下、LN基板と略す）に光導波路と進行波電極を形成した進行波電極型リチウムナイオベート光変調器（以下、LN光変調器と略す）がある。このLN光変調器は、その優れたチャージング特性から 2.5 Gbit/s、10 Gbit/s の大容量光通信システムに適用されている。最近はさらに 40 Gbit/s の超大容量光通信システムにも適用が検討されている。

【0004】

以下、従来、実用化され、又は提唱されてきたリチウムナイオベートの電気光学効果を利用したLN光変調器について説明する。

【0005】

（第 1 の従来技術）

特許文献 1 に開示された、z-カットLN基板を用いて構成した、いわゆるリッジ型LN光変調器を第 1 の従来技術の光変調器として図 19 にその斜視図を示す。なお、図 20 は図 19 の A-A' 線における断面図である。

【0006】

z-カットLN基板 1 上に光導波路 3 が形成されている。この光導波路 3 は、金属Tiを1050℃で約10時間熱拡散して形成した光導波路であり、マッハツェンダ干渉系（あるいは、マッハツェンダ光導波路）を構成している。したがって、光導波路 3 の電気信号と光が相互作用する部位（相互作用部と言う）には 2 本の相互作用光導波路 3a、3b（あるいは、簡単に光導波路 3a、3b）、つまりマッハツェンダ光導波路の 2 本のアームが形成されている。

【0007】

この光導波路 3 の上面に SiO_2 バッファ層 2 が形成され、この SiO_2 バッファ層 2 の上面に進行波電極 4 が形成されている。進行波電極 4 としては、1 つの中心導体 4a と 2 つの接地導体 4b、4c を有するコプレーナウェーブガイド (CPW) を用いている。なお、通常、進行波電極 4 は高価な貴金属材料であるAuにより形成されている。5 は z

10

20

30

40

50

ーカット L N 基板 1 を用いて製作した L N 光変調器に特有の焦電効果に起因する温度ドリフトを抑圧するための導電層であり、通常は S i 導電層を用いる。中心導体 4 a の幅 S は $7\text{ }\mu\text{m}$ 程度で、中心導体 4 a と接地導体 4 b、4 c の間のギャップ W は $15\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。なお、説明を簡単にするために、図 19 では図示した温度ドリフト抑圧のための S i 導電層 5 を図 20 においては省略している。また、以下においても S i 導電層 5 は省略して議論する。

【0008】

この第 1 の従来技術では、z-カット L N 基板 1 をエッチングなどで掘り込むことにより、凹部 9 a、9 b、及び 9 c（あるいは、リッジ部 8 a、8 b とも言える）を形成している。ここで、10 a、10 b は接地導体において高周波電信号の電磁界が小さくなった領域あるいは部位であり、外周部と呼ぶ。なお、リッジ部 8 a、8 b を各々中心導体用リッジ部、接地導体用リッジ部とも呼ぶ。またリッジ部を簡単にリッジとも言う。

10

【0009】

このリッジ構造をとることにより、高周波電気信号の実効屈折率（あるいは、マイクロ波実効屈折率）、特性インピーダンス、変調帯域、駆動電圧などにおいて優れた特性を実現することができる。なお、図 20 では凹部 9 a、9 b、及び 9 c の深さ（あるいはリッジ部 8 a、8 b の高さ）を強調して描いているが、実際には $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 程度であり、中心導体 4 a や接地導体 4 b、4 c の厚み約 $20\text{ }\mu\text{m}$ に比較するとその値は小さい。

【0010】

さて、この第 1 の従来技術は L N 光変調器としての変調特性は高いものの、安定性について問題があることがわかった。即ち、S i 導電層 5 を使用しているにもかかわらず、温度ドリフト特性が悪いことが判明した。その原因は高い変調性能を生み出すリッジ構造に起因していると考えられる。

20

【0011】

以下にその原因について詳しく説明する。図 20 からわかるように、中心導体 4 a の直下のリッジ部 8 a については、接地導体 4 b、4 c とは独立しているので、z-カット L N 基板 1 の表面に平行な方向にリッジ部 8 a を引っ張る力は存在しない。

【0012】

ところが、リッジ部 8 b については、前述のように約 $20\text{ }\mu\text{m}$ の厚い接地導体 4 b が凹部 9 c、外周部 10 b とともに形成されている。そして、S i O₂ バッファ層 2 上の接地導体 4 b の A u と z-カット L N 基板 1 の熱膨張係数は互いに大きく異なる。さらに、z-カット L N 基板 1 の幅は数ミリメートル（例えば、 $1\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$ ）と広い。一方、相互作用光導波路 3 a、3 b のギャップは約 $15\text{ }\mu\text{m}$ 程度と狭いので、接地導体 4 b や 4 c の幅は各々 z-カット L N 基板 1 の幅の約半分と言えるくらいに広い（換言すると、外周部 10 a や 10 b が広い）。つまり、図 20 の接地導体 4 b の幅も広いので環境変化に起因する熱膨張や熱収縮などの応力が積み重なり、リッジ部 8 b へかなり大きな応力（あるいは厚みが厚いことに起因するモーメント）がかかる。さらに、リッジ部 8 b は突起しているので、応力（特にモーメントによる応力）の影響を受けやすい。なお、実際には接地導体 4 c の幅も広く、その影響もある。

30

【0013】

ところが、z-カット L N 基板 1 に応力がかかるとその屈折率が変化する（応力複屈折）ので、結果的に相互作用光導波路 3 a の屈折率が変化する事になり、L N 光変調器を動作させる際の D C バイアス点が変わってしまう。これがリッジ構造特有の温度ドリフト現象であり、L N 光変調器としての安定性を損なう結果となる。ちなみに、L N 光変調器の環境温度を室温から $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで変化させた際に、この第 1 の従来技術での D C バイアス点の変化は 6 V と大きかった。

40

【0014】

（第 2 の従来技術）

この第 1 の従来技術の問題点を解決するために、特許文献 2 に開示された第 2 の従来技術の相互作用部における断面図を図 21 に示す。この図 21 からわかるように、リッジ部

50

8 bの上に形成された接地導体4 b'と外周部10 bの上に形成された接地導体4 b''の厚みは厚いが、凹部9 cに形成された接地導体4 b'''の厚みを例えば約300 nm以下と薄くしている。このように凹部9 cにおける接地導体4 b'''の厚みを薄くすることにより、広い面積を有する接地導体4 b'がリッジ部8 bへ与える応力を小さくすることができるので、温度安定性を改善できるという考え方である。

【0015】

以下において、温度ドリフトと高周波電気信号の伝搬の観点から議論する。この第2の従来技術ではリッジ部8 aと8 bを形成する凹部9 a、9 b、9 cと相互作用光導波路3 aと3 bはそれらの中間に設けた中心線Iに対して対称な構造である。さて、リッジ部8 aや8 bの側面は傾斜している（よって、傾斜面あるいは傾斜部とも言う）。こうした傾斜面は-z面でないため焦電効果による電荷の発生が-z面であるz-カットLN基板1の上面や凹部9 a、9 b、及び9 cと異なっている。

10

【0016】

そのため、優れた温度ドリフト特性を実現するためには、凹部9 a、9 b、及び9 cを相互作用光導波路3 aと3 bの中間に設けることのできる中心線Iに対してほぼ対称な（あるいは、相互作用光導波路3 aと3 bを含むz-カットLN基板1の構造がその中間に設けた中心線Iに対してほぼ対称な）構造が望ましい。つまり、この第2の従来技術は温度ドリフト抑圧に適した構造と言える。なお、マッハツェンダ光導波路のように、相互作用光導波路が2本（相互作用光導波路3 aと3 b）の場合に、相互作用光導波路3 aと3 bがそれらの中間の中心線に対して対称となる構造では、実質的な凹部（9 a、9 b、9 c）の数が奇数となる。

20

【0017】

ところが、高周波電気信号の低損失で安定な伝搬の観点からこの第2の従来技術は以下のように問題を有していることがわかる。図19に示すように、マイクロ波である高周波電気信号は高周波電気信号給電線6や不図示のコネクタを伝搬した後、進行波電極4に印加されるが、高周波電気信号給電線6と不図示のコネクタの電磁界分布は各々の中心導体に対して軸対称である。また、高周波電気信号給電線6に接続される不図示のコネクタと進行波電極4との接続部（入力用フィードスルー部と呼ばれる）においても高周波電磁界の電磁界分布は進行波電極4の中心導体（相互作用部の中心導体4 aを不図示のコネクタの芯線との接続部まで延長した部位）に対して左右対称（つまり、基板表面方向に対して対称）である。

30

【0018】

しかしながら、この第2の従来技術では図21の中心導体4 aの中央に引いた線IIに対して進行波電極が構造的に左右非対称である。構造が左右非対称ということは電磁界分布も左右非対称となるので、入力用フィードスルー部における左右対称な電磁界分布と整合性が良くない。その結果、高周波電気信号が中心導体4 a、接地導体4 b'、4 b''、4 b'''、4 cで構成される進行波電極4を伝搬する際に、対称な電磁界分布から非対称な電磁界分布に変換せねばならず、電磁界分布が安定しない、あるいは放射損失（または伝搬損失）が生じるなどの不都合が生じてしまう。

【0019】

（第3の従来技術）

図22に特許文献3に開示された第3の従来技術の上面図を示す。なお、z-カットLN基板1の幅は数ミリメートルあり、相互作用光導波路3 aと3 bのギャップは15 μm程度である。またz-カットLN基板1の長さは5 cm～7 cm程度である。

40

【0020】

ここで、B-B'とC-C'における断面図を図23と図24に示す。なお、11 a、11 b、11 c、及び11 dは凹部9 a、9 b、9 c及び9 dがあることによる空隙部であり、4 b⁽⁴⁾、4 b⁽⁵⁾、4 b⁽⁶⁾、4 c⁽⁴⁾、4 c⁽⁵⁾、4 c⁽⁶⁾は接地導体である。ここで、接地導体4 b⁽⁵⁾は接地導体4 b⁽⁴⁾と4 b⁽⁶⁾を接続している。また、10 cは外周部である。8 a、8 b、8 cはリッジ部である。空隙部11

50

aと11dは接地導体において導体が欠落した部位（あるいは、接地導体を開けた窓）とも言える。また、13a、13dは空隙部11aと11dを接地導体4b⁽⁵⁾と4c⁽⁵⁾で埋めた埋め込み部である。図23と図24において、IVは中心導体4aの中心線であり、進行波電極はこの中心線IVに対して対称となっている。

【0021】

図からわかるように、接地導体4b⁽⁴⁾と4c⁽⁴⁾の幅は図21に示した第2の従来技術の接地導体4b'や中心導体4aと同程度に狭い。また、接地導体4b⁽⁶⁾、4c⁽⁶⁾は図21に示した第2の従来技術の接地導体4b''のように広い。そして、この第3の従来技術において接地導体4b⁽⁴⁾と4b⁽⁶⁾を接続する接地導体4b⁽⁵⁾と、接地導体4c⁽⁴⁾と4c⁽⁶⁾を接続する接地導体4c⁽⁵⁾の厚みは、図21に示した第2の従来技術の接地導体4b'''よりも厚く設定している。

10

【0022】

ところが、この第3の従来技術を実際に製作したところ、この構造ではリッジ構造に起因する温度ドリフトを抑圧することができないという重要な問題があることがわかった。以下、その問題点を焦電効果の観点から説明する。

【0023】

相互作用光導波路3aと3bの中間の中心線IIIに対して、リッジ部8a、8b、8c（あるいは凹部9a、9b、9c、9d）が非対称に配置されている。リッジ部8a、8b、8cの側面である傾斜面は-z面ではないので、環境温度の変化に伴う焦電効果による電荷の分布はこれらの凹部やzカットLN基板1の上面と異なっている。そのため、環境温度の変化とともに刻々と変化する不均一な電荷分布（即ち、不均一な電界分布）が生じるので相互作用光導波路3aと3bに不均一な電圧が印加される。これらの不均一な電界分布を打ち消すように外部回路からDCバイアスを印加する必要があるので、結果的に温度ドリフトを生じてしまうと結論できる。

20

【特許文献1】特開平4-288518号公報

【特許文献2】特開2004-157500号公報

【特許文献3】特開2006-84537号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0024】

30

以上のように、リッジ型LN光変調器として提案された従来の第1技術では電極を構成するAuとzカットLN基板との熱膨張係数の差に起因する接地導体からの応力（あるいは、モーメントによる応力）が温度とともに最適DCバイアス点を変化させる温度ドリフトを生じた。この温度特性を改善するために提案された第2の従来技術では、温度ドリフトは改善できるものの、進行波電極が中心導体に対して対称ではないため、高周波電気信号が対称モードから非対称モードへのモード変換における安定な伝搬と低損失な伝搬という観点から不利であった。また、第3の従来技術では進行波電極が中心導体に対して対称であるため、高周波電気信号の安定で低損失な伝搬という観点から有利であったが、リッジ部（あるいは凹部）の構成が2本の相互作用光導波路に対して非対称であったため、特にリッジの傾斜面における焦電効果の影響が強く、温度ドリフトの観点から問題があった。つまり、光変調器としての高速性・低駆動電圧性を犠牲にしないで温度安定化を実現できる光変調器の開発が急務となっている。

40

【0025】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、光変調特性が高性能であるとともに、安定性について改善された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】

【0026】

上記課題を解決するために、本発明の請求項1の光変調器は、電気光学効果を有する基板と、前記基板に形成された2本の光導波路と、前記基板の上に形成されたバッファ層と、該バッファ層の上方に配置された中心導体と接地導体からなる進行波電極と、前記進行

50

波電極を伝搬する高周波電気信号の電界強度が強い領域における前記基板の少なくとも一部を掘り下げることにより形成した凹部により構成されるリッジ部とを具備し、該リッジ部は前記中心導体が上方に形成された中心導体用リッジ部と、前記接地導体が上方に形成された接地導体用リッジ部からなり、前記中心導体用リッジ部に前記2本の光導波路のうちの1本が形成され、前記接地導体用リッジ部にもう1本の光導波路が形成されている光変調器において、前記凹部は第1、第2及び第3の凹部であり、前記第1の凹部の中心線に対して対称な位置に前記第2及び第3の凹部が形成されており、前記第1の凹部と前記第2の凹部との間に前記中心導体用リッジ部が形成され、前記第1の凹部と前記第3の凹部との間に前記接地導体用リッジ部が形成されており、前記第1の凹部及び前記第2の凹部の上方には前記接地導体が形成されておらず、前記第3の凹部の上方と、前記第2の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された前記接地導体の前記中心導体の中心線に対して前記第3の凹部と対称となる位置とにて、一方に前記接地導体が形成された部分と形成されていない部分とが接続用接地導体と空隙部として光導波路方向に交互に形成され、他方に前記中心導体の厚みよりも導体が薄く形成された部分と前記中心導体もしくは前記中心導体に相対向する接地導体とほぼ同じ厚みを持つ部分とが形成されていることを特徴とする。

10

【0027】

本発明の請求項2の光変調器は、電気光学効果を有する基板と、前記基板に形成された2本の光導波路と、前記基板の上に形成されたバッファ層と、該バッファ層の上方に配置された中心導体と接地導体からなる進行波電極と、前記進行波電極を伝搬する高周波電気信号の電界強度が強い領域における前記基板の少なくとも一部を掘り下げることにより形成した凹部により構成されるリッジ部とを具備し、該リッジ部は前記中心導体が上方に形成された中心導体用リッジ部と、前記接地導体が上方に形成された接地導体用リッジ部からなり、前記中心導体用リッジ部に前記2本の光導波路のうちの1本が形成され、前記接地導体用リッジ部にもう1本の光導波路が形成されている光変調器において、前記凹部は第1、第2及び第3の凹部であり、前記第1の凹部の中心線に対して対称な位置に前記第2及び第3の凹部が形成されており、前記第1の凹部と前記第2の凹部との間に前記中心導体用リッジ部が形成され、前記第1の凹部と前記第3の凹部との間に前記接地導体用リッジ部が形成されており、前記第1の凹部及び前記第2の凹部の上方には前記接地導体が形成されておらず、前記第3の凹部の上方と、前記第2の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された前記接地導体の前記中心導体の中心線に対して前記第3の凹部と対称となる位置とにて、一方に前記接地導体が形成された部分と形成されていない部分とが接続用接地導体と空隙部として光導波路方向に交互に形成され、他方に前記接地導体が前記中心導体の厚みよりも薄い厚さで全面に形成されていることを特徴とする。

20

30

【0028】

本発明の請求項3の光変調器は、前記接続用接地導体が、前記中心導体もしくは前記接地導体の少なくとも一部とほぼ同じ厚みを持つことを特徴とする。

【0029】

本発明の請求項4の光変調器は、前記接続用接地導体が、前記中心導体の厚みよりも薄いことを特徴とする。

40

【0030】

本発明の請求項5の光変調器は、前記第3の凹部に隣接する前記接地導体用リッジ部でない側の基板上に形成された接地導体の、前記高周波電気信号の電磁界が小さくなった領域である前記第3の凹部から所定距離離れた領域における厚みを、当該領域以外の領域における接地導体の厚みよりも薄く構成したことを特徴とする。

【0031】

本発明の請求項6の光変調器は、前記第2の凹部に隣接する前記中心導体用リッジ部でない側の基板上に形成された接地導体の、前記高周波電気信号の電磁界が小さくなった領域である前記第2の凹部から所定距離離れた領域における厚みを、当該領域以外の領域に

50

おける接地導体の厚みよりも薄く構成したことを特徴とする。

【0032】

本発明の請求項7の光変調器は、前記基板がリチウムナイオベートからなることを特徴とする。

【0033】

本発明の請求項8の光変調器は、前記基板が半導体からなることを特徴とする。

【発明の効果】

【0034】

本発明に係る光変調器では、リッジやそれを構成する凹部は2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線に対して対称とする。これにより、環境温度の変化に対応して起こる焦電効果による電荷の分布（即ち、電界の分布）が2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線に対してほぼ対称となるので、温度ドリフトを解決することができる。また、進行波電極の基本的な構造を中心導体の中心線に対して対称とすることにより、高周波電気信号の安定で低損失な伝搬を可能とする。これらの結果、リッジ型光変調器の変調の観点からの高い性能を損なうことなく、熱ドリフトが小さなLN光変調器を提供することが可能となるという優れた効果がある。さらに、本発明には接地導体において高周波電気信号の電磁界分布が小さくなる領域（あるいは部位）である外周部の導体の厚みを薄くする構造も含んでいる。この外周部の導体の厚みを薄くする構造により、環境温度が変化する際に、 SiO_2 バッファ層2上の接地導体とZ-カットLN基板の熱膨張係数の差に起因して生じる広い接地導体からの導体の応力を緩和することができるので、一層の温度ドリフト特性の改善に寄与するばかりでなく、高価な貴金属材料であるAuの使用量を減らすことができるので光変調器としてのコスト低減も可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0035】

以下、本発明の実施形態について説明するが、図19から図24に示した従来技術と同一の符号は同一機能部に対応しているため、ここでは同一の符号を持つ機能部の説明を省略する。

【0036】

（第1の実施形態）

図1に本発明の第1の実施形態についてその上面図を示す。また、D-D'、E-E'における断面図を各々図2と図3に示す。ここで、11a、11b、及び11cは空隙部である。なお、 $4b^{(4)}$ 、 $4b^{(5)}$ 、 $4b^{(6)}$ 、 $4c^{(4)}$ 、 $4c^{(5)}$ 、 $4c^{(5)'}$ 、 $4c^{(6)}$ は接地導体である。

【0037】

接地導体 $4b^{(5)}$ と接地導体 $4c^{(5)}$ の厚みは厚いので厚い接地導体、一方、接地導体 $4c^{(5)'}$ の厚みは薄いので薄い接地導体とも呼ばれる。また、10bと10dは接地導体において高周波電気信号の強度が小さくなった部位であり、外周部と呼ぶ。8aと8bはリッジ部である。

【0038】

厚い接地導体 $4b^{(5)}$ は接地導体 $4b^{(4)}$ と $4b^{(6)}$ とを、また厚い接地導体 $4c^{(5)}$ と薄い接地導体 $4c^{(5)'}$ は接地導体 $4c^{(4)}$ と $4c^{(6)}$ とを接続している（なお、厚みが厚い接地導体 $4b^{(5)}$ 、及び接地導体 $4c^{(5)}$ は厚い接続用接地導体、また厚みが薄い接地導体 $4c^{(5)'}$ は薄い接続用接地導体とも呼ばれる）。

【0039】

本実施形態では高周波電気信号としての表皮効果の影響を受けにくいように、接続用接地導体である接地導体 $4b^{(5)}$ と $4c^{(5)}$ はそれらの厚みを厚くしている。さらに、薄い接地導体 $4c^{(5)'}$ の厚みは温度ドリフトが充分小さくなるように例えば50nm～500nmと薄く設定するが、材料としては電気抵抗の小さなAuにより構成する。従って、これらの部分のAuを欠落させるよりは高周波電気信号の伝搬損失が小さくなる。なお、薄い接地導体 $4c^{(5)'}$ の厚みについての上記の数値は例でありこの限りではな

いことは言うまでもない。

【0040】

また、10bと10dは接地導体において高周波電気信号の強度が小さくなった部位であり、外周部と呼ぶ。8aと8bはリッジ部である。空隙部11aは接地導体において導体が欠落した部位（あるいは、接地導体を開けた窓）とも言える。また、13aは空隙部11aを接地導体4b⁽⁵⁾で埋めた埋め込み部である。

【0041】

ここで、相互作用光導波路が形成されていない側の接地導体4c⁽⁵⁾と4c⁽⁶⁾の下には凹部を形成していない。図2においてVは相互作用光導波路3aと3bの中間に設けた中心線であり、相互作用光導波路3aと3b（あるいは、リッジ部8aと8b、もしくは凹部9a、9b、9c）はこの中心線Vに対して対称な構造となっている。従って、Vは光導波路（あるいは、リッジ）についての対称軸と言える。前述のように、リッジ部8aと8bは焦電効果により発生する電荷の分布が凹部9a、9b、9cの底面やZ-カットLN基板1の上面とは異なる傾斜部（前述のように、リッジ部8aと8bの側面であり、傾斜面とも言う）を持っている。

【0042】

重要なことは第1の実施形態では相互作用光導波路3aと3bについてこの傾斜面を含め、凹部9a、9b、9cを中心線Vに対して対称な構造としていることである。これにより、焦電効果による電荷分布、即ち電界分布も中心線Vに対して対称となるので、環境変化に伴う温度ドリフトについては極めて安定な特性を実現できる。

【0043】

なお、各接地導体の下方において、温度ドリフトには影響のない箇所に凹部を作ることにより相互作用光導波路3aと3bについての対称性を壊しても、それは影響のない箇所の変更であるので本発明に属する。また、図2や図3における凹部の数は3個であるが、2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線に対して構造が対称でありさえすれば、これ以上の数の凹部を設けても本発明に属すると言える。そして、これらのことは本発明の全ての実施形態について成り立つことは言うまでもない。

【0044】

図4には環境温度Tを20℃から80℃まで変化させた場合の本発明における第1の実施形態についての実験結果を示す。比較のために、図には第1の従来技術、第2の従来技術、及び第3の従来技術についての測定結果も示している。ここで、中心導体4aの幅Sは7μm、中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、もしくは接地導体4c⁽⁴⁾とのギャップWは15μmとした。また、空隙部11aの幅Wwが15μmで、それらの長さLwと接地導体4b⁽⁵⁾の長さLeが各々1mmと100μmとした。図からわかるように、進行波電極が中心導体4aの中心線に対して対称であるため、高周波光変調の観点から有利ではあるものの、凹部9a、9b、9c、9dの配置が相互作用光導波路3a、3bについては対称ではない第3の従来技術よりも温度ドリフトを大幅に抑えることが可能となり、本発明の考え方が正しいことを実証できた。なお、温度ドリフトについては第2の従来技術も優れているが、先に述べたように第2の従来技術は高周波電気信号のモード変換の観点から問題がある。ここで、空隙部11aの長さLwと接地導体4b⁽⁵⁾の長さLeは各々30μm～3mm、及び5μm～500μm程度まで変化させても効率よく温度ドリフトを抑圧できた。但し、本発明はこれらの数値に限るものではないことは言うまでもない。

【0045】

以上の説明においては、本発明の原理の説明を簡単にするために、空隙部11aの幅Wwと長さLwが、薄い接地導体4c⁽⁵⁾の幅Ww'と長さLw'と各々等しく、また接地導体4b⁽⁵⁾の長さLeと接地導体4c⁽⁵⁾の長さLe'も等しいと仮定したが、本発明はこれに限るものではない。さらに、空隙部11aや接地導体4b⁽⁵⁾の個数と、薄い接地導体4c⁽⁵⁾や接地導体4c⁽⁵⁾の個数が各々異なっても良い。そして、このことは本発明の全ての実施形態について言える。なお、以上に述べた接地導

体（接続用接地導体）や空隙部の長さや幅は相互作用光導波路 3 a、3 b の長さ方向に対するものとする。

【0046】

次に、高周波電気信号の電磁界分布の観点から考察する。本発明におけるその他の全ての実施形態と同じく、図 1～図 3 における進行波電極としての基本的な構成要素は中心導体 4 a と接地導体 4 b⁽⁴⁾、4 b⁽⁶⁾、4 c⁽⁴⁾、4 c⁽⁶⁾ である。そして、図 2 と図 3 からわかるように、中心導体 4 a の中心に引いた中心線 V I は中心導体 4 a と接地導体 4 b⁽⁴⁾、4 b⁽⁶⁾、4 c⁽⁴⁾、4 c⁽⁶⁾ からなる進行波電極の対称軸となっている。このように、本実施形態における進行波電極の基本的な構造について、中心導体 4 a の中心線を対称軸とする構造対称性を有している。進行波電極の基本的な構造が対称であるということは、進行波電極を伝搬する高周波電気信号の電磁界分布も対称であることを意味している。従って、図 2 1 に示した第 2 の従来技術では必要であったコネクタや入力用フィードスルー部の対称な高周波電気信号の対称モードから進行波電極の非対称モードへの変換が不要となるので、高周波電気信号を安定、そして低損失に伝搬することが可能となる。

10

【0047】

さて、凹部が相互作用光導波路 3 a と 3 b の中間に設けた中心線 V に対して厳密に対称でないと本発明の効果を発揮できないかということそれは正しくない。また、接地導体 4 b⁽⁴⁾ や 4 c⁽⁴⁾ の幅は中心導体 4 a の幅と数 μm 程度異なっても良く、これを含めて相互作用光導波路 3 a、3 b の中間に設けた中心線 V に対して凹部が対称である（あるいは、実質的にほぼ対称）としている。さらに、同様に進行波電極の構造が中心線 V I に対して厳密に対称でなくても本発明の効果を発揮できる。そしてこれらのことは本発明の全ての実施形態について言える。

20

【0048】

以上のように、本実施形態は相互作用光導波路に関する構造を 2 本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線 V について対称とするとともに、進行波電極に関する基本的な構造を中心導体の中心線 V I について対称とすることにより、それらの対称性を有しない場合と比較して、環境温度変化に伴う温度ドリフトを抑圧し、かつ高周波電気信号のモードを安定させ、そして低損失に伝搬させている。

【0049】

前述のように、中心導体 4 a の中心に引いた中心線 V I は進行波電極の基本的な構造である中心導体 4 a と接地導体 4 b⁽⁴⁾、4 b⁽⁶⁾、4 c⁽⁴⁾、4 c⁽⁶⁾ の対称軸となっている。進行波電極の基本的な構造の対称性が重要であるという観点から、例えば、図 2 において空隙部 1 1 a の代わりに、接地導体 4 b⁽⁴⁾ と接地導体 4 b⁽⁶⁾ を接続する薄い接続用接地導体を、また薄い接地導体 4 c⁽⁵⁾ の代わりに空隙部を設けても良い。つまり図 2 において中心導体 4 a の中心線を対称軸として、空隙部 1 1 a と薄い接地導体 4 c⁽⁵⁾ とを入れ替えた構造でも良いことは言うまでもない。なお、この薄い接続用接地導体と空隙部を互いに入れ替えても良い（換言すると、中心導体 4 a の中心に引いた中心線 V I に対して進行波電極の左右の構造を互いに入れ替えても良い）という考え方は本発明の全ての実施形態について言える。

30

40

【0050】

（第 2 の実施形態）

図 5 は本発明における第 2 の実施形態の上面図を示している。図 1 に示した第 1 の実施形態と比較するとわかるように、本実施形態では空隙部 1 1 a と薄い接続用接地導体 4 c⁽⁵⁾ とが、また厚い接続用接地導体 4 b⁽⁵⁾ と 4 c⁽⁵⁾ とが相互作用光導波路の方向に互いにずれており、その結果 F-F' と G-G' における断面図は図 2 及び図 3 と同じである。

【0051】

なお、この第 2 の実施形態のように、中心導体 4 a の中心線 V I に対して進行波電極の空隙部や接続用接地導体などの電極構成要素が相互作用光導波路 3 a、3 b の長手方向に

50

ずれても良いという考え方は本発明の全ての実施形態について言うことができる。なお、ここで、相互作用光導波路 3 a、3 b の長手方向にずれても良い進行波電極の構成要素とは、例えば第 2 の実施形態では空隙部 1 1 a と薄い接続用接地導体 4 c ⁽⁵⁾ '、あるいは厚い接続用接地導体 4 b ⁽⁵⁾ と 4 c ⁽⁵⁾ であるが、本実施形態に限らず本発明では空隙部、厚い接続用接地導体、あるいは薄い接続用接地導体などを指すものとする。

【0052】

また、本発明のその他の実施形態と同じく、この第 2 の実施形態においても、図 5 の空隙部 1 1 a と薄い接地導体 4 c ⁽⁵⁾ ' とを入れ替える、つまり、第 1 の実施形態についての説明でも述べたように、薄い接続用接地導体 4 c ⁽⁵⁾ ' と空隙部 1 1 a を中心導体 4 a の中心線 V I の左右で入れ替えた構造としても良いことは言うまでもない。

10

【0053】

(第 3 の実施形態)

図 6 に本発明の第 3 の実施形態についてその上面図を示す。また、H-H'、I-I' における断面図を各々図 7 と図 8 に示す。ここで、第 1 の実施形態と同じく、1 1 a は空隙部である。なお、4 b ⁽⁴⁾、4 b ⁽⁵⁾、4 b ⁽⁶⁾、4 c ⁽⁴⁾、4 c ⁽⁶⁾、4 c ⁽⁷⁾ は接地導体である。接地導体 4 b ⁽⁵⁾ は接地導体 4 b ⁽⁴⁾ と 4 b ⁽⁶⁾ を、また接地導体 4 c ⁽⁷⁾ は接地導体 4 c ⁽⁴⁾ と 4 c ⁽⁶⁾ を接続している（接地導体 4 b ⁽⁵⁾ と接地導体 4 c ⁽⁷⁾ は接続用接地導体とも呼ばれる）。また、1 0 b と 1 0 d は外周部である。8 a と 8 b はリッジ部である。空隙部 1 1 a は接地導体において導体が欠落した部位（あるいは、接地導体に開けた窓）とも言える。

20

【0054】

ここで、図 7 と図 8 において V は相互作用光導波路 3 a と 3 b の中間に設けた中心線であり、相互作用光導波路 3 a と 3 b（あるいは、リッジ部 8 a と 8 b、もしくは凹部 9 a、9 b、9 c）はこの中心線 V に対して対称な構造となっている。従って、V は相互作用光導波路 3 a と 3 b についての対称軸と言える。前述のように、リッジ部 8 a と 8 b は焦電効果により発生する電荷の分布が凹部 9 a、9 b、9 c の底面や Z-カット LN 基板 1 の上面とは異なる傾斜部（リッジ部 8 a と 8 b の側面、あるいは傾斜面）を持っている。本発明のこの第 2 の実施形態においても相互作用光導波路 3 a と 3 b についてはこの傾斜部を含め、凹部 9 a、9 b、9 c を中心線 V に対して対称な構造となっているので、焦電効果による電荷分布、即ち電界分布も中心線 V に対して対称となり、環境変化に伴う温度ドリフトについては極めて安定となる。

30

【0055】

次に、第 1 の実施形態と同様に、高周波電気信号の電磁界分布の観点から考察する。本発明におけるその他の全ての実施形態と同じく、図 6～図 8 における進行波電極としての基本的な構成要素は中心導体 4 a と接地導体 4 b ⁽⁴⁾、4 b ⁽⁶⁾、4 c ⁽⁴⁾、4 c ⁽⁶⁾ である。そして、図 7 と図 8 からわかるように、中心導体 4 a の中心に引いた中心線 V I は中心導体 4 a と接地導体 4 b ⁽⁴⁾、4 b ⁽⁶⁾、4 c ⁽⁴⁾、4 c ⁽⁶⁾ からなる進行波電極の基本的な構成要素の対称軸となっている。このように、本実施形態では進行波電極の基本的な構造について、中心導体 4 a の中心を対称軸とする構造対称性を有しているので、その構造対称性を有しない図 2 1 に示す第 2 の従来技術よりも、コネクタや入力用フィードスルー部の対称な電磁界を安定、かつ低損失に伝搬することができる。

40

【0056】

以上のように、本実施形態においても相互作用光導波路やリッジに関する構造を 2 本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線 V について対称とするとともに、進行波電極に関する基本的な構造を中心導体の中心線 V I について対称とすることにより、それらの対称性を有しない場合と比較して、環境温度変化に伴う温度ドリフトを抑圧し、かつ高周波電気信号のモードを安定させ、かつ低損失に伝搬させている。

【0057】

但し、図 3 と図 8 を比較するとわかるように、図 8 における接続用接地導体 4 c ⁽⁷⁾ は図 3 における接続用接地導体 4 c ⁽⁵⁾ よりも薄いので、表皮効果の観点から高速光変

50

調にはやや不利になる。

【0058】

なお、第1の実施形態において述べたように、中心導体4aの中心に引いた中心線V Iは進行波電極の基本的な構造である中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾の対称軸となっている。進行波電極の基本的な構造の対称性が重要であるという観点から、例えば、図7において空隙部11aの代わりに、接地導体4b⁽⁴⁾と接地導体4b⁽⁶⁾を接続する薄い接続用接地導体を、また薄い接続用接地導体4c⁽⁷⁾の代わりに空隙部を設け、また図8では厚い接続用接地導体4b⁽⁵⁾と薄い接続用接地導体4c⁽⁷⁾を互いに入れ替えても良い。つまり図7と図8において、中心線V Iに対して進行波電極の左右の構成要素を互いに入れ替えても良い（なお、念のために図8では進行波電極の左右の構成要素を入れ替えても、元と同じ構造であることを述べておく）。

10

【0059】

（第4の実施形態）

図9に本発明の第4の実施形態についてその上面図を示す。また、J-J'、K-K'における断面図を各々図10と図11に示す。ここで、第1の実施形態と同じく、11aは空隙部である。なお、4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4b⁽⁷⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁵⁾、4c^{(5)'}、4c⁽⁶⁾は接地導体である。薄い接地導体4b⁽⁷⁾は接地導体4b⁽⁴⁾と4b⁽⁶⁾とを、また厚い接地導体4c⁽⁵⁾と薄い接地導体4c^{(5)'}は接地導体4c⁽⁴⁾と4c⁽⁶⁾とを接続している（各々、薄い接地導体4b⁽⁷⁾、及び厚い接地導体4c⁽⁵⁾と薄い接地導体4c^{(5)'}は接続用接地導体とも呼ばれる）。また、10bと10dは外周部である。8aと8bはリッジ部である。空隙部11aは接地導体において導体が欠落した部位（あるいは、接地導体を開けた窓）とも言える。

20

【0060】

ここで、図10と図11においてVは相互作用光導波路3aと3bの中間に設けた中心線であり、相互作用光導波路3aと3b（あるいは、リッジ部8aと8b、もしくは凹部9a、9b、9c）はこの中心線Vに対して対称な構造となっている。従ってVは相互作用光導波路3aと3bについての対称軸と言える。前述のように、リッジ部8aと8bは焦電効果により発生する電荷の分布が凹部9a、9b、9cの底面やz-カットLN基板1の上面とは異なる傾斜部（リッジ部8aと8bの側面、あるいは傾斜面）を持っている。本発明のこの第2の実施形態においても相互作用光導波路3aと3bについてはこの傾斜部を含め、凹部9a、9b、9cを中心線Vに対して対称な構造となっているので、焦電効果による電荷分布、即ち電界分布も中心線Vに対して対称となり、環境変化に伴う温度ドリフトについては極めて安定となる。

30

【0061】

次に、第1の実施形態と同様に、高周波電気信号の電磁界分布の観点から考察する。本発明におけるその他の全ての実施形態と同じく、図9～図11における進行波電極としての基本的な構成要素は中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾である。そして、図10と図11からわかるように、中心導体4aの中心に引いた中心線V Iは中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾からなる進行波電極の基本的な構成要素の対称軸となっている。このように、本実施形態では進行波電極の基本的な構造について、中心導体4aの中心を対称軸とする構造対称性を有しているので、その構造対称性を有しない図21に示す第2の従来技術よりも、コネクタや入力用フィードスルー部の対称な電磁界を安定、かつ低損失に伝搬することができる。

40

【0062】

以上のように、本実施形態においても相互作用光導波路やリッジに関する構造を2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線Vについて対称とするとともに、進行波電極に関する基本的な構造を中心導体の中心線V Iについて対称とすることにより、それらの対称性を有しない場合と比較して、環境温度変化に伴う温度ドリフトを抑圧し、かつ高周波電

50

気信号のモードを安定させ、かつ低損失に伝搬させている。

【0063】

但し、図3と図11を比較するとわかるように、図11における接続用接地導体4b⁽⁷⁾は図3における接続用接地導体4b⁽⁵⁾よりも薄いので、表皮効果の観点から高速光変調にはやや不利になる。

【0064】

なお、第1の実施形態において述べたように、中心導体4aの中心に引いた中心線V Iは進行波電極の基本的な構造である中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾の対称軸となっている。進行波電極の基本的な構造の対称性が重要であるという観点から、例えば、図10において空隙部11aの代わりに、接地導体4b⁽⁴⁾と接地導体4b⁽⁶⁾を接続する薄い接続用接地導体を、また薄い接続用接地導体4c⁽⁷⁾の代わりに空隙部を設け、また図11では厚い接続用接地導体4b⁽⁵⁾と薄い接続用接地導体4c⁽⁷⁾を互いに入れ替えても良い。つまり図10と図11において、中心線V Iに対して進行波電極の左右の構成要素を互いに入れ替えても良い。

【0065】

さらに、この第4の実施形態においても空隙部11aと薄い接続用接地導体4c⁽⁵⁾、また厚い接続用接地導体4b⁽⁷⁾と4c⁽⁵⁾が、図5に示した第2の実施形態と同様に、相互作用光導波路3a、3bの方向に互いにずれていても良いことは言うまでもない。

【0066】

(第5の実施形態)

図12に本発明の第5の実施形態についてその上面図を示す。また、L-L'、M-M'における断面図を各々図13と図14に示す。ここで、第1の実施形態と同じく、11aは空隙部である。なお、4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4b⁽⁷⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾、4c⁽⁷⁾は接地導体である。接地導体4b⁽⁷⁾は接地導体4b⁽⁴⁾と4b⁽⁶⁾を、また接地導体4c⁽⁷⁾は接地導体4c⁽⁴⁾と4c⁽⁶⁾を接続している(接地導体4b⁽⁷⁾と接地導体4c⁽⁷⁾は接続用接地導体とも呼ばれる)。また、10bと10dは外周部である。8aと8bはリッジ部である。空隙部11aは接地導体において導体が欠落した部位(あるいは、接地導体を開けた窓)とも言える。

【0067】

ここで、図13と図14においてVは相互作用光導波路3aと3bの中間に設けた中心線であり、相互作用光導波路3aと3b(あるいは、リッジ部8aと8b、もしくは凹部9a、9b、9c)はこの中心線Vに対して対称な構造となっている。従って、Vは相互作用光導波路3aと3bについての対称軸と言える。前述のように、リッジ部8aと8bは焦電効果により発生する電荷の分布が凹部9a、9b、9cの底面やz-カットLN基板1の上面とは異なる傾斜部(リッジ部8aと8bの側面、あるいは傾斜面)を持っている。本発明のこの第2の実施形態においても相互作用光導波路3aと3bについてはこの傾斜部を含め、凹部9a、9b、9cを中心線Vに対して対称な構造となっているので、焦電効果による電荷分布、即ち電界分布も中心線Vに対して対称となり、環境変化に伴う温度ドリフトについては極めて安定となる。

【0068】

次に、第1の実施形態と同様に、高周波電気信号の電磁界分布の観点から考察する。本発明におけるその他の全ての実施形態と同じく、図12～図14における進行波電極としての基本的な構成要素は中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾である。そして、図13と図14からわかるように、中心導体4aの中心に引いた中心線V Iは中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾からなる進行波電極の基本的な構成要素の対称軸となっている。このように、本実施形態では進行波電極の基本的な構造について、中心導体4aの中心を対称軸とする構造対称性を有しているので、その構造対称性を有しない図21に示す第2の従来技術よりも、コネクタや入力用フィードスルー部の対称な電磁界を安定、かつ低損失に伝搬することが

できる。

【0069】

以上のように、本実施形態においても相互作用光導波路やリッジに関する構造を2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線Vについて対称とするとともに、進行波電極に関する基本的な構造を中心導体の中心線VIについて対称とすることにより、それらの対称性を有しない場合と比較して、環境温度変化に伴う温度ドリフトを抑圧し、かつ高周波電気信号のモードを安定させ、かつ低損失に伝搬させている。

【0070】

但し、図13と図14を比較するとわかるように、図13における接続用接地導体4c⁽⁷⁾と図14における接続用接地導体4b⁽⁷⁾は厚みが薄いので、表皮効果の観点から高速光変調にはやや不利になる。

10

【0071】

なお、第1の実施形態において述べたように、中心導体4aの中心に引いた中心線VIは進行波電極の基本的な構造である中心導体4aと接地導体4b⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁶⁾の対称軸となっている。進行波電極の基本的な構造の対称性が重要であるという観点から、例えば、図13において空隙部11aの代わりに、接地導体4b⁽⁴⁾と接地導体4b⁽⁶⁾を接続する薄い接続用接地導体を、また薄い接続用接地導体4c⁽⁷⁾の代わりに空隙部を設けても良い。つまり図13と図14において、中心線VIに対して進行波電極の左右の構成要素を互いに入れ替えても良い（なお、念のために図14では進行波電極の左右の構成要素を入れ替えても、元と同じ構造であることを述べておく）。

20

【0072】

（第6の実施形態）

図15に本発明の第6の実施形態についてその上面図を示す。また、N-N'、O-O'における断面図を各々図16と図17に示す。ここで、第1の実施形態と同じく、11aは空隙部である。なお、4b⁽⁸⁾、4b⁽⁹⁾、4b⁽¹⁰⁾、4b⁽¹¹⁾、4c⁽⁸⁾、4c⁽⁹⁾、4c^{(9)'}、4c⁽¹⁰⁾、4c⁽¹¹⁾は接地導体である。接地導体4b⁽⁹⁾は接地導体4b⁽⁸⁾と4b⁽¹⁰⁾を、また接地導体4c⁽⁹⁾、4c^{(9)'}は接地導体4c⁽⁸⁾と4c⁽¹⁰⁾を接続している（接地導体4b⁽⁹⁾と接地導体4c⁽⁹⁾、4c^{(9)'}は接続用接地導体とも呼ばれる）。また、10bと10dは外周部である。8aと8bはリッジ部である。空隙部11aは接地導体において導体が欠落した部位（あるいは、接地導体を開けた窓）とも言える。

30

【0073】

この本発明の第6の実施形態において注目すべきことは接地導体4b⁽¹¹⁾と4c⁽¹¹⁾の厚みが例えば300nmのように薄くなっていることである。接地導体の厚みが厚いと、この原理によりZ-カットLN基板1、ひいてはリッジ部8aや8bに加わる応力（あるいは、モーメントによる応力）が大きくなる。そこで、まずこの実施形態では外周部10bの接地導体4b⁽¹¹⁾の厚みを薄くすることにより、この応力を小さくしている。さらに、本発明の効果を一層顕著とするために、外周部10d上に形成した接地導体4c⁽¹¹⁾の厚みも同じく薄くしている。この工夫をとり入れることにより、図18に示すように20℃から80℃の環境温度の変化に対するDCバイアスの温度ドリフトを第1の実施形態よりもさらに小さく抑えることができた。

40

【0074】

なお、本実施形態では第1の実施形態を例にとり、外周部10b、10dの上方にある接地導体4b⁽¹¹⁾と4c⁽¹¹⁾の厚みを薄くしたが、本実施形態の考え方はその他の第2実施形態から第5実施形態を含め、本発明の全ての実施形態に適用することが可能である。

【0075】

先に述べたように、相互作用光導波路3aと3bのギャップが15μm程度であることを考慮すると、高周波電気信号と相互作用光導波路3a、3bを伝搬する光が相互作用す

50

る相互作用部の幅は、z-カットLN基板1の幅（約1mm～5mm程度）と比較して著しく狭い。従って、接地導体4b⁽¹¹⁾と4c⁽¹¹⁾の厚みを薄くすることにより、高価なAuの使用量を著しく低減することができ、コスト削減に貢献できる。

【0076】

なお、厚みは薄いものの面積が広い接地導体4b⁽¹¹⁾と4c⁽¹¹⁾は高周波電気信号の観点からしっかりとした電氣的アースの確立と電氣的アースである筐体とのワイヤやリボンによる接続の観点から有用である。このことは本発明の全ての実施形態について言える。

【0077】

また図16や図17において接地導体4b⁽¹¹⁾と4c⁽¹¹⁾の厚みのどちらかのみを薄くしてもある程度の効果がある。また、もともと高周波電気信号の電磁界は外周部では小さいので、非対称性がこの程度壊れても高周波電気信号の伝搬特性に影響を与えることは小さい。そしてこのことは本発明の全ての実施形態にあてはまる。

【0078】

（各実施形態）

なお、本明細書において、進行波電極が中心導体の中心線に対して左右対称であることが高周波電気信号の伝搬の観点から最も望ましいと述べてきたが、これは主要な構造についてのことである。つまり、図5において、接続用接地導体4b⁽⁵⁾と4c⁽⁵⁾が光導波路の長手方向において（図1、図5、図8の紙面では上下方向に）互いにずれているが、進行波電極の基本的な構造である中心導体4aや光導波路の長手方向に連続な接地導体（4b⁽⁴⁾と4c⁽⁴⁾、4b⁽⁶⁾と4c⁽⁶⁾）については中心導体4aの中心軸に対して対称であるため、高周波電気信号にとってはほぼ左右対称な電極構造と感ずる。なお、相互作用部の長手方向のぎりぎりまで空隙部11b、11cを形成しても良いことは言うまでもない。つまり、厳密には対称でない構造であっても主要な部位でほぼ対称であれば、それも本発明に属することは言うまでもない。

【0079】

また、図3に示した第1の実施形態や図8に示した第3の実施形態では、接続用接地導体が中心導体の厚み程度に厚いとして説明したが、接続用接地導体の厚みが一様でなくとも良いことは言うまでもない。なお、特に凹部に接続用接地導体を形成する場合、窪んだ所に電極を形成するので、レジスト塗布やメッキ条件などプロセスの方法によっては接続用接地導体が中心導体の厚みよりも厚くなる場合もあるし、薄くなる場合もあるが、これらも本発明に属すると言える。

【0080】

分岐光導波路の例としてマッハツェンダ光導波路を用いたが、方向性結合器などその他の分岐合波型の光導波路にも本発明を適用可能であることは言うまでもなく、考え方は3本以上の光導波路にも適用可能であるし、光導波路が1本の位相変調器にも適用できる。なお、位相変調器の場合には、その1本の光導波路と進行波電極が中心導体の中心線に対して対称となる。また光導波路の形成法としてはTi熱拡散法の他に、プロトン交換法など光導波路の各種形成法を適用できるし、バッファ層としてAl₂O₃等のSiO₂以外の各種材料も適用できる。

【0081】

また、z-カットLN基板について説明したが、x-カットやy-カットなどその他の面方位のLN基板でも良いし、リチウムタンタレート基板、さらには半導体基板など異なる材料の基板でも良い。さらに、電極は進行波電極として説明してきたが、原理的には集中定数電極でも良いので、本明細書における進行波電極は集中定数電極も含むものとする。

【0082】

また、通常、各凹部は同じ程度の幅で形成するが、外周部に近い凹部が極めて広くなるように（外周部が凹部の底部とほぼ同じ高さとなるように）エッチングしている場合には、その広くエッチングされた部分を事実上の外周部と考え、本発明を適用することが可能

10

20

30

40

50

である。

【産業上の利用可能性】

【0083】

以上のように、本発明に係る光変調器は、高性能なリッジ型の光変調器において、基板に設ける凹部、リッジ、あるいは相互作用光導波路に関する構造を2本の相互作用光導波路の中間に設けた中心線に対称とすることにより温度ドリフト特性を改善し、進行波電極の基本的な構造について、中心導体の中心線に対して構造対称とすることにより高周波電気信号の伝搬特性を改善し、かつ外周部のAuの厚みを薄くすることにより温度ドリフト特性のさらなる改善と、コストの低減を実現した光変調器として有用である。

【図面の簡単な説明】

10

【0084】

【図1】本発明の第1の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

【図2】図1のD-D'における断面図

【図3】図1のE-E'における断面図

【図4】本発明の第1の実施形態の特性を説明する図

【図5】本発明の第2の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

【図6】本発明の第3の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

【図7】図6のH-H'における断面図

【図8】図6のI-I'における断面図

【図9】本発明の第4の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

20

【図10】図9のJ-J'における断面図

【図11】図9のK-K'における断面図

【図12】本発明の第5の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

【図13】図12のL-L'における断面図

【図14】図12のM-M'における断面図

【図15】本発明の第6の実施形態に係わる光変調器の概略構成を示す上面図

【図16】図15のN-N'における断面図

【図17】図15のO-O'における断面図

【図18】本発明の第6の実施形態の特性を説明する図

【図19】第1の従来技術の光変調器についての概略構成を示す斜視図

30

【図20】図19のA-A'における断面図

【図21】第2の従来技術の光変調器についての概略構成を示す断面図

【図22】第3の従来技術の光変調器についての概略構成を示す上面図

【図23】図22のB-B'における断面図

【図24】図22のC-C'における断面図

【符号の説明】

【0085】

1：z-カットLN基板（LN基板）

2、14、15：SiO₂バッファ層（バッファ層）

3：マッハツェンダ光導波路（光導波路）

40

3a、3b：マッハツェンダ光導波路を構成する相互作用光導波路

4：進行波電極

4a：中心導体

4b、4b'、4b''、4b'''、4b⁽⁴⁾、4b⁽⁵⁾、4b⁽⁶⁾、4b⁽⁷⁾、4b⁽⁸⁾、4b⁽⁹⁾、4b⁽¹⁰⁾、4b⁽¹¹⁾、4c、4c⁽⁴⁾、4c⁽⁵⁾、4c^{(5)'}、4c⁽⁶⁾、4c⁽⁷⁾、4c⁽⁸⁾、4c⁽⁹⁾、4c^{(9)'}、4c⁽¹⁰⁾、4c⁽¹¹⁾：接地導体

5：Si導電層

6：高周波（RF）電気信号給電線

7：高周波（RF）電気信号出力線

50

8 a : リッジ部 (中心導体用リッジ部)

8 b、8 c : リッジ部 (接地導体用リッジ部)

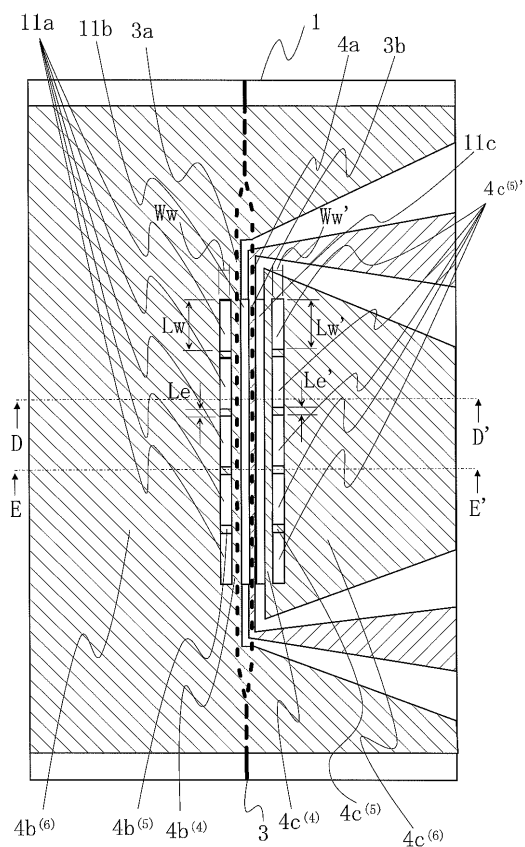
9 a、9 b、9 c、9 d : 凹部

10 a、10 b、10 c、10 d : 外周部

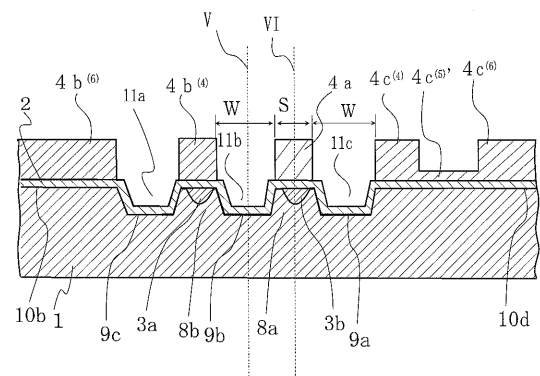
11 a、11 b、11 c、11 d : 空隙部 (導体が欠落した部位)

13 a、13 d : 埋め込み部

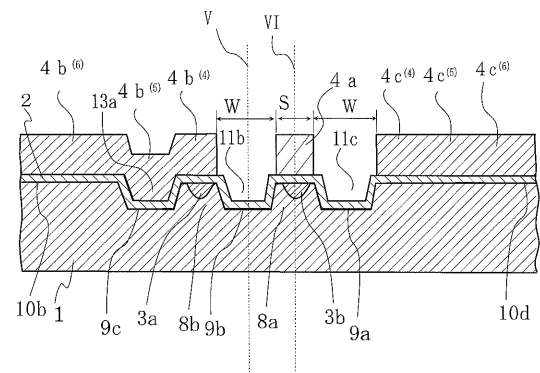
【図 1】



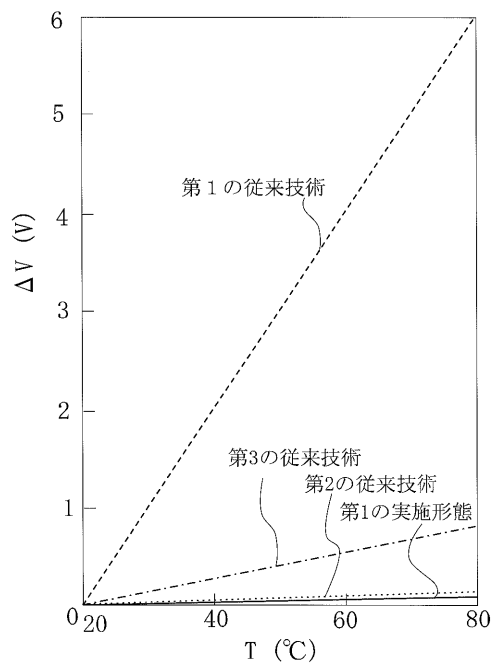
【図 2】



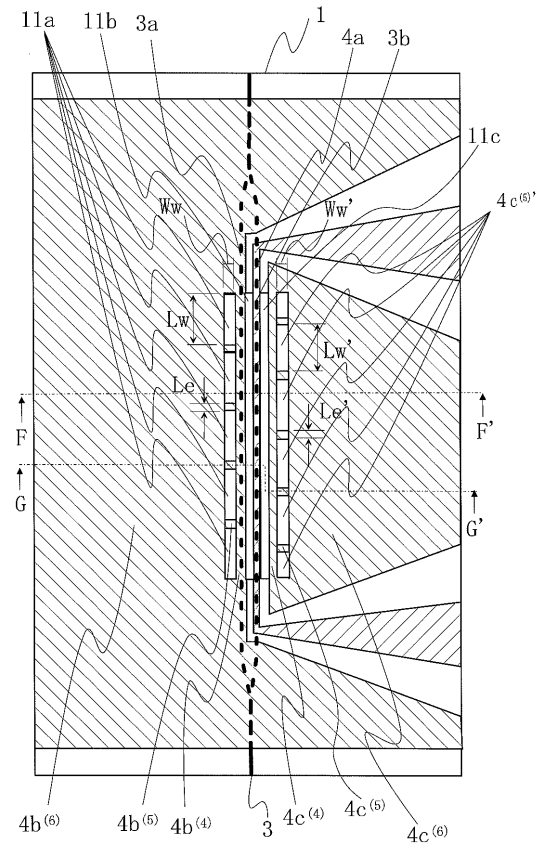
【図 3】



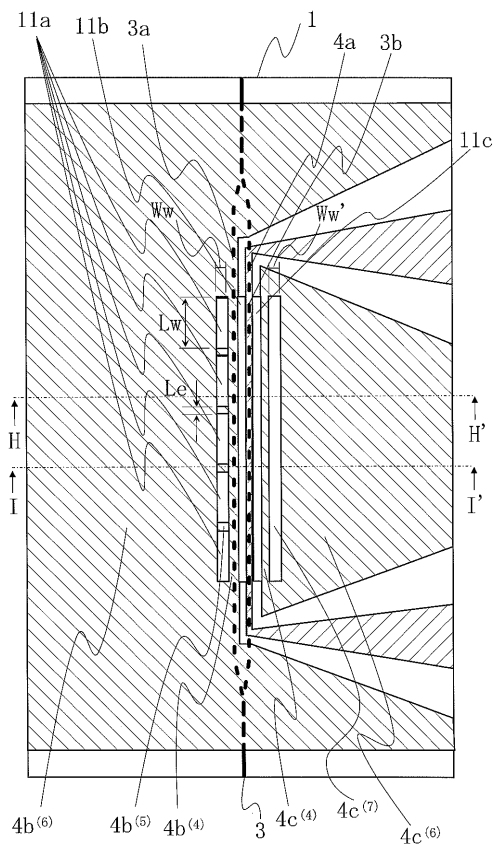
【図 4】



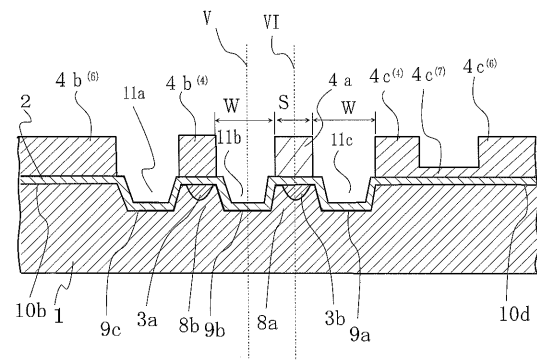
【図 5】



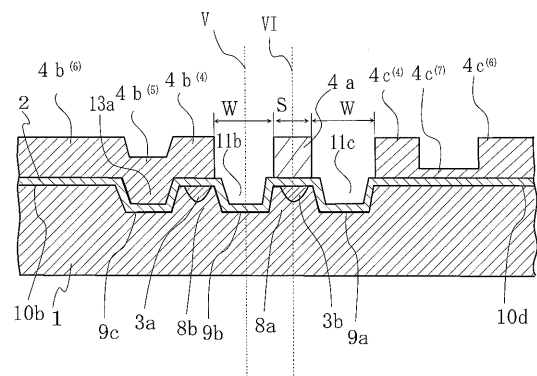
【図 6】



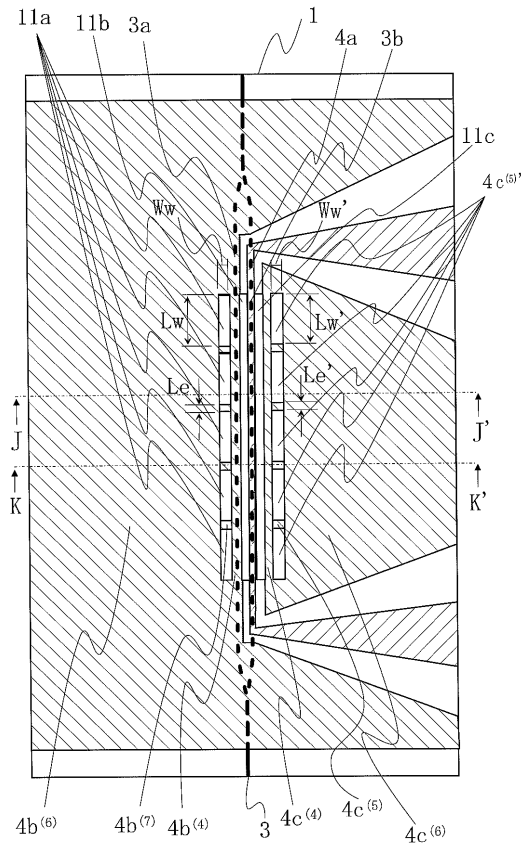
【図 7】



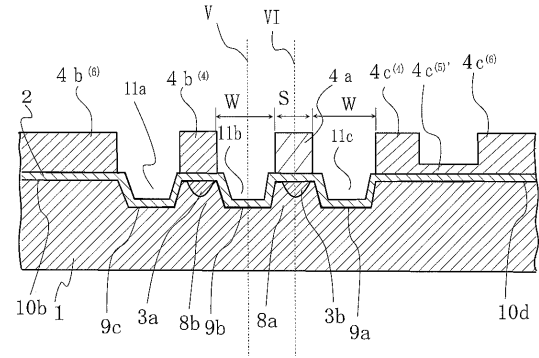
【図 8】



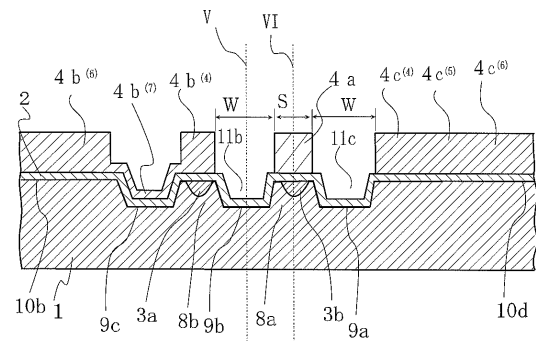
【図 9】



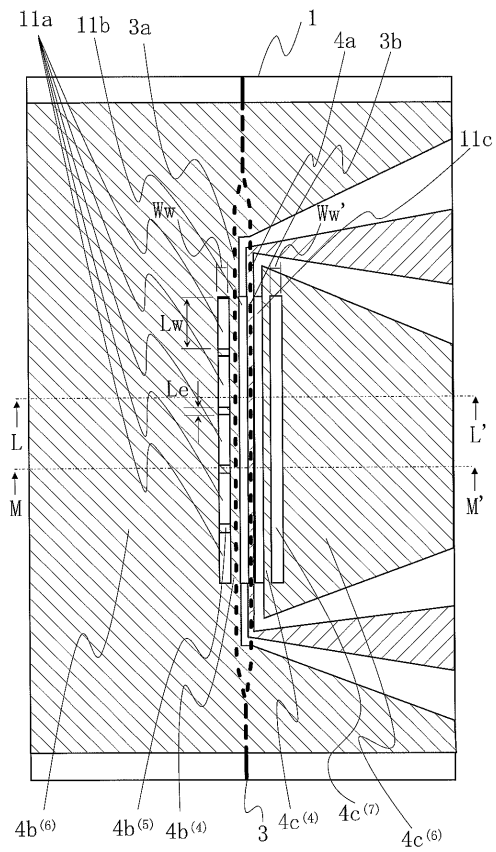
【図 10】



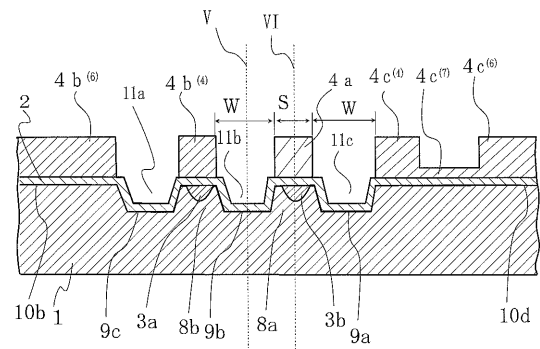
【図 11】



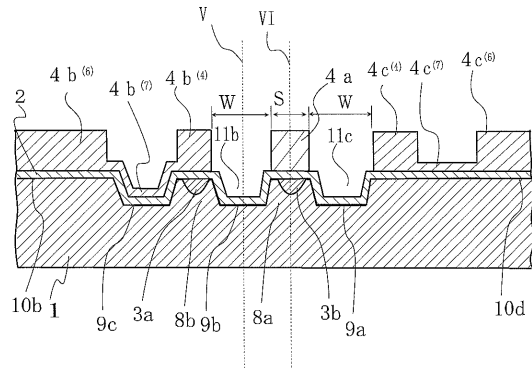
【図 12】



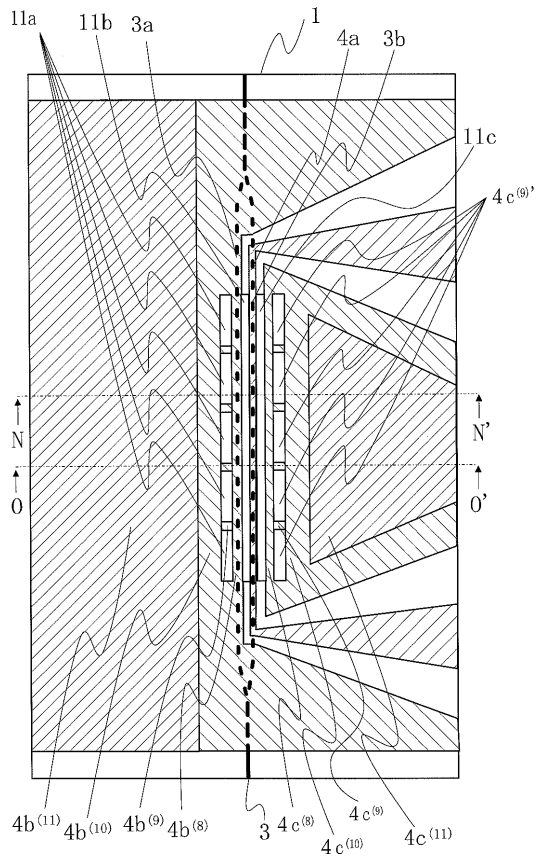
【図 13】



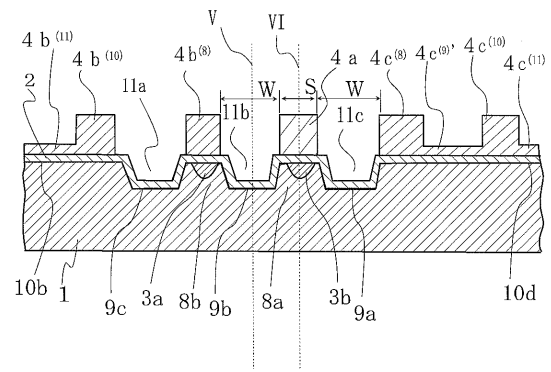
【図 14】



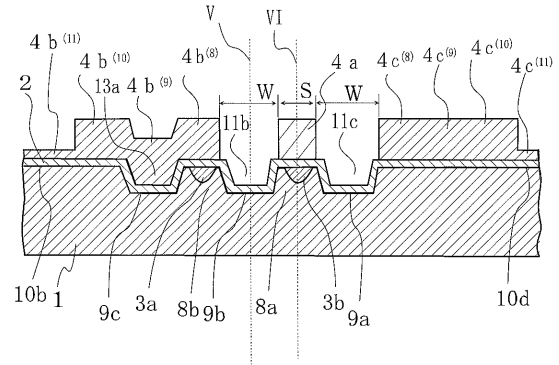
【図 15】



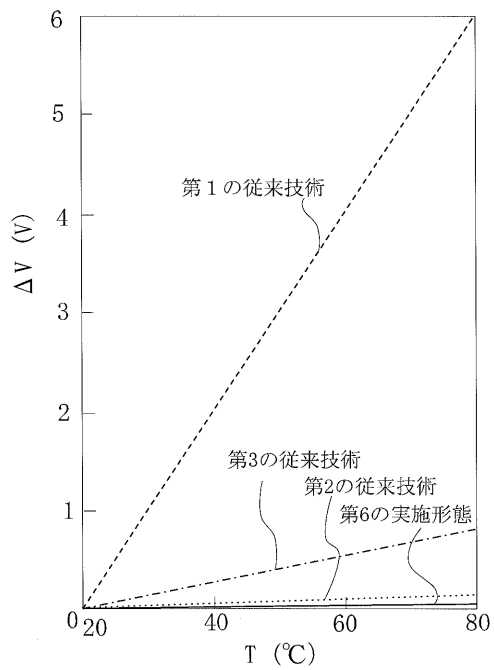
【図 16】



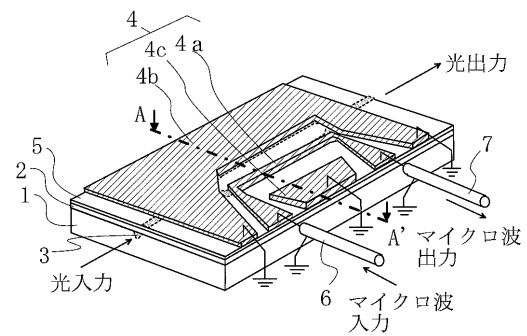
【図 17】



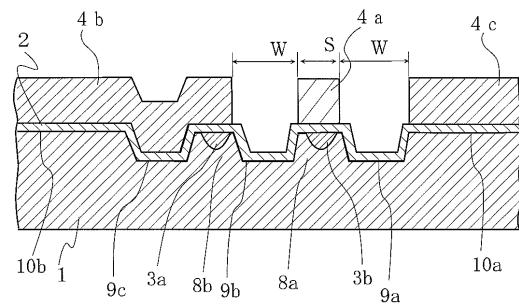
【図 18】



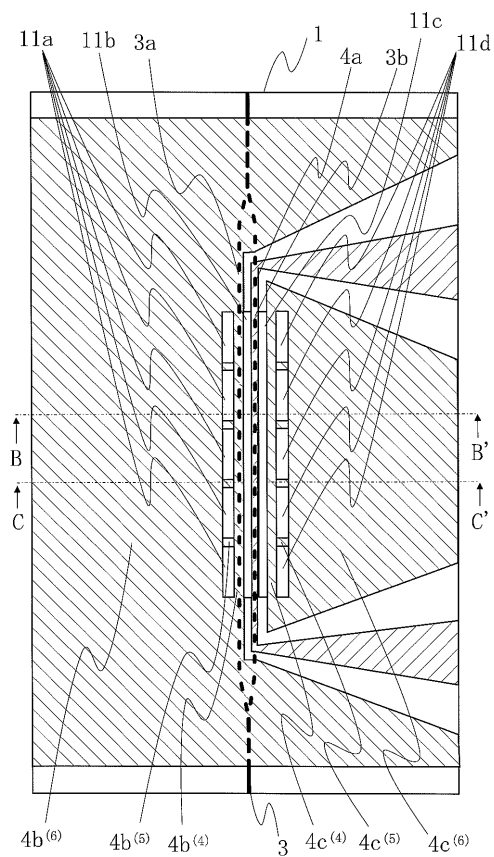
【図 19】



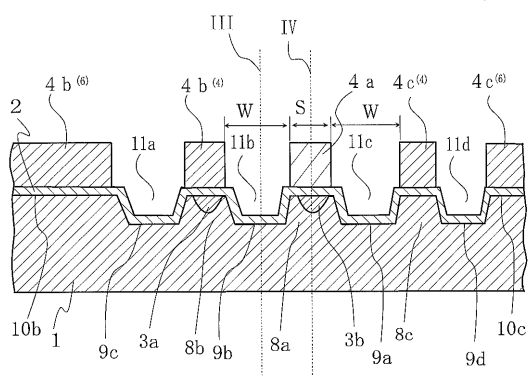
【図 20】



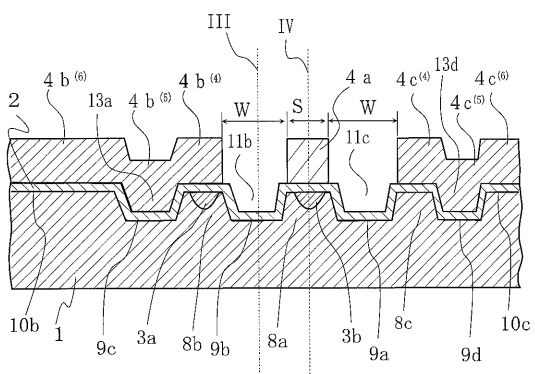
【图 2 2】



【图 2 3】



【图 2 4】



フロントページの続き

- (72)発明者 名波 雅也
神奈川県厚木市恩名五丁目1番1号 アンリツ株式会社内
- (72)発明者 内田 靖二
神奈川県厚木市恩名五丁目1番1号 アンリツ株式会社内
- (72)発明者 五十嵐 信弘
神奈川県厚木市恩名五丁目1番1号 アンリツ株式会社内
- (72)発明者 中平 徹
神奈川県厚木市恩名五丁目1番1号 アンリツ株式会社内
- (72)発明者 松本 聡
神奈川県厚木市恩名五丁目1番1号 アンリツ株式会社内

Fターム(参考) 2H079 AA02 AA12 BA01 CA05 DA03 EA05 EB04 EB12 HA23