

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5433919号  
(P5433919)

(45) 発行日 平成26年3月5日(2014.3.5)

(24) 登録日 平成25年12月20日(2013.12.20)

(51) Int.Cl.		F I	
<b>GO2F</b>	<b>1/035</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2F 1/035
<b>GO2F</b>	<b>1/015</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2F 1/015 505
<b>GO2B</b>	<b>6/12</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2B 6/12 J
			GO2B 6/12 H

請求項の数 9 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2005-374605 (P2005-374605)	(73) 特許権者	000004237
(22) 出願日	平成17年12月27日(2005.12.27)		日本電気株式会社
(65) 公開番号	特開2007-178550 (P2007-178550A)		東京都港区芝五丁目7番1号
(43) 公開日	平成19年7月12日(2007.7.12)	(74) 代理人	100123788
審査請求日	平成20年10月16日(2008.10.16)		弁理士 官崎 昭夫
前置審査		(74) 代理人	100106138
			弁理士 石橋 政幸
		(74) 代理人	100127454
			弁理士 緒方 雅昭
		(72) 発明者	石坂 政茂
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
		審査官	佐藤 宙子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光機能素子、その駆動方法及び製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光波信号を入力するための入力光導波路と、第1及び第2の分岐光導波路と、前記入力光導波路に接続して前記光波信号を前記第1及び第2の分岐光導波路に2分岐して伝搬させる分波部と、前記第1及び第2の分岐光導波路の少なくとも一方に設けられ、当該分岐光導波路を伝搬する光波信号を変調する光変調部と、前記第1及び第2の分岐光導波路からの光波信号を再び合波する合波部と、合波した光波信号を出力するための出力光導波路と、を有する光機能素子であって、

前記光変調部は、対応する前記分岐光導波路に光学的に結合するように配置されたリング型光導波路と、前記対応する分岐光導波路と前記リング型光導波路との間の振幅分岐比を変化させる手段と、を備え、

前記振幅分岐比を変化させる手段は、前記対応する分岐光導波路に直列に挿入された2つの多モード干渉方式の3dBカプラと、前記2つの3dBカプラ間において前記対応する分岐光導波路に挿入され前記対応する分岐光導波路を伝搬する光波信号の位相を変化させる位相変調部と、を有し、前記対応する分岐光導波路と前記リング型光導波路は、前記各3dBカプラの位置で対応する3dBカプラを介して接続していることを特徴とする、光機能素子。

【請求項2】

前記位相変調部は、該位相変調部における分岐光導波路に形成されたpn接合またはpin接合と、前記pn接合またはpin接合に電圧を印加する手段と、を有することを特

徴とする請求項 1 に記載の光機能素子。

【請求項 3】

前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路のそれぞれに前記光変調部を有することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光機能素子。

【請求項 4】

前記分波部及び合波部は光導波路構造を有し、前記入力光導波路と前記分波部と前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路と前記合波部と前記出力光導波路と前記リング型光導波路とが半導体材料から構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の光機能素子。

【請求項 5】

前記分波部及び合波部は光導波路構造を有し、前記入力光導波路と前記分波部と前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路と前記合波部と前記出力光導波路と前記リング型光導波路とがシリコン半導体基板上に形成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の光機能素子。

【請求項 6】

前記光変調部を駆動する駆動回路が、前記シリコン半導体基板上にモノリシックに集積されていることを特徴とする請求項 5 に記載の光機能素子。

【請求項 7】

前記振幅分岐比を変化させる手段は、入力する光波信号を変調するための変調信号に応じて前記 p n 接合または p i n 接合に電圧を印加することを特徴とする、請求項 2 に記載の光機能素子。

【請求項 8】

請求項 3 に記載の光機能素子の駆動方法であって、位相遅れ量に対する基準値を定めておき、前記第 1 の分岐光導波路の光変調部では、位相遅れ量に関する基準値から位相遅れ方向となる範囲で変調を行い、前記第 2 の分岐光導波路の光変調部では、前記第 1 の分岐光導波路の光変調部での変調と相補的になるように、前記基準値から位相進み方向となる範囲で変調を行うことを特徴とする駆動方法。

【請求項 9】

光波信号を入力するための入力光導波路と、第 1 及び第 2 の分岐光導波路と、前記入力光導波路に接続して前記光波信号を前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路に 2 分岐して伝搬させる分波部と、前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路の少なくとも一方に挿入され当該分岐光導波路を伝搬する光波信号の位相を変化させる位相変調部と、前記位相変調部を挟んで該位相変調部に対応する分岐光導波路に直列に挿入された 2 つの多モード干渉方式の 3 d B カプラと、前記各 3 d B カプラの位置で対応する 3 d B カプラを介して前記対応する分岐光導波路に接続するリング型光導波路と、前記第 1 及び第 2 の分岐光導波路からの光波信号を再び合波する合波部と、合波した光波信号を出力するための出力光導波路と、を有する光機能素子の製造方法であって、

シリコン基板上に第 1 のシリコン酸化膜が積層された S O I 基板の上部に第 1 の導電型のシリコン層を積層し、

前記第 1 の導電型のシリコン層の上に、第 2 のシリコン酸化膜を積層し、

前記第 2 のシリコン酸化膜上に、前記第 1 の導電型とは反対導電型である第 2 の導電型のシリコン層を積層し、

前記第 2 の導電型のシリコン層の上に、前記各光導波路の形成位置に対応した第 1 のレジストパターンを形成し、感光性レジスト膜によって、前記位相変調部を除く光導波路に対応する光導波路パターンを形成し、

前記第 1 のレジストパターンをマスクとして前記第 2 の導電型のシリコン層をエッチングしてリッジ光導波路を形成し、そののち、前記第 1 のレジストパターンを除去し、

前記第 2 のシリコン酸化膜及び前記リッジ光導波路の上に、第 3 のシリコン酸化膜を積層し、

前記第 3 のシリコン酸化膜の全体を、前記リッジ光導波路の上部が露出するまで均一に

10

20

30

40

50

エッチングし、その後、第1の電極を形成するための第1のレジストマスクパターンを形成し、

前記第1のレジストマスクパターンをマスクとして、前記第1の導電型のシリコン層の一部が露出するまで前記第3のシリコン酸化膜をエッチングし、前記第1の導電型のシリコン層及び前記第1のレジストマスクパターン上に、第1のポリシリコン層及び第1の金属電極層を積層形成し、そののち、前記第1のレジストマスクパターンをリフトオフ法で除去して前記第1の電極を形成し、

前記第1の電極の形成ののち、前記位相変調部における光導波路を形成するための第2のレジストマスクパターンを形成し、

前記第2のレジストマスクパターンをマスクとして、前記第1の導電型のシリコン層の一部が露出するまで前記第3のシリコン酸化膜及び前記第2のシリコン酸化膜をエッチングし、前記第1の導電型のシリコン層及び前記第2のレジストマスクパターン上に、第2のポリシリコン層及び第2の金属電極層を積層形成し、そののち、前記第2のレジストマスクパターンをリフトオフ法で除去して前記位相変調部におけるリッジ光導波路及び第2の電極を形成する、

光機能素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光通信、光情報処理及び光インターコネクション等に用いられる光機能素子に関し、特に、電気信号を光信号に変換する光変調器や可変光減衰器などの光機能素子と、そのような光機能素子の駆動方法及び製造方法とに関する。

【背景技術】

【0002】

変調信号である電気信号を光信号に変換する光変調器や、減衰量を表わす電気信号に応じて光信号を減衰させる光減衰器によって代表される光機能素子は、近年の光通信市場における通信トラフィックの急速な増大に関連して極めて重要な役割を果たしている基幹部品である。そして、光通信技術の進展とともにこれらの光変調器や光減衰器などの光機能素子は、高性能化と低コストが進んでおり、そのため、光通信分野のみならず、光情報処理や光インターコネクションなどに代表されるような、より使用数量の多い分野へのその適用が検討され始めている。光変調器も光減衰器も電気信号に応じて光波強度を変化させる点では同じであり、ただ、光波強度の変化を高速に行うのか（光変調器）、あるいは低速に行うのか（光減衰器）の違いだけであるので、ここでは、これらの光機能素子の代表として、光変調器を取り上げる。光変調器としては、化合物半導体材料を用いた電界吸収型変調器やLiNbO<sub>3</sub>材料を用いたマッハ-ツェンダー変調器が実用化されている。

【0003】

マッハ-ツェンダー型の光変調器は、光波信号を入力するための入力光導波路と、第1及び第2の導波路部分と、入力光導波路に接続して光波信号を第1及び第2の導波路部分に2分岐して伝搬させる分波部と、第1及び第2の導波路部分からの光波信号を再び合波する合波部と、合波した光波信号を出力するための出力光導波路と、備えるマッハ-ツェンダー型干渉光学系の基本構成において、第1及び第2の導波路部分を伝搬する光波信号間の位相差を変化させることによって、マッハ-ツェンダー型干渉効果により出力光における光波強度の変動を行うことを可能にするものである。

【0004】

マッハ-ツェンダー型光変調器は、第1及び第2の導波路部分の間での位相差を用いるものであるから、入力光の波長を変化させた場合には、波長に応じて出力光の強度も変化する。したがって、マッハ-ツェンダー型変調器を応用した波長可変フィルタなども提案されている。例えば特開平8-95108号公報（特許文献1）には、上述したマッハ-ツェンダー型干渉光学系の基本構成において第1の導波路部分にモード結合するリング型光導波路を設け、このように構成されたものを単位構造を複数段縦続接続して構成された

10

20

30

40

50

光信号処理器が開示されている。この光信号処理器では、縦続接続される単位構造を適宜に設計することにより、例えば、所望の特性を有する光フィルタを構成することができ、また、導波路部分に位相制御部を設けることによって、特性を可変とすることができる。しかしながら、特許文献1に記載のものは、リング型光導波路と導波路部分との結合係数（振幅分岐比）によって素子特性が大きく変化するものであるが、構造上の誤差などの影響によって振幅分岐比が大きくばらつくので、所望の特性を得るための製造や調整が難しくなる。また、特開2004-102097号公報（特許文献2）には、上述したマッハ-ツェンダー型干渉光学系の基本構成において、第1の導波路部分にモード結合する第1のリング型光導波路と、第2の導波路部分にモード結合する第2のリング型光導波路と、を設けた波長可変フィルタが開示されている。この波長可変フィルタでは、リング型光導波路に対して電流注入あるいは電圧印加などを行うことによってその屈折率を変化させてリング型光導波路の光学距離（＝物理的長さ×屈折率）を変化させることにより、透過波長を変化させる。

10

【0005】

特許文献1の光信号処理器あるいは特許文献2の波長可変フィルタでは、入力光の波長が一定である場合には、電気信号に応じて、出力光の強度が変化する。

【0006】

さらに光変調器についての先行技術を説明すると、化合物半導体材料による電界吸収型変調器の例として、InP材料による変調器集積化光源がIshizakaらによって発表されており（非特許文献1）、この変調器集積化光源は、長距離光通信用光源として実用化されている。LiNbO<sub>3</sub>材料によるマッハ-ツェンダー変調器の例としては、Sugiyamaらによって、特に小型化されたものが報告されている（非特許文献2）。しかしながら、前者は、ウェハ材料や製造コストの点から低コスト化に難点があり、後者も小型化されたものの1cm以上の素子サイズを有しており、低コスト化に限界がある。

20

【0007】

これに対して、最近、安価に製造できるSi半導体を用いた光変調器が、Ansheng Liuらにより発表されている（非特許文献3）。Si半導体を用いることのメリットは、成熟したプロセス技術を利用できること以外に、CMOS LSIとの親和性からSiウェハによるOEIC（光-電気集積回路）の可能性を示唆している点にある。Liuらによって発表された光変調器は、光の受動導波路部だけでなく能動導波路部をもSiウェハ上に形成した点が画期的であった。しかしながら、素子構造としては、PN接合近傍の電界印加による屈折率変化を単純なマッハ-ツェンダー干渉系により光強度に変換しているだけであり、1cm以上の素子サイズが必要となっている。センチメートルオーダの素子サイズでは、ウェハ一枚あたりから得られる収量の点から低コスト化に限界があるばかりでなく、CMOS LSI等の集積化の観点からもOEIC化が困難であり、Si半導体材料を用いる利点を十分に生かせないという問題点を抱えている。

30

【特許文献1】特開平8-95108号公報

【特許文献2】特開2004-102097号公報

【非特許文献1】M. Ishizaka et al., "Modulator Integrated DFB Lasers with More Than 600-km Transmission Capability at 2.5Gb/s," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 10, pp. 1406-1408 (1997)

40

【非特許文献2】M. Sugiyama et al., "Compact Zero-Chirp LiNbO<sub>3</sub> Modulator for 10-GB/s Small-Form-Factor Transponder," 30th European Conference on Optical Communication, Post-Deadline Session 3, Th4.3.5 (2004)

【非特許文献3】Ansheng Liu et al., "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," Nature, Vol. 427, pp. 615-618 (2004)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

50

光変調器や光減衰器などの光機能素子は、光通信分野において使用されるだけでなく、光情報処理や光インターコネクションの分野においてもその適用が検討され始めている。しかしながら光情報処理や光インターコネクションの分野において広く使用されるようになるためには、光機能素子は大量生産に耐えるものであるとともに、その製造コストの大幅な削減が不可欠である。光情報処理や光インターコネクションの分野で使用される製品の製造コストとしては、光通信分野における製品に比べ、2桁以上の削減が必要であると言われている。製造コストの削減という観点からすれば、所望の変調特性あるいは減衰特性を有しながら、かつ、サイズを小さく製造できることが重要である。また、大量生産に耐えるものであるためには、構造上のばらつきによる特性への影響が小さいものであることが望まれる。

10

**【0009】**

しかしながら、上述した従来の光機能素子においては、特許文献1に示す光信号処理器あるいは特許文献2に示す波長変化フィルタにおいても、導波路における屈折率変化を通じてその導波路を伝搬する光波信号に対して伝搬遅延を与え、その伝搬遅延に基づく位相遅れを介してマッハ-ツェンダー型干渉効果による出力光の強度変化を得る構成となっているので、原理的に、サイズを小さくすることが難しい、という問題点を有する。サイズが大きいうことは、電気的な寄生容量が大きくなることも意味するので、高速動作を難しくする。非特許文献3に示したSi材料を用いた変調器においても、成熟した半導体製造技術を用いるため、特性の安定したものを大量に生産することが可能であるが、やはり、サイズを小さくすることができず、コスト低減に限界がある。

20

**【0010】**

本発明の目的は、光変調器や光減衰器などのマッハ-ツェンダー型の光機能素子であって、上述した課題を解決することができて製造や調整が容易であり、素子サイズを小さくでき、また高速動作が可能な光機能素子を提供することにある。

**【0011】**

本発明の別の目的は、本発明の光機能素子の駆動方法を提供することにある。

**【0012】**

本発明のさらに別の目的は、本発明の光機能素子の製造方法を提供することにある。

**【課題を解決するための手段】****【0013】**

本発明の光機能素子は、光波信号を入力するための入力光導波路と、第1及び第2の分岐光導波路と、入力光導波路に接続して光波信号を第1及び第2の分岐光導波路に2分岐して伝搬させる分波部と、第1及び第2の分岐光導波路の少なくとも一方に設けられ、その分岐光導波路を伝搬する光波信号を変調する光変調部と、第1及び第2の分岐光導波路からの光波信号を再び合波する合波部と、合波した光波信号を出力するための出力光導波路と、を有する光機能素子であって、光変調部は、対応する分岐光導波路に光学的に結合するように配置されたリング型光導波路と、対応する分岐光導波路とリング型光導波路との間の振幅分岐比を変化させる手段と、を備える。この光機能素子では、振幅分岐比を変化させることにより、第1及び第2の分岐光導波路を伝搬する光波信号の位相差が変化し、出力光導波路から出力される光波信号の強度が制御される。

30

40

**【0014】**

このような光機能素子は、例えば、光変調器あるいは光減衰器、光スイッチとして使用されるものである。

**【0015】**

本発明において、上述した対応する分岐光導波路とリング型光導波路とが光学的に結合しているとは、例えば、これら両方の光導波路のコアが近接して配置することによって両方の光導波路がモード結合している場合と、両方の光導波路がカプラなどを介して接続しており、モード結合の場合と同様に一方の光導波路から他方の光導波路への光波信号の分岐と他方の光導波路から一方の光導波路への光波信号の分岐とがともに起こりうる場合とを含む。

50

## 【 0 0 1 6 】

## 〔作用〕

本発明の光機能素子では、マッハ - ツェンダー型の干渉光学系を用いているので、第 1 及び第 2 の分岐光導波路をそれぞれ伝搬する光波信号間に の位相差が生じたとすると、入力光強度  $P$  に対して出力光強度は  $P \cdot \cos^2(\quad / 2)$  となり、位相差 に応じて、出力光は減衰消光することになる。そこで本発明では、第 1 及び第 2 の分岐光導波路の少なくとも一方に、その分岐光導波路を伝搬する光波信号を変調する光変調部を設けている。光変調部は、光変調部は、対応する分岐光導波路に光学的に結合するように配置されたリング型光導波路と、対応する分岐光導波路とリング型光導波路との間の振幅分岐比  $K$  を変化させる手段と、を備える。この構成においては、後述するように振幅分岐比  $K$  を  $0 < K < 1$  程度の範囲で変化させるだけで、光変調部を通過する光波信号に対し、 $0$  から 程度までの位相遅れを与えることができるので、光変調部によりこのような位相遅れを少なくとも一方の分岐光導波路に導入することによって、出力光強度を制御することが可能になる。

10

## 【発明の効果】

## 【 0 0 1 7 】

本発明では、光変調部における分岐光導波路とリング型光導波路との間の振幅分岐比  $K$  を変化させることで、光変調や光減衰、光スイッチの機能を実現する。振幅分岐比  $K$  は、例えば、分岐光導波路とリング型光導波路とが光学的に結合している部位での屈折率を変化させることによって容易に変化させることができ、この部位の面積は小さいのでそれに伴う寄生容量も小さい。そのため、本発明によれば、印加電圧や消費電力などを伴うことなく、素子サイズを小さくしつつ、高速動作が可能な光機能素子を得ることができる。

20

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【 0 0 1 8 】

次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細を説明する。

## 【 0 0 1 9 】

## (第 1 の実施形態)

図 1 は、本発明の第 1 の実施形態の光機能素子の構成を示している。ここでは光機能素子はマッハ - ツェンダー型の光変調器として設けられている。

## 【 0 0 2 0 】

シリコン基板 1 の上部の同一平面上に、一端から光波信号が入力される入力光導波路 9 と、入力光導波路 9 の他端に接続する分波部 8 と、一対の分岐光導波路 7 A、7 B と、両方の分岐光導波路 7 A、7 B から伝搬してきた光波信号を合波する合波部 6 と、合波導波路部 6 において合波された光波信号を出力するための出力光導波路 5 が形成されるとともに、一方の分岐光導波路 7 A に近接して、この分岐光導波路 7 A に対してモード結合するリング型光導波路 3 が形成されている。図において分岐光導波路 7 A、7 B は、それぞれ直線状に設けられているが、曲線状に設けられていてもよい。分波部 8 は、入力光導波路 9 から伝搬してきた光波信号を分岐光導波路 7 A、7 B に 2 分岐するものである。

30

## 【 0 0 2 1 】

これらの光導波路 3、5、7 A、7 B、9 や合波部 6、分波部 8 は、いずれもシリコン基板 1 において光導波路構造を有するものとして形成されている。以下、このような光導波路構造の構成について説明する。図 2 は、図 1 における B 1 - B 2 断面を示す模式図である。シリコン基板 1 上に  $\text{SiO}_2$  膜 2 1、 $n$  型シリコン層 2 2 が順次積層されており、 $n$  型シリコン層 2 2 の上部には、リング型光導波路 3 および分岐光導波路 7 A、7 B がリッジ光導波路として、それぞれ  $p$  型シリコン層で形成されている。図示したものでは、 $p$  型シリコン層 4 6 は分岐光導波路 7 A に対応し、 $p$  型シリコン層 4 7 はリング型光導波路 3 に対応する。光波強度が集中する領域には、 $n$  型シリコン層 2 2 と  $p$  型シリコン層 4 6、4 7 とによる  $pn$  接合 5 1、5 2 が形成されている。また、 $p$  型シリコン層 4 6、4 7 の両側は、 $\text{SiO}_2$  膜 2 3 で埋め込まれており、さらに、 $p$  型シリコン層 4 6、4 7 の上部には、 $p$  型ポリシリコン層 4 8、電圧印加のための陰極電極 4 9 が順次積層されており

40

50

、陰極電極 4 9 には、パッド電極 4 が電氣的に接続された状態で形成されている。図 3 は、図 1 における C 1 - C 2 断面を示す模式図であるが、n 型シリコン層 2 2 の一部上部には、n 型ポリシリコン層 2 9 と電圧印加のための陽極電極 1 1 が順次積層された構成となっている。図示していないが、入力光導波路 9、分波部 8、分岐光導波路 7 B、合波部 6 及び出力光導波路 5 も、p 型シリコン層からなるリッジ光導波路として構成されている。

【 0 0 2 2 】

なお、このような光機能素子の一例では、分岐光導波路 7 A とリング型光導波路 3 が光学的に結合して相互作用する導波路部の長さ（すなわち相互作用長）が  $100 \mu\text{m}$  となり、このときの両方の光導波路間のモード結合定数が  $1 \times 10^{-3} \text{ rad} / \mu\text{m}$  となるように、相互作用する部分の導波路部の構造が定められている。

10

【 0 0 2 3 】

以下に、この実施形態の動作機構について詳細に述べる。入力光導波路 9 に入力された光波は、分波部 8 で 2 分岐した後、分岐光導波路 7 A、7 B を伝搬する。分岐光導波路 7 A とリング型光導波路 3 とはモード結合しているため、分岐光導波路 7 A を伝搬してきた光波は、リング型光導波路 3 にも分岐する。分岐光導波路 7 A を伝搬してきた光波の振幅を  $|a|$  とし、このうちリング型光導波路 3 に分岐する光波の振幅を  $|c|$  とすれば、振幅分岐比  $K$  は、 $|c| / |a|$  で表わされる。ただし、 $0 \leq K \leq 1$  である。なお、リング型光導波路 3 と分岐光導波路 7 A とのモード結合の結合定数を  $k$  とし、モード結合している部分の光路長を  $l$  とすれば、 $K = \sin(kl)$  と表わされる。

【 0 0 2 4 】

20

リング型光導波路 3 に分岐した光波成分も最終的には分岐光導波路 7 A に戻るが、リング型光導波路 3 が有限の長さ  $L$  を有するため、結果として、分岐光導波路 7 A への入力と出力とに着目すると、位相遅れが発生することになる。一方の分岐光導波路 7 A とリング型光導波路 3 とのモード結合の強さは、上述の振幅分岐比  $K$  で表わすことができる。そこで、分岐光導波路 7 A とこれにモード結合したリング型光導波路 3 とからなる系を、リング共振型位相シフタと呼ぶことにする。図 4 は、リング共振型位相シフタを概念的に説明する図である。

【 0 0 2 5 】

ここで、分岐光導波路 7 A の一端に入射する光波振幅を  $a$ 、分岐光導波路 7 A の他端から出射する光波振幅を  $b$  で表わすと（いずれも複素表現である）、 $b$  は、 $a$  を用いて(1)式のように表わすことができる。

30

【 0 0 2 6 】

【数 1】

$$b = \frac{e^{j\beta L} \cdot \sqrt{1-K^2} - 1}{e^{j\beta L} - \sqrt{1-K^2}} \cdot a \quad (1)$$

ただし、 $\beta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{eff}} \cdot L$

【 0 0 2 7 】

40

ここで、 $\omega$  は円周率、 $\lambda$  は光波の波長、 $n_{\text{eff}}$  はリング型光導波路における実効屈折率、 $L$  はリング型光導波路のリング周囲長である。(1)式において、 $\beta L$  は、波長  $\lambda$  の光波がリング型光導波路を 1 周したときの位相遅れをラジアン単位で表わしたものである。入射光  $a$  と出射光  $b$  との位相差  $\phi$  は、光波振幅  $a$ 、 $b$  の相互の複素比の偏角で表わされるから、

【 0 0 2 8 】

【数 2】

$$\Delta\phi = \text{Arg}\left[\frac{b}{a}\right] = \tan^{-1}\left[\frac{K^2 \cdot \sin(\beta L)}{2\sqrt{1-K^2} - (2-K^2) \cdot \cos(\beta L)}\right] \quad (2)$$

【0029】

となる。上述したように、振幅分岐比  $K$  は、 $0 < K < 1$  を満たしている。

【0030】

(2)式から明らかのように、位相差  $\Delta\phi$  は、振幅分岐比  $K$  を変化させることによって変化させることができる。図 5 は、半径が  $200 \mu\text{m}$  の真円のリング型光導波路 3 (リング周囲長  $L = 1.256 \text{ mm}$ ) を用いた場合の振幅分岐比  $K$  と位相差  $\Delta\phi$  との関係を示すグラフである。このリング型光導波路 3 のリング周囲長  $L$  は、そのリング型光導波路での入射光の波長のほぼ整数倍であるが (図 5 における  $L$  の式の右辺第 1 項の「2」で表わす)、正確に整数倍より少し長く、そのため、入射光がリング光導波路 3 を周回したとすると、(波長の整数倍の項を除いて)  $5 \times 10^{-4}$  ラジアンだけの位相遅れを生じさせるものである。このグラフでは、縦軸の位相差  $\Delta\phi$  は、(円周率) で正規化されている。このグラフから明らかのように、 $0 < K < 0.1$  程度の範囲で振幅分岐比  $K$  を変化させれば、ほぼ 0 から  $\pi$  までの位相の変調が可能となる。

10

【0031】

図 1 ~ 図 3 に戻って、陰極電極 49 と陽極電極 11 の間に電圧を印加すると、 $n$  型シリコン層の電位が変化し、 $p-n$  接合 51、52 における空乏層が広がり、プラズマ効果によって、これらの  $p-n$  接合 51、52 の近傍の領域における屈折率が変化する。この屈折率変化により、リング型光導波路 3 と分岐光導波路 7A における光波の断面電磁界分布が変化して、その結果、両者間の振幅分岐比  $K$  も変化し、位相差  $\Delta\phi$  も変化する。

20

【0032】

本実施形態の光変調器においては、入射光導波路 9 から入射した入力光波信号は、分波部 8 によって 1 対の分岐光導波路 7A、7B に分岐する。分岐光導波路 7B に分岐した方の光波信号は位相遅れを受けることなく合波部 6 に入射するが、分岐光導波路 7A に分岐した方の光波信号は、リング型光導波路 3 とのリング共振型位相シフトによって、0 から  $\pi$  までの間で可変の位相遅れを受けてから合波導波路部 6 に入射する。ここでの位相遅れは、陰極電極 49 と陽極電極 11 との間に印加された電圧に依存する。合波部 6 におけるマッハ - ツェンダー干渉効果により、合波部 6 で合波されて出力される光波信号の強度は、分岐光導波路 7A での位相遅れに応じて変化する。その結果、陰極電極 49 と陽極電極 11 の間に印加する電圧すなわち変調信号を変化させて上述の振幅分岐比  $K$  を変化させることにより、合波部 6 から出力光導波路 5 を介して出射する光波信号の強度を変化させることができ、光波信号の変調を行うことができる。なお当然のことながら、本実施形態の光変調器は、陰極電極 49 と陽極電極 11 の間に印加する電圧に応じて出力光の強度が減衰する光減衰器あるいは光スイッチとしても使用できるものである。

30

【0033】

この実施の形態においては、振幅分岐比  $K$  を変化させるために、リング型光導波路 3 と分岐光導波路 7A とが近接する部分において、両方の光導波路 3、7A に接続するように陰極電極 49 を設け、電圧印加によって両方の光導波路 3、7A の屈折率を変化させる構成としている。しかしながら、いずれか一方の光導波路の屈折率を変化させるだけで、その光導波路を伝搬する光波信号の導波モードが変化し、両方の光導波路 3、7A の結合状態が変化する。したがって、本実施形態の光変調器においては、リング型光導波路 3 及び分岐光導波路 7A のいずれか一方のみの上に陰極電極 49 を設け、その対応する光導波路のみに電圧を印加できる構成としてもよい。

40

【0034】

本実施形態の光変調器では、振幅分岐比  $K$  を 0 から 0.1 の間で変化させるだけで、実質的に 100% の光強度変調を達成することができる。振幅分岐比  $K$  をこの程度変化させ

50



るために陰極電極 4 9 及び陽極電極 1 1 の間に印加すべき電圧は、比較的低い電圧で十分である。また、振幅分岐比  $K$  を変化させるための電極は、リング型光導波路と分岐光導波路とがモード結合している部分に対して電圧を印加できればよいので、光導波路の光学距離を変化させるために用いられる電極に比べて、小さく形成することができ、そのため、その電極に寄生する静電容量も小さくできる。これらのことにより、本実施形態によれば、従来のものと比べて、少ない電力で高速に変調できる光変調器を構成することができる。また、電極を小さくできることから、本実施形態によれば光変調器を小型に形成することができ、シリコン基板上で 1 つの光変調器が占める面積を小さくできるので、光変調器の製造コストを低減することができる。

#### 【 0 0 3 5 】

特許文献 1 に記載された光信号処理器では、製造上のばらつきなどにより、分波部で 2 分岐した光波信号のうち的一方を伝搬する光導波路とリング型光導波路との光学的な結合が変化し、そのため所望の特性を得ることが難しくなっている。これに対して本実施形態の光変調器では、分岐光導波路とリング型光導波路との光学的な結合の大きさ自体を変化させることによって変調を行うので、製造上のばらつきなどは、変調結果をフィードバックすることなどによって、容易に補正できる。したがって、本実施形態によれば、光変調器自体の製造や調整が容易になる。

#### 【 0 0 3 6 】

上述した構成では、振幅分岐比  $K$  を変えるために  $p-n$  接合におけるプラズマ効果を利用しているが、当業者には自明であるように、 $p-n$  接合の代わりに  $p-i-n$  接合を設け、この  $p-i-n$  接合におけるプラズマ効果を利用するようにしてもよい。 $p-i-n$  接合とする場合、 $i$  型シリコン層が、 $n$  型シリコン層 2 2 と  $p$  型シリコン層 4 6、4 7 との間に設けられることになる。このとき、 $i$  型シリコン層は、 $p$  型シリコン層 4 6、4 7 が設けられる位置において  $p$  型シリコン層 4 6、4 7 の直下の位置にのみ形成されていてもよいし、 $n$  型シリコン層 2 2 の上面の全面に形成されていてもよい。

#### 【 0 0 3 7 】

次に、図 1 に示した光変調器の製造方法を説明する。図 6 は第 1 の実施形態の光変調器の製造工程を順に追って示す模式図であり、図 1 の  $G 1 - G 2$  線に沿う断面に対応するものである。

#### 【 0 0 3 8 】

シリコン基板 1 上に  $S i O_2$  膜 2 1 が積層された  $S O I$  基板を使用し (工程 A)、この  $S O I$  基板の上面に  $n$  型シリコン層 2 2 を積層する (工程 B)。 $n$  型シリコン層 2 2 の上に  $p$  型シリコン層 1 5 4 を積層し (工程 C)、 $p$  型シリコン層 1 5 4 の上面に、感光性レジスト膜を用いた通常の露光工程により、光導波路パターン 1 5 5 を形成する (工程 D)。その後、光導波路パターン (レジストパターン) 1 5 5 をマスクとした  $R I E$  (反応性イオンエッチング) 法により  $p$  型シリコン層 1 5 4 をエッチングし、リング型光導波路 3 となるべき  $p$  型リッジ導波路 1 5 6 ( $p$  型シリコン層 4 7) を形成する。図では示されていないが、このとき、分岐光導波路 7 A、7 B となるリッジ光導波路も同時に形成される。しかる後、光導波路パターン 1 5 5 を除去し (工程 E)、 $n$  型シリコン層 2 2 及び  $p$  型シリコン層 4 7 の上に  $S i O_2$  膜 1 5 7 を積層する (工程 F)。 $R I E$  法により、 $S i O_2$  膜 1 5 7 の全体を、 $p$  型リッジ光導波路の上部が露出するまで均一にエッチングし (工程 G)、陽極電極 1 1 を形成するためのレジストマスクパターン 1 5 9 を形成し、 $R I E$  法により、レジストマスクパターン 1 5 9 をマスクとして  $n$  型シリコン層 2 2 の一部が露出するまで均一に  $S i O_2$  膜 1 5 7 エッチングする (工程 I)。その後、 $n$  型シリコン層 2 2、レジストマスクパターン 1 5 9 の上に、 $n$  型ポリシリコン層 1 6 0 及び金属電極層 1 6 1 を積層形成し (工程 J)、レジストマスクパターン 1 5 9 を有機溶剤等で除去するリフトオフ法により、 $n$  型ポリシリコン層 2 9 及び陽極電極 1 1 を形成する (工程 K)。その後、一般的なフォトリソグラフィ工程を経て  $p$  型ポリシリコン層 4 8 及び陰極電極 4 9 を設けることにより、第 1 の実施形態の光変調器が完成する。 $p$  型ポリシリコン層 4 8 及び陰極電極 4 9 は、例えば、陰極電極 4 9 を形成するためのレジストマスクパターンを形

10

20

30

40

50

成し、このレジストマスクパターン上にp型ポリシリコン層と金属電極を積層し、その後、レジストマスクパターンをリフトオフ法で除去することによって、設けることができる。

#### 【0039】

(第2の実施形態)

次に、本発明の第2の実施形態として、低消費電力で動作するマッハ-ツェンダー型の光減衰器について説明する。図7は、第2の実施形態の光減衰器を示しており、図8は、図7のD1-D2線に沿う断面を示している。図7、図8において、図1~図3において示したものと同一構成要素には、同じ参照符号が付与されている。

#### 【0040】

この光減衰器も、第1の実施形態の光変調器と同様に、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aからなるリング共振型位相シフタを使用し、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aの間の振幅分岐比Kを制御することで、出力光導波路5から出射される光波信号の強度を変化させている。ただしこの実施形態では、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aとがモード結合している部位の表面にヒータ65を設け、このヒータに通電して発熱させることにより、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aとがモード結合している位置での各光導波路3, 7Aの屈折率を温度変化によって変化させている。温度変化による屈折率変化によって、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aにおける光波の断面電磁界分布が変化し、両者間の振幅分岐比Kが変化する。したがって、ヒータ65に対する通電量を変化させて振幅分岐比Kを変化させることにより、光波信号における分岐光導波路7Aでの位相遅れが変化し、出力光導波路5から出射される光波信号の強度が変化する。この光減衰器で得たいとする所望の減衰量に応じて、ヒータ65に対する通電量を定めればよい。ヒータ65に対して通電するためのパッド電極66、67も、光減衰器の表面に設けられている。

#### 【0041】

本実施形態では、温度変化に基づく屈折率変化に応じて振幅分岐比Kを変化させているので、その応答の時定数は数十ミリ秒程度となる。したがってこの構成は、変調信号によって光波信号を高速に変調するための光変調器には不向きであるが、動作時間が数十ミリ秒程度と、減衰器やスイッチとしては高速で動作する光減衰器(さらには光スイッチ)として使用でき、変調信号が極めて低速である場合には光変調器としても使用できることになる。pn接合にけるプラズマ効果を用いて振幅分岐比Kを変化させるのか、温度変化による屈折率変化によって振幅分岐比を変化させるかの違いはあるが、その他の点では動作原理としては第1の実施形態と同じである。

#### 【0042】

なお、この実施の形態においては、振幅分岐比Kを変化させるために、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aとが近接する部分において、両方の光導波路3、7Aにまたがるようにヒータ65を配置し、ヒータ65への通電によって両方の光導波路3、7Aの温度を変えて両方の光導波路3、7Aの屈折率を変化させる構成としている。しかしながら、いずれか一方の光導波路の屈折率を変化させるだけで、その光導波路を伝搬する光波信号の導波モードが変化し、両方の光導波路3、7Aの結合状態が変化する。したがって、本実施形態の光変調器においては、リング型光導波路3及び分岐光導波路7Aのいずれか一方のみの上にヒータ65を設け、その対応する光導波路のみを加熱できる構成としてもよい。

#### 【0043】

この光減衰器の断面構成を説明する。シリコン基板60上に、SiO<sub>2</sub>クラッド層61が積層されており、SiO<sub>2</sub>クラッド層61上の一部にSiONコア層62, 63が形成され、さらにこれらSiO<sub>2</sub>クラッド層61及びSiONコア層62, 63を覆うように、SiO<sub>2</sub>クラッド層64が設けられている。SiONコア層62, 63は、それぞれ、分岐光導波路7A及びリング型光導波路3に対応する。SiONコア層62, 63(分岐光導波路7A及びリング型光導波路3)がモード結合する位置において、SiO<sub>2</sub>クラッド

10

20

30

40

50

ド層 64 の表面にヒータ 65 が形成されており、ヒータ 65 には、電流通電用のパッド電極 66、67 が接続されている。ここでは示されていないが、入力光導波路 9、分波部 8、分岐光導波路 7B、合波部 6 及び出力光導波路 5 も、SiO<sub>2</sub>クラッド層と SiON コア層により構成されている。

#### 【0044】

この光減衰器では、パッド電極 65、66 の間に電圧を印加することにより、ヒータ 65 をジュール加熱する。その結果、SiON コア層 62、63 やその近傍の SiO<sub>2</sub>クラッド層 64 に温度上昇が生じ、熱光学効果により、これらの層 62 ~ 64 の屈折率が変化する。これによって、振幅分岐比 K が変化する事となり、第 1 の実施形態の場合と同じ原理によって、出力光強度を変えることができる。本実施形態では、分岐光導波路 7A 及びリング型光導波路 3 とがモード結合している領域のみを加熱できればよいので、ヒータ面積を小さくすることができ、その分、ヒータ 65 に供給すべき電力も低下し、低消費電力が可能となる。もちろん、ヒータ 65 に供給する電力に応じて発熱量が変化し、これによって振幅分岐比 K が変化するのので、任意の減衰度を設定できる可変光減衰器を実現することができる。

10

#### 【0045】

本実施形態では、リング型光導波路 3 と分岐光導波路 7A とがモード結合している位置のみの温度を変化させればよいので、例えばリング型光導波路の全体、あるいは一方の分岐光導波路の全体の温度を変化させるような従来の光減衰器と比較して、ヒータで消費される電力を大幅に削減することができる。また、温度を変化させる部分の熱容量も小さいから、高速で動作させることが可能になる。

20

#### 【0046】

また本実施形態の光減衰器は、リング型光導波路 3 と分岐光導波路 7A における温度変化に伴う屈折率変化によって動作するので、光導波路として、例えば、シリコン基板上に形成される石英光導波路構造を用いることができる。したがって本実施形態によれば、数十ミリ秒程度という速い動作速度を有する光減衰器あるいは光スイッチを、簡単なプロセスで低コストに製造することができる。また、石英光導波路構造を用いる場合には、シリコン光導波路を用いる場合に比べ、可視光などより短波長側でも使用することができる。

#### 【0047】

(第 3 の実施形態)

30

次に、本発明の第 3 の実施形態の光変調器について説明する。図 9 は本発明の第 3 の実施形態の光変調器を示す断面図である。この光変調器は第 1 の実施形態の光変調器と同様のものであり、図 9 は図 1 における B1 - B2 線に沿う断面に対応するものである。しかしながら本実施形態の光変調器は、分岐光導波路 7A とリング型光導波路 3 との振幅分岐比 K を可変とするために、pn 接合におけるプラズマ効果を用いるのではなく、分岐光導波路 7A とリング型光導波路 3 とがモード結合する領域において両方の光導波路 3、7A のコアの間の領域に電気光効果 (EO 効果) を有する物質からなる EO 効果層 (電気光効果素子) 130 を設けている。この光変調器では、EO 効果層 130 に印加される電圧に応じて EO 効果が大きさが異なるので、印加電圧に応じて両方の光導波路 3、7A 間の結合状態を変化させることができ、両方の光導波路 3、7A 間の振幅分岐比 K を変化させることができる。EO 効果層 130 は、例えば、LiNbO<sub>3</sub> などによって形成される。EO 効果層 130 は、その下面が n 型シリコン層 22 に接し、上面には電極 131 が設けられている。また、両方の光導波路 3、7A のコアとして、p 型シリコン層ではなく、電気絶縁性の SiO<sub>2</sub> コア層 132、133 が設けられている。図示していないが、入力光導波路 9、分波部 8、分岐光導波路 7B、合波部 6 及び出力光導波路 5 も、コアとして、SiO<sub>2</sub> を用いている。

40

#### 【0048】

この光変調器では、電極 131 と陽極電極 11 (図 1 参照) との間に電圧を印加することにより、EO 効果層 130 にその電圧が印加される。EO 効果層 130 への印加電圧を制御することによって振幅分岐比 K を制御することができ、光波信号の変調を行うことが

50

できる。この光変調器も、E O効果層130に印加される電圧に応じて出力光の強度が減衰する光減衰器あるいは光スイッチとして使用できるものである。

【0049】

本実施形態の光変調器では、リング型光導波路3のコアと分岐光導波路7Aのコアとの間に配置したE O効果層130に電圧を印加することによって振幅分岐比Kを変化させるので、E O効果層130に用いる物質としてE O効果が大きいものを使用すれば、比較的小さな電圧で振幅分岐比Kを大きく変化させることができ、したがって、電圧振幅の小さな変調信号を用いても、出力光における大きな変調を達成できる。また、各導波路として石英光導波路構造を使用できるので、可視光などの比較的波長の短い光の変調を行うことができる。

10

【0050】

(第4の実施形態)

次に、本発明の第4の実施形態の光変調器について説明する。図10は、本発明の第4の実施形態の光変調器を示している。

【0051】

この光変調器では、第1の実施形態の光変調器と同様に、シリコン基板1の上部の同一平面上に、一端から光波信号が入力される入力光導波路9と、入力光導波路9の他端に接続する分波部8と、一对の分岐光導波路7A、7Bと、両方の分岐光導波路7A、7Bから伝搬してきた光波信号を合波する合波部6と、合波導波路部6において合波された光波信号を出力するための出力光導波路5が形成されるとともに、リング型光導波路3が形成されている。この光変調器が第1の実施形態のものとは異なる点は、リング型光導波路3が、わずかな距離を挟んで配置された2組のMMI (multi-mode interference; 多モード干渉方式) 3dB光カプラ81, 82を介して、2箇所での一方の分岐光導波路7Aと結合するとともに、分岐光導波路7Aに位相変調部83が挿入されている点である。位相変調部83は、分岐光導波路7Aにおいて、2つの3dB光カプラ81, 82の挿入点の間位置に設けられている。位相変調部83としては、分岐光導波路7Aを伝搬する光波信号に対し、pn接合あるいはpin接合によるプラズマ効果によって位相遅れを与えるものなどが好ましく使用される。このような2つの3dBカプラ81, 82と位相変調部83とによって、分岐光導波路7Aとリング型光導波路3とは光学的に結合し、この光学的な結合は、分岐光導波路7Aとリング型光導波路3とがモード結合しているものとして扱うことができ、両者間の振幅分岐比Kを上述と同様に定義することができる。そしてこの構成においては、位相変調部83における位相遅れ量を調整することにより、上述した振幅分岐比Kが変化する。この場合、位相変調部83のみによる位相遅れの変化に比べ、振幅分岐比Kが変化したことによるリング共振型位相シフタとしての位相遅れの変化は、例えば10倍以上に拡大される。したがって、分岐光導波路7Aに挿入される位相変調部83として、サイズの小さなものを使用することが可能になる。

20

30

【0052】

図11は、図10におけるA1-A2断面を示す模式図であり、図12は、図10におけるB1-B2断面を示す模式図である。第1の実施形態のものと同様に、シリコン基板1上にSiO<sub>2</sub>膜21、n型シリコン層22が順次積層されており、n型シリコン層22の上には、リング型光導波路3および分岐光導波路7A, 7Bがリッジ光導波路として、それぞれp型シリコン層で形成されている。図では、リング型光導波路3に対応して、Siコア層27が設けられている。また、分岐光導波路7Aのうち、位相変調部83に当たる部分は、図12に示すように、p型ポリシリコン層31で形成されている。リング型光導波路3のSiコア層27をn型シリコン層22から電氣的に分離するために、両者の界面にSiO<sub>2</sub>膜30が設けられている。位相変調部83においては、p型ポリシリコン層31はn型シリコン層とpn接合を形成するとともに、p型ポリシリコン層31に接続するように、陰極電極10が形成されている。Siコア層27及びp型ポリシリコン層31の両側はSiO<sub>2</sub>膜23で埋め込まれており、n型シリコン層22の一部の上には、n型ポリシリコン層29と電圧印加のための陽極電極11とが順次積層されている。

40

50

## 【 0 0 5 3 】

この光変調器においては、陽極電極 1 1 と陰極電極 1 0 との間に電圧を印加すると、位相変調部 8 3 において、リッジ光導波路（分岐光導波路 7 A の一部）である p 型ポリシリコン層 3 1 と、その下側に位置する n 型シリコン層 2 2 からなる p n 接合におけるプラズマ効果により、p 型ポリシリコン層 3 1 を伝搬する光波信号に位相遅れが発生する。この位相遅れにより、上述したようにリング型光導波路 3 と分岐光導波路 7 A との振幅分岐比 K が変化し、その結果、分岐光導波路 7 A を伝搬する光波信号に大きな位相遅れが発生する。陽極電極 1 1 と陰極電極 1 0 との間の印加電圧を変化させることによって振幅分岐比 K が変化するので、本実施形態によれば、光波信号の変調を行うことができる。本実施形態の光変調器も、陰極電極 1 0 と陽極電極 1 1 の間に印加する電圧に応じて出力光の強度が減衰する光減衰器あるいは光スイッチとしても使用できるものである。

10

## 【 0 0 5 4 】

次に、図 1 0 ~ 図 1 2 に示した光変調器の製造工程について、図 1 3 a、図 1 3 b、図 1 4 a、図 1 4 b を用いて説明する。図 1 3 a、図 1 4 a は、図 1 0 の A 1 - A 2 線での断面に対応する図であり、図 1 3 b、図 1 4 b は、図 1 0 の B 1 - B 2 線での断面に対応する図である。

## 【 0 0 5 5 】

まず、シリコン基板 1 上に  $\text{SiO}_2$  膜 2 1 が積層された SOI 基板を使用し（工程 A）、この SOI 基板の上面に n 型シリコン層 2 2 を積層する（工程 B）。n 型シリコン層 2 2 の上に、薄い  $\text{SiO}_2$  膜 2 0 3 を形成し（工程 C）、 $\text{SiO}_2$  膜 2 0 3 上にシリコン層 2 0 4 を積層し（工程 D）、シリコン層 2 0 4 の上面に、感光性レジスト膜 2 0 5 を塗布する（工程 E）。その後、感光性レジスト膜 2 0 5 をパターンニングして光導波路パターン 2 0 5 を形成する（工程 F）。その後、光導波路パターン（感光性レジスト膜 2 0 5 によるパターン）2 0 5 をマスクとした RIE（反応性イオンエッチング）法により p 型シリコン層 2 0 4 をエッチングし、リング型光導波路 3 となるべきリッジ光導波路（Si コア層 2 7）を形成する（工程 G）。図では示されていないが、このとき、分岐光導波路 7 A、7 B となるリッジ光導波路も同時に形成される。ただし、位相変調部となるべき部分の光導波路はこの時点では形成されない。

20

## 【 0 0 5 6 】

しかる後、光導波路パターン 2 0 5 を除去し、n 型シリコン層 2 2 及び Si コア層 2 7 の上に  $\text{SiO}_2$  膜 2 0 6 を積層する（工程 H）。RIE 法により、 $\text{SiO}_2$  膜 2 0 6 の全体を、リッジ光導波路の上部が露出するまで均一にエッチングし（工程 I）、陽極電極 1 1 を形成するためのレジストマスクパターン 2 0 9 を形成し（工程 J）、RIE 法により、レジストマスクパターン 2 0 9 をマスクとして n 型シリコン層 2 2 の一部が露出するまで均一に  $\text{SiO}_2$  膜 2 0 6 をエッチングする（工程 K）。その後、n 型シリコン層 2 2、レジストマスクパターン 2 0 9 の上に、n 型ポリシリコン層 2 1 0 及び金属電極層 2 1 1 を積層形成し（工程 L）、レジストマスクパターン 2 0 9 を有機溶剤等で除去するリフトオフ法により、n 型ポリシリコン層 2 9 及び陽極電極 1 1 を形成する（工程 M）。

30

## 【 0 0 5 7 】

次に、位相変調部における光導波路を形成するためのレジストマスクパターン 2 1 2 を形成し（工程 N）、このレジストマスクパターン 2 1 2 をマスクとして、RIE 法などのドライエッチングにより、n 型シリコン層 2 2 の一部が露出するまで均一に  $\text{SiO}_2$  膜 2 0 6 をエッチングする（工程 O）。次に、n 型シリコン層 2 2、レジストマスクパターン 2 0 9 の上に、p 型ポリシリコン層 2 1 3 及び金属電極層 2 1 4 を積層形成し（工程 P）、レジストマスクパターン 2 0 9 を有機溶剤等で除去するリフトオフ法により、位相変調部での光導波路を構成する n 型ポリシリコン層 3 1 と、その n 型ポリシリコン層 3 1 上に設けられる陰極電極 1 0 を形成する（工程 Q）。

40

## 【 0 0 5 8 】

以上の工程を経て、第 4 の実施形態の光変調器が完成する。

## 【 0 0 5 9 】

50

図15及び図16は、このような光変調器の具体的な構成例を示す図であり、図15は平面図、図16(a)は図15のA-B線での断面図、図16(b)は図15のC-D線での断面図である。ここでは、陰極電極が裏面電極としてn型シリコン(Si)基板の裏面側に設けられている構成を説明する。

#### 【0060】

ここでは、分岐光導波路7A及びリング型光導波路3のコア部分は、幅が $2.5\mu\text{m}$ 、厚さが $1.5\mu\text{m}$ のi型シリコンあるいはp型ポリシリコン(不純物濃度 $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ )からなっている。MMI方式の3dBカプラ81, 82として、それぞれ、光結合部の長さが $65\mu\text{m}$ 、幅が $5\mu\text{m}$ のものを用いている。このような分岐光導波路7A及びリング型光導波路3は、裏面に裏面電極が形成されたn型シリコン基板(不純物濃度が $1.7 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ )上に形成されている。分岐光導波路7Aの位相変調部83の光路長は、 $250\mu\text{m}$ である。位相変調部83の部分では、p型ポリシリコンからなる分岐光導波路7Aのコア上に、電極10が形成されている。

10

#### 【0061】

図17は、図15及び図16に示した光変調器における、電極10と裏面電極との間に印加された電圧をVとしたときに、電圧Vと振幅分岐比Kとの関係を示すグラフである。位相変調部83の光路長が $250\mu\text{m}$ であるとして、印加電圧Vを約10V変化させることで、Kを0から0.1までの範囲で変化させることができる。第1の実施形態でも説明したように、Kを0から0.1までの範囲で変化させると、0からほぼ までの位相差を与えることができるから、結果として、十分な消光比を有する光変調器を、光路長 $250\mu\text{m}$ の位相変調部を用いて実現できることになる。この位相変調部は、電圧印加によって屈折率を変化させるものであるが、同じく電圧印加による屈折率の変化で光変調を行う非特許文献3に記載のものでは、本実施形態のものと同じ消光比を得るために、mmオーダの光路長を必要としている。言い換えれば、本実施形態のものは、非特許文献3に比べ、位相変調部に用いられる電極サイズを $1/10$ 以下にすることができるので、寄生容量も $1/10$ 以下となり、その分、高速に光波信号の変調を行えることになる。

20

#### 【0062】

第4の実施形態の光変調器は、リング型光導波路3と分岐光導波路7Aとを近接して配置することにより両者をモード結合させるのではなく、2箇所(3dBカプラ81, 82)によって両者を結合させており、見た目では構成が複雑であるが、製造誤差の影響を受けにくい構造となっている。したがって、第4の実施形態によれば、特性の安定した光変調器を大量に生産すること可能である。

30

#### 【0063】

(第5の実施形態)

次に、本発明の第5の実施形態として、プッシュプル動作により、低電圧駆動が可能な光変調器について説明する。図18は、本発明の第5の実施形態の光変調器を示している。この光変調器は、上述した第1の実施形態の変調器と同様のものであるが、1対の分岐光導波路7A, 7Bのうち、他方の分岐光導波路7Bに対してモード結合する第2のリング型光導波路3Bが設けられている点で、第1の実施形態のものと相違する。第2のリング型光導波路3Bは分岐光導波路7Bとともに第2のリング共振型位相シフタを構成しており、この光変調器では、2本の分岐光導波路7A, 7Bのそれぞれごとに、リング共振型位相シフタが設けられていることになる。構造としては両方のリング共振型位相シフタは同等のものであり、そのため、分岐光導波路7Bの側にも、陰極電極49B、パッド電極4B、陽極電極11Bが設けられている。なお、陽極電極11、11Bはいずれもn型シリコン層22に電氣的に接続するものであるから、陽極電極としては、陽極電極11、11Bのいずれか一方のみを設けるようにしてもよい。

40

#### 【0064】

次に、この光変調器の動作を説明する。この光変調器ではそれぞれの両方の分岐光導波路7A, 7Bに対して別々の位相遅れを設定することができる。そこで、陽極電極11, 11Bを共通電極とし、陰極電極49, 49Bに印加する電圧の基準値Rとして、対応す

50

る分岐光導波路において  $\pi/2$  だけの位相遅れが生じるような電圧を設定する。陰極電極 49、49B の電圧がともにこの基準値であれば、分岐光導波路 7A、7B 間での位相差は生じず、最大強度の出力光を得ることができる。そして、出力光を最小にするためには、一方の陰極電極 49 に対して  $\pi/2$  だけの位相遅れが生じる電圧を印加し、他方の陰極電極 49B に対して位相遅れが生じないような電圧を印加する。このような電圧は、基準値からの電圧差として考えると、いずれも、一方の分岐光導波路において 0 から  $\pi/2$  までの位相遅れを生成するために必要な電圧差  $E$  の概ね半分である。したがって、陰極電極 49、49B を駆動する駆動回路としては、一方は  $R$  から  $R + (E/2)$  までの電圧を印加できる機能を備え、他方は、 $R$  から  $R - (E/2)$  までの電圧を印加できる機能を備えればよい。すなわち 2 つの駆動回路は、基準値  $R$  を中心として、基準値  $R$  からの電位差がたかだか  $E/2$  であるような相補的な信号を印加できるようなものであればよい。

10

## 【0065】

本実施形態では、各駆動回路としては、変調信号に応じた電圧信号であってたかだか  $E/2$  だけの電圧変化を与えるものを用いることができるので、一方の分岐光導波路のみで変調を行う場合に比べ、駆動回路が出力する信号における電圧変化の振幅を半分に低減することが可能となる。一般に、変調信号に応じて電圧を変化させる回路では、その電圧変化幅が大きいと、回路各部に存在する寄生容量などの問題によって、消費電力が電圧変化幅の例えば 2 乗に比例して増加するとともに、高速では電圧を変化させることができなくなる。本実施形態では、個々の駆動回路に要求される電圧変化幅を小さくすることができるので、高速動作が可能になるとともに、駆動回路を 2 個必要としても、一方の分岐光導波路のみにおいて変調を行う場合に比べ、消費電力を削減することができる。

20

## 【0066】

上述した第 5 の実施形態では、第 1 の実施形態の構成において両方の分岐光導波路に対してそれぞれリング共振型位相シフタを設けるようにしているが、第 2 乃至第 4 の実施形態において、それらの実施形態におけるリング共振型位相シフタを両方の分岐光導波路に対して設けるようにしてもよい。第 2 乃至第 4 の実施形態においてリング共振型位相シフタを両方の分岐光導波路に設ける構成とした場合も、駆動回路は、 $\pi/2$  の位相遅れを基準として相補的な信号をそれぞれのリング共振型位相シフタに印加するようなものであればよい。

## 【0067】

30

以上説明した本発明の各実施形態の光機能素子（光変調器、光減衰器）は、いずれも、シリコン半導体基板上に、半導体装置製造技術を用いて形成されるものである。そこで本発明においては、各リング共振型位相シフタを駆動するための駆動回路やその他の信号信号処理回路も、光機能素子が設けられたシリコン半導体基板上に設けることができる。例えば、駆動回路は、CMOS LSI 回路としてシリコン半導体基板上にモノリシックに集積することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0068】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態の光変調器の構成を示す概略平面図である。

【図 2】図 1 の B1 - B2 線に沿う断面図である。

40

【図 3】図 1 の C1 - C2 線に沿う断面図である。

【図 4】リング共振型位相シフタの動作原理を説明する図である。

【図 5】振幅分岐比  $K$  と位相差  $\phi$  の関係をグラフである。

【図 6】第 1 の実施形態の光変調器の作成方法を示す図である。

【図 7】本発明の第 2 の実施形態の光減衰器の構成を示す概略平面図である。

【図 8】図 6 の D1 - D2 線に沿う断面図である。

【図 9】本発明の第 3 の実施形態の光変調器の構成を示す概略断面図である。

【図 10】本発明の第 4 の実施形態の光変調器の構成を示す概略平面図である。

【図 11】図 9 の B1 - B2 線に沿う断面図である。

【図 12】図 9 の C1 - C2 線に沿う断面図である。

50

- 【図13a】第4の実施形態の光変調器の作成方法を示す図である。  
 【図13b】第4の実施形態の光変調器の作成方法を示す図である。  
 【図14a】第4の実施形態の光変調器の作成方法を示す図である。  
 【図14b】第4の実施形態の光変調器の作成方法を示す図である。  
 【図15】第4の実施形態の光変調器の具体例を示す図である。  
 【図16】図13に示した光変調器の断面図である。  
 【図17】印加電圧と振幅分岐比の関係を示すグラフである。  
 【図18】本発明の第5の実施形態の光変調器の構成を示す概略平面図である。

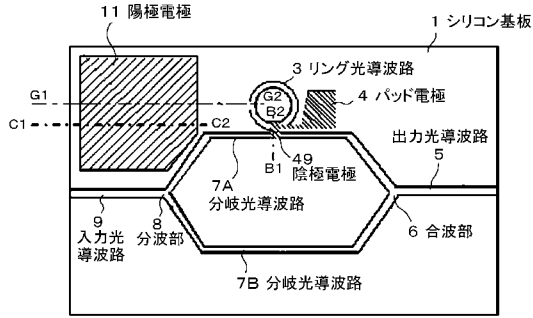
## 【符号の説明】

## 【0069】

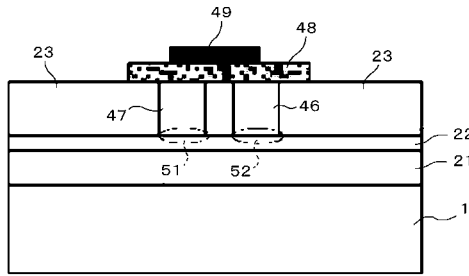
1	シリコン基板	
3, 3B	リング型光導波路	
4, 66, 67	パッド電極	
5	出力光導波路	
6	合波部	
7A, 7B	分岐光導波路	
8	分波部	
9	入力光導波路	
10, 49, 49B	陰極電極	
11, 11B	陽極電極	20
21, 23, 30	SiO <sub>2</sub> 膜	
22	n型シリコン層	
27	Siコア層	
29	n型ポリシリコン層	
31, 48	p型ポリシリコン層	
46, 47	p型シリコン層	
51, 52	pn接合	
61, 65	SiO <sub>2</sub> クラッド層	
62, 63	SiONコア層	
65	ヒータ	30
81, 82	3dBカブラ	
83	位相変調部	
130	EO効果層	
131	電極	
132, 133	SiO <sub>2</sub> コア層	



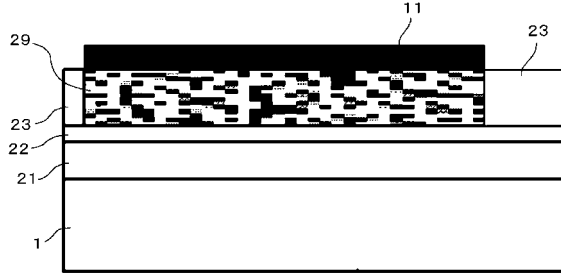
【図1】



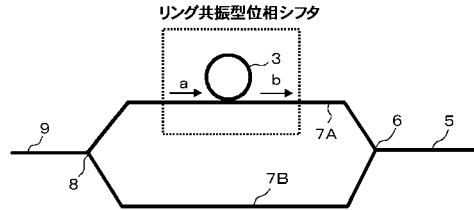
【図2】



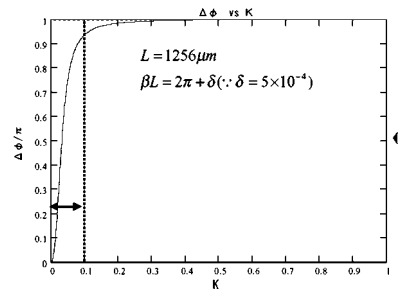
【図3】



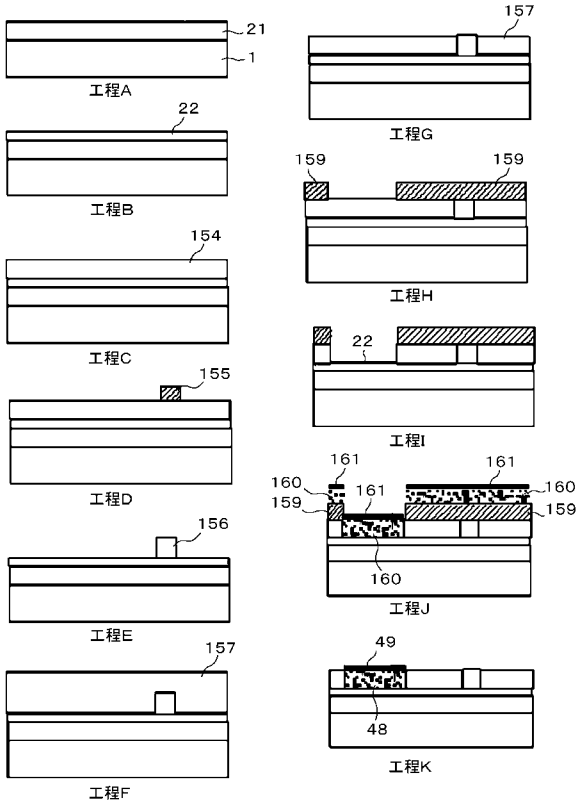
【図4】



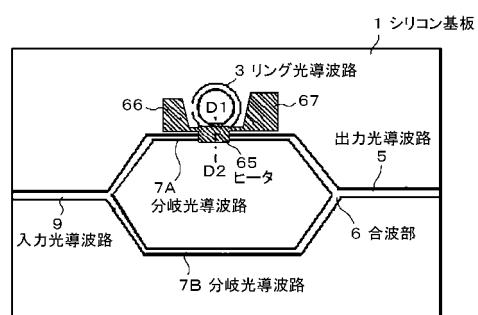
【図5】



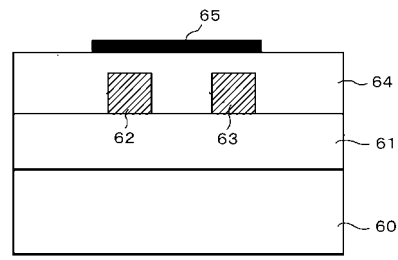
【図6】



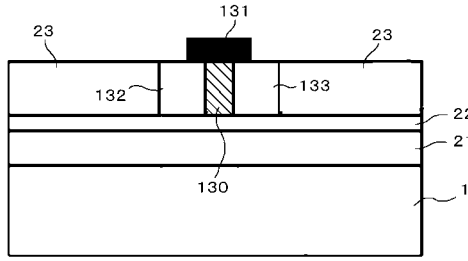
【図7】



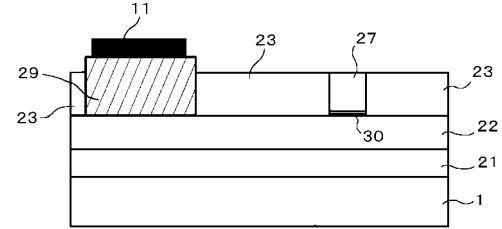
【図8】



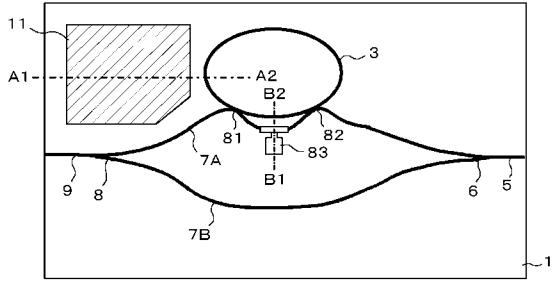
【図9】



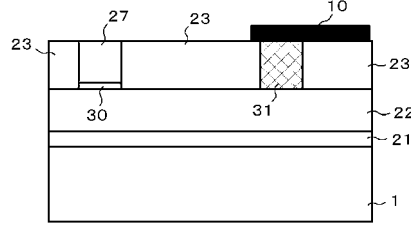
【図11】



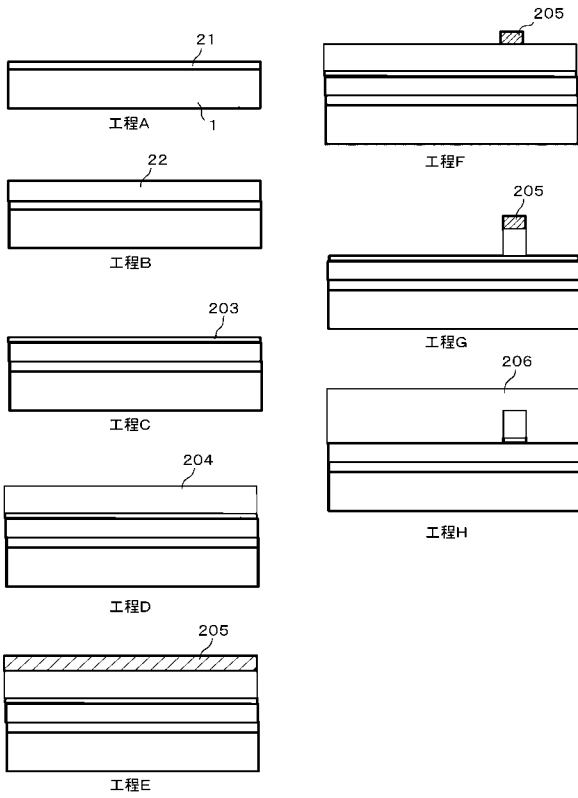
【図10】



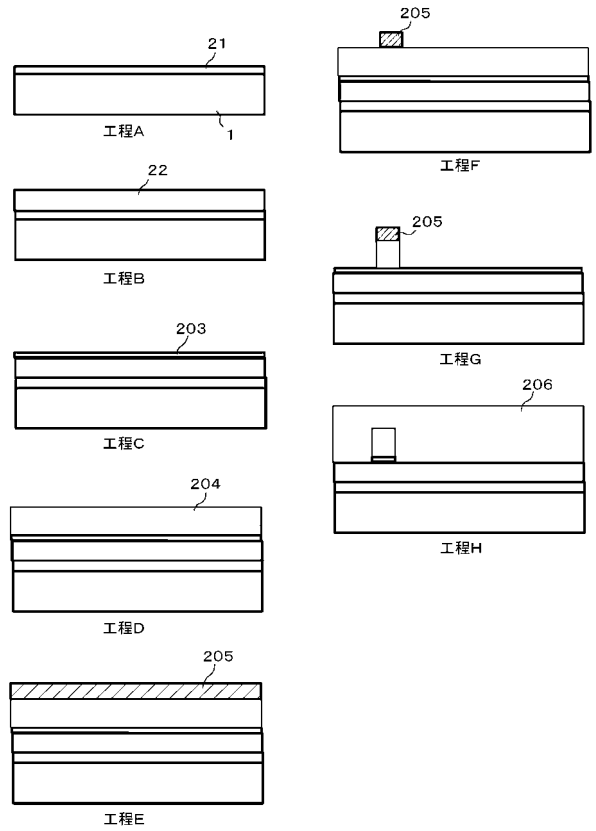
【図12】



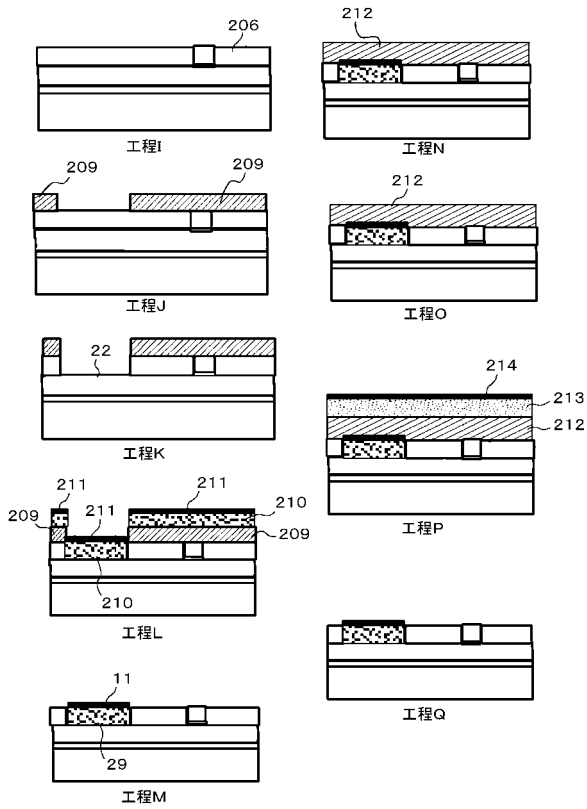
【図13a】



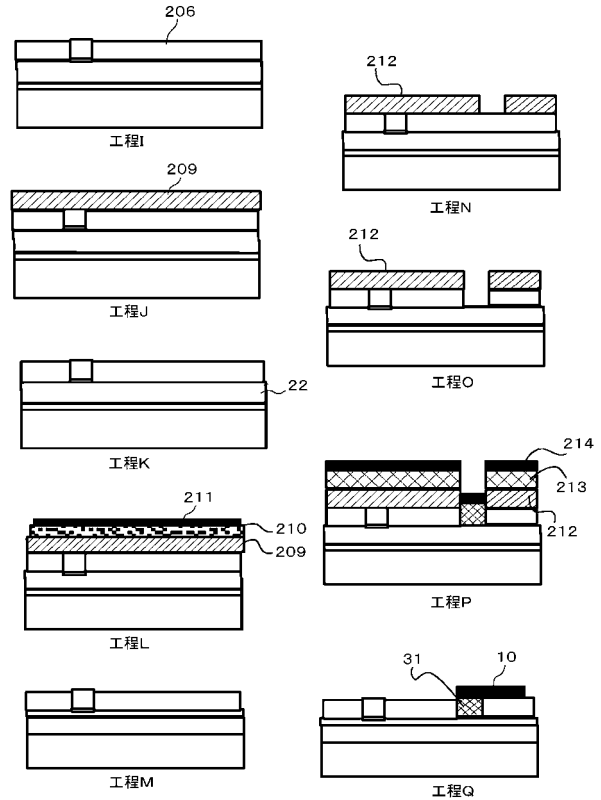
【図13b】



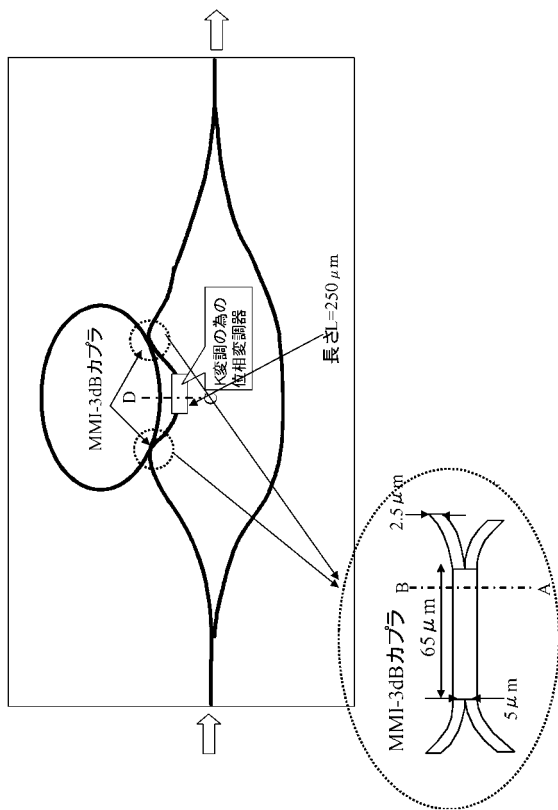
【図14a】



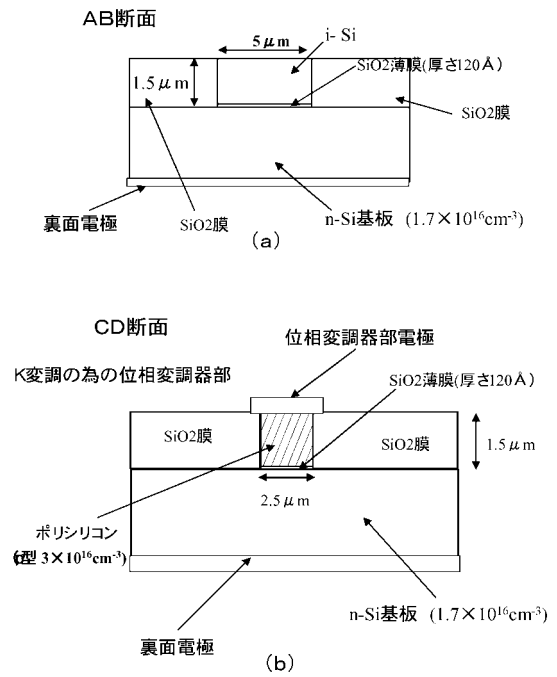
【図14b】



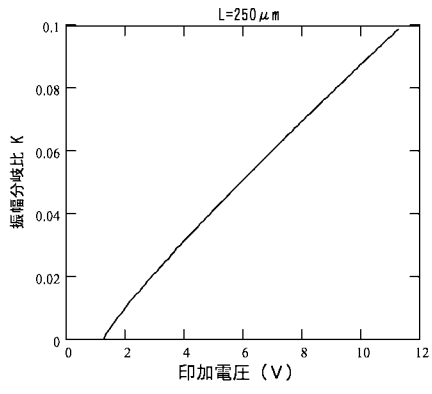
【図15】



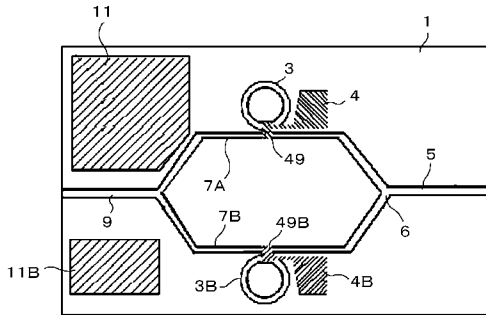
【図16】



【図17】



【図18】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開平05 - 158004 (JP, A)  
特開平05 - 181028 (JP, A)  
米国特許第06341184 (US, B1)  
米国特許出願公開第2005 / 0189591 (US, A1)  
特開平05 - 323391 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1 / 01 - 1 / 035  
G02B 6 / 12  
JSTPlus (JDreamIII)