

明 細 書

発明の名称：光変調器

技術分野

[0001] 本発明は、化合物半導体を用いたMOS構造電荷蓄積型の光変調器に関する。

背景技術

[0002] 通信用光デバイスとして、SOI（silicon-on-insulator）基板の上に化合物半導体素子を集積する技術が注目されている。特に、レーザーと光変調器との集積に関する技術は、通信デバイスの飛躍的な高集積化、低コスト化を実現する上で重要となる。高速、高効率化が要求される光変調器において、InP層をn型、低損失なSi層をp型とするMOS構造電荷蓄積型の光変調器が有望である（非特許文献1参照）。

[0003] この光変調器は、図4に示すように、埋め込み絶縁層401の上に形成されたp型シリコン層402と、p型シリコン層402の上に形成された絶縁層403と、絶縁層403の上に形成されたn型InP層404とから構成されている。p型シリコン層402には、p電極405が接続し、n型InP層404にはn電極406が接続している。埋め込み絶縁層401は、クラッドとして機能する。また、p型シリコン層402は、埋め込み絶縁層401の上のSOI層411をパターニングすることで形成されている。p型シリコン層402のn電極406形成側の側部には、SOI層411との間に空気溝412が形成されている。また、n電極406に覆われていないn型InP層404の上面は、空間に解放されている。

[0004] p型シリコン層402の一部とn型InP層404の一部とは、平面視で互いに重なって配置され、変調対象の光が導波する光導波部を形成している。この光導波部において、積層方向にp型シリコン層402とn型InP層404との間に絶縁層403が挟まれる。変調対象となる光は、埋め込み絶縁層401、空気溝412、および上方空間などをクラッドとして光閉じ込

め部に閉じ込められ、導波モード421が形成される。

- [0005] この光変調器では、光導波部においてp型シリコン層402およびn型InP層404それぞれ絶縁層403との界面に蓄積される多数キャリア密度を変調することにより、光導波部におけるp型シリコン層402およびn型InP層404の屈折率を変調する。この構造では、n型層にSiを用いる場合に比較して、2～3倍程度の変調効率の向上が期待できる。

先行技術文献

非特許文献

- [0006] 非特許文献1：D. Liang et al., "A Tunable Hybrid III-V-on-Si MOS Micro ring Resonator with Negligible Tuning Power Consumption", Optical Fiber Communication Conference 2016, Th1K.4, 2016.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0007] しかしながら、上述した技術では、更なる変調効率の向上が容易ではないという問題があった。変調効率の向上のためには、まず、キャリアによる屈折率変化を増大させることが重要となる（キャリアプラズマ効果）。また、変調効率の向上のためには、生成したキャリアの導波光への作用（影響）をより大きくさせることが重要となる。理論的には、キャリアによる屈折率変化は、化合物半導体の有効質量の低減、およびバンドフィリング効果の増大によって、より大きくすることができる。また、光閉じ込め係数の増大により、キャリアの導波光への作用をより大きくすることができる。
- [0008] しかしながら、実際には、従来技術で用いられているInP層を構成するInPは、化学量論的に安定な組成であり、結晶構造が一意に決定されるため、有効質量や屈折率といった材料物性を調整することができない。このため、上述した2つのことによる変調効率の向上が極めて困難である。
- [0009] 本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、MOS構造電荷蓄積型の光変調器の変調効率を更に向上させることを目的とす

る。

課題を解決するための手段

- [0010] 本発明に係る光変調器は、クラッド層の上に形成されたシリコンまたはシリコンゲルマニウムから構成されたp型の第1半導体層と、第1半導体層の上に形成された絶縁層と、絶縁層の上に形成された3つ以上の材料からなるIII-V族化合物半導体から構成されたn型の第2半導体層と、第1半導体層に接続された第1電極と、第2半導体層に接続された第2電極とを備え、第1半導体層の一部と第2半導体層の一部とは、絶縁層を介して平面視で重なって配置され、クラッド層の平面に平行な方向に変調対象の光が導波する光導波部を形成し、光導波部は、シングルモード条件を満たしている。
- [0011] 上記光変調器において、第1電極は、第1半導体層の光導波部以外の領域の上に形成されている。
- [0012] 上記光変調器において、第2半導体層は、積層された複数の化合物半導体層からなり、複数の化合物半導体層は、絶縁層に近い化合物半導体層ほど小さなバンドギャップエネルギーを有するものとしてもよい。
- [0013] 上記光変調器において、第1半導体層は、積層された複数の半導体層からなり、複数の半導体層は、絶縁層に近い半導体層ほど小さなバンドギャップエネルギーを有するものとしてもよい。

発明の効果

- [0014] 以上説明したように、本発明によれば、n型の第2半導体層を3つ以上の材料からなるIII-V族化合物半導体から構成したので、MOS構造電荷蓄積型の光変調器の変調効率を更に向上させることができるという優れた効果が得られる。

図面の簡単な説明

- [0015] [図1]図1は、本発明の実施の形態1における光変調器の構成を示す断面図である。
- [図2]図2は、本発明の実施の形態1における光変調器の一部構成を示す平面図である。

[図3]図3は、本発明の実施の形態2における光変調器の構成を示す断面図である。

[図4]図4は、従来のMOS構造電荷蓄積型の光変調器の構成を示す断面図である。

発明を実施するための形態

[0016] 以下、本発明の実施の形態について図を参照して説明する。

[0017] [実施の形態1]

はじめに、本発明の実施の形態1について、図1、図2を用いて説明する。図1は、本発明の実施の形態1における光変調器の構成を示す断面図である。また、図2は、本発明の実施の形態1における光変調器の一部構成を示す平面図である。

[0018] この光変調器は、クラッド層101の上に形成されたp型の第1半導体層102と、第1半導体層102の上に形成された絶縁層103と、絶縁層103の上に形成されたn型の第2半導体層104とを備える。第1半導体層102は、シリコンまたはシリコンゲルマニウムから構成されている。第2半導体層104は、3つ以上の材料からなる化合物半導体から構成されている。第2半導体層104は、例えば、InGaAsPから構成されている。また、第1半導体層102に接続された第1電極105と、第2半導体層104に接続された第2電極106とを備える。

[0019] ここで、第1半導体層102の一部と第2半導体層104の一部とは、平面視で互いに重なって配置され、クラッド層101の平面に平行な方向に変調対象の光が導波する光導波部121を形成している。すなわち、光導波部121の積層方向では、第1半導体層102と第2半導体層104との間に絶縁層103が挟まれている。

[0020] なお、実施の形態1において、クラッド層101の上の第2電極106が形成される側の領域には、絶縁層107が形成されている。絶縁層107の側部は、第1半導体層102の側部に接している。また、第2半導体層104の上には、絶縁層108が形成されている。絶縁層107および絶縁層1

08はクラッドとして機能し、クラッド層101とともに、断面視でこれらに囲われた領域に光を閉じ込める機能を果たす。

[0021] 光導波部121は、図2の平面図に矢印で示す光導波方向に延在している。なお、図2では、第1電極105、第2電極106、絶縁層108は省略されている。実施の形態1では、光導波部121を境に、一方の方向に第1半導体層102が延在し、他方の方向に第2半導体層104が延在している。第1半導体層102の光導波部121から延在する領域のうち絶縁層103が形成されていない領域において、第1半導体層102の表面に第1電極105がオーミック接続している。また、第2半導体層104の光導波部121から延在する領域の表面に、第2電極106がオーミック接続している。平面視で光導波部121の領域には、電極が配置されない。言い換えると、第1電極105は、第1半導体層102の上の光導波部121以外の領域に形成されている。

[0022] また、光導波部121に導波モードが形成されるように、光導波部121は、シングルモード条件を満たすようにする。光導波部121において、第1半導体層102および第2半導体層104の絶縁層103との界面に多数キャリアが蓄積されるので、この部分すなわち、第1半導体層102または第2半導体層104の絶縁層103との界面に、光導波路モードフィールドの中心が配置されるように、第1半導体層102の厚さおよび第2半導体層104の厚さを適宜に設定する。

[0023] 以下、実施の形態における光変調器の製造方法について簡単に説明する。例えば、よく知られたSOI基板を用い、埋め込み絶縁層をクラッド層101とし、表面シリコン層を、公知のリソグラフィー技術およびエッチング技術によりパターニングすることで、クラッド層101の上に第1半導体層102を形成する。

[0024] 次に、クラッド層101の上に第1半導体層102に隣接して絶縁層107を形成する。絶縁層107は、例えば、酸化シリコン、酸窒化シリコン、酸化アルミニウムなどから構成すればよい。絶縁層107は、この表面が第

1 半導体層 102 の表面と同一平面上に配置されるように平坦化した状態に形成する。次に、第 1 半導体層 102 および絶縁層 107 の上に、絶縁層 103 を形成する。絶縁層 103 は、例えば、酸化シリコン、酸窒化シリコン、酸化アルミニウムなどから構成すればよい。なお、第 1 半導体層 102 と絶縁層 107 との間に、空気溝を設けてもよい。

[0025] 一方、InP からなる成長基板の上に、よく知られた有機金属気相成長法により、所定の組成比とした InGaAsP の層をエピタキシャル成長させる。次いで、成長した InGaAsP の層を、上述した絶縁層 103 の上に貼り合わせ、この後、成長基板を除去する。次に、絶縁層 103 の上に形成された InGaAsP の層を、公知のリソグラフィー技術およびエッチング技術によりパターンニングすることで、第 2 半導体層 104 を形成する。

[0026] 次に、第 1 電極 105 を形成する箇所の絶縁層 103 に開口を形成して第 1 半導体層 102 の表面を露出させ、ここに第 1 電極 105 を形成する。第 1 電極 105 は、例えば、Ti から構成すればよい。また、第 2 半導体層 104 の上に第 2 電極 106 を形成する。第 2 電極 106 は、例えば、AuGeNi から構成すればよい。各電極は、例えば、よく知られたリフトオフ法により形成すればよい。また、第 2 半導体層 104 および絶縁層 103 の上に、絶縁層 108 を形成する。なお、絶縁層 108 は、必ずしも形成しなくてもよく、代わりに空気の層としてもよい。ただし、絶縁層 108 を形成することで、第 2 半導体層 104 が、周囲の環境より保護できるようになる。

[0027] 実施の形態 1 によれば、第 2 半導体層 104 を 3 つ以上の材料からなる化合物半導体から構成したので、以下に説明するように、光変調器の変調効率の向上が可能となる。

[0028] 3 元系または 4 元系の化合物半導体は、組成の制御により有効質量や屈折率を制御することが可能であり、キャリアによる屈折率の変化、および光閉じ込めの両方を向上させることが可能である。

[0029] 例えば、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ のバンドギャップエネルギー E_g と組成 y との関係は、

$$E_g = 1.344 - 0.738y + 0.138y^2$$

となる。

[0030] ここで、半導体における電流注入による屈折率の変化には、よく知られているように、キャリアプラズマ効果、バンドフィリング効果、バンドギャップ縮小効果がある。これらの効果を考慮した場合、電子密度を $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 変化させると、 InP は、屈折率が 0.0094 変化する。これに対し、電子密度を $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 変化させると、 $E_g = 0.95 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、屈折率が 0.013 変化し、 $E_g = 0.92 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、屈折率が 0.0145 変化し、 $E_g = 0.89 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、屈折率が 0.016 変化する。

[0031] なお、 $E_g = 0.95 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、バンドギャップ波長 λ が $1.3 \mu\text{m}$ であり、 $E_g = 0.92 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、バンドギャップ波長 λ が $1.35 \mu\text{m}$ であり、 $E_g = 0.89 \text{ eV}$ とした $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、バンドギャップ波長 λ が $1.4 \mu\text{m}$ である。

[0032] $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、組成比を変化させることでバンドギャップエネルギーが小さくなるにつれて、キャリアによる屈折率変化は大きくなり、二元系材料の InP よりも大きな値となる。

[0033] また、一般に $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ は、バンドギャップエネルギーが小さくなるにつれて、屈折率が大きくなる。光導波部 121 を構成する第 2 半導体層 104 に屈折率が大きい材料を用いることで、光導波部 121 への光閉じ込め効果が大きくなり、光導波部 121 における光強度（分布）をより強くすることができる。この結果、光導波部 121

において第 2 半導体層 104 の絶縁層 103 との界面に生成される多数キャリアを、光導波部 121 に導波する光に対してより強く作用させることが可能となる。従って、第 2 半導体層 104 を構成する多元系の化合物半導体においては、バンドギャップエネルギーがより小さくなる組成とすることが望ましい。

[0034] 以上に説明したように、第 2 半導体層 104 をバンドギャップエネルギー

がより小さい半導体から構成することで、第1に、キャリア密度変化による屈折率変化の増大が可能となり、第2に、発生させたキャリアの導波光への影響の増大が可能となることが分かる。なお、第2半導体層104におけるバンド間吸収を防ぐため、バンドギャップエネルギーは、変調対象の光の波長に対応するエネルギー以上にしなければならない。例えば、対象となる光の波長が $1.55\mu\text{m}$ の場合、第2半導体層104のバンドギャップエネルギーは 0.8eV 以上でなければならない。

[0035] また、第1半導体層102は、必ずしもシリコンである必要はなく、より有効質量が小さなシリコンゲルマニウム混晶材料から構成されても良い。また、絶縁層103は、絶縁破壊耐性やトンネル電流防止性能が得られる範囲で、所望とするCR時定数の容量が実現できるように薄くすればよい。

[0036] [実施の形態2]

次に、本発明の実施の形態2について、図3を用いて説明する。図3は、本発明の実施の形態2における光変調器の構成を示す断面図である。

[0037] この光変調器は、クラッド層101の上に形成されたp型の第1半導体層102と、第1半導体層102の上に形成された絶縁層103と、絶縁層103の上に形成されたn型の第2半導体層204とを備える。また、第1半導体層102に接続された第1電極105と、第2半導体層204に接続された第2電極106とを備える。

[0038] 第1半導体層102の一部と第2半導体層104の一部とは、平面視で互いに重なって配置され、クラッド層101の平面に平行な方向に変調対象の光が導波する光導波部121を形成している。すなわち、光導波部121の積層方向では、第1半導体層102と第2半導体層104との間に絶縁層103が挟まれている。

[0039] 実施の形態2では、第2半導体層204は、積層された複数の化合物半導体層204a、204bから形成されている。化合物半導体層204a、204bのバンドギャップエネルギーは、互いに異なり、絶縁層103に近い化合物半導体層204aほどより小さなバンドギャップエネルギーを有する

。第2半導体層204以外の構成は、前述した実施の形態1と同様であり、実施の形態2においても、クラッド層101の上に第1半導体層102に隣接して絶縁層107が形成され、第2半導体層204の上には、絶縁層108が形成されている。

[0040] 光導波部121における第1半導体層102および第2半導体層204の絶縁層103との界面に発生したキャリアにより屈折率が変化する領域は、キャリアが蓄積される第1半導体層102および第2半導体層204の絶縁層103との界面近傍となる。従って、より屈折率変化が大きくバンドギャップエネルギーがより小さい層は、絶縁層103の付近に配置されていればよい。従って、上述したように、バンドギャップエネルギーがより小さい化合物半導体層204aを絶縁層103の側に配置する。

[0041] この構成では、屈折率の大小関係が、化合物半導体層204a>化合物半導体層204bとなるところに特徴がある。この構成により、第2半導体層204には、積層方向に屈折率差が生じるため、光導波部121を導波する光は屈折率がより高い化合物半導体層204aの側に集中し、キャリアが蓄積される絶縁層103との界面付近により強く光が閉じ込められる。この結果、キャリアの導波光への作用をより大きくすることができる。

[0042] なお、実施の形態2においても、光導波部121における多数キャリアが蓄積される部分、すなわち第1半導体層102または第2半導体層204の絶縁層103との界面近傍に光導波路モードフィールドの中心が配置されるように、第1半導体層102、化合物半導体層204a、化合物半導体層204bの各々の厚さを適宜に設定する。また、実施の形態2においても、第1電極105は、第1半導体層102上の光導波部121以外の領域に形成されており、平面視で光導波部121の領域には、電極が配置されない。

[0043] また、より小さいバンドギャップを有する化合物半導体は、キャリアによる屈折率変化が大きい一方で、キャリアによる吸収も大きい。このため、キャリア蓄積が生じない界面近傍以外の領域をより低損失な化合物半導体層204bとすることで、導波光の吸収損失を低減することができる。

[0044] ところで、この実施の形態2では、第1半導体層102をシリコンまたはシリコンゲルマニウムから構成し、第2半導体層204を、各々異なるバンドギャップエネルギーの化合物半導体層204a、204bの積層構造とし、絶縁層103に近い化合物半導体層ほど小さなバンドギャップエネルギーとしたが、第1半導体層102においても、第2半導体層204と同様に、互いに異なるバンドギャップエネルギーを有する半導体層の積層構造とし、絶縁層に近い半導体層ほど小さなバンドギャップエネルギーを有する構成としてもよい。また、実施の形態1においても、第1半導体層102を上述した積層構造としてもよい。第1半導体層102は、シリコンとゲルマニウムの混晶材料の組成により、バンドギャップおよび屈折率の制御が可能であり、第1半導体層においても、上記と同様の効果が得られるものと考えられる。

[0045] 以上に説明したように、本発明によれば、n型の第2半導体層を3つ以上の材料からなるIII-V族化合物半導体から構成したので、MOS構造電荷蓄積型の光変調器の変調効率を更に向上させることができる。

[0046] なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形および組み合わせが実施可能であることは明白である。例えば、上述では、InGaAsPを例に説明したが、これに限るものではなく、他の3元素、4元素のIII-V族化合物半導体から構成してもよい。また、これらは、必ずしも結晶でなくてもよい。

符号の説明

[0047] 101…クラッド層、102…第1半導体層、103…絶縁層、104…第2半導体層、105…第1電極、106…第2電極、107…絶縁層、108…絶縁層。