

明 細 書

発明の名称：光学素子及びマッハツェンダ型光導波路素子

技術分野

[0001] 本発明は、光通信等に利用される光学素子及びこれを用いたマッハツェンダ型光導波路素子に関する。

本願は、2011年10月26日に、日本に出願された特願2011-234964号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 現在、光通信で利用される情報量は、増加の一途をたどっている。こうした情報量の増加に対応するため、バックボーンネットワーク、メトロネットワーク、アクセスネットワーク等の各種の光通信ネットワークでは、信号速度の高速化や、波長多重通信によるチャネル数の増加等の対策が進められている。しかし、こうした対策に伴い、光通信に必要なシステムは複雑になり、大型化、高額化、消費電力増大などの課題を生じる。

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

[0003] このような光通信ネットワークにおける課題の解決、さらには新規分野への光通信の導入を実現する技術として、シリコン等の高屈折率材料を用いた光デバイスが注目を集めている。

媒質中の光の波長は、その媒質内の屈折率に反比例する。したがって、屈折率が約3.5と高いシリコン(Si)では、光導波路のコア寸法(幅や高さ等)が小さくなる。また、シリカ(SiO₂)のように、シリコンに対する

屈折率差の大きい媒質をクラッドとして用いることで、閉じ込めの強い光導波路が得られる。このような光導波路では、曲がり半径を小さくすることができる。したがって、光導波路を用いた光デバイスの小型化が可能になり、同じ機能であればより小型に、また、同じ大きさであればより多くの機能を持たせること（多機能化）や高密度化を実現できる。

[0004] また、シリコン等の高屈折率材料は、半導体材料であるため、一般的に電氣的な制御が可能である。このような半導体材料を用いることにより光変調器等の特性可変のデバイスを実現することが可能である。さらに、半導体を光導波路コアに用いた光デバイスは、製造プロセスに関する技術や装置において、従来のCPUやメモリ等の半導体デバイスとの共通要素が多いため、量産によって低コストな光デバイスの実現が期待できる。

また、半導体を利用した光導波路を、電気信号を用いる従来の半導体デバイスと同一の基板上に集積することにより、即ち、これまでメタル配線が用いられていた箇所を光導波路で置き換えることにより、さらなる機器の高速化や低消費電力化の可能性がある。

光変調器は、電気信号を光信号に変換する光通信における主要デバイスの一つであり、他のデバイスと同様に、光集積デバイスの実現に向けた要素の一つとして、各機関により研究されてきた。

[0005] まず、シリコンの光学特性について、説明する。ドーピングされたシリコンの通信波長領域での屈折率は、半導体中のキャリア密度に依存することが知られている。非特許文献1によれば、P型、N型シリコンにおける、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光に対するシリコンの屈折率 n 、及び吸光係数 α の変化は、電子及び正孔のキャリア密度（ 1cm^3 当たりの個数）の変化を、それぞれ ΔN_e 及び ΔN_h として、次の（式1）、及び（式2）により表される。

[0006] [数1]

$$\Delta n = - \left[8.8 \times 10^{-22} \times \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} \times (\Delta N_h)^{0.8} \right] \quad (\text{式1})$$

[0007] [数2]

$$\Delta\alpha = 8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \times \Delta N_h \quad (\text{式2})$$

[0008] 従って、ドーピングされたシリコン中のキャリア密度が高くなれば、屈折率は低くなり、キャリア密度が低くなれば、屈折率は高くなる。同様に、キャリア密度が高くなれば、吸光係数は高くなり、キャリア密度が低くなれば、吸光係数は低くなる。また、上述したように、媒質中の光の波長は、その媒質内の屈折率に反比例する。したがって、光導波路の長さが変わることなく、その屈折率が変化すれば、この光導波路を通過した後の位相が変化することになる。

したがって、吸光係数が低い領域において、光導波路にドーピングしたシリコンを用い、何らかの方法でキャリア密度を変化させることができれば、そのキャリア密度の変化により、この光導波路を通過させた後の位相を変化させることができる。そのような光導波路は、光位相変調器として機能する。

[0009] そこで、リブ型導波路中にPN接合、又はPIN接合を形成した光位相変調器がこれまでに提案されている（例えば特許文献1～3参照）。

特許文献1では、リブ型導波路のリブ中に、垂直方向の境界を有するPN接合が設けられている。PN接合の接合境界付近では、空乏層と呼ばれるキャリアの少ない領域が存在する。PN接合に逆バイアス電圧を印加することで、この空乏層が拡がり、結果的にリブ部のキャリアは減少する。この減少を利用することで、電圧によりキャリア密度を制御し、光位相変調器を実現することができる。

特許文献2では、PN接合を有する光位相変調器が開示され、その第2図では、多結晶シリコンからなるストリップを積層した導波路（Strip Loaded

Waveguide) に適用した例が挙げられている。

特許文献3では、PIN接合を形成した光位相変調器が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：国際公開第00／58776号

特許文献2：米国特許第7085443号明細書

特許文献3：米国特許第6801702号明細書

非特許文献

[0011] 非特許文献1：R. A. Soref and B. R. Benette, “Electrooptical effect in Silicon”、IEEE J. Quantum Electron. QE-23、1987年、p. 123－129

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] シリコン等ではキャリア密度の変化（電圧印加）により屈折率変化と同時に損失が変化するため、挿入損失は目的とする光の位相によって異なる。

また、特許文献2の第2図に示された構成では、リブ型導波路の中央部に材料の境界が存在する。光導波路の内部に材料の境界が存在すると、光の進行方向におけるその境界面の不均一さ（荒れ）による光の散乱が発生し、光導波路における挿入損失の増加を招くおそれがある。

[0013] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、キャリア密度の変化による損失の変化量を低減し、また、挿入損失を低減することが可能な光学素子及びこれを用いたマッハツェンダ型光導波路素子の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明の一態様に係る光学素子は、リブ部と、前記リブ部を挟んでその両側に位置し、かつ前記リブ部よりも厚みの薄い第一及び第二スラブ部と、から形成されたコアを有する光導波路を備え、前記コアの、前記リブ部と前記第一及び第二スラブ部とは半導体単結晶により一体に形成され、前記第一ス

ラブ部は、P型にドーピングされたP型領域を有し、前記第二スラブ部は、N型にドーピングされたN型領域を有し、前記リブ部は、前記第一スラブ部に設けられたP型領域に接しているP型領域と、前記第二スラブ部に設けられたN型領域に接しているN型領域とを有し、前記リブ部のP型領域とN型領域とが接してPN接合部を構成し、前記リブ部は、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記第一及び第二スラブ部よりも上方に位置する上端部を有し、前記リブ部の上端部は、イントリンシック領域及び隣接する前記P型領域又はN型領域のドーパント濃度の $1/10$ 以下のドーパント濃度でドーピングされた低濃度ドーピング領域の一方から形成されるアンドープ領域を有する。

[0015] 前記リブ部におけるP型領域とN型領域との境界が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記コアの下面に垂直であってもよい。

前記リブ部のP型領域は、前記第一スラブ部と同じ高さに位置し、前記リブ部のN型領域は、前記第二スラブ部と同じ高さに位置してもよい。

前記リブ部のP型領域は、前記第一スラブ部の上面よりも高い位置まで延在し、前記リブ部のN型領域は、前記第二スラブ部の上面よりも高い位置まで延在していてもよい。

前記第一スラブ部のP型領域及び前記リブ部のP型領域で形成される全P型領域のドーパント濃度が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記PN接合部に向かって減少し、前記第二スラブ部のN型領域及び前記リブ部のN型領域で形成される全N型領域のドーパント濃度が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記PN接合部に向かって減少していてもよい。

前記全P型領域は、ドーパント濃度が異なる2以上の領域を有し、前記全N型領域は、ドーパント濃度が異なる2以上の領域を有していてもよい。

上記光学素子が、金属からなる第一電極及び第二電極をさらに備え、

前記第一スラブ部のP型領域は、前記第一電極に接続され、前記第一スラブ部のP型領域のドーピング濃度よりも高いドーピング濃度を有するP⁺領域

を有し、

前記第二スラブ部のN型領域は、前記第二電極に接続され、前記第二スラブ部のN型領域のドーピング濃度よりも高いドーピング濃度を有するN⁺領域を有していてもよい。

前記第一電極及び前記第二電極が、前記光導波路の長手方向に沿って連続して形成された進行波型電極であってもよい。

前記進行波型電極が、コプレーナ線路型電極、又はスロット線路型電極を構成してもよい。

[0016] また、本発明の一態様に係るマッハツェンダ型光導波路素子は、2つのアームが同一の基板上に集積されたマッハツェンダ型光導波路素子であって、上記光学素子が、少なくとも前記2つのアームの一方の光導波路に用いられている。

また、本発明の一態様に係るマッハツェンダ型光導波路素子は、2つのアームが同一の基板上に集積されたマッハツェンダ型光導波路素子であって、上記光学素子が、前記2つのアームの各光導波路に用いられ、前記各光導波路に用いられた前記各光学素子の第一スラブ部が前記2つのアーム間に配されているか、又は、前記各光学素子の第二スラブ部が前記2つのアーム間に配されている。

発明の効果

[0017] 上記本発明の態様によれば、光導波路の断面において、ドーピングされた領域において、電圧印加によりキャリア密度の変化する領域の割合を高めることができる。すなわち、リブ型導波路のリブ全域にドーピングする場合と比較して、電圧印加時の空乏層の幅の変化を増大させることができ、ドーピングされている領域に対するキャリア密度の変化する領域の割合を増加させることができる。

また、PN接合部と一体に形成されたリブ上方のアンドープ領域にキャリアが拡散することにより、キャリア密度の低い部分が生じる。よって、屈折率変化時の損失の変化量、すなわち光学素子動作時の損失の変化量を低減さ

せることができる。

光導波路の単位長さ当たりの接合容量は減少するため、高周波領域における応答時間の改善が期待できる。また、電極からスラフ部にかけてドーピング濃度を変更する必要があるため、寄生抵抗の増大は回避可能である。リゾ型導波路の中央部に材料の境界が存在しないため、光導波路として用いたときの挿入損失を低減することができる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1A]本発明の実施形態1に係る光学素子を示す断面図である。

[図1B]本発明の実施形態1の一変形例に係る光学素子を示す断面図である。

[図2A]図1Aの光学素子に電極を設けた例を示す断面図である。

[図2B]図2Aの光学素子を示す斜視図である。

[図2C]図2Aの光学素子にグラフト電極を設けた例を示す断面図である。

[図3]図1Aの光学素子に電極を設けた例を示す斜視図である。

[図4A]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図4B]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図4C]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図4D]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図4E]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図4F]図2Aの光学素子の製造工程の一例を示す断面図である。

[図5A]本発明の実施形態2に係る光学素子を示す断面図である。

[図5B]本発明の実施形態2に係る光学素子を示す断面図である。

[図6]本発明の実施形態3に係る光学素子を示す断面図である。

[図7]本発明の実施形態4に係る光学素子を示す断面図である。

[図8A]本発明の実施形態5に係る光学素子を示す断面図である。

[図8B]本発明の実施形態5の一変形例に係る光学素子を示す断面図である。

[図9]本発明の実施形態6に係る光学素子を示す断面図である。

[図10]ツッパツエ型光導波路素子の一例を示す模式図である。

[図11A]本発明の実施形態7に係るツッパツエ型光導波路素子を示す平面

図である。

[図11B]本発明の実施形態7に係るマッハツェンダ型光導波路素子のT部を示す部分拡大図である。

[図12A]図11Aに示す位相変化部の一例を示す断面図である。

[図12B]図11Aに示す位相変化部の一例を示す断面図である。

[図13]マッハツェンダ型光導波路素子における電極配置の一例を示す平面図である。

[図14]マッハツェンダ型光導波路素子における電極配置の他の一例を示す平面図である。

[図15A]図11Aに示す位相変化部の他の例を示す断面図である。

[図15B]図11Aに示す位相変化部の他の例を示す断面図である。

[図16]光路長調整部を有するマッハツェンダ型光導波路素子の一例を示す模式図である。

[図17]キャリア密度と、 $\Delta n / \Delta \alpha$ の比との関係の一例を示すグラフである。

[図18]実施例1の断面構造を示す断面図である。

[図19A]実施例1について、コアの中心部の断面構造を示す断面図である。

[図19B]比較例1について、コアの中心部の断面構造を示す断面図である。

[図20]バイアスを0Vから-4Vへ変化させたときの実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図21]バイアスを-4Vから0Vへ変化させたときの実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図22A]実施例1におけるキャリア密度分布のシミュレーション結果を示す図面代用写真である。

[図22B]実施例1におけるキャリア密度分布のシミュレーション結果を示す図面代用写真である。

[図23A]図22Aのシミュレーション結果を説明する模式図である。

[図23B]図22Bのシミュレーション結果を説明する模式図である。

[図24A]比較例1におけるキャリア密度分布のシミュレーション結果を示す図面代用写真である。

[図24B]比較例1におけるキャリア密度分布のシミュレーション結果を示す図面代用写真である。

[図25A]図24Aのシミュレーション結果を説明する模式図である。

[図25B]図24Bのシミュレーション結果を説明する模式図である。

発明を実施するための形態

[0019] 以下、好適な実施の形態に基づき、本発明を説明する。

まず、光位相変調器の位相変化部における挿入損失について考察する。

位相変化部の主目的は、導波路を通過した後の出射光の位相を変化させることである。

位相変化部の屈折率を変化させて位相変調を行う場合、出力時の位相変化 $\Delta\phi$ は、 $\Delta\phi = 2\pi L \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$ で表される。ここで、 Δn_{eff} は、光導波路の断面構造における導波モードの実効屈折率 n_{eff} の変化であり、 L は、位相変化部の長さであり、 λ は光の波長であり、 π は円周率である。つまり、出力時の位相変化は、実効屈折率の変化 Δn_{eff} と位相変化部長 L との積を含む式として表される。

[0020] 一方、キャリアの吸収による導波路損失も位相変化部長 L に依存する。導波路の実効的な吸光係数 α に対して、初期パワーを P_0 とすると、導波路を通過した後の出射光（透過光）のパワー P_1 は、 $P_1 = P_0 \times \exp(-\alpha L) = P_0 \times e^{-\alpha L}$ で表される。この場合、位相変化部の挿入損失をデシベルで表示すると、 $10 \log_{10}(P_0/P_1) = 10 \log_{10}(e^{\alpha L}) = \alpha L (10 \log_{10} e)$ で表される。

[0021] 実効的な吸光係数 α は、位相変化部の動作時の空乏層の変化に応じて変化する。空乏層が広がるように位相変化部を動作させている状態における吸光係数を α_{eff} 、空乏層が狭まるように位相変化部を動作させている状態における吸光係数を $\alpha_{\text{eff}} + \Delta\alpha_{\text{eff}}$ と表せば、 α_{eff} は、逆バイアスの印加による影響を受けない領域からの寄与である。換言すると、 α_{eff} は、キャリアは分布している

がそのキャリア分布が変化しない領域からの寄与である。一方、 $\Delta \alpha_{\text{eff}}$ は、逆バイアスの変化によりキャリア分布が変化した領域からの寄与と考えることができる。

[0022] 動作時の損失は、 α_{eff} と $\alpha_{\text{eff}} + \Delta \alpha_{\text{eff}}$ との間で往復する。つまり、光導波路として挿入損失を低減するためには、 α_{eff} や $\alpha_{\text{eff}} + \Delta \alpha_{\text{eff}}$ を低減する必要がある。損失の変化量を低減させるためには、 $\Delta \alpha_{\text{eff}}$ を低減する必要がある。よって、その両方の課題に対しては、 α_{eff} と、 $\Delta \alpha_{\text{eff}}$ の2つのパラメータをそれぞれ低減する必要がある。

[0023] 位相変化部の挿入損失の低減のためには、吸光係数の変化 $\Delta \alpha_{\text{eff}}$ の寄与の他に、吸光係数 α_{eff} そのものが重要である。位相変化部長 L を短くすることでも、位相変化部の挿入損失を低減することが可能であると考えられる。しかしながら、位相変化部長 L は、光位相変調器において対応可能なバイアス電圧の範囲 V_{bias} や、要求される変調効率により決まるため、自由に短くすることはできない。

[0024] 要求される位相変調量を ϕ_{req} とし、印加可能な信号のバイアス電圧の範囲 V_{bias} におけるキャリア密度変化による実効屈折率の変化を Δn_{eff} とすると、光位相変調器に必要な長さ L_{req} は、次の(式3)で表される。(式3)は、上述の出力時の位相変化を表す式より得られる $\phi_{\text{req}} = 2\pi L_{\text{req}} \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$ を変形することにより得られる。

[0025] [数3]

$$L_{\text{req}} = \frac{\phi_{\text{req}}}{2\pi} \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (\text{式3})$$

[0026] 光位相変調器の損失 $\alpha_{\text{eff}} L_{\text{req}}$ ($10 \log_{10} e$)は、これに(式3)を代入すると、次の(式4)で表される。

[0027]

[数4]

$$\alpha_{eff} L_{req} (10 \log_{10} e) = \phi_{req} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\alpha_{eff}}{\Delta n_{eff}} (10 \log_{10} e) \quad (\text{式4})$$

[0028] (式4)より、必要な位相変調量 ϕ_{req} と波長 λ が決まっている場合、光位相変調器の損失は、 Δn_{eff} と α_{eff} との比によって決まることが分かる。

従って、位相変化部の損失を低減するには、光導波路の断面構造において、光導波路領域全体のキャリアがドーピングされた領域において、電圧印加によりキャリア密度の変化する領域の割合を高めることが重要であることが分かる。

つまり、 $F_1 = \Delta n_{eff} / \alpha_{eff}$ を、位相変調量の性能指数 (Figure of merit) として用いると、低損失な光位相変調器を実現するには、この F_1 の高くなるような導波路構造を作製すればよいとすることができる。

[0029] 一方、挿入損失の変化量に関しては、損失量の変化 $\Delta \alpha_{eff}$ のみを考慮すればよく、この変化は、次の(式5)で表される。

[0030] [数5]

$$\Delta \alpha_{eff} L_{req} (10 \log_{10} e) = \phi_{req} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta \alpha_{eff}}{\Delta n_{eff}} (10 \log_{10} e) \quad (\text{式5})$$

[0031] Δn_{eff} と $\Delta \alpha_{eff}$ は共に、キャリア密度の変化によって生じるものであり、したがって、同じ領域からの寄与を受ける変化である。従って、この挿入損失の変化量の低減には、キャリア密度の変化による、吸光係数変化の実効屈折率変化に対する比 $\Delta \alpha_{eff} / \Delta n_{eff}$ を下げることが有効であることが分かる。

この場合、前述の F_1 と同様に、挿入損失の変化量について、 $F_2 = \Delta n_{eff} / \Delta \alpha_{eff}$ を定義すると、この F_2 の最大化を図ることが、挿入損失の変化量の

低減に寄与すると言うことができる。

[0032] なお、吸光係数（損失）変化に対する実効屈折率変化の比である $\Delta n_{\text{eff}} / \Delta \alpha_{\text{eff}}$ や、吸光係数（損失）に対する実効屈折率変化の比である $\Delta n_{\text{eff}} / \alpha_{\text{eff}}$ を、光学素子（光デバイス）の設計に応用する場合、実際にはドーピングされた材料の屈折率及び実効屈折率の測定は難しい。上述の $\Delta \phi = 2 \pi L \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$ によれば、位相変化量 $\Delta \phi$ は、実効屈折率変化 Δn_{eff} に比例することから、次の（式6）、及び（式7）が得られる。これらの式によれば、波長 λ 、及び位相変化部長 L が定められた条件では、損失、及び損失変化に対する実効屈折率変化の比（ $\Delta n_{\text{eff}} / \alpha_{\text{eff}}$ 、及び $\Delta n_{\text{eff}} / \Delta \alpha_{\text{eff}}$ ）の代わりに、損失、及び損失変化に対する位相変化量の比（ $\Delta \phi / \alpha_{\text{eff}}$ 、及び $\Delta \phi / \Delta \alpha_{\text{eff}}$ ）を、指標として用いることができる。

[0033] [数6]

$$\frac{\Delta \phi}{\alpha_{\text{eff}}} = 2\pi \frac{L}{\lambda} \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\alpha_{\text{eff}}} \quad (\text{式6})$$

[0034] [数7]

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta \alpha_{\text{eff}}} = 2\pi \frac{L}{\lambda} \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta \alpha_{\text{eff}}} \quad (\text{式7})$$

[0035] 上述の挿入損失の低減と挿入損失の変化量の低減という課題を解決するために、本発明の一態様では、ドーピングをリブ構造の下部に行い、リブ構造の上部にはアンドープ領域を設ける。

この構造によれば、光導波路領域全体のドーピングされた領域に対する、電圧印加によりキャリアの変化する領域の割合を高めることができる。また、リブ上方のアンドープ領域へのキャリアの拡散により、屈折率変化時の損

失変化を低減することができる。

このような構造をとることにより、次の効果が奏される。

(1) リン型導波路の全域にドーピングされた構造と比較して、電圧印加時の空乏層の幅変化を増大させることができ、ドーピングされている領域に対するキャリア密度の変化する領域の割合を増加させることができる。

(2) リン上方のアンダー領域にキャリアが拡散することにより、キャリア密度の低い部分が生じ、屈折率変化時の損失の変化量、すなわち動作時の損失の変化量を低減させることができる。

(3) 光導波路の単位長さ当たりの接合容量は減少するため、高周波領域における反応時間の改善が期待できる。また、電極からアンダー部にかけてドーピング濃度を変更する必要があるため、寄生抵抗の増加は生じない。

図 1A に示す光学素子 1 は、リン型導波路からなる光導波路 6 を有する。
光導波路 6 のコア 4 は、リン部 10 と、アンダー部 11、12 とから形成されている。アンダー部 11、12 は、リン部 10 より厚みの薄く、リン部 10 を挟んでその両側に位置する。

第一アンダー部 11 は、P 型にドーピングされた P 型領域 13b を有し、第二アンダー部 12 は、N 型にドーピングされた N 型領域 14b を有する。

また、リン部 10 は、第一アンダー部 11 に設けられた P 型領域 13b に接する P 型領域 13a と、第二アンダー部 12 に設けられた N 型領域 14b に接する N 型領域 14a とを有している。これらの P 型領域 13a と N 型領域 14a とが互いに接することにより P-N 接合部 15 を構成する。すなわち、P-N 接合部 15 において、P 型領域 13a と N 型領域 14a とが互いに接している。

リン部 10 は、光導波路 6 の長手方向に垂直な断面において、アンダー部 11、12 より上方に位置する上端部 10a を有する。リン部 10 は、上端部 10a の少なくとも一部にアンダー部領域 16 を有する。アンダー部領域 16 は、図 1A に示すように、リン部 10 内の P 型領域 13a 及び N 型領域 14a の上から、リン部 10 の上面（上部クラフト 5 との境界）まで存在して

いることが好ましい。

[0037] アンダーゾーン領域 16 は、イントリニシック領域でもよく、又は、隣接する P 型領域 13 a 及び/又は隣接する N 型領域 14 a のドーパント濃度の 1/10 以下のドーパント濃度でドーピングされた低濃度ドーピング領域でもよい。

低濃度ドーピング領域の例としては、アンダーゾーン領域 16 に隣接する P 型領域 13 a の 1/10 以下のドーパント濃度で P 型にドーピングされた低濃度 P 型ドーピング領域、アンダーゾーン領域 16 に隣接する N 型領域 14 a の 1/10 以下のドーパント濃度で N 型にドーピングされた低濃度 N 型ドーピング領域、隣接する P 型領域 13 a 及び N 型領域 14 a の 1/10 以下のドーパント濃度で P 型及び N 型のドーパントを含む領域などが挙げられる。

[0038] リーズ部 10 とスラッシュ部 11、12 とは、半導体単結晶により一体に形成されている。リーズ部 10 の P 型領域 13 a と第一スラッシュ部 11 の P 型領域 13 b とは、一体化された P 型領域 13 (全 P 型領域) を構成する。また、リーズ部 10 の N 型領域 14 a と第二スラッシュ部 12 の N 型領域 14 b とは、一体化された N 型領域 14 (全 N 型領域) を構成する。

[0039] このように、光導波路内に P-N 接合部を形成し、これに電極を接続して外部から電圧を印加することで、P-N 接合部での空乏層が変化する。逆バイアス電圧の印加により、空乏層は拡大して P-N 接合部のキャリア密度が減少するため、P-N 接合部において屈折率が上昇する。結果的にリズ型導波路の導波モードの実効屈折率に変化し、この導波路を通過する光の、出力位置における位相を変化させることができる。

一方、(式 2) に示すように、キャリアの存在は屈折率を変化させるのみならず、吸光係数 α を増大させる。つまり、キャリア密度の変化を起こすために導波路にドーピングを行うと、導波路の損失を増加させることになる。位相変化量の増加と、損失の低減はトレードオフの関係にある。

挿入損失は、位相変化部の重要な特性の一つとして挙げられる。キャリアの存在による損失は、導波路の挿入損失の主たる要因の一つであり、従って、挿入損失を低減することが重要である。

[0040] 材料自体の光学特性は上述の（式１）及び（式２）で表されるが、導波光の実効屈折率及び伝播損失を計算するには、光のモードプロファイルを考察する必要がある。リブ型導波路におけるモードプロファイルでは、光導波路の断面構造における中心部（特にリブ部）のパワー密度が高くなる。従って中心部での変化は、外周部での変化よりも屈折率変化の割合が高い。

P N接合部におけるキャリアの分布は、キャリアの濃度勾配により生じる拡散電流と、キャリアとドーパント及び外部電界により生じるドリフト電流と、の平衡状態として決まる。この結果、P N接合部には、キャリアが空である空乏層が生じる。

[0041] このとき、導波路の断面構造においてP N接合部から十分に離れた構造内部においては、空間電荷分布はなく、キャリアの濃度勾配は殆ど見られない。しかし、リブ上面等の構造端部（表層部など）では電界が生じている。リブ上面等の構造端部（表層部など）では、構造内部とは異なって、P N接合部から十分に離れていても、キャリアの濃度勾配が生じる。

P N接合部に逆バイアス電圧を印加すると、キャリアが減少して空乏層が広がる。このようなキャリアの減少は、前述の接合部以外の構造の端でも存在し、したがって、P N接合部に逆バイアス電圧を印加するとキャリア密度が変化することが分かる。

[0042] 特許文献１のようにリブ部全体にP N接合が設けられた従来構造では、P N接合部の両端におけるキャリア密度変化による屈折率変化への寄与は、光のモードプロファイルを考えると、光のパワー密度の低い領域にP N接合が設けられているために微量である（例えば図２４Ａ～２５Ｂのシミュレーション結果を参照）。

一方、図１Ａに示すように、リブ上部にアンドープ領域１６を設けた本発明の各実施形態に係る構造では、この境界領域（P N接合部１５の上端）が、導波光のモードプロファイルにおけるパワー密度の高い領域に形成される。また、上面及び下面のキャリア密度の変化する領域の厚みは、ドーパされている領域の厚みとは独立していることから、ドーパされた領域を薄くする

方が、全体に対するPN接合部15の上端の影響の度合いを大きくすることができる。このことにより、PN接合部15のみではなく、その周囲のキャリア密度の変化を有効に活用することが可能である。その結果、キャリア全体に対する、キャリア密度の変化する領域の割合を高めることができる。これにより、例えば図22A～23Bのシミュレーション結果に示されるように、PN接合部15の上端からアンドープ領域16にかけて、キャリア密度の変化する領域が大きな割合を占めるようになる。

なお、図22A～25Bのシミュレーションの実施方法については、後述する。

[0043] また、本発明の各実施形態に係る構造では、PN接合部15とアンドープ領域16とを含むリブ部10、及びスラブ部11、12が、半導体単結晶により一体で形成されており、PN接合部15とアンドープ領域16との間に結晶粒界や電気絶縁層が介在しないため、リブ上方のアンドープ領域16にもキャリアが拡散する。リブ上方では、P型領域やN型領域との境界と比較して生じる電界が弱いため、キャリアは広範囲に拡散する。従って、この領域におけるキャリア密度は、P型領域やN型領域と比較して、低くなる。

挿入損失の観点から実用的なキャリア密度 $10^{16} \sim 10^{18} / \text{cm}^3$ における、前述の損失変化に対する屈折率変化の比（図17参照）は、N型領域よりもP型領域において、より高くなる。さらに、P型領域においてキャリア密度が低い方が（特に、後述する実施形態2参照）、損失変化に対する屈折率変化の比は高くなる。従って、本発明の各実施形態に係る構造によれば、キャリア密度の低い領域での電圧印加による屈折率変化は、損失変化のより低減された、位相変化を実現することが可能である。

[0044] また、PN接合間に生じる接合容量は、高速動作を阻む要因の一つである。しかし、本発明の各実施形態によれば、単位導波路長さ当たりのPN間の面積が減少することから、接合容量を低減することが可能である。変調効率の向上のために導波路長を長くすることも考えられる。しかしながら、この場合、導波路長が長くなるにしたがって接合容量が増えると共に、スラブ部

の抵抗率が低減するため、変調効率の向上の効果が打ち消される。したがって、単位長さ当たりの接合容量の低減が、高速化に寄与すると考えられる。

[0045] <実施形態 1>

図 1 A は、本発明の実施形態 1 に係る光学素子を示す断面図である。また、図 2 A、2 B 及び 3 に、この光学素子に電極を設けた構成例を示す。

図 1 A 及び図 2 A には、光の進行方向（光導波路の長手方向）に垂直な面の断面図が示されている。本実施形態では、製造に用いる基板として、シリコン（Si）－シリカ（SiO₂）－シリコン（Si）からなる SOI（Silicon On Insulator）基板を用いることができる。光導波路 6 の下部クラッド 3 は、SOI 基板の中間の SiO₂ から形成され、コア 4 は、上部の Si 層から形成される。下部の Si 層は基板 2 となる。

[0046] コア 4 は、中央部に厚みの厚いリブ部 10 をもつリブ型シリコン導波路である。この導波路に導波された光は、リブ部 10 を中心に分布する。

一方、厚みの薄いスラブ部 11、12 は、リブ部 10 から離間した位置に、電極に接触する接触部 11a、12a を有する。図 1 B に示すように、接触部 11a、12a は、スラブ部 11、12 の全厚みに亘って形成することも可能である。接触部 11a、12a には、メタル電極 7、8 とオーミックコンタクトを形成できるように、ドーパントが高濃度にドーパされる（P⁺領域、N⁺領域）。電極 7、8 の材料は、アルミ等、シリコン材料とのオーミックコンタクトが形成可能な材料であれば、特に限定されず、元素単体でも合金でもよい。なお、図 1 A 及び 1 B では、電極 7、8 が省略されている。

光導波路 6 の上部クラッド 5 は、再度 SiO₂ や樹脂材料などの低屈折率材料を積層することより形成してもよいし、低屈折率材料の積層を省略して、エアクラッドであってもよい。

クラッド 3、5 は、コア 4 に対して適切な屈折率差を有するように、コア 4 よりも屈折率の低い材料から構成される。

[0047] コア 4 の一部は、P 型に、又は N 型にドーパされている。本実施形態では、第一スラブ部 11 は P 型に、第二スラブ部 12 は N 型にドーパされている

。半導体に導電性を付与するドーパント（不純物）は、半導体の母体媒質に応じて適宜選択することができる。

例えば、本実施形態のように、母体媒質がシリコン（Si）やゲルマニウム（Ge）等のⅣ族半導体であれば、P型極性を与えるドーパントとして、ホウ素（B）やアルミニウム（Al）等のⅢ族元素が挙げられ、N型極性を与えるドーパントとして、リン（P）や砒素（As）等のⅤ族元素が挙げられる。

[0048] ドーピング領域の配置に関し、本実施形態では、第一スラブ部11及びそれに接するリブ下部領域にP型領域13を、第二スラブ部12及びそれに接するリブ下部領域にN型領域14を配置している。P型領域13とN型領域14とはリブ部10において接しており、その境界には空乏層が生じる。

[0049] また、リブ上部にはアンドープ領域16が設けられ、アンドープ領域16には積極的にドーピングを行わない。アンドープ領域16に意図せず少量のドーパントが拡散する可能性がある。また、SOI基板など基板材料の製造方法等に起因して、基板に用いる材料によっては、わずかにP型又はN型にドーピングされる場合もあり得る。このため、アンドープ領域16には、基板に用いる材料に起因して、わずかなドーパントが含まれる場合もある。しかし、いずれの場合においても、アンドープ領域16は、そのドーパント濃度がP型領域13又はN型領域14のドーパント濃度（それらの領域13，14の平均的なドーパント濃度）の $1/10$ 以下、すなわち、 10^{-1} 倍以下であるように形成される。なお、アンドープ領域16のドーパント濃度は、P型領域13又はN型領域14のドーパント濃度の 10^{-2} 倍以下、 10^{-3} 倍以下などであってもよい。

また、スラブ部11，12のうち、リブ部10から離れた上面を含む一部は、他の箇所に比べてドーピング濃度を高くする。これによって、電極7，8とオーミックコンタクトを形成することができる。

[0050] 図3に、本実施形態に係る光学素子1の斜視図を示す。位相変化部は、図1Aや図2Aに示す断面構造が光導波路の長手方向に連続する構造を有する

。長手方向の長さは、要求される位相変化量や、印加可能な電圧範囲等の条件から決められる。例えば、想定する動作電圧が4 V_{pp}（ピーク間電圧）で、この動作電圧における単位長さ（1 mm）当たりの位相変化量が $\pi/4$ ラジアンするとき、位相変化部として必要な位相変化量が $\pi/2$ ラジアンであれば、デバイス長（位相変化部長）は2 mmと決めることができる。また、必要な位相変化量が π ラジアンであればデバイス長は4 mmと決めることができる。

[0051] また、電極7、8は、進行波型電極とすることもできる。この場合、図3に示すように、進行波型電極を長手方向にリブ型光導波路6と並行に配置し、光の導波方向と同方向に進行波型電極に電圧を伝送させる。図3において、例えば光導波路6を導波する光が、矢印Aに示すように図の手前から奥へ向かって伝播する場合には、電極7、8の手前の端部7a、8aに信号源を、奥の端部7b、8bに終端を接続して、電極7に電圧を印加する。その反対に、光が矢印Bに示すように図の奥から手前へ向かって伝播する場合には、奥側の端7b、8bに信号源を、手前の端部7a、8aに終端を接続して、電極7に電圧を印加する。

図2Bには、図2Aの断面構造を有する光学素子1の斜視図を示す。図2Bにおいて、例えば光導波路6を導波する光が、矢印Aに示すように図の手前から奥へ向かって伝播する場合には、電極7、8の手前の端部7a、8aに信号源を、奥の端部7b、8bに終端を接続して、電極7に電圧を印加する。また、光が矢印Bに示すように図の奥から手前へ向かって伝播する場合には、奥の端部7b、8bに信号源を、手前の端部7a、8aに終端を接続して、電極7に電圧を印加する。図2Bの例では、電極7、8が光導波路6の長手方向に沿って連続して形成されている。電極7、8が進行波型電極であってもよい。この場合、たとえば、電極7、8が、グランド（GND）とシグナル電極とが光導波路6の長手方向に沿って所定の間隔を保ちながら連続して形成されたスロット線路型電極を構成することもできる。このスロット線路型電極においては、電極の厚み、電極の間隔を調整することにより線

路の特性インピーダンスを調整することができる。

図2Cの例では、光導波路6の長手方向に垂直な断面において、グラウンド(GND)が、電極8の側方に設けられている。この場合、電極7, 8は、グラウンド(GND)と共に、コプレーナ線路型電極を構成することができる。

[0052] <光学素子の製造方法>

次に、上記実施形態に係る光学素子1の製造方法について説明する。

図4A～4Fに、製造方法の一例を順に示す。

(1) 図4Aに示すように、基板2と下部クラッド3と単結晶半導体層21とを有する積層基板20を用意する。積層基板20としては、例えばSi-SiO₂-SiからなるSOI基板を使用できる。この場合、下部Si層が基板2に、中間SiO₂層が下部クラッド3に、上部Si層が単結晶半導体層21に対応する。単結晶半導体層21は、化学機械研磨(CMP: Chemical Mechanical Polishing)等で上面21aを研磨し、所望のリブ高さが得られる厚みとすることができる。単結晶半導体層21の厚みは、特に限定されるものではないが、例えば数十nm～数百nmである。より具体的な例として、220nmが挙げられる。

なお、図4Aの積層基板20における基板2と下部クラッド3と単結晶半導体層21との厚みの比率は、実際の厚みの比率を表すものではない。

[0053] (2) 図4Bに示すように、マスク22を使用して、P型ドーパントのインプラントにより、P型領域13を形成する。このとき、注入イオン23のエネルギーを調整することにより、P型ドーパントの注入深さが、下記(4)で形成される第一スラブ部11の厚み程度になるようにする。より具体的な例として、ドーズ量 $5 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、注入エネルギー40eVにてホウ素(B)のインプラントが挙げられる。マスク22は、P型領域13を形成しない領域を覆うように設けられる。

[0054] (3) 図4Cに示すように、マスク24を使用して、N型ドーパントのインプラントにより、N型領域14を形成する。このとき、注入イオン25の

エネルギーを調整することにより、N型ドーパントの注入深さが、下記（４）で形成される第二スラブ部１２の厚み程度になるようにする。具体例として、リン（P）をドーズ量 $3 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ 、注入エネルギー 110 eV によるインプラントが挙げられる。マスク２４は、N型領域１４を形成しない領域を覆うように設けられる。

[0055] （４） 図４Dに示すように、エッチングにより、断面においてリブを有するコア４を形成する。また、メタル電極との接触部１１a，１２aとなる高濃度ドーピング領域（P⁺領域、N⁺領域）を、さらなるドーピングにより形成する。リブ部１０の上部において積極的にドーピングをしなかった部分が、アンドープ領域１６となる。

図示のように、P型領域１３が第一スラブ部１１と同じ高さに位置し、N型領域１４が第二スラブ部１２と同じ高さに位置する場合、リブ部１０におけるドーピング領域の高さが、スラブ部１１，１２におけるドーピング領域の高さと同じにできるので、イオン注入の工程をより単純に実施することができる。

P型領域１３とN型領域１４との境界が、光導波路の長手方向に垂直な断面において、コア４の下面（下側クラッド３の上面）に垂直である場合、基板２の表面に垂直な方向でイオン注入を行って境界におけるP型ドーパントとN型ドーパントの混在を抑制することができる。なお、上記製造方法において、基板２に対して斜めの方向でイオン注入を行ったり、P型領域１３とN型領域１４との境界をコア４の下面に対して傾斜させたりすることも可能である。

[0056] （５） 図４Eに示すように、コア４の上に、SiO₂等を堆積（デポジション）することにより、上部クラッド５を形成する。エアクラッドとする場合は、このSiO₂等の堆積による上部クラッド５の形成を省略することができる。また、樹脂の塗布などによって上部クラッド５を形成することもできる。

（６） 図４Fに示すように、電極７，８をスラブ部１１，１２の接触部１

1 a, 1 2 aに接続するためのコンタクトホールを上部クラッド5に形成した後、スパッタ等により形成したコンタクトホールをメタルで充填して電極7, 8を形成する。電極の材料としては、例えばアルミニウム (Al) やシリコン合金等が挙げられる。

[0057] 以上の工程により、リブ部10の上部に、イントリンシック領域、及び、低濃度ドーピング領域の一方から形成されるアンドープ領域16を残し、リブ部10の下部にPN接合部15が形成された、リブ型位相変化部として利用可能な光学素子1を製造することが可能である。

なお、図4A～4Fでは、P型領域13が第一スラブ部11と同じ高さに位置し、N型領域14が第二スラブ部12と同じ高さに位置する場合を例示したが、本発明は、この場合に限定されるものではない。ドーピング領域 (P型領域13、及びN型領域14) の厚みをスラブ部11, 12の厚みより大きくすることにより (後述する実施形態6参照)、ドーピング領域がスラブ部11, 12よりも高い位置にまで延在する構造を実現することも可能である。また、マスクの構成や注入深さ等を調整することにより、リブ部10におけるドーピング領域の高さを、スラブ部11, 12におけるドーピング領域の高さよりも低くする等、リブ部10とスラブ部11, 12とで高さの異なるドーピング領域を形成することも可能である。

[0058] <実施形態2>

上述した (式1)、及び (式2) より、 $\Delta n / \Delta \alpha$ を求めると、P型領域では、電子密度変化 ΔN_e を無視すれば、 $\Delta n / \Delta \alpha$ はおよそ正孔密度 ΔN_h の0.2乗に反比例する [すなわち、 $\Delta n / \Delta \alpha \propto 1 / (\Delta N_h)^{0.2}$]。一方、N型領域では、正孔密度変化 ΔN_h を無視すれば、 $\Delta n / \Delta \alpha$ は電子密度 ΔN_e によらずおよそ一定になる。

これらの関係を、グラフに表すと、図17に示すとおりである。ここで、図17の横軸のキャリア密度に関し、電子については ΔN_e 、正孔については ΔN_h が用いられている。また、図17の数値は、 $1 \times 10^{\pm m}$ を、 $1 E^{\pm m}$ とする形式 ($\pm m$ は整数) で表示している。

図17から明らかなように、 $\Delta n / \Delta \alpha$ は、P型の低濃度領域で高いことから、キャリア密度の変化領域におけるP型の低濃度ドーピング領域の割合を大きくすることで、 $\Delta n / \Delta \alpha$ を向上させ、損失の変化量を低減することが可能である。

[0059] PN接合部における空乏層は、接合部におけるP型領域とN型領域との間にドーパント濃度差がある場合には、濃度の低い方に空乏層が広がる。したがって、図5Aに示すように、リブ部10の下方におけるN型領域14aのドーパント濃度を、P型領域13aのドーパント濃度よりも高くすることで、低損失化と変調効率の向上とを実現できる。ここで、リブ部10の下方に設けられるP⁻領域は、リブ部10の下方のみならず、スラブ部11のリブ部10に近接する領域に設けても良い。

ここで、P領域、P⁻領域、N領域のドーパント濃度の関係について、必ずしもP領域とN領域とでのドーパント濃度が一致していなくてもよい。本実施形態においては、N領域と接するP⁻領域が、P領域よりもドーパント濃度が低く、かつ、このP⁻領域のドーパント濃度が、N領域のドーパント濃度よりも低い。

[0060] また、リブ型導波路は、導波路の中心部（リブ部10及びその近傍）で導波光のパワー密度が大きいことを考慮して、図5Bに示すように、PN接合部15の中心位置を、リブ部10の幅方向中央から、N型領域14を有する第二スラブ部12寄りにシフト（変位）させることも可能である。この場合、ドーパント濃度が比較的低いP⁻領域が拡大するため、ドーパント濃度が比較的高いN領域による損失の発生を低減することができる。さらに、導波光のパワー密度の高い領域においてパワー密度が変化することにより、 $\Delta n / \alpha$ を向上し、一層の低損失化を図ることができる。

[0061] <実施形態3>

実施形態1～2においては、メタル電極7、8とコンタクトを取るための高濃度ドーピング領域は、スラブ部11、12の上部に形成されている。電極7、8に用いられる金属材料は光の吸収が大きいため、この吸収をより低

減するためには、導波光の分布する領域から電極 7, 8 を十分に離す必要がある。しかし、電極 7, 8 を導波光の分布する領域から離すほど、電極 7, 8 と PN 接合部 15 との距離も大きくなる。すると、電極 7, 8 と PN 接合部 15 との間の半導体中の抵抗値が大きくなり、コアを構成する半導体の応答速度の低下などにより高周波特性の悪化を招く。

[0062] そこで、図 6 に示すように、スラブ部 11, 12 の上面よりも高い位置まで延在する接触部 17, 18 を、リブ部 10 からより離れた位置に設けることもできる。図 6 において、スラブ部の上部に形成された接触部と区別するため、スラブ部の上面よりも高い位置まで延在する接触部の符号を 17, 18 としている。

接触部 17, 18 の高さは、リブ部 10 の上端部 10a と同じ高さ、又は上端部 10a よりも高いことが好ましい。この場合、電極 7, 8 を構成する金属材料がコア 4 の上面よりも高い位置に配置されるため、スラブ部 11, 12 の上部に接触部 11a, 12a を設ける場合と比較して、より近い位置に電極 7, 8 を配置することができる。これにより、スラブ部 11, 12 による抵抗値を低減し、コアを構成する半導体の応答速度を向上させ、高速動作を実現することができる。

[0063] 高濃度ドーピング領域である P⁺領域、及び N⁺領域の位置を考慮すると、スラブ部 11, 12 の P 型領域 13、及び N 型領域 14 と接触する面が、コア 4 の下面（下部クラッド 3 との境界）に垂直であることが好ましい。この場合、ドーピング濃度を高くすることで抵抗値を下げた高濃度ドーピング領域と、PN 接合部 15 との距離を、全体的に短縮できるので、スラブ部 11, 12 による抵抗値を低減し、コアを構成する半導体の応答速度を向上させ、高速動作を実現することができる。

[0064] 本実施形態に係る光学素子を、図 4A～4F に示す方法で製造する場合、単結晶半導体層 21 のエッチング深さを変えることで、スラブ部 11, 12 の上面よりも高い位置まで接触部 17, 18 が延在するように、エッチングすることが可能である。図 4A において準備する単結晶半導体層 21 の厚み

は、接触部 17, 18 の高さをリブ部 10 の厚みより大きくする場合、目的とする接触部 17, 18 の厚み以上とする。接触部 17, 18 の高さ、リブ部 10 の高さとが等しい場合、接触部 17, 18 の上面、及びリブ部 10 の上面がエッチングされないようにエッチングを行って、スラブ部 11, 12 を形成すればよい。

[0065] <実施形態 4>

リブ型導波路において、最も電界が集中する領域は、導波路の断面水平方向の中心部（リブ部 10、及びその近傍）である。したがって、中心部のキャリア密度変化は、その周囲におけるキャリア密度変化と比較して、より大きな屈折率変化 Δn をもたらし、 $\Delta n / \alpha$ が向上する。

図 1 A 及び 2 A に示す実施形態 1 に係る構造では、空乏層が導波路の中心位置に存在する。空乏層はバイアスがゼロの時点（ゼロバイアス時）で一定の幅をもっているため、中心部にはゼロバイアス時でもキャリアが存在しない（又はキャリア密度が著しく低い）。キャリア密度は導波路の中心からずれた部分において変化する。

[0066] そこで、図 7 に示すように、PN 接合部 15 の中心位置を、リブ部 10 の幅方向中央から横方向にシフトした位置に PN 接合部 15 を形成することができる。これにより、導波路の中心位置において、ゼロバイアス時にキャリアを存在させておき、目的とするバイアス電圧の範囲において、中心部のキャリア密度変化を最大にすることが可能になる。これにより、より大きな屈折率変化 Δn をもたらし、 $\Delta n / \alpha$ が向上し、一層の低損失化を図ることができる。上記と同様の効果を得るために、PN 接合部 15 の中心位置を、図 7 とは反対に、P 型領域 13 を有する第一スラブ部 11 寄りにシフトさせてもよい。

さらに、実施形態 2 で説明したように、位相変調時の損失変化量を低減に対しては、P 型領域のドーパント濃度が低い部分における変調が有効である。したがって、PN 接合部 15 の中心位置を、N 型領域 14 を有する第二スラブ部 12 寄りにシフトさせることで、変調時の損失変化量をより低減する

ことが可能である。

[0067] <実施形態 5>

導波路の断面構造において、P型領域及びN型領域が一様である必要はなく、断面の水平方向に、ドーパント濃度が分布（変化）を有することも可能である。

例えば、第一スラブ部 11 からリブ部 10 にかけて設けられる P 型領域 13 のドーパント濃度が、光導波路 6 の長手方向に垂直な断面において、N 型領域 14（PN 接合部 15）に向かって減少している構成を採用することもできる。この場合、P 型領域 13 における P 型のドーパント濃度が連続的に変化していてもよい。また、P 型領域 13 において、P 型のドーパント濃度が異なる 2 以上の領域を有するように、P 型のドーパント濃度が段階的に変化していてもよい。

また、第二スラブ部 12 からリブ部 10 にかけて設けられる N 型領域 14 のドーパント濃度が、光導波路 6 の長手方向に垂直な断面において、P 型領域 13（PN 接合部 15）に向かって減少している構成を採用することもできる。この場合、N 型領域 14 における N 型のドーパント濃度が連続的に変化していてもよい。また、N 型領域 14 において、N 型のドーパント濃度が異なる 2 以上の領域を有するように、N 型のドーパント濃度が段階的に変化していてもよい。

[0068] 図 8A には、ドーパント濃度を 2 段階で変化させた例が示されている。P 型領域 13 及び N 型領域 14 が、それぞれ二つの濃度の領域（P1 領域と P2 領域、及び N1 領域と N2 領域）に分割されている。高速動作を行うためには、電極 7, 8 から PN 接合部 15 までの抵抗値を下げるのが有効である。抵抗値はドーピング濃度を高くすることで下げることができる。

ドーピング濃度を上げると、吸光係数（損失）の増大を招くが、キャリア密度の増大により屈折率変化 Δn も増大する。PN 接合部 15 から離れた領域においては、そこまで空乏層が到達しがたいため、キャリア密度の変化は生じない。一方で、導波光の一部は、通常スラブ部 11, 12 にも到達する

ことから、この領域でドーピング濃度を上げると、屈折率変化による変調効率は増大せず、損失のみ増大することになる。そこで、ドーピング濃度の高い、P 1 領域、及びN 1 領域を、損失に影響のない範囲で、可能な限り光導波路の中央部に近づけ、光の分布領域である、リブ部 1 0 及びその近傍に、ドーピング濃度の低い、P 2 領域、及びN 2 領域を設けることにより、高速動作と損失低減を両立させることができる。

[0069] ここで、各領域のドーパント濃度の関係について、必ずしも P 1 領域と N 1 領域とでのドーパント濃度が一致していなくてもよく、P 2 領域と N 2 領域とでのドーパント濃度が一致していなくてもよい。本実施形態においては、P 2 領域よりも P 1 領域のドーパント濃度が高く、N 2 領域よりも N 1 領域のドーパント濃度が高い。

P 1 領域のドーパント濃度は、接触部 1 1 a における P⁺領域のドーパント濃度より低くても、同程度でもよい。また、N 1 領域のドーパント濃度は、接触部 1 2 a における N⁺領域のドーパント濃度より低くても、同程度でもよい。

なお、図 8 B に示すように、接触部 1 1 a, 1 2 a がスラブ部 1 1, 1 2 の全厚みに亘って形成された構成を採用することもできる。図 8 A の例では、P 1 (N 1) 領域とは別に金属電極 7 (8) とのオーミックコンタクトを形成する接触部 1 1 a (1 2 a)、すなわち P⁺ (N⁺) 領域が形成されている。これに対し、図 8 B の例では、金属電極 7 (8) とのオーミックコンタクトを形成する P⁺ (N⁺) 領域がスラブ部 1 1 (1 2) の全厚みに亘って形成されている。すなわち、図 8 B に示された例は、図 8 A における P 1 領域と P⁺ とを 1 つの P⁺ で置き換えた構造を有している。

図 8 B に示された構造においても、P 型領域及び N 型領域それぞれが、ドーパント濃度の異なる 2 つの領域 (P⁺ 領域, P 2 領域; 及び N⁺ 領域, N 2 領域) を有する。また、図 8 B の例における P⁺ 領域, P 2 領域, N⁺ 領域, 及び N 2 領域の各ドーパント濃度は、上述した図 8 A の例における P 1 領域, P 2 領域, N 1 領域, 及び N 2 領域のドーパント濃度と同様に設定できる

。したがって、図 8 B に示された構造によっても、光導波路の中央部における損失を抑制しつつ電極 7, 8 と P N 接合部 1 5 との間の半導体中の抵抗値を低減することができる。

また、図 8 B に示された構造によれば、図 8 A の構造における P⁺ (N⁺) 領域及び P 1 (N 1) 領域を同時に形成することができる。特に、スラブ部 1 2, 1 3 の厚みが薄い場合には、一度のインプラントによりスラブ部 1 1 (1 2) の全厚みに亘って P⁺ (N⁺) 領域を形成できるので、インプラント回数を低減することが可能である。

[0070] <実施形態 6>

図 9 に示す実施形態では、リブ部 1 0 におけるドーピング領域が、スラブ部 1 1, 1 2 の上面よりも高い位置まで延在している。

図 4 A ~ 4 F に示した製造方法において、イオン注入の条件によりドーピング深さをより高く設定するとともに、スラブ部 1 1, 1 2 のエッチング条件により、スラブ部 1 1, 1 2 におけるドーピング領域の上部を除去することにより、図 9 に示すような断面構造を実現することができる。すなわち、リブ部 1 0 の P 型領域 1 3 a が、それに接する第一スラブ部 1 1 の上面よりも高い位置まで延在し、リブ部 1 0 の N 型領域 1 4 a が、それに接する第二スラブ部 1 2 の上面よりも高い位置まで延在している断面構造を実現することが可能である。

[0071] 本実施形態によれば、スラブ部 1 1, 1 2 の厚みによらず、リブ部 1 0 のドーピング領域の高さを、光の分布形状に合わせて配置することが可能になり、低損失な変調を実現することができる。例えば、リブ部 1 0 の厚み（コア下面からの厚みをいう。図 1 8 の T₁ 参照）が厚い場合に、導波光の分布中心が、スラブ部 1 1, 1 2 の上面の高さよりも高い位置となることがある。その場合、ドーピング領域とアンドープ領域との境界を、導波光の分布中心の近傍に配置することが好ましい。

[0072] <リング型共振器>

上記各実施形態に係る光学素子は、リング型共振器における導波路として

利用することができる。たとえば、文献 (Optics Express Vol. 18, 18242) には、シリコン導波路を用いた μ リング型共振器が開示されている。この μ リング型共振器におけるリング状の変調器に、上記各実施形態に係る光学素子を適用することが可能である。なお、リングの形状は円である必要はなく、始点と終点とが接続されていればよい。

[0073] <マッハツェンダ型光導波路素子>

光位相変調器は、光伝送路において、単体で 사용할 ことができる。特に長距離通信においては、光位相変調器をマッハツェンダ干渉計のアームに配置した、マッハツェンダ型光変調器としても使用されている。マッハツェンダ型光導波路素子 30 の概略構成を図 10 に示す。入射部 31 よりマッハツェンダ型光導波路素子 30 に入射した光は、分波部 32 で 2 つに分波され、それぞれ 2 つのアーム 33, 34 に導波する。各アーム 33, 34 には、それぞれ位相変化部が設けられ、アーム 33, 34 ごとに位相変調を行う。アーム 33, 34 を通過した光は、合波部 35 で合波されて出射部 36 に出力される。したがって、両アーム 33, 34 を通過した後の光の位相差に応じた、強度変調や、位相変調が可能になる。

[0074] 両アーム 33, 34 の位相変化を逆方向にする、すなわち、一方のアームでは位相を進め、他方のアームでは位相を遅らせることにより、マッハツェンダ型光導波路素子 30 から出射部 36 への出力信号の周波数チャープを低減した変調が可能である。特に、光導波路の波長分散 (周波数分散) の影響が問題となる長距離光通信では、このような周波数チャープを低減できるマッハツェンダ型光変調方式が用いられている。

上述した実施形態 1 ~ 6 に例示される光学素子は、1 つの位相変化部自体でも光位相変調器として動作可能である。以下に示す実施形態 7 ~ 9 は、実施形態 1 ~ 6 に例示したような光学素子をマッハツェンダ型光変調器に適用した例である。

[0075] <実施形態 7>

図 11 A 及び 11 B の平面図に示すように、少なくとも各アーム 33, 3

4の位相変化部において、リブ部37とその両側のスラブ部38、38を設ける必要がある。位相変化部以外の部分における導波路は、リブ部とスラブ部とを有するリブ型導波路であってもよく、また、スラブ部のない矩形型導波路であってもよい。図11A及び11Bでは、位相変化部以外の部分に矩形型導波路が用いられたコア形状が示されている。リブ部、スラブ部、矩形部からなるコアの材料には、シリコン等の半導体を用いることができる。また、クラッド（図示せず）には、 SiO_2 や樹脂等の絶縁体を用いることができる。上部クラッドは、エアクラッドとすることも可能である。

なお、図11A及び11Bにおいて、図10に対応する構成には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。入射部31、分波部32、各アーム33、34、合波部35、及び出射部36は、同一の基板上に一体化されて基板型光導波路を構成することも可能である。

[0076] 各アーム33、34の位相変化部33a、34aにより位相変調を行い、合波部35において合波を行うことにより、各アーム33、34を通過した後の光の位相差に応じて、出射部36からの出力光の状態が変化し、強度変調や、位相変調が可能になる。

例えば、相対的に π ラジアン位の位相差がつけば、各アーム33、34を通過した光の波が互いに打ち消しあうことにより、合波部35において導波光のパワーの一部はコアの周囲に広がり、出射部36に結合する光のパワーは減少する。一方、合波部35において各アーム33、34を通過した光の位相が一致する場合には、その光の波は互いに打ち消しあうことなく合成されて出射部36に結合する。このような変調動作は、強度変調と呼ばれる。

特に、両者のアーム33、34の位相変化部33a、34aを同時に駆動して、各アーム33、34の導波光の位相を反対側に変調する、つまり、一方では位相を進め、他方では位相を遅らせるというプッシュプル動作を行うことにより、周波数チャープを低減して、長距離伝送に適した光信号を出力として得ることができる。

[0077] 次に、マッハツェンダ型光導波路素子30の各部について説明する。

入射部 31 は、これに接続される光伝送路の種類に応じて、適宜の構成を採用することができる。例えば、光学素子 30 を直接光ファイバに接続する場合には、モードフィールド形状の違いによる接続損失を低減するために、モードフィールドコンバータを用いることができる。例えば、コアが光の進行方向に向かって逆テーパ状であるモードフィールドコンバータが挙げられる。また、光学素子 30 と同一基板上に作製した、別の光学素子と接続することも可能である。その場合には、入射部 31 のコアを延長して、別の光学素子と接続することが可能である。もちろん、接続先の導波路に応じて、導波路の幅や高さ等の寸法を変更することも可能である。

[0078] 分波部 32 は、入射光を 2 つのアーム 33, 34 に分配する。分波部 32 には、Y 分岐光導波路や、MMI (マルチモード干渉) カプラ、方向性結合器などを採用することができる。

また、合波部 35 は、2 つのアーム 33, 34 から出射部 36 に光を合波する。合波部 35 には、分波部 32 と同様に、Y 分岐光導波路や、MMI カプラ、方向性結合器などを採用することができる。分波部の分岐部における光の入射方向と出射方向とを逆にすれば、合波部 35 として使用することができる。光学素子 30 において、分波部 32 と合波部 35 とが同一の構成を有しても、異なる構成を有してもよい。

[0079] 図 11A 及び 11B に示す例において、入射部 31、及び出射部 36 は、矩形型導波路であり、分波部 32、及び合波部 35 にも、矩形型導波路を採用している。一般に、導波路単体においては、矩形型導波路よりも、リブ型導波路のほうが、導波路損失が低いことが知られている。分波部 32 や合波部 35 をリブ型導波路とすることもできる。具体的には、Y 分岐光導波路、MMI カプラ、方向性結合器等を、リブ型導波路から構成することが可能である。

この場合には、入射部 31 や出射部 36 にリブ型導波路を用いるか、入射部 31 と分波部 32 との間、又は合波部 35 と出射部 36 との間に、矩形リブ変換部を形成することができる。矩形リブ変換部については、後述する。

[0080] 二手に分かれた各アーム 33, 34 に位置する位相変化部 33a, 34a には、たとえば、上述の本発明の実施形態に係る光学素子を用いた光位相変調器が用いられる。

図 11A 及び 11B に示す例においては、両方のアーム 33, 34 に位相変化部 33a, 34a が設けられている。これにより、チャープ低減動作などが可能である。単純な強度変調であれば、片側のアームにのみ、位相変化部を設けることも可能である。これにより、製造コストや、電圧印加用の端子の削減、さらには制御の簡略化により、低コスト化を図ることができる。

[0081] 本発明の各実施形態に係る光学素子を、マッハツェンダ型光導波路素子 30 に適用する場合には、少なくとも、その位相変化部 33a, 34a にリブ型導波路として用いる。そして、実施形態 1～6 に示したように、リブ部 37 とその両側のスラブ部 38, 38 に P 型領域、N 型領域、及びアンドープ領域と、逆バイアスを印加するための電極とを形成する。

位相変化部 33a, 34a 以外の光導波路には、適宜ドーピングをしてもよいが、ドーピングをしなくてもよい。本発明の各実施形態に係る光学素子を、一方のアーム 33, 34 に用いてもよく、両方のアーム 33, 34 に用いてもよい。

[0082] 本実施形態では、図 11A に示すように、各アーム 33, 34 において、分波部 32 と位相変化部 33a, 34a との間、及び位相変化部 33a, 34a と合波部 35 との間に、矩形リブ変換部 39 が設けられている。

矩形リブ変換部 39 は、図 11B に示すように、矩形型導波路の両側方から連続的にスラブ部 38 が形成されて、光の導波方向に沿って連続的に、スラブ部 38 の幅が広く（又は狭く）なっている。矩形リブ変換部 39 の導波方向の長さは、矩形型導波路からリブ型導波路への導波モードの変換が、断熱的に行われるために十分な長さであることが好ましい。実際には、図 11B の右側においてスラブ部 38 が広い領域では、スラブ部 38 が狭い領域よりもモード形状の変化が小さいため、スラブ部 38 の幅の広がり方をより急峻にすることが可能である。これにより、矩形リブ変換部 39 の長さを低減

することが可能である。

[0083] 位相変化部 33 a, 34 a は、例えば、図 12 A、図 12 B、図 15 A 又は図 15 B に示すように構成することができる。

位相変化部 33 a, 34 a の各部は、実施形態 1 で例示した各種の材料で構成することができる。具体例としては、基板 2、及び各アーム 33, 34 のコアには、シリコン (Si) を用い、下部クラッド 3、及び上部クラッド 5 には、シリカ (SiO₂) を用いることができる。

[0084] 本実施形態においては、位相変化部が 2 つのアーム 33, 34 の両方に配置されている。図 12 A、及び図 12 B の間では、2 つの位相変化部における P 型領域と N 型領域との位置関係が、逆転している。

つまり、図 12 A の場合、両アーム 33, 34 間に配置されるドーピング領域が、いずれも N 型領域である。たとえば、位相変化部 33 a, 34 a に、図 1 A の光学素子 1 を用いた場合には、位相変化部 33 a, 34 a の各第二スラブ部 12 が両アーム 33, 34 間に配置される。アーム 33, 34 の外側に配置されるドーピング領域は、いずれも P 型領域である。

一方、図 12 B の場合、両アーム 33, 34 間に配置されるドーピング領域が、いずれも P 型領域である。たとえば、位相変化部 33 a, 34 a に、図 1 A の光学素子 1 を用いた場合には、位相変化部 33 a, 34 a の各第一スラブ部 11 が両アーム 33, 34 間に配置される。アーム 33, 34 の外側に配置されるドーピング領域は、いずれも N 型領域である。

このように、両アーム 33, 34 間に配置された 2 つのスラブ部が、同種 (P 型領域又は N 型領域のいずれか一方) のドーピング領域を有することにより、両アーム 33, 34 間の 2 つのスラブ部に共通の電極を接続することができる。

[0085] 図 12 A の場合、両アーム 33, 34 間 (内側) に共通の GND を配置し、外側に、それぞれの位相変化部 33 a, 34 a を駆動する Signal 電極を配置することができる。この場合、内側の N 型領域に接続される電極が GND であるので、逆バイアス電圧を印加するためには、外側の P 型領域に

接続される S i g n a l 電極に負電圧を印加する。図 1 2 A の図示とは反対に、内側に S i g n a l 電極を配置し、外側に G N D を配置した場合、逆バイアス電圧を印加するためには、S i g n a l 電極に正電圧を印加する。

[0086] 図 1 2 B の場合、内側の P 型領域に接続される電極が G N D であるので、逆バイアス電圧を印加するためには、外側の N 型領域に接続される S i g n a l 電極に正電圧を印加する。図 1 2 B の図示とは反対に、内側に S i g n a l 電極を配置し、外側 G N D を配置した場合、逆バイアス電圧を印加するためには、S i g n a l 電極に負電圧を駆動する。

[0087] 高周波特性を高めるため、図 3 を参照して説明したように、進行波電極構造を用いることが可能である。例えば、図 1 3 に示すように、導波路長手方向に沿って電極を配置し、さらに S i g n a l 電極の外側に別の G N D を配置し、電極及び電極間の幅を適宜調整することで、コプレーナ線路を構成することができる。この場合は、より高速な伝送が可能になる。

デバイスを構成する場合には、パッケージングを考慮して、各端部が図 1 4 に示すように、周囲に引き延ばされるように各電極を配置することができる。この際に、各電極の断面構造を均一に延長することにより、インピーダンスを一定にし、不要な反射を引き起こさずに駆動信号を伝送することが可能である。

[0088] 図 1 2 A ~ 1 4 では、アーム 3 3, 3 4 間に共通の電極を配置した構造を挙げたが、別の構造として、アーム 3 3, 3 4 間に電極を 2 つ配置して、2 つの位相変化部 3 3 a, 3 4 a を独立に駆動することも可能である。この場合、2 つの位相変化部 3 3 a, 3 4 a に印加する電圧のカップリングを低減することができる。

[0089] さらに別の構造として、図 1 5 A 及び 1 5 B に示すように、コアのドーピング領域の極性を、左から右へ、P N P N、又は N P N P の順にすることもできる。

図 1 5 A、及び図 1 5 B では、N 型領域に接続される電極を G N D としていたので、逆バイアス電圧を印加するためには、P 型領域に接続される S i

Signal電極に負電圧を印加する。これらの図示例とは反対に、P型領域に接続される電極がGNDである場合、逆バイアス電圧を印加するためには、N型領域に接続されるSignal電極に正電圧を印加する。

[0090] <マッハツェンダ型光変調器の光路長調整部>

マッハツェンダ型光変調器を構成する際、製造誤差のために、一般には2つのアーム間の光路長にわずかな差が生じる。また、この光路長差は、温度により変化するため、環境温度の変化に対して、光路長差を調整することが望ましい。アームの光路長を調整する手段として、前述の実施形態1～6に示したような、逆バイアス電圧を印加可能にした各位相変化部において、DC（直流）成分を変化させることでも、光路長を調整することが可能である。

[0091] しかしながら、DC成分を変化させれば、同時にAC（交流）成分も影響を受けるため、例えば両アームで同一の特性を得ることが好ましいプッシュプル動作には上記の手段が適さない場合もある。このため、図16に示すように、アーム33、34に、位相変化部33a、34aとは別に、光路長調整部33b、34bを設けることが可能である。

図16では、2つに分かれたアーム33、34に、各々光路長調整部33b、34bを設けている。光路長調整部33b、34bは、温度変化等の環境条件に応じてアームの光路長を調整できればよく、高周波特性や高速動作が要求されない。このため、光路長調整部33b、34bは、逆バイアス電圧の印加により制御される構成に限られず、熱光学効果を用いた位相変調手段によって構成することも可能である。

[0092] 熱光学効果を用いた位相変調手段の具体例としては、光導波路の周囲に、電熱線として機能するニクロムの蒸着や、不純物を添加したシリコンなどの導電部を設け、光導波路の温度調整が可能なように構成したものが挙げられる。導電部は、クラッドの外側（例えば上部クラッドの上）に設けることもでき、また、導波光の分布する領域から離れていれば、スラブ部に設けることもできる。また、導電部は、光導波路の長手方向に沿って所定の長さを有

するように設けることが好ましい。

熱光学効果を用いた光路長調整部 33b, 34b は、高速動作には適さないが、キャリア吸収による損失がないため、低損失な光路長調整部を形成することが可能である。

また、図 16 では両方のアーム 33, 34 に光路長調整部 33b, 34b を設けているが、一方のアームのみに光路長調整部を設けることも可能である。

[0093] 以上、本発明を好適な実施の形態に基づいて説明してきたが、本発明は上述の形態例に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の改変が可能である。

上述の実施形態では、リブが上方に突出した断面構造を有しているが、リブが下方に突出した断面構造や、リブが上下両方に突出した断面構造を採用することもできる。これら断面構造においても、同様にリブの内部に P N 接合部とアンドープ領域を設けることで、アンドープ領域にキャリアが拡散し、電圧印加によりキャリア密度の変化する領域の割合を高めることができ、リブが上方に突出した断面構造と同様の効果を奏する。

実施例

[0094] 以下、本発明の一実施例を説明する。

[0095] <シミュレーションによる比較>

図 18 に、シミュレーション（実施例 1）で用いた光導波路の断面構造を示す。リブ部 10 の幅は $W_r = 600 \text{ nm}$ 、リブ厚は $T_r = 220 \text{ nm}$ 、スラブ厚は $T_s = 90 \text{ nm}$ 、スラブからリブが突出する高さは $T_r - T_s = 130 \text{ nm}$ とした。

コア 4 はシリコン (Si) からなり、コア 4 の上下は、それぞれシリカ (SiO_2) からなる上部クラッド 5、及び下部クラッド 3 で覆われる構造とした。

また、コア 4 のドーピングは、コア 4 の下面からスラブ厚 T_s に等しい 90 nm までの範囲で設けられるものとし、ドーピング濃度は、P 型領域 13 で

$5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 、N型領域14で $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ とした。

電極7, 8とのコンタクトをとる接触部11a, 12aは、P⁺領域、N⁺領域ともに $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ の高濃度ドーピング領域で形成され、導波光の分布する領域から十分に離れるよう、リブ端から $W_s = 600 \text{ nm}$ の距離だけ、電極7, 8寄りに配置した。この場合、接触部11a, 12aとPN接合部15との距離は、 $W_s + (W_r / 2) = 900 \text{ nm}$ である。接触部11a, 12aの幅は $W_o = 4000 \text{ nm}$ 、電極7, 8の幅は $W_e = 1000 \text{ nm}$ とした。

実施例1では、実施形態1に即して、図19Aに示すように、リブ部10の下部に、その下面からスラブ厚 T_s と同じ高さまでドーピングし、その上方にはイントリンシック・シリコンからなるアンドープ領域16を配置した。

比較例1では、特許文献1に即して、図19Bに示すように、P型及びN型のドーピング領域を、リブの下面から上端まで、同じ濃度で配置した。ドーピング濃度は、実施例1と同じ（P型は $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 、N型は $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ ）とした。

[0096] (シミュレーション方法)

シミュレーションは、次の手順により行った。

1. 所定のバイアス電圧ごとにキャリア密度分布の変化を求めた。この計算には、Silvaco社製のシミュレータATLASを利用した。
2. 1. で得られたキャリア密度分布から、上記の(式1)及び(式2)を用いてキャリア密度を複素屈折率に変換した。
3. 2. で得られた複素屈折率分布から、光導波路の実効屈折率と実効吸収係数を求めた。この計算には、Rsoft社製シミュレータBeamPropを利用した。

[0097] (挿入損失のシミュレーション)

前述のシミュレーション方法の手順1. ~ 3. に従い、次の条件における位相変化部の損失についてシミュレーションを行った。

[0098] 必要位相変化量： 0.5π

動作電圧 (Bias) : 0 ~ -4 V

[0099] この場合、上述の (式 6) 及び (式 7) により説明したように、波長、及び導波路長が定まれば、導波路損失に対する実効屈折率変化の代わりに、導波路損失に対する位相変化量を、指標として用いることができる。そこで、本シミュレーションでは、波長を 1550 nm、導波路長は 0.5π の位相変化量が得られる長さとして定める。

単位長さ当たりの位相変化量と、導波路損失 (-4 V バイアス時)、及び導波路損失の変化 (動作電圧 0 ~ -4 V の間での挿入損失の変動幅) を求めると、それぞれ表 1 のとおりになる。

[0100] [表1]

単位長さ当たり	比較例 1	実施例 1
位相変化量	0.30 rad/mm	0.18 rad/mm
導波路損失 (バイアス -4V 時)	0.58 dB/mm	0.21 dB/mm
導波路損失の変化	-0.26 dB/mm	-0.14 dB/mm

[0101] ただし、表 1 の導波路損失は、キャリアの吸収による損失のみを考慮しており、実デバイスで発生するその他の損失、例えば材料の吸収や、コアークラッド境界での微細な凹凸における導波路の散乱などによる損失については考慮していない。

そこで、実デバイスにおける実測値を勘案して、上記結果に損失量 0.06 dB を加えて、“全影響を含む導波路損失” を求めた。その結果を、導波路損失 (total) として表 2 に示す。

[0102] [表2]

単位長さ当たり	比較例 1	実施例 1
導波路損失 (total)	0.64 dB/mm	0.27 dB/mm

[0103] 表 1 に示す単位長さ当たりの位相変化量より、目的とする 0.5π シフトに必要な導波路長を求めることができる。そこで、 0.5π シフトに最適な導波路長を有する位相変化部を設計し、導波路長、導波路損失、及び導波路損失の変化を求めた。それぞれの結果を表 3 に示す。

[0104] [表3]

0.5 π シフト	比較例 1	実施例 1
導波路長	5.7 mm	8.8 mm
導波路損失(バイアス-4V時)	3.36 dB	2.36 dB
導波路損失の変化	1.40 dB	1.26 dB

[0105] 表 3 に示す結果より、本実施例 1 によれば、比較例 1 に比べて、同じ位相変化量に対して、挿入損失の低減、及び動作時の損失変化が低減されている。

[0106] (応答速度のシミュレーション)

次に、応答速度について、シミュレーションを行った。

応答速度は、急激な電圧変化を与えたときに、変化後のバイアス電圧に応じた屈折率変化が得られるまでに要する時間として求めることができる。

前述のシミュレーション方法と同様に、Silvaco 社製のシミュレータ ATLAS を利用して計算したキャリア密度分布を基に、Rsoft 社製シミュレータ BeamProp を利用して導波モードの実効屈折率と実効吸収係数とを求めた。

[0107] 図 20 に、バイアス電圧を 0 V から -4 V へ変化させた際の (Ramp on) の実効屈折率 n_{eff} の変化を、また、図 21 に、バイアス電圧を -4 V から 0 V へ変化させた際の (Ramp off) の実効屈折率 n_{eff} の変化を、それぞれ示す。図 20～21 において、横軸は、急激な電圧変化を与えた時点を 0 (ps) とした経過時間を表す。また、縦軸は、屈折率が低い 0 V 印加時の実効屈折率を

0、屈折率が高い−4 V印加時の実効屈折率を1として、正規化した実効屈折率 n_{eff} を表す。

応答時間を見積もるため、正規化した実効屈折率が、10%と90%の間で（0.1から0.9まで、又は0.9から0.1まで）の変化に要する時間を比較すると、それぞれ表4のとおりになる。

[0108] [表4]

	0V から−4V	−4V から 0V
実施例 1	1.65 ps	1.73 ps
比較例 1	2.30 ps	2.16 ps

[0109] 図20～21、及び表3に示す結果より、本実施例1によれば、比較例1に比べて、応答時間が短く、一層の高速化を実現する高速動作可能なデバイスを実現できることが分かった。

[0110] (キャリア分布のシミュレーション)

前述のシミュレーション方法の1.で行ったキャリア分布の計算結果を、実施例1については図22A～23Bに、比較例1については図24A～25Bに示す。なお、上述したように、リブ幅は600 nm、リブ厚は220 nm、スラブ厚は90 nmである。図22A～25Bの縦と横の縮尺は異なる。

実施例1によれば、図22A～23Bに示すように、リブ上部のアンドープ領域においても、キャリア密度の変化が起こり、リブ全体にわたって大きなキャリア密度の変化が生じていることが分かる。また、比較例1の場合、図24A～25Bに示すように、逆バイアス印加時のキャリア密度の変化は、相対的に、リブの上端と下端において大きく、リブ中央部において小さいことが分かる。

[0111] <作製したデバイスの実測による比較>

実施形態1に係るデバイス（実施例2）を、図2Aに示す断面構造を有す

るように作製した。リブ幅が600 nmであり、リブ厚は220 nm、スラブ厚は95 nmである。

製造方法は、図4 A～4 Fに示すように、次の工程（1）～（6）を行うものである。

（1）SOI基板を用意し、その上部のSi層が220 nmとなるようにCMP研磨で基板を研磨する。

（2）N型領域が形成される領域をマスクで覆い、P型ドーパントとして、をドーズ量 $5 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、注入エネルギー40 eVにてホウ素（B）のインプラントを行い、スラブ厚に対応する高さ範囲のみがドーピングされるように、P型領域を形成する。

（3）P型領域を形成した領域をマスクで覆い、N型ドーパントとして、ドーズ量 $3 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 、注入エネルギー110 eVにてリン（P）のインプラントを行い、スラブ厚に対応する高さ範囲のみがドーピングされるように、N型領域を形成する。

（4）エッチングにより断面においてリブを有するコアを形成した後、スラブ部の上部に高濃度ドーピング領域を、ドーピングにより形成する。

（5）コアの上に、 SiO_2 をデポジションして上部クラッドを形成する。

（6）上部クラッドにコンタクトホールを形成した後、形成したコンタクトホールをスパッタによりアルミニウム（Al）で充填し、電極を形成する。

[0112] 実施例2では、（4）のエッチングによって、図19 Aに示すように、リブの上部にアンドープ領域が設けられるように、（2）及び（3）の注入エネルギーを調整した。

また、比較例2では、図19 Bに示すように、リブ上端までドーピングされるように、（2）及び（3）の注入エネルギーを調整した。

[0113] 作製したデバイスについて、DCバイアスを印加し、デバイスの位相変化量と導波路損失とを測定した。上述した（式6）及び（式7）に示すように、実効屈折率変化を調べる代わりに、単位長さ当たりの位相変化量を測定することで、位相変調の効率を考察することができる。

測定条件は、バイアス電圧 0 ～ -4 V、波長 1550 nm である。得られた測定値を導波路長で除算することにより、単位長さ当たりの位相変化量と導波路損失とを求めた。その結果を、表 5 に示す。

[0114] [表5]

単位長さ当たり	比較例 2	実施例 2
位相変化量	1.02 rad/mm	0.53 rad/mm
導波路損失	0.72 dB/mm	0.27 dB/mm

[0115] さらに、要求される位相変化量が π ラジアン のときに必要な導波路長、及び導波路損失を求めると、それぞれ表 6 のとおりになる。

[0116] [表6]

π シフト	比較例 2	実施例 2
導波路長	3.1 mm	6.0 mm
導波路損失	2.2 dB	1.6 dB

[0117] 表 6 に示す結果より、本実施例 2 に比べて、同じ位相変化量に対する導波路損失が低く、低損失化が可能であることが分かる。

産業上の利用可能性

[0118] 本発明の態様によれば、キャリア密度の変化による光の損失の変化量を低減し、また、挿入損失を低減することが可能な光学素子及びこれを用いたアップコンダクタ型光導波素子を提供できる。

符号の説明

[0119] 1…光学素子（光位相変調器等）

2…基板

3…下部クラッド

- 4…コア
- 5…上部クラッド
- 6…光導波路
- 7, 8…電極
- 10…リブ部
- 11…第一スラブ部
- 12…第二スラブ部
- 13, 13a, 13b…P型領域
- 14, 14a, 14b…N型領域
- 15…PN接合部
- 16…アンドープ領域
- 20…積層基板
- 21…単結晶半導体層
- 22, 24…マスク
- 23, 25…注入イオン
- 30…マッハツェンダ型光導波路素子（光変調器等）
- 31…入射部
- 32…分波部
- 33, 34…アーム
- 35…合波部
- 36…出射部
- 37…リブ部
- 38…スラブ部
- 39…矩形リブ変換部。

請求の範囲

- [請求項1] リブ部と、前記リブ部を挟んでその両側に位置し、かつ前記リブ部よりも厚みの薄い第一及び第二スラブ部と、から形成されたコアを有する光導波路を備える光学素子であって、
- 前記コアの、前記リブ部と前記第一及び第二スラブ部とは半導体単結晶により一体に形成され、
- 前記第一スラブ部は、P型にドーピングされたP型領域を有し、
- 前記第二スラブ部は、N型にドーピングされたN型領域を有し、
- 前記リブ部は、前記第一スラブ部に設けられたP型領域に接しているP型領域と、前記第二スラブ部に設けられたN型領域に接しているN型領域とを有し、
- 前記リブ部のP型領域とN型領域とが互いに接することによりPN接合部を構成し、
- 前記リブ部は、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記第一及び第二スラブ部よりも上方に位置する上端部を有し、
- 前記リブ部の上端部は、イントリンシック領域及び隣接する前記P型領域又はN型領域のドーパント濃度の $1/10$ 以下のドーパント濃度でドーピングされた低濃度ドーピング領域の一方から形成されるアンドープ領域を有する光学素子。
- [請求項2] 前記リブ部におけるP型領域とN型領域との境界が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記コアの下面に垂直である請求項1に記載の光学素子。
- [請求項3] 前記リブ部のP型領域は、前記第一スラブ部と同じ高さに位置し、
- 前記リブ部のN型領域は、前記第二スラブ部と同じ高さに位置する請求項1又は2に記載の光学素子。
- [請求項4] 前記リブ部のP型領域は、前記第一スラブ部の上面よりも高い位置まで延在し、
- 前記リブ部のN型領域は、前記第二スラブ部の上面よりも高い位置

まで延在している請求項 1 又は 2 に記載の光学素子。

[請求項5] 前記第一スラブ部の P 型領域及び前記リブ部の P 型領域で形成される全 P 型領域のドーパント濃度が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記 P N 接合部に向かって減少し、

前記第二スラブ部の N 型領域及び前記リブ部の N 型領域で形成される全 N 型領域のドーパント濃度が、前記光導波路の長手方向に垂直な断面において、前記 P N 接合部に向かって減少している請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の光学素子。

[請求項6] 前記全 P 型領域は、ドーパント濃度が異なる 2 以上の領域を有し、
前記全 N 型領域は、ドーパント濃度が異なる 2 以上の領域を有している請求項 5 に記載の光学素子。

[請求項7] 金属からなる第一電極及び第二電極をさらに備え、
前記第一スラブ部の P 型領域は、前記第一電極に接続され、前記第一スラブ部の P 型領域のドーピング濃度よりも高いドーピング濃度を有する P⁺領域を有し、

前記第二スラブ部の N 型領域は、前記第二電極に接続され、前記第二スラブ部の N 型領域のドーピング濃度よりも高いドーピング濃度を有する N⁺領域を有する請求項 1 ～ 6 のいずれかに記載の光学素子。

[請求項8] 前記第一電極及び前記第二電極が、前記光導波路の長手方向に沿って連続して形成された進行波型電極である請求項 7 に記載の光学素子。

[請求項9] 前記進行波型電極は、コプレーナ線路型電極、又はスロット線路型電極を構成する請求項 8 に記載の光学素子。

[請求項10] 2 つのアームが同一の基板上に集積されたマッハツェンダ型光導波路素子であって、

請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載の光学素子が、少なくとも前記 2 つのアームの一方の光導波路に用いられているマッハツェンダ型光導波路素子。

[請求項11] 2つのアームが同一の基板上に集積されたマッハツェンダ型光導波路素子であって、

請求項1～9のいずれかに記載の光学素子が、前記2つのアームの各光導波路に用いられ、

前記各光導波路に用いられた前記各光学素子の前記第一スラブ部が前記2つのアーム間に配されているか、又は、前記各光学素子の前記第二スラブ部が前記2つのアーム間に配されているマッハツェンダ型光導波路素子。

[請求項12] 前記光導波路は、その長手方向においてその始点と終点とが接続されてリング形状を形成している請求項1～6に記載の光学素子。