

明 細 書

発明の名称： 偏波変換素子

技術分野

[0001] 本発明は、基板上に作製される光導波路素子の構造に関し、特に偏波変換を目的とした素子である偏波変換素子に関する。

本願は、２０１３年６月２７日に日本に出願された特願２０１３－１３５４９２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、メトロ、アクセスといった光通信ネットワークでは信号速度の高速化、波長多重通信によるチャネル数の増加、といった対策が進められている。これに伴い、光通信に必要なシステムは複雑になり、システムの大型化や高額化、消費電力の増大といった課題を生じる。

[0003] 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に迫られている。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が、より一層の高速化や消費電力の低減の要請から、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。さらには、コンピュータのボード内、ＣＰＵ内と各レベルにおいても、光通信の導入が課題となっている。

[0004] 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導入を実現する技術として、従来より用いられてきた石英ＰＬＣによる光集積回路や、リチウムナイオベート等の強誘電体による高速動作デバイス等に加え、近年ではシリコン、ＩｎＰ、ＧａＡｓなどの高屈折率材料を用いた光デバイスが注目を集めるなど、基板型光導波路素子デバイスの研究開発が各所で進められている。

[0005] 媒質中の光の波長はその媒質の屈折率に反比例するため、屈折率が約３．

5 と高いシリコンでは、光導波路のコア幅などの寸法が小さくなる。また、シリカのような、シリコンに対して屈折率の大きく異なる媒質をクラッドとすることで、閉じ込めの強い光導波路となる。その特徴として曲がり半径を小さくとることができる。これらの理由から、光導波路を用いた光デバイスそのものの小型化が可能となり、同じ機能であればより小型に、同じ大きさであればより多くの機能を実現できる。また、シリコンが半導体材料であることを活かして、電氣的な制御が可能であり、光変調器を始めとした、特性可変のデバイスの実現が可能である（特許文献 1 参照）。

[0006] さらに、シリコンを用いた光デバイスの製造に関する技術・装置は、従来の CPU、メモリ等の半導体デバイス製造で使用する半導体プロセスに関する技術・装置と共通要素が多い。量産により低コストな光デバイスの実現が期待できる。従来の半導体デバイスと光デバイスを同一基板上で集積することにより、基板上で半導体デバイスと光デバイスとを接続することができる。これまではデバイス間の接続にメタル配線上の電気信号が用いられてきたが、今後は信号の一部を光で置き換えることにより、さらなる機器の高速化、低消費電力化の可能性がある。

[0007] このような基板型光部品で使用される平面型光導波路は、円筒対称な光ファイバとは異なり、導波路の断面方向において、方位角方向に非対称性を持つ。これにより、異なる偏向方向の導波光（偏波）に対して異なる特性をもつ。平面型光導波路において、今便宜上その導波モードの主電界が基板に対して水平方向であるものを TE モード、また主電界が基板に対して垂直方向である導波モードを TM モードと表すとする。平面型光導波路の垂直方向の構造及び水平方向の構造に違いがある場合は、二つのモードは異なる実効屈折率を持つ。このため、平面基板上で両偏波に対して同一の特性を持つデバイスの作製は困難である。そこで、偏波ダイバーシティと呼ばれる二つのモードを回転させる構造が用いられる。この偏波ダイバーシティにおいては、TE と TM 間で偏波の変換を行う偏波ローテータが必要となる。

また、近年の高速光通信方式では光ファイバ伝送時に直交する二つの偏波

に異なる信号を乗せる偏波多重技術が行われており、この送受信デバイスにおいて偏波を分離、合波又は変換させる要素技術が必要である。

このような中、基板集積型の偏波変換素子として、以下のようなものが検討されてきた。

[0008] 非特許文献1に、シリコン基板上に作製した偏波変換素子を示す。この文献では、シリコンの導波路に対して、屈折率の異なる窒化シリコン (Si_3N_4) を用いて、導波路上部に構造を形成している。しかしながら、 Si_3N_4 を用いたプロセスが必要となり、導波路形成が困難である。また、 Si_3N_4 を付与する部分において、理想的には Si_3N_4 の先端を限りなく細く作製することが望ましいが、実際の量産用のプロセスでは、100nm程度が限度のため、この部分でモード不整合により損失が生じる。また、先端をさらに細く形成できるEBプロセスを用いることもできるが、製造コストの上昇を招く。

一方、上記非特許文献1と同様の偏波回転プロセスをシリコンのみで実現した例として非特許文献2が挙げられる。しかしながら、課題として上記同様に接続部においてテーパ状の先端部が100nm程度の幅になる場合、モード不整合による損失が生じる。

[0009] 非特許文献3に示すような、矩形導波路にL字型導波路を接続した構造が挙げられる。これは、もともとの導波路に対して、偏波軸が傾いた導波路を接続することで、二つのモードの実効屈折率差を利用して偏波を回転する素子である。しかしながら、この接続部分において損失が生じ、また実効屈折率が波長に依存するため、波長依存性が生じるという課題がある。

また、非特許文献4には、InPを用いた例として、同様にリブ型導波路を変形させることで、軸が傾いた導波路を接続する手法が挙げられている。リブ型導波路から、TE/TMが混在するL字型導波路に適切な長さに設計し、低損失に両方のモードを励起することで低損失な偏波回転素子を実現している。しかしながら、両方のモードを励起するためのtaper部の製造トレランスと、非特許文献3同様、波長依存性が生じるという課題がある。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：国際公開第00／58776号

非特許文献

[0011] 非特許文献1：L. Chen, C. R. Doerr, and Y.-K. Chen, “Compact polarization rotator on silicon for polarization-diversified circuits,” *Optics letters*, Vol. 36, Issue 4, pp. 469-471 (2011)

非特許文献2：J. Zhang, M. Yu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “Silicon-Waveguide-Based Mode Evolution Polarization Rotator,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.16, Issue 1, pp.53-60 (2010)

非特許文献3：山内潤治、島田尚亨、中村正志、若林佑、中野久松、“L字及び傾斜導波路型偏波変換器の反射損”、電子情報通信学会総合大会講演論文集、2011年、C-3-52

非特許文献4：C. Alonso-Ramos, S. Romero-Garcia, A. Ortega-Monux, I. Molina-Fernandez, R. Zhang, H. G. Bach, and M. Schell, “Polarization rotator for InP rib waveguide,” *Optics Letters*, Vol. 37, Issue 3, pp. 335-337 (2012)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 以上のように、従来は、容易な製造プロセスと、低い波長依存性を両立した偏波変換素子の実現が課題であった。

[0013] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、容易に製造することが可能な偏波変換素子を提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0014] 前記課題を解決するため、本発明は、基板上に形成された光導波路が、順に、第1導波部と偏波回転部と第2導波部を持ち、前記第1導波部は、その

断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含み、その最も実効屈折率の高いTEモードは、TMモードよりも実効屈折率が高く、前記第2導波部は、その断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含み、TMモードは、その最も実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高く、前記第1導波部及び前記第2導波部は互いに導波路構造の高さが等しく、前記偏波回転部の導波路構造は、前記基板からの高さ方向に少なくとも2通りの高さを有し、その導波路構造は、前記第1導波部及び前記第2導波部の導波路構造と同じ高さの厚板部と、前記厚板部より厚みの低い薄板部とを有し、前記偏波回転部の導波路構造は、断面が幅方向に非対称で、かつ高さ方向にも非対称となる部分を有し、前記第1導波部の導波路構造と前記偏波回転部の厚板部と前記第2導波部の導波路構造との間で、同じ高さの導波路構造が連続して存在することを特徴とする偏波変換素子を提供する。

[0015] 前記第1導波部と前記偏波回転部と前記第2導波部との間で、導波方向に沿って、前記導波路構造の幅が不連続点を持たず連続的に変化することが好ましい。

前記第1導波部の前記導波路構造が、その断面において幅方向が高さ方向よりも広い矩形状であることが好ましい。

前記第1導波部の前記導波路構造が、厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であることが好ましい。

前記偏波回転部の厚板部の高さは前記リブ部の高さと同しく、前記薄板部が前記スラブ部の高さと同しいことが好ましい。

前記第2導波部の前記導波路構造が、その断面において幅方向が高さ方向よりも狭い矩形状であることが好ましい。

前記第2導波部の前記導波路構造が、一定の幅で直線状に延びている断面が矩形状の部分を、前記厚板部に連続して有することが好ましい。

前記第2導波部の前記導波路構造が、厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であることが好ましい。

[0016] 前記第1導波部の断面における導波光の固有モードが、1つのTEモードと1つのTMモードを含むか、又は、少なくとも2つのTEモードと、2番目に実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高い1つのTMモードを含むことが好ましい。

[0017] 前記第2導波部は、前記偏波回転部から離れる方向に従って導波路構造の幅が拡大するモード拡大部に接続されていることが好ましい。

前記第1導波部及び前記第2導波部のいずれか一方又は両方は、前記偏波回転部から離れる方向に従って導波路構造の幅が細くなるテーパ形状のモード変換部に接続されていることが好ましい。

前記偏波回転部の厚板部の下面と薄板部の下面が、前記基板から同じ高さにあることが好ましい。

前記偏波回転部の厚板部の上面と薄板部の上面が、前記基板から同じ高さにあることが好ましい。

前記導波路構造がコアであることが好ましい。

前記導波路構造が、コアと、前記コア上に積層されて前記コアの幅以下の幅を有する上部クラッドとからなることが好ましい。

また、本発明は、前記偏波変換素子を備えたDP-QPSK変調器を提供する。

発明の効果

[0018] 本発明によれば、コア等の導波路構造が先端部の細いテーパ状の部分の有することなく、容易に製造することが可能な構造となる。

図面の簡単な説明

[0019] [図1]本発明の偏波変換素子の第1実施形態の一例を示す斜視図である。

[図2]図1の偏波変換素子の上面図である。

[図3]それぞれ図2の(a)A-A線、(b)B-B線、(c)C-C線、(d)D-D線に沿う断面図である。

[図4]図1の偏波変換素子の前後を矩形導波路に接続した構成の上面図である。

[図5]本発明の偏波変換素子の第2実施形態の一例を示す上面図である。

[図6]本発明の偏波変換素子の第2実施形態の別の一例を示す上面図である。

[図7]本発明の偏波変換素子の第3実施形態の一例を示す（a）斜視図、（b）L1とL2の境界部における断面図である。

[図8]本発明の偏波変換素子の第4実施形態の一例を示す上面図である。

[図9]本発明の偏波変換素子の第5実施形態の一例を示す（a）上面図、（b）R-R線に沿う断面図である。

[図10]本発明の偏波変換素子の第6実施形態の一例を示す（a）上面図、（b）S-S線に沿う断面図である。

[図11]本発明の偏波変換素子の第7実施形態の一例を示す上面図である。

[図12]本発明の偏波変換素子の第8実施形態の一例を示す上面図である。

[図13]（a）厚板部の形成に使用するマスクパターンの一例を示す上面図、（b）薄板部の形成に使用するマスクパターンの一例を示す上面図、（c）二つのマスクパターンの重ね合わせを説明する上面図である。

[図14]マスクずれを説明する上面図である。

[図15]本発明の偏波変換素子の第9実施形態の一例を示す断面図である。

[図16]本発明の偏波変換素子の第10実施形態の一例を示す（a）上面図、（b）A1-A1線に沿う断面図、（c）B1-B1線に沿う断面図、（d）C1-C1線に沿う断面図、（e）D1-D1線に沿う断面図、（f）E1-E1線に沿う断面図、（g）F1-F1線に沿う断面図である。

[図17]本発明の偏波変換素子の第10実施形態の別の一例を示す上面図である。

[図18]本発明の偏波変換素子の第10実施形態の別の一例を示す（a）上面図、（b）A2-A2線に沿う断面図、（c）B2-B2線に沿う断面図、（d）C2-C2線に沿う断面図、（e）D2-D2線に沿う断面図、（f）E2-E2線に沿う断面図である。

[図19]本発明の偏波変換素子の第11実施形態の一例を示す（a）上面図、（b）A3-A3線に沿う断面図、（c）B3-B3線に沿う断面図、（d）

）C3－C3線に沿う断面図、（e）D3－D3線に沿う断面図である。

[図20]（a）～（d）は実施例1における断面Aの電界分布を示す図である。

[図21]（a）～（d）は実施例1における断面Bの電界分布を示す図である。

[図22]（a）は実施例1における断面Aから断面Bでの実効屈折率変化を示すグラフであり、（b）はその断面構造の説明図である。

[図23]（a）～（d）は実施例1における断面Cの電界分布を示す図である。

[図24]（a）は実施例1における断面Bから断面Cでの実効屈折率変化を示すグラフであり、（b）はその断面構造の説明図であり、（c）は実施例1における断面Bから断面Cへ構造が変化する際の各モードの光強度における、E_y成分の寄与する割合を示すグラフである。

[図25]（a）は実施例1における断面Cから断面Dでの実効屈折率変化を示すグラフであり、（b）はその断面構造の説明図である。

[図26]実施例1における伝搬の様子を示す図面であり、（a）は電界のE_x成分を、（b）は電界のE_y成分を表す図である。

[図27]実施例2のシミュレーション結果を示すグラフである。

[図28]実施例2で製作した光導波路の結合パワーの測定結果を示すグラフである。

[図29]実施例3の光導波路素子を示す（a）上面図、（b）A4－A4線に沿う断面図、（c）B4－B4線に沿う断面図、（d）C4－C4線に沿う断面図、（e）D4－D4線に沿う断面図である。

[図30]実施例4の光導波路素子を示す（a）上面図、（b）A5－A5線に沿う断面図、（c）B5－B5線に沿う断面図、（d）C5－C5線に沿う断面図、（e）D5－D5線に沿う断面図である。

発明を実施するための形態

[0020] 以下、好適な実施の形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。

図1～3に、本発明の偏波変換素子の第1実施形態の一例を示す。図1はコアの斜視図、図2はコアの上面図、図3(a)～(d)は、それぞれ図2のA-A線、B-B線、C-C線、D-D線に沿う、クラッドを含む光導波路の断面図である。便宜上、図2のA～Dに対応して、図3(a)～(d)のそれぞれの断面を、断面A、断面B、断面C、断面Dという。図1～2では、クラッドの図示は省略されている。断面図は、導波方向に垂直な面上の断面を示す。

[0021] 偏波変換素子10は、基板17(図3参照)上に形成された光導波路からなる。光導波路は、図3(a)～(c)に示すように、基板17上に形成された下部クラッド16bと、その上に形成されたコア11c、12cと、下部クラッド16b及びコアの上に形成された上部クラッド16aを有する。コアは例えばシリコン(Si)からなり、クラッド(上部クラッド16a及び下部クラッド16b)は例えばシリカ(SiO₂)からなる。図3では、光導波路の幅方向の一部を示しており、クラッドが、さらに横方向に広がっていてもよい。

[0022] 図1に示す偏波変換素子10の光導波路構造は、主に3つの部位に分かれている。それらは、順に、図3(a)に示す第1導波部11と、図3(b)に示す偏波回転部13と、図3(c)に示す第2導波部12である。導波方向は、第1導波部11から偏波回転部13を経て第2導波部12に、あるいは、第2導波部12から偏波回転部13を経て第1導波部11に向かう方向である。

[0023] 第1導波部11は、その断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含んでいる。第1導波部11のコア11cは、導波モードのうち、実効屈折率の高い順にTEモード、TMモードと、少なくとも2つのモードが存在する構造である。つまり、ある程度幅W1を広げると、TEの高次のモードが生じるが、この高次のモードの実効屈折率が基本TMモードよりも実効屈折率の低い限り問題ない。そのため、コア11cの幅W1(図2参照)が高さH1(図1参照)よりも広いことが

好ましい。

第1導波部11の断面における導波光の固有モードが、1つのTEモードと1つのTMモードを含む場合は、そのTEモードは、TMモードよりも実効屈折率が高ければよい。

第1導波部11の断面における導波光の固有モードが、少なくとも2つのTEモードと、1つのTMモードを含む場合は、その最も実効屈折率の高いTEモードは、TMモードよりも実効屈折率が高く、そのTMモードは、2番目に実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高ければよい。

第1導波部11は、図1や図3(a)では、コア11cの断面が矩形状である矩形導波路からなるが、必ずしもこれに限定されない。第1導波部は、矩形導波路、リブ型導波路、直線導波路、曲げ導波路、その他、所望の形状を有する種々の導波路から構成することができ、例えば、矩形導波路とリブ型導波路を長手方向の異なる区間に用いるなど、2種以上の導波路の組み合わせとしても構成可能である。第1導波部が矩形導波路からなる部分においては、コアの幅がコアの高さよりも広いことが好ましい。

[0024] 第2導波部12は、その断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含んでいる。第2導波部12のコア12cは、導波モードのうち、実効屈折率の高い順にTMモード、TEモードと、少なくとも2つのモードが存在する構造である。そのため、コア12cの幅W2（図2参照）が高さH1（図1参照）よりも狭いことが好ましい。

第2導波部12の断面における導波光の固有モードが、1つのTEモードと1つのTMモードを含む場合は、そのTMモードは、モードよりも実効屈折率が高ければよい。

第2導波部12の断面における導波光の固有モードが、少なくとも2つのTEモードと、1つのTMモードを含む場合は、TMモードは、その最も実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高ければよい。

第2導波部12は、図3(c)では、コア12cの断面が矩形状である矩

形導波路からなるが、必ずしもこれに限定されない。第2導波部は、矩形導波路、リブ型導波路、直線導波路、曲げ導波路、その他、所望の形状を有する種々の導波路から構成することができ、例えば、矩形導波路とリブ型導波路を長手方向の異なる区間に用いるなど、2種以上の導波路の組み合わせとしても構成可能である。第2導波部が矩形導波路からなる部分においては、コアの幅がコアの高さよりも狭いことが好ましい。

[0025] 偏波回転部13においては、導波路構造のうち、コアは図3(b)に示すように基板17からの高さ方向に少なくとも2通りの高さを有し、階段状の構成をとる。偏波回転部13のコアは、厚板部14と、厚板部14より厚みの低い薄板部15を有する。図1及び図3(a)～(c)に示すように、第1導波部11のコア11cと第2導波部12のコア12cは高さH1が等しく、厚板部14の高さH1はコア11c、12cの高さH1に等しい。図2に示すように、薄板部15は厚板部14の片側にあり、断面Bのコア断面(図3(b)参照)が幅方向に非対称となっている。薄板部15の高さH2は、厚板部14の高さH1より低い。さらに、薄板部15が厚板部14の下段に存在することにより、断面Bのコア断面が高さ方向にも非対称となっている。

[0026] 第1導波部11と第2導波部12との間で、コアの断面構造は連続的に変化する。コアの幅は、導波方向に沿って、不連続点を持たず、厚板部14の幅及び薄板部15の幅は、それぞれ、連続的に変化する。本実施形態の場合、図1及び図2に示すように、区間L1で厚板部14の幅が連続的に変化し、区間L2で薄板部15の幅が連続的に変化する。区間L1で厚板部14と薄板部15を合わせたコア全体の幅W1は一定であり、区間L2で厚板部14の幅W2は一定である。断面Bにおける薄板部15の幅W3は、 $W1 - W2$ の差に等しい。

[0027] コアの高さについては、第1導波部11のコア11cと偏波回転部13の厚板部14と第2導波部12のコア12cの間で、コアが同じ高さのまま連続して存在する。すなわち、コア11c、12cの上面11a、12aと厚

板部 14 の上面 14 a が同一平面に含まれ、コア 11 c, 12 c の下面 11 b, 12 b と厚板部 14 の下面 14 b も同一平面に含まれる。

[0028] 本実施形態の偏波変換素子 10 の場合、図 1 の区間 L3 ではコアの幅のみが連続的に変化している。すなわち、第 2 導波部 12 が、偏波回転部 13 から離れる方向に従ってコア 18 c の幅が拡大するモード拡大部 18 に接続されている。図 3 (d) に示す断面 D の構造は、図 3 (a) の断面 A と等しい形状にすることができる。コア 18 c の断面は矩形状である。モード拡大部 18 では、コア 18 c の高さは H1 のまま一定であり、コア 18 c の上面 18 a 及び下面 18 b は、それぞれ第 2 導波部 12 のコア 12 c の上面 12 a 及び下面 12 b と同一平面に含まれている。

[0029] 本実施形態の偏波変換素子 10 は、上述の構造を有することにより、コアの形状を変化させるのみで、偏波を回転すること、すなわち TE モードと TM モードを入れ替えることが可能となる。この原理を次に説明する。

[0030] まず、第 1 導波部 11 の断面 A においては、すでに説明したように、TE モードと TM モードがこの実効屈折率の高い順番に並んでいる。この状態では、それぞれのモードの各主電界は高い割合で垂直方向及び水平方向に存在する（例えば実施例 1 の図 20 参照）。上述したように、TE モードの主電界は垂直方向、TM モードの主電界は水平方向である。一方、偏波回転部 13 の断面 B における 2 つのモードは TE 成分と TM 成分が混ざったモードとなる（例えば実施例 1 の図 21 参照）。

[0031] 断面 A から断面 B へ構造が変化する際の各モードの実効屈折率は、例えば実施例 1 の図 22 (a) に示すように、交差することなく、互いに離れている。従って、十分緩やかに変化（断熱変化）した場合には、断面 A における最も実効屈折率が高いモード（TE モード）が断面 B における最も実効屈折率が高いモードに、また断面 A における 2 番目のモードは断面 B における 2 番目のモードに結合する。

[0032] 次に、第 2 導波部 12 の断面 C においては、最も実効屈折率が高いモードが TM モード、2 番目が TE モードとなっている（例えば実施例 1 の図 23

参照)。しかし、断面Bから断面Cに遷移する過程における実効屈折率変化は、実施例1の図24(a)に示すように、実効屈折率が交差することなく、互いに離れている。したがって、断面Bにおける最も実効屈折率が高いモードが断面Cにおける最も実効屈折率が高いモード(TMモード)に、また断面Bにおける2番目のモードは断面Cにおける2番目のモードに結合する。

このため、断面Aから断面Cへ光が伝搬する際には、断面AでのTEモードが断面CにおいてはTMモードへと変換される。つまり、偏波回転部13は、偏波ローテータ(偏波回転素子)として機能する。

[0033] 図24(c)には、断面Bから断面Cへ構造が変化する際の各モードの光強度における、 E_y 成分の寄与する割合 C_y を示す。 C_y の定義を次の式に示す。

[0034] [数1]

$$C_y = \frac{\epsilon_0 v_c}{4} \int^{\infty} n(s) E_y^2(s) ds / \int^{\infty} P_z(s) ds$$

[0035] ただし、 ϵ_0 は誘電率、 v_c は真空中の光の伝搬速度、 n は比屈折率、 s は断面上の積分範囲(無限遠まで)である各点を表す変数、 E_y は E_y 成分、 P_z はポインティングベクトルを示す。すなわち、TEモードでは通常 E_x モードが主電界であり、光強度は E_x 成分の寄与する割合が高い。すなわち E_y 成分の寄与する割合が低くなる、一方、TMモードでは E_y 成分の寄与が支配的である。断面Bから断面Cに遷移する過程において電界の主成分が入れ替わっており、断面Cにおいては、1番目がTMモード、2番目がTEモードとなることが分かる。

[0036] モード拡大部18では、矩形導波路の幅が広がり、図3(c)の断面Cでは高さが幅より大きい構造であったのが、図3(d)の断面Dでは高さが幅より小さい構造となっている。この場合、実効屈折率の変化は、コアの高さと幅が等しく、上下左右に構造が対称となった位置で、TEモードとTMモ

ードの実効屈折率が一致する（例えば実施例１の図２５参照）。

モード拡大部１８においては、モード拡大部の光の伝搬方向に対する全ての垂直面において、ＴＥモード及びＴＭモードはそれぞれ異なる対称性を持つ。すなわち、その垂直面においては、ＴＥモードはそのＥ×成分はｘ軸方向に対称であり、またＴＭモードのＥ×成分は反対称である。導波路中の偏波の回転はこのモード間の結合により説明することができるが、この両者のモード間の結合は、対称性が逆であるために生じない。実際の製造時には、製造上のばらつきのために、対称性が崩れる可能性があるが、わずかにずれただけでは、モード間の結合は弱く、数十μmの範囲では断熱変化とならない。このため、断面Ｃから断面Ｄに向かってＴＥモードとＴＭモードの実効屈折率変化曲線が交差していても、それぞれのモードが交わることはなく、ＴＥモードはＴＥモードに、ＴＭモードはＴＭモードへと遷移することになる。従って、モード拡大部１８では、各伝搬モードの実効屈折率の順番が、ＴＥとＴＭで入れ替わることになる。

[0037] 以上のように、偏波回転部１３を含む区間Ｌ１及びＬ２の導波路では、断面構造の上下左右（高さ方向と幅方向）に非対称性を生じることで、ＴＥモードからＴＭモードへの変化を誘起している。原理的にわずかでも非対称性が生じれば、十分導波路の長さを取り断熱変換を行うことは可能であるが、現実的には限られた長さで変換を行う必要がある。そこで、本実施形態では、実効屈折率で明確な分離が生じるように、偏波回転部１３の階段形状により非対称性を誘起している。

本構造の偏波回転素子では、ＴＥの０次モード（実効屈折率が最も高いモード）とＴＭの０次モードの反対称性を考慮して、両者の変換を行ったが、後述するように、ＴＥ_{2n}モード（ｎは０以上の整数）とＴＭの０次モードの間で変換を行うことも可能である。

[0038] 本構造をシリコン導波路に適用する場合、導波路の製造に用いる基板としてＳｉ－ＳｉＯ₂－ＳｉからなるＳＯＩ（Silicon on insulator）基板をもとに形成することができる。中間のＳｉＯ₂層を下部クラッドとし、上部のＳｉ

層をコアとして用いる。S i 層は、高さが異なる段状の形状を有しており、深さ方向へ途中までエッチングすることで形成することができる。シリコンコア上部の上部クラッドは、シリコンコアの形成後にデポジションを行う。

本実施形態の偏波変換素子 10 を導波路に組み込む場合、図 4 に示すように、第 1 導波部 11 及び第 2 導波部 12 のそれぞれに、導波路 1, 2 を接続することができる。導波路 1, 2 の形状は任意であるが、コアの幅及び高さが一定の矩形導波路であってもよい。

[0039] 図 5 及び図 6 に、それぞれ本発明の偏波変換素子の第 2 実施形態の一例を示す。

図 1 ～ 4 に示す第 1 実施形態の偏波変換素子 10 では、断面 A と断面 C の中間でコアの高さを 2 段として上下に非対称性を生じ、かつその下段の薄板部 15 を厚板部 14 の片側に配置して上下左右に非対称性を生じることで、偏波変換を行っている。このとき、第 1 実施形態では、便宜上、断面 B を境界として区間 L1 と区間 L2 に分け、階段形状のコアの上段の幅（厚板部 14 の幅）と下段の幅（厚板部 14 と薄板部 15 を合わせた幅）を独立に変化させた。

しかし、この階段の上段と下段の幅を独立に変化させることは本質的ではなく、例えば、図 5 の偏波変換素子 10 A のように導波方向に沿って上段と下段の幅を同時に変化させることも可能である。さらに、コア側面の形状が直線である必要はなく図 6 の偏波変換素子 10 B のように曲線でもよい。このように、上段のコア幅が変化する区間と下段のコア幅が変化する区間を、偏波変換素子の導波方向の一部又は全部において重複させることにより、さらに導波路の短縮化、及び偏波消光比の向上を図ることができる。

[0040] 図 7 に、本発明の偏波変換素子の第 3 実施形態の一例を示す。第 1 実施形態及び第 2 実施形態では、コアの下段が上段よりも幅が広がっている。これは、矩形導波路に対してエッチングを行い形成する場合には有用である。図 3 (b) では、厚板部 14 の下面 14 b と薄板部 15 の下面 15 b は基板 17 から同じ高さにあり、偏波回転部 13 の下面 13 b が同一平面にある。

一方、図7に示すように、コアの上段の幅がコアの下段の幅より大きく形成することも可能である。例えば、シリコン導波路では、ポリシリコンを使ってシリコンを堆積させることで、上部の幅の広い導波路を形成することが可能である。図7(b)では、厚板部14の上面14aと薄板部15の上面15aは基板17から同じ高さにあり、偏波回転部13の上面13aが同一平面にある。

[0041] 図7(a)では、図1及び図2の第1実施形態と同様に、区間L3にモード拡大部18を設けたが、偏波変換素子を得るには区間L1及びL2があれば十分である。図4と同様に、前後に導波路1, 2を設けてもよい。また、図7(a)の偏波変換素子は、導波方向に沿って、コアの下段の幅を変化させる区間L1とコアの上段の幅を変化させる区間L2に分けているが、第2実施形態と同様に、上段と下段を同時に変化させることもできる。

[0042] 図8に、本発明の偏波変換素子の第4実施形態の一例を示す。

第1～第3の実施形態では、進行方向（導波方向）に沿ったコア幅の中心位置の変化について特に言及していないが、図では、厚板部14のうち薄板部15がない方の側部を直線状にしている。本発明は特にこれに限定されるものではなく、例えば、図8の偏波変換素子10Cに示すように、コア幅の中央位置がずれてもよい。

[0043] 図9(a)及び(b)に、本発明の偏波変換素子の第5実施形態の一例を示す。

第1実施形態（図1～4）では、第1導波部11及び導波路1が矩形導波路であるが、これに限らず、リブ型形状から連続的にコア断面形状を変化させてもよい。この構成により、リブ型光導波路から矩形導波路への変換と同時に偏波回転を行うことができる。また、図9に示すように、薄板部15は厚板部14に対して片方のみに位置している必要はなく、幅方向の非対称性が残れば導波路の反対位置に存在していてもよい。この偏波変換素子10Dでは、第1導波部11のコアが、厚みの厚いリブ部11rと薄いスラブ部11s, 11sを持つリブ型構造である。この場合、偏波回転部13の厚板部

14の高さはリブ部11rの高さと等しく、薄板部15がスラブ部11sの高さと等しいことが好ましい。第1導波部11に接続されるリブ型光導波路においては、リブ部11rの両側の各スラブ部11s、11sの幅が等しくてもよい。

本構造はモード発展型の偏波ローテータであり、アスクずれ等から製造誤差が生じた場合においても、特性劣化は低い。図9では、第1導波部11のコアが厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であるが、第2導波部のコアが厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であってもよい。

リブ型導波路は、非特許文献4に記されるようなI n P系材料を用いた光導波路デバイスにおいても多用される。本変換素子は、シリコン導波路のみならず、I n PやG a A s 等の材料系における高屈折率差導波路に対しても適用することが可能である(例えば、後述する第10実施形態、第11実施形態を参照)。

[0044] 図10に、本発明の偏波変換素子の第6実施形態の一例を示す。

第1実施形態(図4)では、導波路は第2導波部12からモード拡大部18へと再び幅を広げて、元の(反対側の矩形導波路1と同一の断面構造を有する)矩形導波路2へと続くが、この矩形導波路2への接続は必須ではない。

図10(a)に示すように、偏波ローテータの第2導波部12の先に、さらに幅の細くなるテーパー形状のモード変換部19を付けることで、偏波回転とモード変換を同時に行うことが可能である。モード変換部19は、導波方向に沿って、偏波回転部13から離れる方向に従ってコアの幅が細くなるテーパー形状である。図10(a)では、第2導波部12にモード変換部19を接続しているが、第1導波部11にモード変換部19を接続してもよく、第1導波部11及び第2導波部12の両方にモード変換部19を接続してもよい。図10(b)に示すように、モード変換部19の周囲にはクラッド16が設けられる。

例えば、非特許文献 1 では、シリコン導波路とコアの実効屈折率の低い SiO_2 導波路の接続を行っており、周囲を SiO_2 で囲む構造をとることにより、 SiO_2 導波路へ接続が可能である。また、テーパ形状の導波路はモードフィールドコンバータとして多用されている。本発明の偏波変換素子は、各導波路に対する変換部と組み合わせて使用することが可能である。

[0045] 図 11 に、本発明の偏波変換素子の第 7 実施形態の一例を示す。

現在利用の進んでいる DP-QPSK (Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying) 変調方式に代表される偏波多重に対応した変調器として利用した構成例を図 11 に示す。この DP-QPSK 変調器 20 は、入力部 21 から入力した TE モードの信号を 1×2 カプラ 22 で 2 つに分岐し、それぞれを IQ 変調器 23 により変調させる。2 つに分岐した TE モードの信号の一方を偏波ローテータ 24 により TM モードに変換する。偏波コンバイナ 25 により、TE モードと TM モードを同一の導波路上に合成し、出力部 26 から出力する。

本発明の偏波変換素子を偏波ローテータ 24 として用いて、偏波多重方式に対応した光変調器を同一基板上に構成することが可能である。特に、本構造により、リブ型形状を持つ基板型光変調器に対して追加プロセスを用いることなく、偏波ローテータを集積することができる。

[0046] 図 12 に、本発明の偏波変換素子の第 8 実施形態の一例を示す。

本実施形態は、製造時のマスクずれを考慮した構造の一例である。本実施形態では、偏波回転部 13 とモード拡大部 18 との間において、第 2 導波部 12 が、図 3 (c) に示すように、一定のコア幅で直線状に延びている矩形導波路 27 を有する。この矩形導波路 27 は、導波路の長手方向で、偏波回転部 13 の厚板部 14 に連続している。つまり、本構造は、偏波回転部 13 の先端で薄板部 15 の幅が 0 となる箇所から先に、厚板部 14 と同じ高さで、コア（導波路構造）の断面が矩形状の矩形導波路 27 として、コア（導波路構造）の幅が一定の直線導波路が接続されている。この矩形導波路 27 は、第 2 導波部 12 の全体に設けてもよく、一部に設けてもよい。

[0047] 一般に、シリコンのリブ型導波路は、厚みの厚い部分と、薄い部分を製造する二度のパターニング工程により形成される。シリコン導波路の量産プロセスでは、一般に、導波路の形成がフォトリソグラフィによるパターン転写と、エッチングによるパターン形成により行われる。このとき、フォトリソグラフィに使用するマスクのアラインメントの精度により、パターニング工程ごとに数nmから数十nm程度のずれが生じることがある。二度のパターニング工程により導波路を製作する場合、この各工程で使用するマスクの間にずれ（マスクずれ）が生じることになる。

[0048] このマスクずれにより、第2導波部12の導波路構造が矩形形状にならない場合がある。この場合として、例えば、図1及び図2において、薄板部15の一部がモード拡大部18の側面まで形成された場合が挙げられる。この際、第1導波部11から入射したTEモードが、偏波回転部13の先端まで達した際に十分にTMモードまで回転せず、モード拡大部18において、TEモードに結合する可能性がある。十分に偏波が回転するかどうかの境界条件は、導波路形状により異なるが、一般に、偏波回転部13の先端における矩形形状のコア寸法の縦と横の比が小さいほど、薄板部15が第2導波部12に残っていたときに、偏波の回転が不十分になる。

このマスクずれを補償する（マスクずれがあっても特性を維持する）ために、図12に示すように、偏波回転部13のテーパ先端に、矩形導波路27の導波路幅が一定の部分（区間L4の部分）を配置することが可能である。矩形導波路27は、第2導波部12と同一の断面構造を有する。

[0049] 図13（a）に、厚板部14の形成に使用するマスクパターン28の一例を示す。このマスクパターン28は、厚板部14のパターンとともに、第2導波部12のパターン（さらに所望ならモード拡大部18等のパターン）を含むことができる。また、図13（b）に、薄板部15の形成に使用するマスクパターン29の一例を示す。このマスクパターン29は、薄板部15のパターンを含むが、第2導波部12やモード拡大部18のパターンを含んでいない。パターニングの際、二つのマスクパターン28、29が重なる部分

については、マスクパターン 28 に従って厚みが厚く形成されとする。この場合、図 13 (c) に示すように二つのマスクパターン 28, 29 を重ね合わせると、図 12 に示す導波路構造が形成される。偏波変換素子においては、一般に、偏波の回転が断熱変化となるように、導波路の長手方向が、導波路の幅方向よりも大きい。従って、マスクずれに際しては、幅方向のずれによる影響が大きい。図 12 に示す構造では、図 14 の破線または鎖線に示すように、幅方向のずれを含むマスクずれが生じた場合においても、光の導波方向に対して急な形状変化が生じず、連続的な変化を保っている。また、偏波回転部 13 の先端部で薄板部 15 が残ることなく、矩形導波路 27 まで変化し、確実に偏波変換が行われる素子を製作することができる。

[0050] 図 15 に、本発明の偏波変換素子の第 9 実施形態の一例を示す。上記各実施形態の偏波変換素子は、導波路幅を細く絞る構造を用いるため、導波路コア断面が波長に対して小さいと、導波路幅の細い部分（特に、偏波回転部 13 の先端や第 2 導波部 12）において、光の閉じ込めが弱くなり、光導波路を伝搬する光は、その進行方向に垂直な面における導波路周辺部へ、光の分布が広がる。この際、コアから基板までのクラッド（下部クラッド）の厚みが少ない場合には、基板に光が漏洩するおそれがある。これを回避するために、例えば参考文献 1（Qing Fang, Tsung-Yang Liow, Jun Feng Song, Chee Wei Tan, Ming Bin Yu, Guo Qiang Lo, and Dim-Lee Kwong, “Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for silicon photonics,” Optics Express, Vol. 18, Issue 8, pp. 7763–7769 (2010)）に示すように、Suspended 構造を用いてもよい。これにより、基板への光の漏洩を低減し、より低損失な偏波変換素子を実現することができる。

[0051] 図 15 に示す Suspended 構造において、コア 31 の周囲を囲むクラッド 32 は、コア 31 の幅方向の両側で、スリット状の間隙 34, 34 を有する。さらに、コア 31 の下方で、クラッド 32 と基板 33 との間にトレンチ 35 が形成されている。間隙 34, 34 とトレンチ 35 は、クラッド 32 の上方と同様に、空気（あるいは窒素ガスなどのガス）で満たされている。基板 33

とクラッド32との間に、空気等の、屈折率の低い媒体が満たされているので、クラッド32から基板33への光の漏洩を低減することができる。なお、図13において、コア31及びその周囲を囲むクラッド32は、長手方向の前後に間隙34、34やトレンチ35の存在しない部分を設けることにより、基板33上に支持される。

[0052] 図16に、本発明の偏波変換素子の第10実施形態の一例を示す。この偏波変換素子は、InP基板上にInGaAsPからなるコアを配置した光導波路から構成されている。コアの下方のInP基板が下部クラッドであり、コアの上部及び両側は、SiO₂の上部クラッドに囲まれている。図16(b)～(g)の断面図において、InGaAsPコアの下面から左右に延びる水平線は、InPクラッドとSiO₂クラッドの境界を示す。

[0053] A1-A1線からB1-B1線の間で、リブ型導波路46の厚みの薄いスラブ部46sの幅を減少させて、厚みの厚いリブ部46rが偏波変換素子40の第1導波部41に接続されている。B1-B1線からD1-D1線の間で、偏波回転部43のコアが、厚板部44と、厚板部44より厚みの低い薄板部45を有し、幅を変化させている等の点は、第1実施形態の偏波変換素子10と同様である。第2導波部42からモード拡大部48を経て、さらにリブ型導波路47が接続されている。リブ型導波路46、47のリブ部46r、47rは、偏波回転部43やモード拡大部48のコアと同じ厚みを有する。スラブ部46s、47sの厚みは、偏波回転部43の薄板部45の厚みと同じにしてもよい。図16の場合、リブ部46r、47rの幅は、一定であってよい。

[0054] InPとInGaAsPの屈折率差が小さい（例えばInPの屈折率は3.17で、InGaAsPの屈折率は組成比により異なるが、3.4程度）ため、リブ型導波路のコア幅が狭い場合は、スラブ部を狭めた段階で、コアへの光の閉じ込めが弱く、モードが伝搬しにくい可能性がある。このため、図17に示すように、第1導波部41に接続されるリブ型導波路46において、第1導波部41に近づくにつれて、スラブ部46sの幅をより狭くする

とともに、リブ部46rの幅を広げることが可能である。

[0055] 図18は、図16のA1からC1の区間（リブ型導波路46と第1導波部41と偏波回転部43の一部）でコア幅を一括して変化させた例である。図18のA2からB2では、第1導波部51のリブ部51r及びスラブ部51sが、それぞれ偏波回転部53の厚板部54及び薄板部55に長手方向に連続して、幅を変化させている。偏波変換素子50の第2導波部52、モード拡大部58、リブ型導波路57のリブ部57r及びスラブ部57s等の構造は、図16と同様である。図18(b)～(f)の断面図において、InGaAsPコアの下面から左右に延びる水平線は、InPクラッドとSiO₂クラッドの境界を示す。

図16～18のいずれの場合においても、各部分の導波方向の長さは、モードの変換が断熱的に行われるように設計する。

[0056] 図19に、本発明の偏波変換素子の第11実施形態の一例を示す。例えば、参考文献2（Masaru Zaitzu, Takuo Tanemura, and Yoshiaki Nakano, “Efficiency and Fabrication Tolerance of Half-Ridge InP/InGaAsP Polarization Converters,” The 18th Opto-Electronics and Communications Conference(2013), pp. WL3-1）には、InP導波路を用いたハイメサ型導波路が開示されている。ハイメサ型導波路は、下部クラッド上に、下から順に所定の幅のコアと上部クラッドが積層され、さらに、コア及び上部クラッドの幅方向両側が空気で囲まれた構造である。ハイメサ型導波路は、導波路の幅方向において屈折率差が大きく、光が強く閉じ込められた構造である。

[0057] 第1～第10実施形態では、導波路構造のうちコアが、高さの異なる厚板部と薄板部を有する構成である。図19に示す第11実施形態の偏波変換素子60では、コア63c上に上部クラッド63aが積層された部分を厚板部64とし、コア63c上に上部クラッド63aが積層されていない部分を薄板部65としている。上部クラッド61a, 62a, 63a, 68a及び下部クラッド61b, 62b, 63b, 68bはInPからなり、コア61c, 62c, 63c, 68cはInGaAsPからなる。第1導波部61と第

2導波部62との間に偏波回転部63が設けられ、偏波回転部63の導波路構造が、厚みの厚い厚板部64と、厚みの薄い薄板部65を有する点や、第2導波部62にモード拡大部68が接続されている等の点は、第1実施形態の偏波変換素子10と同様である。

[0058] 偏波回転部63の導波路構造のうち、コアと上部クラッドからなる部分の断面が幅方向に非対称で、かつ高さ方向にも非対称となる部分を有することにより、偏波を回転させることができる。また、第1導波部61と偏波回転部63の厚板部64と第2導波部62の間で、導波路構造のコアと上部クラッドが同じ高さで連続して存在することにより、第1実施形態と同様の構造的特徴を有する。図19の場合、第1導波部61、第2導波部62、モード拡大部68は、コアと上部クラッドの幅が等しい矩形導波路とされている。

[0059] 本実施形態は、この例に限定されるものではなく、第1導波部61や第2導波部62の上部で厚さを削ってリブ構造とすることも可能である。また、コア及び上部クラッドの周囲を囲むクラッドとしては、保護膜として SiO_2 を積層したり、エアクラッドとすることも考えられる。クラッドの材料は、偏波変換素子60と同一の基板上に集積する他のデバイスで用いるプロセスを考慮して決定することができる。

各部分の導波方向の長さは、モードの変換が断熱的に行われるように設計する。

[0060] 以上、本発明を好適な実施形態に基づいて説明してきたが、本発明は上述の実施形態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。

[0061] 本発明と同様の原理で、実効屈折率曲線において TE_{2n} モード（ n は0以上の整数）と基本TMモードが交わる縮退点を本発明と同様の薄板部と厚板部からなる導波路の上下及び左右方向の非対称性を入れた構造によって分離することができ、その間をテーパ化することで変換を行うことができる。ここで、 TE_{2n} は、TEモード（TE0次，TE1次，TE2次，・・・）の中で（ $2n+1$ ）番目に実効屈折率が高いモードをいう。TE1モードは、

$n = 0$ の TE_{2n+1} モード（奇数次のモード）である。

TE モードの偶数次のモード（ TE_{2n} モード）が変換対象になるのは以下の理由による。矩形状コア（幅方向と高さがともに対称な構造（屈折率分布））を伝搬する基本 TM モードは、その電界の x 成分（ E_x ）は、幅方向と高さ方向でともに反対称な分布になる。一方、 TE_0 を含む偶数次の TE モードの E_x は、幅方向に対して対称、高さ方向に対しても対称な電界分布になる。そのため、屈折率分布を幅方向、及び高さ方向の両者に対して非対称にすることで、 TE_{2n} の高さ方向及び幅方向の対称性が崩れ、基本 TM モードと相互作用して縮退点付近でそれぞれのモードが混ざり、縮退点が分離する。そのため、本発明と同様の構造により、 TE_{2n} モードは、基本 TM モードとの間で変換が可能である。

[0062] 本発明において、第 1 導波部と偏波回転部の厚板部と第 2 導波部との間で「導波路構造」の高さが同じであり、偏波回転部において、「導波路構造」の厚みが厚板部より低い薄板部を有する、というときの「導波路構造」としては、第 1 実施形態のように「コア」であってもよく、第 1 1 実施形態のように「コア及び上部クラッド」であってもよい。また、コア以外の導波路構造として、例えば、クラッドに高さの異なる部分を設けてもよい。導波路構造の変化がモード変換に影響して偏波回転を実現するためには、「導波路構造」のうち高さ及び幅の変化する部分は、コアを含むか、コアに近接する部分（例えばクラッドの一部）を含むことが望ましい。

偏波変換素子の前後に接続される導波路として、矩形導波路、リブ型導波路、モード拡大部、モード変換部、直線導波路、曲げ導波路等が挙げられる。これらの導波路は、偏波変換素子と同様な導波路構造を有することが好ましい。

例えば、コアの高さを 2 通り以上として、高さ及び幅の変化する偏波回転部を形成した場合、偏波変換素子の前後に接続される導波路のコアの高さは、偏波回転部の厚板部の高さと連続的に接続することが好ましい。また、コア上に上部クラッドを有する部分を厚板部として、コア上に上部クラッドの

ない部分を薄板部として、高さ及び幅の変化する偏波回転部を形成した場合、偏波変換素子の前後に接続される導波路は、厚板部と同様に、コア上に上部クラッドを有する構造とすることが好ましい。

実施例

[0063] 以下、実施例をもって本発明を具体的に説明するが、本発明は以下の実施例に限定されるものではない。

[0064] (実施例 1)

図 1～3 に示すように、コアが第 1 導波部 11、偏波回転部 13、第 2 導波部 12 を有し、偏波回転部 13 が厚板部 14 の片側に薄板部 15 を有する構造の光導波路を設計した。各寸法は $L1 = 10 \mu m$ 、 $L2 = 20 \mu m$ 、 $L3 = 20 \mu m$ 、 $W1 = 400 nm$ 、 $W2 = 200 nm$ 、 $W3 = 200 nm$ 、 $H1 = 300 nm$ 、 $H2 = 150 nm$ である。

[0065] 電界分布を計算したところ、第 1 導波部 11 (断面 A) では図 20、偏波回転部 13 (断面 B) では図 21、第 2 導波部 12 (断面 C) では図 23 のようになった。例えば、図 20 において、電界強度のうち 98% が E_x 成分である。これらの電界分布の結果では、最も実効屈折率の高いモードを「mode 1」、2 番目に実効屈折率の高いモードを「mode 2」としている。また、電界分布は、(a)～(d)に分けて、mode 1 及び mode 2 のそれぞれに対し、 E_x 成分と E_y 成分の結果を示している。

mode 1 及び mode 2 の 2 つのモードについて、断面 A と断面 B の間における実効屈折率の変化を図 22 (a) に、断面 B と断面 C の間における実効屈折率の変化を図 24 (a) に、断面 C と断面 D の間における実効屈折率の変化を図 25 (a) に示す。

[0066] 図 22 (a) 及び図 24 (a) に示すように、断面 A から断面 B、そして断面 C に移る間、2 つのモードの実効屈折率は交差せず、mode 1 と mode 2 の順序は変化しない。しかし、図 20 に示すように、第 1 導波部 11 (断面 A) では mode 1 が TE、mode 2 が TM であり、図 23 に示すように、第 2 導波部 12 (断面 C) では mode 1 が TM、mode 2 が T

Eである。

図25(a)に示すように、モード拡大部18では、コア幅 w が $0.3\mu\text{m}$ のときにコア高さに等しくなり、mode1とmode2の実効屈折率も、幅 $0.3\mu\text{m}$ 付近で一致していることが分かる。

[0067] 本構造を、有限差分時間領域 (Finite-Difference Time Domain: FDTD) 法により計算した。波長は $1.55\mu\text{m}$ で計算を行った。屈折率は、 SiO_2 の屈折率を1.45、 Si の屈折率を3.48としている。シミュレーションの結果を表1に示す。

入力ポートにTE光を入射した場合、その出力はTMになり、この時の損失は 0.05dB である。入力ポートにTMを入射した場合はその出力は出力ポートでTEに変換され、偏波消光比 (PER) は 22dB 以上を確保できている。

[0068] [表1]

		出力ポート(dB)		PER (dB)
		TE	TM	
入力ポート	TE	-24.2	-0.05	23.7
	TM	-0.22	-24.2	22.0

[0069] この時の伝搬の様子を図26に示す。図26には図の下部より、TEモードを入射した場合の光の電界分布を示す。図26(a), (b)には各々電界の E_x 成分、 E_y 成分を表している。伝搬するに従って主電界が E_x から E_y に変化しており、出力部においては、モードが E_y 成分のみとなっており、TEモードがTMモードへと変化していることが分かる。

[0070] (実施例2)

実施例2として、シリコン光導波路で多用される、シリコンコアの厚みが 220nm の場合について、シミュレーション及び実際に製作したデバイスの測定結果を示す。

[0071] 図1～3に示すように、コアが第1導波部11、偏波回転部13、第2導

波部12を有し、偏波回転部13が厚板部14の片側に薄板部15を有する構造の光導波路を設計した。シミュレーションソフトFimmwave (Photonデザイン社)を用いて、EME (Eigenmode expansion) 法による計算を行った。光の波長は1550nmとした。デバイスの各寸法は、 $L_1 = 40\ \mu\text{m}$ 、 $L_2 = 150\ \mu\text{m}$ 、 $L_3 = 40\ \mu\text{m}$ 、 $H_1 = 220\ \text{nm}$ 、 $H_2 = 95\ \text{nm}$ 、 $W_1 = 300\ \text{nm}$ 、 $W_2 = 180\ \text{nm}$ 、 $W_3 = 120\ \text{nm}$ を基本とし、 W_2 の値が160nm、及び180nmの各々の場合について、 L_2 を変化させた。シミュレーションの結果を図27のグラフに示す。

[0072] 図27の縦軸は、図2の第1導波部11側からTEモードを入射した場合に、モード拡大部18側から出射するTEモード及びTMモードの出射パワーを規格化した値、すなわち、TEモードから各モードへの変換効率を表している。図27に示すように、導波路長の L_2 を十分長くすることで、第1導波部11から入射したTEモードは断熱的に変化し、第2導波部12側に出射時にTMモードに変化することが分かる。同様に、第2導波部12から入射したTMモードは断熱的に変化し、第1導波部11側に出射時にTEモードに変化することが分かる。また、 $W_2 = 160\ \text{nm}$ と $W_2 = 180\ \text{nm}$ の比較では、 W_2 の幅が狭い方が、より短い距離(L_2)で断熱変換が生じることが分かる。

[0073] シリコンコアの厚み H_1 が220nmの導波路では、一般的に400nm程度のコア幅が利用される。このコア幅が狭くなるにつれてモードが広がる。コア幅が狭くなり、モードが広がると、製造上生じる側壁のラフネスによる光の散乱による損失が、より増大する。また、モードが広がると、SOI基板上に光導波路を形成する場合には、光導波路の下部に基板のシリコン層が存在するため、シリコン層への光の漏洩が生じる。これらの損失増大と、断熱変化に必要な長さの条件を考慮して、適宜最適な導波路幅、及び導波路長を選択することが可能である。

[0074] さらに、上部シリコン層の厚さが220nmで、BOX層の厚さが2 μm

のSOI基板を用いて、光導波路を製作した。本製作では、シミュレーション結果に基づき、 $L2 = 150\ \mu\text{m}$ 、 $W2 = 180\ \text{nm}$ とした。第1導波部にTEモードを入射して、第2導波部（モード拡大部）側から出射するTEモード及びTMモードの結合パワー（dB）を測定した結果を図28に示す。この結合パワーは、偏波変換構造を有しない直線導波路をリファレンスとした、差の値である。図28より、 $1500 \sim 1600\ \text{nm}$ の広範な波長にわたって、TEからTMへの偏波変換が実現できていることが分かる。また、この波長範囲において、 $10\ \text{dB}$ 以上の偏波消光比（「Input TE $\Rightarrow$ Output TM」と「Input TE $\Rightarrow$ Output TE」の結合パワーのdB値の差）が確認された。

[0075]（実施例3）

実施例3として、第10実施形態によるInP系光導波路を用いた偏波変換素子を設計した。図29に、本実施例の構造を示す。この構造は、図18の構造からモード拡大部58を省略し、さらに、第1導波部51のリブ部51rから偏波回転部53の厚板部54を経て、第2導波部52に接続されたリブ型導波路57のリブ部57rに至るまで、一定の幅とした構造である。

なお、本実施例の偏波変換素子は、その周囲（長手方向の前後）の導波路と接続して使用することが想定されるが、本実施例のA4-A4断面やD4-D4断面に、厚板部及び薄板部の幅がテーパ状に変化する導波路を接続することで（例えば、図16（a）、図17、図18（a）参照）、損失なく周囲の導波路に光を伝搬させることが可能である。

図29（b）～（e）の断面図では、各部のコア51c、52c、53c、57cの下方に存在する基板51b、52b、53b、57bと、コア51c、52c、53c、57cの側方及び上方を覆う上部クラッド51a、52a、53a、57aのうち、コアの近傍の部分を図示している。基板51b、52b、53b、57bは下部クラッドとして機能する。

[0076] 偏波回転部53において、図29（a）の上側にある薄板部55の幅は、第1導波部51から長さL11の範囲で、W11から0まで線形的に減少し

ている。次の長さ L_{12} の範囲では、薄板部55は厚板部54の片側にのみ存在している。また、図29(a)の下側にある薄板部55の幅は、第1導波部51から長さ L_{11} の範囲では、幅が W_{13} で一定であり、次の長さ L_{12} の範囲では、幅が W_{13} から0まで線形的に減少している。断面が矩形状の第2導波部52から長さ L_{13} の範囲では、リブ部57rの幅方向の両側で、それぞれスラブ部57s、57sの幅が線形的に増大している。

H_{11} は、スラブ部51s、57s及び薄板部55の高さである。 H_{12} は、 $H_{13} - H_{11}$ の差である。 H_{13} は、リブ部51r、57r及び厚板部54の高さである。

W_{11} は、図29(a)の上側にあるスラブ部51s、57sの最大幅である。 W_{12} は、リブ部51r、57r、厚板部54及び第2導波部52の幅である。 W_{13} は、図29(a)の下側にあるスラブ部51s、57sの最大幅である。

[0077] 本実施例では、InP基板上のInGaAsPをコア、上部クラッドをSiO₂とした場合について計算を行った。InP及びSiO₂の屈折率は、3.17と1.45をそれぞれ用いた。また、InGaAsPの屈折率はその組成比によって変化することが知られているがここでは、3.4として計算を行った。

図29(a)～(e)における各寸法は以下の通りである。 $W_{11} = 1\ \mu\text{m}$ 、 $W_{12} = 0.8\ \mu\text{m}$ 、 $W_{13} = 1\ \mu\text{m}$ 、 $H_{11} = 1.045\ \mu\text{m}$ 、 $H_{12} = 0.62\ \mu\text{m}$ 、 $H_{13} = H_{11} + H_{12} = 1.665\ \mu\text{m}$ 、 $L_{11} = 300\ \mu\text{m}$ 、 $L_{12} = 600\ \mu\text{m}$ 、 $L_{13} = 100\ \mu\text{m}$ 。

シミュレーションには、シミュレーションソフトFimmwave (Photonデザイン社)を用いてEME (Eigenmode Expansion) 法による計算を行った。光の波長は1550nmとした。シミュレーションの結果を表2に示す。この結果から、基板のInPと導波路のInGaAsPとの屈折率差が比較的小さいInP系光導波路を用いた偏波変換素子により偏波回転が可能であることが確認できた。

[0078] [表2]

		出力ポート(dB)		PER (dB)
		TE	TM	
入力ポート	TE	-14.64	-0.22	14.4
	TM	-0.23	-14.61	14.4

[0079] (実施例4)

次に、第11実施形態の実施例として図30に示す構造を設計し、シミュレーションを実施した。この構造は、図19の構造と同様であるが、図30(b)～(e)の断面図では、ハイメサ構造(コア、上部クラッド及び下部クラッド)の幅方向両側にクラッド61d, 62d, 63d, 68dを図示している。H21は、下部クラッド61b, 62b, 63b, 68bが基板61e, 62e, 63e, 68eの上面から突出する高さである。H22はコア61c, 62c, 63c, 68cの厚さである。H23は上部クラッド61a, 62a, 63a, 68aの厚さである。W21, W22, W23, L21, L22, L23の定義は、それぞれ図2のW1, W2, W3, L1, L2, L3と同じである。

[0080] 本実施例では、InP基板上的InGaAsPをコアとし、上部クラッドをInPとし、ハイメサ構造の幅方向両側のクラッドをSiO₂とした場合について計算を行った。

本実施例においても、InP、InGaAsP、SiO₂の屈折率は上記実施例3と同様の値を用いた。また、計算手法も同じである。構造の各寸法は、W21=1.5μm、W22=0.9μm、W23=0.6μm、H21=1μm、H22=0.5μm、H23=1μm、L21=200μm、L22=700μm、L23=100μmである。シミュレーション結果を表3に示す。この結果から、本構造のハイメサ構造においても、本発明を適用することで偏波回転が実現できることが確認できた。

[0081]

[表3]

		出力ポート(dB)		PER (dB)
		TE	TM	
入力ポート	TE	-13.26	-0.26	13.0
	TM	-0.25	-13.27	13.0

産業上の利用可能性

[0082] 本発明の偏波変換素子は、例えば、基板上に作製される光導波路素子の構造に関し、偏波変換を目的とした素子に利用することができる。

符号の説明

[0083] 10, 10A, 10B, 10C, 10D, 40, 50, 60…偏波変換素子、11, 41, 51, 61…第1導波部、11c, 12c, 18c, 31, 61c, 62c, 63c, 68c…コア、11r, 46r, 47r, 51r, 57r…リブ部、11s, 46s, 47s, 51s, 57s…スラブ部、12, 42, 52, 62…第2導波部、13, 43, 53, 63…偏波回転部、14, 44, 54, 64…厚板部、15, 45, 55, 65…薄板部、17…基板、18, 48, 58, 68…モード拡大部、19…モード変換部、20…DP-QPSK変調器、61a, 62a, 63a, 68a…上部クラッド、61b, 62b, 63b, 68b…下部クラッド。

請求の範囲

- [請求項1] 基板上に形成された光導波路が、順に、第1導波部と偏波回転部と第2導波部を持ち、
- 前記第1導波部は、その断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含み、その最も実効屈折率の高いTEモードは、TMモードよりも実効屈折率が高く、
- 前記第2導波部は、その断面における導波光の固有モードが、少なくとも1つのTEモードと1つのTMモードを含み、TMモードは、その最も実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高く、
- 前記第1導波部及び前記第2導波部は互いに導波路構造の高さが等しく、
- 前記偏波回転部の導波路構造は、前記基板からの高さ方向に少なくとも2通りの高さを有し、その導波路構造は、前記第1導波部及び前記第2導波部の導波路構造と同じ高さの厚板部と、前記厚板部より厚みの低い薄板部とを有し、
- 前記偏波回転部の導波路構造は、断面が幅方向に非対称で、かつ高さ方向にも非対称となる部分を有し、
- 前記第1導波部の導波路構造と前記偏波回転部の厚板部と前記第2導波部の導波路構造との間で、同じ高さの導波路構造が連続して存在することを特徴とする偏波変換素子。
- [請求項2] 前記第1導波部と前記偏波回転部と前記第2導波部との間で、導波方向に沿って、前記導波路構造の幅が不連続点を持たず連続的に変化することを特徴とする請求項1に記載の偏波変換素子。
- [請求項3] 前記第1導波部の前記導波路構造が、その断面において幅方向が高さ方向よりも広い矩形状であることを特徴とする請求項1又は2に記載の偏波変換素子。
- [請求項4] 前記第1導波部の前記導波路構造が、厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であることを特徴とする請求項1又は2に記載

の偏波変換素子。

- [請求項5] 前記偏波回転部の厚板部の高さは前記リブ部の高さと同しく、前記薄板部が前記スラブ部の高さと同しいことを特徴とする請求項4に記載の偏波変換素子。
- [請求項6] 前記第2導波部の前記導波路構造が、その断面において幅方向が高さ方向よりも狭い矩形形状であることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項7] 前記第2導波部の前記導波路構造が、一定の幅で直線状に延びている断面が矩形形状の部分を、前記厚板部に連続して有することを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項8] 前記第2導波部の前記導波路構造が、厚みの厚いリブ部と薄いスラブ部を持つリブ型構造であることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項9] 前記第1導波部の断面における導波光の固有モードが、1つのTEモードと1つのTMモードを含むか、又は、少なくとも2つのTEモードと、2番目に実効屈折率の高いTEモードよりも実効屈折率が高い1つのTMモードを含むことを特徴とする請求項1～8のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項10] 前記第2導波部は、前記偏波回転部から離れる方向に従って導波路構造の幅が拡大するモード拡大部に接続されていることを特徴とする請求項1～9のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項11] 前記第1導波部及び前記第2導波部のいずれか一方又は両方は、前記偏波回転部から離れる方向に従って導波路構造の幅が細くなるテーパ形状のモード変換部に接続されていることを特徴とする請求項1～9のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項12] 前記偏波回転部の厚板部の下面と薄板部の下面が、前記基板から同じ高さにあることを特徴とする請求項1～11のいずれか1項に記載の偏波変換素子。

- [請求項13] 前記偏波回転部の厚板部の上面と薄板部の上面が、前記基板から同じ高さにあることを特徴とする請求項1～11のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項14] 前記導波路構造がコアであることを特徴とする請求項1～13のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項15] 前記導波路構造が、コアと、前記コア上に積層されて前記コアの幅以下の幅を有する上部クラッドとからなることを特徴とする請求項1～13のいずれか1項に記載の偏波変換素子。
- [請求項16] 請求項1～15のいずれか1項に記載の偏波変換素子を備えたDP-QPSK変調器。