

明 細 書

発明の名称：

高次偏波変換素子、光導波路素子、及びDP-QPSK変調器

技術分野

[0001] 本発明は、例えば光ファイバ通信において用いられる基板型光導波路素子に関し、特に、偏波の変換を行う高次偏波変換素子、光導波路素子、及びDP-QPSK変調器に関する。

本願は、2013年6月27日に、日本に出願された特願2013-135490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、高速なインターネット回線サービスやスマートフォンなどの普及に伴い、光通信によって伝送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、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などの対策が進められている。特に、高速度の情報通信を目的とした次世代の100Gbps（ギガビット毎秒）のデジタルコヒーレント伝送技術では、単位時間当たりの情報量を2倍にするために、電界が直交する2つの偏波のそれぞれに情報を載せる偏波多重方式が利用されている。しかしながら、偏波多重方式を含む高速通信の変調方式は、光変調器を構成する光回路部品の構造が複雑になり、装置の大型化、高額化などの課題が生じる。

また、光通信によって伝送される情報量の増加に応じて送受信器などの光回路部品の必要個数も増加する。そのため、限られたスペースの中で光回路部品を増やすために、光回路部品を構成する光素子の小型化と、高密度集積化が必要となる。

こうした課題に対して、加工が容易であり、集積化による小型化、大量生産による低コスト等のメリットを持つ、シリコンを用いた基板型光導波路（シリコン光導波路）による光回路部品（光変調器など）の研究及び開発が進

められている。

シリコン光導波路は、コアに屈折率の大きなシリコン系材料 (Si 、 Si_3N_4 など) を、クラッドにコアとの屈折率差が大きい材料 (SiO_2 、空気、 Si_3N_4 など) を利用した、いわゆる比屈折率差の大きな光導波路である。比屈折率差が大きいとコアへの光の閉じ込めが大きくなるため、急峻な曲げが可能になり、光素子の小型化、高密度集積化に適している。

[0003] しかしながら、このような基板型光導波路内での偏波多重には、次のような問題点がある。一般的に、基板型光導波路は、基板に対して平行な幅方向と基板に対して垂直な高さ方向が非対称な形状をしている。このため、実質的に幅方向の電界成分のみを持つモード (以下、TEモードと呼ぶ) と、実質的に高さ方向の電界成分のみを持つモード (以下、TMモードと呼ぶ) の2種類の偏波モードに対して、実効屈折率などの特性が異なる。これらのモードの中で、多くの場合に使用されるのは、基本TEモード (TE_0) と基本TMモード (TM_0) である。ここで、 TE_0 はTEモードの中で実効屈折率が一番大きなモードをいう。また、 TM_0 はTMモードの中で実効屈折率が一番大きなモードをいう。

特性が異なるこれらのモードに対して、光変調操作を行う場合、単一の基板型光導波路素子だけでは困難である。モードごとに最適化された基板型光導波路素子を必要とした場合、基板型光導波路素子の開発の面で大きな労力が必要となる。

[0004] この問題を解決する方法として、 TE_0 に対して最適化された所望の基板型光導波路素子への入力光として TE_0 を用い、その出力を TM_0 に偏波変換する方法が挙げられる。ここで偏波変換とは、 TE_0 から TM_0 、または TM_0 から TE_0 への変換を表す。上記操作を行う為には、基板上で偏波変換を行う基板型光導波路素子が必要である。

[0005] このような偏波変換を基板上で行う技術として、 TE_0 を高次TEモード (TE_1) に変換した後、 TE_1 を TM_0 に変換する方法がある。ここで、 TE_1 は2番目に実効屈折率の高いTEモードを表す。 TE_1 は、 TE_0 と同方向の

電界成分を持つので、矩形状の光導波路を並列させるなどの簡単なプロセスのみで作製可能な方向性結合器を用いることで変換することが可能である。そのため、 TE_1 を TM_0 に変換する素子の実現されれば、 TE_1 を介して偏波変換が可能となる。

[0006] また、一般にシリコン光導波路は大きな複屈折率を持つため、強い偏波依存性を持つ。例えば、光素子に TE_0 と、 TM_0 を入力した際に、光素子の特性が大きく異なる。この問題を解決するために、 TM_0 を TE_0 （もしくはその逆）に変換する偏波変換素子を用いて、同一モードを光素子へ入力する偏波ダイバーシティ方式が利用される。したがって、光素子の小型化、高密度集積化を行うためには、小型の偏波変換素子が必須となる。

シリコン光導波路による偏波変換素子の技術として、 TE_0 を TE_1 に変換し、その後 TE_1 を TM_0 に変換する方法が提案されている。

[0007] 基板型光導波路上で、このような TE_1 と TM_0 との間の変換（以下、高次偏波変換と呼ぶ）を用いて偏波変換を行う技術として、非特許文献1が挙げられる。

非特許文献1のFig. 2 (a) 及び Fig. 2 (b) に、その実施例が示されている。

非特許文献1の開示する光導波路素子は方向性結合器部分（結合部）とテーパ状光導波路部分（テーパ部）から成り、結合部の出射端がテーパ部に接続された構造となる。結合部は TE_0 を TE_1 に変換し、テーパ部は TE_1 を TM_0 に変換する基板型光導波路素子である。これらの2つの部分において使用される光導波路の屈折率の、導波方向に垂直な断面分布は非特許文献1のFig. 1 (a) 及び Fig. 1 (c) のグラフ中に示されている。これらの図では、コアと呼ばれる矩形部分とそのコアの下部に位置し屈折率がコアよりも低い水平な下部クラッドと、屈折率がコアより低く下部クラッドとは異なるコアを覆う上部クラッドが示されている。

非特許文献1のFig. 1 (a) 及び Fig. 1 (c) には、コア幅に対する実効屈折率のグラフが示されている。コアはSiで屈折率が3.455

、下部クラッドは SiO_2 で屈折率が1.445、上部クラッドは空気（屈折率が1.0）又は Si_3N_4 （屈折率が2.0）、コアの高さは220nmとしている。

また、非特許文献1のFig. 1 (b)には上部クラッドと下部クラッドとが等しい屈折率を持つ上下対称な屈折率断面形状の光導波路の実効屈折率のグラフが示されている。

これらの図からも分かるように屈折率断面が上下非対称な屈折率断面構造を持つ場合、幅方向の変化に対する各モードの実効屈折率の変化のグラフにおいて、上下対称な屈折率断面構造を持つ導波路では縮退していた TE_1 と TM_0 の点が分離している。

例えば、非特許文献1のFig. 1 (a)のグラフには、導波路幅0.7 μm 付近で、導波路幅が広がる間に、実効屈折率が2番目に高いモードは TM_0 （基本 TM モード）から TE_1 （高次 TE モード）へ、また、実効屈折率が3番目に高いモードは TE_1 （高次 TE モード）から TM_0 （基本 TM モード）へ変化することが示されている。このため、 TE_1 と TM_0 は実効屈折率曲線状で連続的に繋がるので、導波路幅を緩やかに変化させることで損失の小さい高次偏波変換を行うことが可能となる。この現象を利用しているのが、前述の偏波変換素子におけるテーパ部で、導波路幅を TE_1 から TM_0 に変換する範囲で、緩やかに変化させるテーパ構造にすることで、高次偏波変換を行っている。

[0008] また、非特許文献2は、上下クラッドを同じ材料（ SiO_2 ）を用い、コアの断面構造を上下非対称にすることで高次偏波変換を行うことを開示している。

非特許文献2はFig. 11などにおいて、入出力部の断面の一方の端部がリブ導波路の断面構造をもち、他方の端部は矩形導波路の断面構造をもつ高次偏波変換素子を開示している。

先行技術文献

非特許文献

[0009] 非特許文献1: Daoxin Dai and John E. Bowers, "Novel concept for ultra compact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires," Optics Express, Vol. 19, Issue 11, pp. 10940 (2011)

非特許文献2: Daoxin Dai, Yongbo Tang, and John E Bowers, "Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides," Optics Express, Vol. 20, Issue.12, pp. 13425-13439 (2012)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 非特許文献1では、高次偏波変換を行うテーパ部において上部クラッドと下部クラッドで異なる屈折率を持つ材料が必要となることを開示している。このような新たな材料を用いる場合、余分なプロセスの発生や本来他の光導波路部分で使用しない材料が必要である。従って、効率やコストの面で不利である。また上部クラッドと下部クラッドとに異種材料を使用すると、線膨張係数などの違いによりひずみが生じ歩留りを下げてしまう。また下部クラッドは光導波路で使用する材料であり、上部クラッドの材料を空気とする方法も挙げられている。しかしながら、製造過程において光導波路がむき出しになってしまうので、異物の付着によって特性が劣化し、歩留りが低下してしまう。

[0011] さらに、非特許文献2の開示する構造では、リブ導波路の幅方向のクラッド領域が狭いことから、幅方向の光の閉じ込めが弱くなり、急峻な曲げ半径による曲げ導波路部分で大きな損失を招くことがある。そのため、リブ導波路を用いる場合は曲げ半径を大きくする必要があり（数十～数百 μm ）、非特許文献2の開示する構造では高密度集積化することが困難である。つまり、光回路部品内における光素子の高密度集積化を目指した場合、光素子間は幅方向がクラッドで十分に覆われている矩形導波路で接続する必要がある。また、仮に非特許文献2の開示するリブ導波路の端部にリブ導波路から矩形導波路への変換構造を組み合わせたとしても、矩形ーリブ変換部を必要とする。従って、光素子を小型化することは困難である。

[0012] 本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、上部クラッドと下部クラッドで異なる屈折率を持たなくても、 TE_1 と TM_0 との間で偏波変換をすることが可能な高次偏波変換素子及び光導波路素子を提供すること、及び小型化・高密度集積化を両立させた高次偏波変換素子及び光導波路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

[0013] 前記課題を解決するため、本発明の第1態様に係る高次偏波変換素子は、基板と、前記基板上に設けられる下部クラッドと、前記下部クラッド上に設けられ、断面矩形状で一定の高さを有する下部コアと、前記下部コアと同じ材料で形成されかつ前記下部コアの上に連続して配置される断面矩形状で一定の高さを有する上部コアとを有するコアと、前記コア及び前記下部クラッドの上に設けられ、前記下部クラッドと同じ材料で形成される上部クラッドと、を備える。さらに、前記コアは、前記下部コアの幅と前記上部コアの幅とが同じである開始部から、前記下部コアの幅と前記上部コアの幅とが同じである終了部まで光が導波可能な光導波路を構成し、少なくとも前記上部コアの幅及び前記下部コアの幅のうちの一方は、前記開始部と前記終了部との間で前記光の導波方向に対して連続的に減少しかつ前記上部コアの幅及び前記下部コアの幅の両方が前記開始部から前記終了部まで増加せず、前記開始部において、 TE_0 の実効屈折率が TE_1 の実効屈折率より大きく、前記 TE_1 の実効屈折率が TM_0 の実効屈折率よりも大きく、前記光導波路の終了部において、前記 TE_0 の実効屈折率が前記 TM_0 の実効屈折率よりも大きく、前記 TM_0 の実効屈折率が前記 TE_1 の実効屈折率よりも大きく、前記開始部と前記終了部との間の前記光導波路のうち前記開始部と前記終了部とを除く部分において、前記コアは前記上部コアの幅と前記下部コアの幅とが異なる上下非対称な構造を有し、前記高次偏波変換素子は、前記開始部の TE_1 と前記終了部の TM_0 との間で高次偏波変換をする。

[0014] 前記開始部と前記終了部との間において、前記下部コアの幅が前記上部コアの幅よりも常に大きくなり、前記光が導波する方向に垂直な断面において

前記上部コアの下辺が前記下部コアの上辺に常に含まれてもよい。

前記開始部と前記終了部との間において、前記上部コアの幅方向の両端がそれぞれ前記下部コアの前記幅方向の両端と常に重ならなくてもよい。

前記開始部と前記終了部との間において、前記上部コアの幅方向の一つの端が前記下部コアの前記幅方向の一つの端と常に重なってもよい。

前記開始部において、前記コアの高さが 210 nm 以上 230 nm 以下であり、前記コアの幅が 700 nm 以上であり、かつ、前記終了部において、前記コアの高さが 210 nm 以上 230 nm 以下であり、前記コアの幅が 620 nm 以下であってもよい。

前記下部コアと前記上部コアが Si からなり、前記下部クラッドと前記上部クラッドが SiO_2 からなってもよい。

前記上部コアの幅が前記開始部から中間部まで減少し前記中間部から前記終了部まで一定で、かつ前記下部コアの幅が前記開始部から前記中間部まで一定で、前記中間部から前記終了部までの間で減少してもよい。

[0015] また、本発明の第2態様に係る光導波路素子は、上述の高次偏波変換素子と、前記高次偏波変換素子が接続されていない第1の光導波路と、前記高次偏波変換素子の前記開始部と接続された第2の光導波路とで構成される方向性結合器と、を備える。さらに、前記第1の光導波路には TE_0 が導波し、前記第2の光導波路には TE_1 が導波し、前記第1の光導波路の TE_0 が前記第2の光導波路の TE_1 と結合可能である。

前記第1の光導波路の TE_0 の実効屈折率と前記第2の光導波路の TE_0 の実効屈折率の差が 0.2 以上であってもよい。

また、本発明の第3態様に係る DP-QPSK 変調器は、前記光導波路素子を備える。

発明の効果

[0016] 本発明の上記態様によれば、光導波路のコアが、幅の異なる上部コアと下部コアとからなり、上下に非対称性を有するコア形状とすることにより、上部クラッドと下部クラッドで異なる屈折率を持たなくても、高次偏波変換を

行うことが可能になる。

図面の簡単な説明

[0017] [図1A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の一例の光導波路の断面図である。

[図1B]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の一例のコアの斜視図である。

[図2A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の別の一例の光導波路の断面図である。

[図2B]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の別の一例のコアの斜視図である。

[図3A]上部クラッドと下部クラッドとの屈折率差を利用した構造の一例を示すコアの平面図である。

[図3B]上部クラッドと下部クラッドとの屈折率差を利用した構造の一例を示す光導波路の断面図である。

[図4A]本発明の第1実施形態に係る高次偏波変換素子のコアの平面図である。

[図4B]図4AのⅠVb-ⅠVb線に沿う断面図である。

[図4C]図4AのⅠVc-ⅠVc線に沿う断面図である。

[図4D]図4AのⅠVd-ⅠVd線に沿う断面図である。

[図5A]本発明の第2実施形態に係る高次偏波変換素子のコアの平面図である。

[図5B]図5AのVb-Vb線に沿う断面図である。

[図5C]図5AのVc-Vc線に沿う断面図である。

[図5D]図5AのVd-Vd線に沿う断面図である。

[図6A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の第3実施形態のコアの平面図である。

[図6B]図6AのVⅠb-VⅠb線に沿う断面図である。

[図6C]図6AのVⅠc-VⅠc線に沿う断面図である。

[図7A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の第1又は第2実施形態の
改変例のコアの平面図である。

[図7B]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の第1又は第2実施形態の
改変例のコアの平面図である。

[図7C]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の第1又は第2実施形態の
改変例のコアの平面図である。

[図7D]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子の第1又は第2実施形態の
改変例のコアの平面図である。

[図8A]本発明の第3実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図8B]本発明の第3実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図8C]本発明の第3実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図9A]本発明の第4実施形態に係る高次偏波変換素子のコアの平面図である
。

[図9B]図9AのI X b - I X b線に沿う断面図である。

[図9C]図9AのI X c - I X c線に沿う断面図である。

[図10A]本発明の第4実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図10B]本発明の第4実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図10C]本発明の第4実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面
図である。

[図11A]本発明の第5実施形態に係る高次偏波変換素子のコアの平面図である
。

[図11B]図11AのX I b - X I b線に沿う断面図である。

[図11C]図11AのX I c - X I c線に沿う断面図である。

[図12A]本発明の第5実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面図である。

[図12B]本発明の第5実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面図である。

[図12C]本発明の第5実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例のコアの平面図である。

[図13A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子を非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子の一例のコアの平面図、(b)は(a)のX | | | b - X | | | b線に沿う断面図である。

[図13B]図13AのX | | | b - X | | | b線に沿う断面図である。

[図14A]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子を非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子の別の一例のコアの平面図である。

[図14B]本発明の実施形態に係る高次偏波変換素子を非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子の別の一例の非対称方向性結合器のコアの断面図である。

[図15]DP-QPSK変調器の一例を示す模式図である。

[図16]偏波ダイバーシティ・コヒーレント受信機の一例を示す模式図である。

[図17]偏波ダイバーシティ方式の一例を示す模式図である。

[図18]計算例1で下底に対する実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図19](a)～(d)はそれぞれ計算例1で、下底が $0.5\mu\text{m}$ であるときの電界振幅を示す図である。

[図20](a)～(d)はそれぞれ計算例1で、下底が $0.6\mu\text{m}$ であるときの電界振幅を示す図である。

[図21](a)～(d)はそれぞれ計算例1で、下底が $0.8\mu\text{m}$ であるときの電界振幅を示す図である。

[図22](a)～(d)はそれぞれ計算例1で、下底が $1.2\mu\text{m}$ であるときの電界振幅を示す図である。

[図23]実施例1でZ座標に対する実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図24](a)～(d)はそれぞれ実施例1で開始部断面の電界振幅を示す図である。

[図25]実施例1で求めた変換損失の波長依存性のグラフである。

[図26]実施例1で導波路に沿った電界の(a) E_x 成分、及び(b) E_y 成分をFDTD法で求めたシミュレーション結果である。

[図27]実施例3の構造において実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図28]実施例4の構造において実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図29]実施例5の構造において実効屈折率の変化を示すグラフである。

[図30]実施例7の構造において偏波変換損失の波長依存性を示すグラフである。

[図31]実施例7の構造において TE_0 の透過損失の波長依存性を示すグラフである。

[図32] TE_1 を発生させる変換合波素子の一例を示す平面図である。

[図33]対称方向性結合器の一例を示す平面図である。

[図34]図32の変換合波素子を備えたDP-QPSK変調器の一例を示す平面図である。

[図35]図32の変換合波素子を備えたDP-QPSK変調器の別の一例を示す平面図である。

[図36]実施例8の変換合波素子における、(a)入力部分の断面における基本 TE モードのモード分布、(b)合波部の断面における高次 TE モードのモード分布のシミュレーション結果を示す図である。

[図37]実施例8の変換合波素子における過剰損失のシミュレーション結果を示すグラフである。

[図38]FDTD法による実施例8の変換合波素子の電界シミュレーションの結果を示す図である。

[図39]図4A～4Dに示す構成を用いた場合のテーパ導波路への埋め込みのイメージ図である。

[図40]本発明に係る実施形態を用いた高次偏波変換部の設計例を示す図である。

[図41A]本発明に係る実施形態を用いた高次偏波変換部の設計例を示す図である。

[図41B]本発明に係る実施形態を用いた高次偏波変換部の設計例を示す図である。

[図41C]本発明に係る実施形態を用いた高次偏波変換部の設計例を示す図である。

[図42A]側壁荒れが生じた変換合波素子を示す図である。

[図42B]側壁荒れが生じた変換合波素子を示す図である。

[図43A]実施例10の高次偏波変換素子の構造を示す図である。

[図43B]実施例10の高次偏波変換素子の構造を示す図である。

[図44]実施例10の高次偏波変換素子を導波するモードの実効屈折率を示すグラフである。

[図45]実施例10の高次偏波変換素子を導波するモードの R_{TE} 、 R_{TM} を示すグラフである。

[図46A]比較例2の高次偏波変換素子の構造を示す図である。

[図46B]比較例2の高次偏波変換素子の構造を示す図である。

[図47]比較例2の高次偏波変換素子を導波するモードの実効屈折率を示すグラフである。

[図48]比較例2の高次偏波変換素子を導波するモードの R_{TE} 、 R_{TM} を示すグラフである。

[図49]実施例10と比較例2の全素子長に対する高次偏波変換時の変換効率を示すグラフである。

[図50]実施例10の高次偏波変換素子の高次偏波変換効率の波長依存性をシミュレーションで計算した結果を示す図である。

[図51]実施例11で作製されたデバイスの高次偏波変換効率の波長依存性を測定した結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0018] 以下、好適な実施形態に基づき、図面を参照して本発明を説明する。

図1A～図2Bに、本発明の高次偏波変換素子の構造を模式的に例示する。これらの高次偏波変換素子は、図1A及び図2Aに示すように、基板S上にコア2及びクラッド5を有する光導波路1を備える基板型光導波路素子から構成される。コア2の形状は、導波方向に垂直な断面において、コア形状が2つの幅を持つ矩形を重ねた形を成す。なお、本願では、単に「断面」と記載する場合は光の導波方向に垂直な断面を指す。

以下、上側の断面矩形状の部分を上部コア3、下側の断面矩形状の部分を下部コア4と呼び、下部コア4と下部クラッド7が接する部分を下底4a、上部コア3の上部を上底3aと呼ぶ。上部コア3は下部コア4と同じ材料からなる。クラッド5は、基板Sとコア2の間に設けられた下部クラッド7と、コア2及び下部クラッド7の上に設けられた上部クラッド6を有する。

つまり、基板S上に設けられる下部クラッド7上に、下部コア4と上部コア3とを有するコア2が設けられる。さらに、コア2及び下部クラッド7の上に上部クラッド6が設けられる。

このような断面を持つ光導波路のコア形状の一例を図1B及び図2Bに示す。図1Bは図1Aの断面を有する光導波路のコア形状の一例であり、図2Bは図2Aの断面を有する光導波路のコア形状の一例である。

[0019] 図1A～図2Bに光導波路が高次偏波変換素子として機能するためには、まず、光導波路の開始部8において、 TE_0 （基本TEモード）の実効屈折率が TE_1 （高次TEモード）の実効屈折率よりも大きく、 TE_1 （高次TEモード）の実効屈折率が TM_0 （基本TMモード）の実効屈折率よりも大きくなるような3つ以上のモードを持つこと、光導波路の終了部9において、 TE_0 の実効屈折率が TM_0 の実効屈折率よりも大きく、 TM_0 の実効屈折率が TE_1 の実効屈折率よりも大きくなるような3つ以上のモードを持つことが必要である。この関係を持つためには、終了部9におけるコア幅（上部コア3の幅又は下部コア4の幅）が、開始部8におけるコア幅より小さいことが好ま

しい。

すなわち、（１）終了部９における上部コア３の幅が開始部８における上部コア３の幅より小さいこと、（２）終了部９における下部コア４の幅が開始部８における下部コア４の幅より小さいこと、の少なくとも１つを満足することが好ましい。

[0020] さらに、高次偏波変換素子が、開始部８の TE_1 と終了部９の TM_0 との間で偏波変換をする素子となるためには、開始部８と終了部９との間の光導波路のコア形状が、上部コアの幅と下部コアの幅が異なる上下非対称な構造を有し、上部コア３の幅又は下部コア４の幅は、光導波路の光の導波方向に連続的に変化することが必要である。すなわち、（３）開始部８と終了部９との間で、上部コア３の幅が連続的に十分ゆっくりと変化するような構造を持つこと、（４）開始部８と終了部９との間で、下部コア４の幅が連続的に十分ゆっくりと変化するような構造を持つこと、の少なくとも１つを満足することが好ましい。また、（５）上部コア３の幅又は下部コア４の幅が前記開始部と前記終了部との間で前記光の進行方向に対して連続的に減少しかつ開始部８と終了部９との間で上部コア３及び下部コア４の幅が増加しないことがさらに好ましい。

なお、本願において「連続的に減少」とは、図２Ａの上部コア３の幅及び下部コア４の幅のように開始部８から終了部９にかけて常に減少している場合だけでなく、図４Ａの上部コア３の幅及び下部コア４の幅のように一定幅の部分がある場合も含まれる。

[0021] このとき、開始部８から TE_1 を入力すると、終了部９から TM_0 として出力される。逆に終了部９から TM_0 を入力した場合、開始部８より TE_1 が出力される。すなわち、この高次偏波変換素子は、開始部８の TE_1 と終了部９の TM_0 との間で偏波変換（高次偏波変換）をする素子として機能する。

なお、以下においても開始部８から TE_1 を入力すると、終了部９から TM_0 として出力される構造であれば、終了部９に TM_0 を入力すると開始部８から TE_1 が出力される。

[0022] 図1 A及び1 Bでは、上部コア3の幅方向の一つの端と下部コア4の幅方向の一つの端とが重なり、反対側の端に段差を有している。図2 A及び2 Bでは、上部コア3の幅方向の両端がそれぞれ下部コア4の幅方向の両端と重ならず、左右の両端に段差が生じている。上下非対称な断面構造は、図1 A～図2 Bに限られず、断面図の右上、右下、左上、左下の任意の隅に、合わせて1つ又は2つ以上段差を有する構造であってもよい。

上下非対称な構造としては、図1 A～図2 Bに示すように、上部コア3の幅が下部コア4の幅より小さい構造に限られず、上部コア3の幅が下部コア4の幅より大きい構造とすることもできる。下部コア4の上により幅の小さい上部コア3を設ける場合、基板（及び下部クラッド）の上に設けたコア材料層の上部から一部をエッチング等で除去する方法により、同じ材料からなる上部コア3と下部コア4を容易に作製することができる。従って、下部コア4の上により幅の小さい上部コア3を設けることが好ましい。

[0023] 下部コア4に対する上部コア3の配置は、上部コア3が下部コア4の幅方向の中心位置に近い方が、偏波変換効率が高く、素子の長さであるテーパ長を短くすることができる。

この観点からは、図2 A及び2 Bに示すように、コアの幅方向の両端に段差を設けることが好ましい。さらに、下部コア4の幅が上部コア3の幅よりも大きく、上部コア3の下辺が下部コア4の上辺に含まれる場合は、図2 Aの断面図に示すように、リブ導波路を作製するプロセスを利用することができる。

一方、図1 A及び1 Bに示すように、下部コア4と上部コア3の幅方向の一つの端が重なるようなコア形状では、段差が幅方向の反対側の一つの端のみに生じ、下部コア4の張り出しが大きくなる。従って、製造プロセスの要求精度が下がり、生産効率を高めることができる。

上部コア3と下部コア4は同じ材料からなることが好ましい。例えば、上部コア3と下部コア4をともにSiで構成することができる。コアのSiは、意図的な不純物（ドーパント）あるいは不可避の不純物を含んでもよい。

[0024] さらに、本実施形態の高次偏波変換素子によれば、上部クラッド6と下部クラッド7で異なる屈折率を持たなくても、高次偏波変換を行うことができる。このため、上部クラッドと下部クラッドとの材料が同一の場合であっても、光導波路上で TE_1 から TM_0 への変換及び TM_0 から TE_1 への変換である高次偏波変換を行うことが可能である。例えば下部クラッド7の材料に SiO_2 を用いる場合、上部クラッド6にも SiO_2 を用いることが好ましい。上部クラッド6の SiO_2 の堆積に際して、意図的な不純物（ドーパント）あるいは不可避の不純物を含んでもよい。

上部クラッドと下部クラッドとが同じ材料でないとしても、上部クラッドと下部クラッドとを同じ元素種から構成することもできる。ここで、「2つの材料が同じ元素種から構成される」ことの定義は、2つの材料を構成する元素がすべて同じであることをいう。例えば、シリコン（ Si ）の元素種は Si のみであり、シリカ（ SiO_2 ）の元素種は Si 及び O である。 Si 及び O の2つの元素種から構成される材料は、 SiO_2 と同じ元素種ということができるが、 Si のみから構成される材料（ Si 等）や、 Si 及び O 以外の元素種を含む材料（ Si_3N_4 等）は、 SiO_2 と同じ元素種とはいえない。

[0025] 次に、上記構造の光導波路素子によって高次偏波変換が起こる原理について述べる。一般に、光導波路内の光の閉じ込めの強さに応じて、各モードの実効屈折率が変化する。この閉じ込めの強さは、コアとクラッドの屈折率がそれぞれ一定の場合、コアの大きさに依存し、コアが大きいほど閉じ込めが大きい。そのため、コアの大きさを変化させることで実効屈折率が変化する。ここでは幅方向の変化を考える。幅方向のコアの大きさの変化量に対して、 TE モードの実効屈折率は、 TM モードの実効屈折率よりも大きく変化するため、導波路幅に対する実効屈折率の変化を表すグラフ（実効屈折率曲線）において TE_1 と TM_0 で接近する点が存在する。

上下対称な光導波路形状では、 TE_1 の実効屈折率曲線と TM_0 の実効屈折率曲線とが交わり、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率は縮退する。この場合、この交点の前後でモードの変換は生じない。

一方で、上下非対称なコア形状をもつ光導波路の場合、非特許文献 1 で述べているように屈折率断面の屈折率分布が上下非対称になるため、上下対称なコア形状を持つ導波路では縮退していた TE_1 と TM_0 の点が分離している。このとき、 TE_1 と TM_0 は同一の実効屈折率曲線上で連続的に繋がるので、導波路幅を緩やかに変化させることで高次偏波変換を行うことが可能となる。なお、詳細な具体例は、計算例 1 及び各実施例で述べる。

[0026] 続いて、本実施形態の光導波路素子の作製上の優位点を挙げる。本実施形態のようなコア形状を持つ光導波路はリブ導波路を作製するプロセスで作製することが可能である。基板型光導波路では、矩形導波路と共に、矩形導波路より損失の小さいリブ導波路を併用することが多いので、図 1 A～図 2 B に示すような 2 段重ねのコア形状は、多くの場合に余分なプロセスを必要とせずに作製可能である。下部コアと上部コアとに同じ材料を使用することが可能である。特に、リブ型の位相変調部を有する光変調器（参考文献：K. Go i et al., "20-Gbps BPSK silicon Mach-Zehnder modulator with excellent chirp-free performance," OFC/NFOEC 2013, OW4J.4.）と集積する場合、位相変調部を作成する際に一括して本発明を作成することが可能となる。そのため、DP-QPSK 変調器の作成が大変容易となる。また、上部クラッドに下部クラッドと同じ材料を使用することが可能であり、異なる材料を用いる必要がある高次偏波変換素子に比べて作製の単純化が図れる。また上部クラッドと下部クラッドに異種材料を使用すると、線膨張係数などの違いによりひずみが生じ歩留りを下げてしまう。従って、上部クラッドと下部クラッドとを同じ材料で作製することで歩留り向上にもつながる。特に SOI（Silicon on Insulator）基板による光導波路は、下部クラッドとなる BOX（buried oxide）層は SiO_2 であり、上部クラッドも SiO_2 が多用される。従って、本実施形態のように上部クラッドと下部クラッドとが同じ材料で高次偏波変換が可能であれば SOI 基板による光導波路にも用いることができる。

[0027] 非特許文献 1 に記載される構造では、上部クラッドと下部クラッドの屈折率が異なる場合でも、これらの屈折率差が大きい場合、上下の非対称性

が小さくなり、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率が接近する。従って、十分な変換を行うのに必要なテーパ部の長さが非常に長くなってしまい、小型化の観点で不利である。その他に、光導波路で上部クラッドと下部クラッドとに異なる材料を使用しておりこれらの材料の流用が可能である場合でも、屈折率差が小さければ高次偏波変換を小型に行うことができない。また、同一の材料からなる上部クラッドと下部クラッドとでドーピング条件を変えることで屈折率差をつけるなど、余分なプロセスの手間が少ない場合でも、同様に屈折率差が小さければ高次偏波変換を小型に行うことができない。このような場合に小型の基板型光導波路上の素子で高次偏波変換を行う方法が課題として挙げられる。本発明は、このようにクラッドの屈折率差がある場合でも、コア形状を非対称にすることで導波路断面の上下非対称性を強め、より短い距離で偏波変換を行うことが可能となる。

[0028] リブ構造は、リブ（上部コア）及びスラブ（下部コア）の作製時にそれぞれ別のマスクを使うため、下部コアと上部コアとが幅と長手方向にずれる場合がある。しかしながら、本実施形態では上下非対称性構造で導波路が形成されていればよいので、このような製造バラつきによる高次偏波変換への影響は少ない。また、下部コアの高さも製造時にばらつく可能性があるが、同様の理由により高次偏波変換への影響は小さい。損失への影響については、上部コアと下部コアとを設ける区間が短ければ影響は小さい。従って、本実施形態の高次偏波変換素子では、製造バラつきが従来のリブ構造の導波路と同程度で構わない。このため、高次偏波変換素子の上部コアとリブ構造のリブとの作製に同じ（一体の）マスクを使ったり、高次偏波変換素子の下部コアとリブ構造のスラブとの作製に同じ（一体の）マスクを使ったりすることができる。また、マスク上の他の場所で使用しているリブプロセスを併用する場合、下部コアと上部コアの高さが自由に選べないが、同様の理由により高次偏波変換では可能である。

[0029] 高次偏波変換素子を導波する TE_0 の実効屈折率が、 TM_0 と TE_1 の実効屈折率に比べ大きく異なる場合、 TE_0 の他導波モードへ変換は生じにくい。そ

のような実効屈折率に、 TE_0 と TE_1 とを同時に入力すると、ほとんど変換されないままの TE_0 と TM_0 に変換された TE_1 とが同時に出力されるような素子としての働きも持つ。この観点から、 TE_0 の実効屈折率と TE_1 の実効屈折率の差が0.2以上であることが好ましい。同様の理由から、 TE_0 の実効屈折率と TM_0 の実効屈折率の差が0.2以上であることが好ましい。これらの実効屈折率差に関する要件は、光導波路の開始部と終了部との間の全長にわたって、満足されることが好ましい。

[0030] 本実施形態のようにコア形状に上下非対称性を持たせる構造を、図3A及び3Bのように上部クラッドと下部クラッドとの屈折率差を利用した構造（非特許文献1参照）と比較すると、本実施形態の高次偏波変換素子の方が TE_1 から TM_0 への変換損失が小さくなる場合がある。例えば後述する実施例1（図4A～4D）と比較例1（図3A及び3B）に挙げるように、開始部（入力断面）と終了部（出力断面）のそれぞれのコア形状が同一で、かつ、それらの断面の間の長手方向の長さも同一の場合、比較例1（0.587 dB）に比べて実施例1（0.004 dB）はより小さい損失で変換が可能である。

[0031] 本発明の第1実施形態に係る高次偏波変換素子を図4A～4Dに示す。図4Aにコア2の平面図を示し、図4B～4Dにそれぞれ高次偏波変換素子の終了部、中間部、開始部の断面図を示す。コア2の周囲には図2Aと同様にクラッド5が設けられるが、図4A～4Dでは図示を省略している。この構造の詳細は、実施例1として後述する。

なお、図4Aでは、下部コア4が上部コア3の外側に出る階段状の部分に網かけを付けている。後述する図5A等でも、同様に平面図に網かけを付けた場合がある。

[0032] 本実施形態では、開始部8から終了部9に至るまで、上部コア3が下部コア4の幅方向の中央に位置する。ただし、下部コアの中心以外に上部コアを配置した構造でも高次偏波変換は可能である。特に上記構造を、リブ導波路を製造するプロセスで作製した場合、上部コアと下部コアのデザインを決め

るマスクのずれで中心位置からずれるような場合でも、変換効率は低減するが高次偏波変換は可能である。

[0033] 開始部 8 と終了部 9 では、上部コア 3 の幅方向の両端がそれぞれ下部コア 4 の幅方向の両端と重なり、下部コア 4 の幅と上部コア 3 の幅が同じで、図 4 B 及び 4 D に示すように断面が矩形状である。開始部 8 のコア幅 W_1 は終了部 9 のコア幅 W_2 より大きい。

開始部 8 と終了部 9 との間のうち開始部 8 と終了部 9 とを除く部分では、上部コア 3 の幅方向の両端がそれぞれ下部コア 4 の幅方向の両端と常に重ならず、リブ構造と同様になっている。すなわち、図 4 C に示すように、下部コア 4 の幅が上部コア 3 の幅よりも大きくなり、導波方向に垂直な断面における上部コア 3 の下辺が下部コア 4 の上辺に含まれている。上底から下底までの距離は、開始部 8 と終了部 9 のコア高さ H_1 に等しく、下部コア 4 の高さ H_2 は一定である。

[0034] 図 4 A に示すコア 2 では、長手方向において、 L_1 の区間では上部コア 3 の幅のみを変化させて下部コア 4 の幅を一定とし、 L_2 の区間では下部コア 4 の幅のみを変化させて上部コア 3 の幅を一定としている。上部コア 3 の幅と下部コア 4 の幅を長手方向の同じ区間内で変化させた場合、これらの幅の差が小さいまま長手方向に変化することになる。従って、上下非対称性が小さい。即ち TE_1 と TM_0 の実効屈折率差が小さい範囲での変化になってしまい、変換効率が低下する。そのため、上部コア 3 の幅を開始部 8 側で変化させ、上部コア 3 と下部コア 4 の幅の差が広がった後に、終了部 9 側で下部コア 4 の幅を小さくする構造は、変換効率が高く、素子の長さであるテーパ長 (L_1 と L_2 の長さの合計) を短くすることができる。

[0035] また、コア 2 の長手方向の幅の変化の仕方は、長手方向の距離に対して幅を線形に変化させている。この幅の変化は、二次関数などの任意の連続曲線状の変化に変えることも可能であるが、曲線状の導波路構造は線形に変化させた場合に比べ再現性が低くなる。そのため、図 4 A に示すようなコア 2 を採用することで製造プロセスによる影響を低減させることができる。

[0036] 本実施形態の構造では、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率曲線の分離の度合いが、上部コアと下部コアの寸法を同じにし、上部コアの位置を中心以外でかつ下部コアからはみ出さない範囲に置いた構造に比べて大きい。従って本実施形態では、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率差が大きいほど、高次偏波変換の効率が高いため、素子の長さであるテーパ長を短くすることが可能である。

[0037] 本発明の第2実施形態に係る高次偏波変換素子を図5A～5Dに示す。図5Aにコア2の平面図を示し、図5B～5Dにそれぞれ高次偏波変換素子の終了部、中間部、開始部の断面図を示す。コア2の周囲には図1Aと同様にクラッド5が設けられるが、図5A～5Dでは図示を省略している。この構造の詳細は、実施例2として後述する。

[0038] 本実施形態では、開始部8から終了部9に至るまで、上部コア3と下部コア4の幅方向の一つの端が一致する構造である。コア2の長手方向の断面形状の変化の特徴や、幅の変化の仕方は、図4A～4Dの第1実施形態と同様である。

この構造は、実効屈折率差が小さく偏波変換効率が低下するが、第1実施形態の構造に比べて上部コアに覆われていない下部コアの部分が広く、製造において第1実施形態のものより要求精度が下がり、再現性の高い構造の作製が可能である。

[0039] 本発明の第3実施形態に係る高次偏波変換素子を図6A～6Cに示す。図6Aにコア2の平面図を示し、図6B及び6Cにそれぞれ高次偏波変換素子の終了部、開始部の断面図を示す。コア2の周囲には図1Aと同様にクラッド5が設けられるが、図6A～6Cでは図示を省略している。この構造の詳細は、実施例3として後述する。

[0040] 開始部8の断面形状がリブ導波路で、終了部9の断面形状が矩形導波路となり、上部コア3と下部コア4の幅方向の中心が一致する構造である。図6Cに示すように開始部8では下部コア4の幅が上部コア3の幅よりも大きく、図6Bに示すように終了部9では上部コア3の幅と下部コア4の幅が同じである。コア2の長手方向の幅の変化の仕方は、長手方向の距離に対して幅

を線形に変化させている。開始部 8 と終了部 9 との間では、下部コア 4 と上部コア 3 の幅の比率は異なるが、図 6 C と同様な断面形状となっている。

[0041] 開始部 8 と終了部 9 との間で、上底の長さは $W1a$ から $W2$ まで、下底の長さは $W1$ から $W2$ まで、光導波路の長手方向に沿って徐々に変化させることで、 TE_1 から TM_0 への変換が可能である。本構造のコア 2 の長手方向の断面形状の変化の特徴として、開始部 8 から終了部 9 まで上部コア 3 の幅と下部コア 4 の幅を線形に変化させている点がある。本構造では、終了部 9 及びその近傍を除き、開始部 8 側ではリブ構造をとり、上部コア 3 と下部コア 4 の幅の差が大きいため、上下非対称性が高い。このため、実効屈折率差が大きい範囲で幅が変化して、変換効率を高くすることができる。

[0042] リブ導波路は、矩形導波路よりも、製造プロセスによって起こる側壁荒れによる損失が小さい。通常伝搬に使用される TE_0 に比べて、大きく広がった電界分布を持つ TE_1 は、特に側壁荒れの損失が大きいため、リブ導波路を導波させることで、損失の少ない伝搬が可能である。上記構造では、リブ導波路を伝搬してきた TE_1 を直接、 TM_0 に変換することが可能な構造を特徴とする。 TE_1 を一度矩形導波路に変換することなく TM_0 に変換することが可能であるため、余分な距離を伝搬する必要が無く、側壁荒れや導波路の変換で生じる損失をなくすことが可能である。

[0043] 本発明の高次偏波変換素子は上述の実施形態に限定されず、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。例えば、入出力断面（開始部及び終了部）や長手方向の変化が次のようになる構造の高次偏波変換素子も可能である。

[0044] 本発明の第 1 又は第 2 実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例を図 7 A ～ 7 D に示す。図 7 A ～ 7 D はそれぞれコアの平面図である。これらは、第 1 又は第 2 実施形態と同様に、開始部 8 と終了部 9 の断面が矩形状で、上下対称な構造である。すなわち、開始部 8 の断面において下部コア 4 の幅と上部コア 3 の幅が同じであり、かつ、終了部 9 の断面において下部コア 4 の幅と上部コア 3 の幅が同じである。また、第 1 又は第 2 実施形態と同様に開始

部 8 と終了部 9 との間で上部コア 3 の幅が下部コア 4 の幅よりも常に狭い。

図 7 A は、図 5 A と同様に、上部コア 3 の片側に下部コア 4 がはみ出した段差部を有する。図 7 B は、図 4 A と同様に、上部コア 3 の両側に下部コア 4 がはみ出した段差部を有するが、上部コア 3 が下部コア 4 に対して幅方向の中心になくてもよく、左右非対称である。図 7 C では、上部コア 3 及び下部コア 4 のテーパ部分における幅の変化が連続的な変化であるが、線形（直線）でなくて曲線状である。つまり、開始部 8 から終了部 9 に向けて曲線状に上部コア 3 の幅が狭まっている。さらに、図 7 D では、開始部 8 から終了部 9 に向けて曲線状に上部コア 3 及び上部コア 3 の幅が狭まっている。

[0045] 第 1 又は第 2 実施形態の光導波路の場合、寸法の具体例として、開始部の断面において、コア全体の高さが 220 nm であり、コア全体の幅が 700 nm 以上であること、及び、終了部の断面において、コア全体の高さが 220 nm であり、コア全体の幅が 620 nm 以下であることが好ましい。このように、コアの高さを特定の値に統一して、コア幅のみを変更するようにすれば、SOI 基板など特定の厚さのコア材料（Si）層を有する基板から光導波路を作製する工程が容易になる。製造誤差を $\pm 10\text{ nm}$ とした場合、開始部及び終了部の断面におけるコア全体の高さは、 210 nm から 230 nm 程度が好ましい。また、下部コアの高さは、製造誤差を考慮した場合、 75 nm から 115 nm 程度が好ましい。

[0046] 第 1 又は第 2 実施形態について、図 4 A、図 5 A、及び図 7 A～7 D を用いてさらに詳しく説明する。

図 4 A、図 5 A、及び図 7 A～7 D では、開始部 8 と終了部 9 との間のうち開始部 8 と前記終了部 9 とを除く部分で上部コア 3 の幅が下部コア 4 の幅よりも常に狭い。そのため、2 回のエッチングによって、作成することが可能となる。そのため、例えば、SOI 基板の上位層である S 層をエッチングで削り、その上から SiO₂ を堆積させることで作製可能である。

また、光の進行方向に対して、図 4 A のようにコア幅の変化は段階的でもよいし、図 7 D のように連続的でもよい。コア幅の変化が段階的な方が設計

が容易である。一方、コア幅の変化が連続的な場合はより滑らかに導波路構造を変化させることができ、さらなる低損失化が可能となる。

また、下部コアの上部コアに対してはみ出している部分は、図4 A等のように光の進行方向に対して、両側の張り出しているとしても良いし、図5 Aのように片側だけ張り出しているとしてもよい。両側に張り出している場合の方が高い高次偏波変換効率を持つ。片側に張り出している場合は、下部コアの張り出しをより広く保つことができるので、製造時に要求される解像度を緩和できる。

[0047] 上記実施形態の光導波路では、異なる導波路幅を持つ矩形導波路同士を効率的なテーパ導波路によって接続可能であり、かつ、開始部8から終了部9にかけてコア2の幅が狭くなる導波路（テーパ導波路）内に高次偏波変換部が併設される（埋め込まれる）。この構成を有することによって、短距離での高次偏波変換が可能である。

[0048] 以下、図39を用いて上記実施形態に係る高次偏波変換素子の原理を述べる。

図39（b）は開始部から終了部までの断面が常に矩形で開始部8から終了部9にかけて幅が狭くなるコア2を有するテーパ導波路であり、図39（a）は図39（b）のテーパ導波路に高次偏波変換部74が埋め込まれた高次偏波変換素子である。

まず、高次偏波変換を行う場合、開始部8（入力断面）では、 TE_0 の実効屈折率が TE_1 の実効屈折率よりも大きく、 TE_1 の実効屈折率が TM_0 の実効屈折率よりも大きく、終了部9（出力断面）では、 TE_0 の実効屈折率が TM_0 の実効屈折率よりも大きく、 TM_0 の実効屈折率が TE_1 の実効屈折率より大きい必要がある。さらに、開始部8と終了部9との間のコア2が、連続的に導波路が接続された構造を有し、かつ図39（a）のように上部コア3と下部コア4の2段テーパ導波路構造を有する必要がある。なお、以下2段テーパ導波路構造を持つ部分を2段テーパ部73と呼ぶ。

[0049] 仮に図39（b）のように上部コアの幅と下部コアの幅が開始部から終了

部まで常に等しい場合を考えた場合、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率は、入れかわり(縮退点を持ち)高次偏波変換は行われない。

一方、図39(b)で示すように上部コア3と下部コア4の幅が異なる場合、2段テーパ部73の断面は上下非対称な屈折率分布を持つ。上下非対称な屈折率分布では、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率は入れ替わらず(縮退点を持たず)、ハイブリッドモードと呼ばれる TE_1 と TM_0 が入り交じった導波モードが生じる。このハイブリッドモードを利用することで、高次偏波変換が行われる。なお、以下ではハイブリッドモードが生じる部分を高次偏波変換部74と呼ぶ。ただし、高次偏波変換を高い変換効率で行うには、高次偏波変換部74において、電界の連続的な変化(断熱変換)が行われるようにテーパ長を長くする必要がある。

この場合、上部コア3と下部コア4の高さを一定としたとき、開始部8と終了部9との実効屈折率の順番の条件を満たす場合、常に開始部8の上部コア3の幅は、終了部9の上部コア3の幅に比べて大きくなる。また、常に開始部8の下部コア4の幅は、終了部9の下部コア4の幅に比べて大きくなる。

これは次の理由による。

コア2の幅が狭いほど、幅方向の電界成分が支配的な TE_1 の光閉じ込めが弱くなる。光閉じ込めが弱いと、クラッド5に電界が広がり、コア2よりもクラッド5の屈折率の影響を受けるため、実効屈折率が低下する。それに対して、 TM_0 は高さ方向の電界成分が支配的であるため、コア幅の狭窄化による実効屈折率の変化は TE_1 よりも小さい。そのため、前述の前提条件を満たすときは、常に開始部8のコアの幅は、終了部9のコア幅に比べて大きくなる。

[0050] したがって、高次偏波変換素子では、幅が異なる矩形導波路の間をテーパ導波路で接続する必要がある。このような光素子のうち、高次偏波変換の機能を持たない通常の光素子の小型化を考えた場合、幅が異なる矩形導波路を効率的に接続するには、幅広の矩形導波路(開始部8)から幅狭の矩形導波

路（終了部 9）へ、幅を単調に狭めたテーパ導波路を用いる方法がある。

[0051] 前述のテーパ導波路を基に、導波路内に高次偏波変換部 74 を併設する。高次偏波変換部 74 は、上下非対称な屈折率断面部を持つことで実現できる。そこで、上記実施形態では、前述のテーパ導波路に対して、上部コアと下部コアを設け、この幅の変化が光の進行方向にそれぞれ異なるような 2 段テーパ導波路構造を開始部 8 と終了部 9 の間に設ける。このとき、開始部 8 と終了部 9 の間では、上下非対称な屈折率分布を持たせるため、開始部 8 から終了部 9 までの断面における下部コア 4 の幅と上部コア 3 の幅とは常に異なる。さらに、上部コア 3 又は下部コア 4 の幅が単調に減少しかつ上部コア及び下部コアの両方の幅が増えない。それにより、異なる幅の開始部 8 及び終了部 9 を有する矩形導波路を効率的に接続し、かつ、その間に高次偏波変換部 74 を設けることが出来る。これにより、小型でかつ高密度集積が可能な高次偏波変換素子を実現できる。

[0052] さらに、上記実施形態の高次偏波変換素子を用いると、通常のテーパ導波路に高次偏波変換部を併設としているため、高次偏波変換部 74 の埋め込み位置を任意に設計可能である。

例えば、図 40 に示すように、構造が定まった開始部 8 と終了部 9 に対して、上記実施形態の高次偏波変換素子を用いる際に全素子長に対する高次偏波変換部 74 の割合も任意に設計可能である。これは、光の導波方向に対する 2 段テーパの変化の仕方を調整することで可能となる。高次偏波変換素子全体に占める高次偏波変換部の割合が大きいほど、高次偏波変換の効率が高まる。そのため、より短い距離で高効率な変換が可能となる。ただし、損失が十分小さくなるように高次偏波変換部以外の部分の導波路を設定する必要がある。

[0053] また他の例として、上記実施形態の高次偏波変換素子を用いると、高次偏波変換素子全体に対する高次偏波変換部 74 の位置を調整することも可能である。開始部 8 と終了部 9 との幅が異なっている場合、2 段テーパの変化の仕方を調整が同一であると、高次偏波変換部の位置がずれる。高次偏波変換

部の位置は、後述するように素子の中央にある方が、波長帯域と製造誤差の観点で好ましい。そこで、図40と同様に、光の進行方向に対する2段テーパの変化の仕方を調整することで、図41A～41Cに示すように任意の幅の開始部8と終了部9に対して、高次偏波変換部74を高次偏波変換素子の中央付近に設けることが可能となる。図41A～Cでは図41A、図41B、図41Cの順番で開始部8及び終了部9の幅が小さくなっているが、すべてにおいて高次偏波変換部74は中央に配置される。

[0054] また、導波する光の波長が変化すると、コアへの光閉じ込めの程度が変わる。それにより、実効屈折率が変化し、後述の実施例10で定義される高次偏波変換部74の位置が変化する。上記実施形態では、開始部と終了部との間で常に上下非対称な構造を持つことから、高次偏波変換部の位置がずれても、開始部と終了部の間に高次偏波変換部74を有する限り、変換が可能となる。したがって、上記実施形態は広い波長帯域にわたって動作可能である。特に、高次偏波変換部74が高次偏波変換素子の中央にある場合、より広い波長範囲に割って動作可能となる。これは、波長の変化が大きいほど、高次偏波変換部74の位置ずれが大きくなるためである。上記実施形態を用いると高次偏波変換部を高次偏波変換素子の中央に容易に設計することができる。

[0055] さらに、製造誤差の影響で実効屈折率が変化して高次偏波変換部の位置が変化した場合でも、高次偏波変換部74を高次偏波変換素子の中央に設計可能な上記実施形態では高次偏波変換が可能である。ここで製造誤差が生じる例として、上部コア3又は下部コア4の幅が設計値よりずれたり、上部コア3又は下部コア4の高さが設計値よりずれたり、上部コア3と下部コア4の相対的位置がずれたり、また、上部コア、もしくは下部コアの側壁が基板に対して鉛直方向から傾きを持つ場合が挙げられる。

[0056] さらに、エッチングでコア2を形成する際、図42Aのように上部コア3または下部コア4の幅が設計値に対してランダムな微小変動（側壁荒れ）を起こすことがある。このコアの幅の微小変動が生じると、光の閉じ込めが変

化し、それに応じて実効屈折率もランダムに変動する。そのため、実効屈折率曲線が実質的に太くなり、 TE_1 と TM_0 の実効屈折率の交差の分離の程度が弱まってしまう。即ち、側壁荒れの影響で、高次偏波変換部の変換効率が低下してしまう。上記実施形態によると、全素子長に占める高次偏波変換部74の割合を高めることが出来るため、高次偏波変換素子全体における変換効率低下を抑えることが可能となる。

また、側壁荒れの影響は、上部コア3と下部コア4との幅が大きいほど小さい。コア幅が大きいと、光がコア内部により閉じ込められ、その結果、コアの幅が変動した影響を小さくできるためである。その場合、開始部8に近いほどコア幅が大きいので、図42Bのように開始部8に近い位置に高次偏波変換部74を設けることで、側壁荒れによる高次偏波変換の効率低下を抑制することが可能となる。

[0057] さらに、例えば、高次偏波変換素子中の下部コア4の幅が開始部8の下部コア4の幅よりも大きくなる部分（幅広部）を有すると、その幅広部では開始部8よりもコアへの光の閉じ込めの程度が高くなる。つまり、開始部8では導波しなかった、より高次の導波モード（実効屈折率が、 TE_1 や MT_0 よりも小さい導波モード）を導波する場合がある。その場合、製造誤差によるコア幅の変動によって摂動が起こり、入力した TE_1 がこの高次モードへ変換されてしまう可能性がある。この高次モードへの変換によって損失が生じ、さらに高次偏波変換素子の導波路中をある距離進んだ後に高次モードから TE_1 に逆変換することで、元の TE_1 と位相がずれた TE_1 が重なって伝搬し、損失の波長依存性を招く恐れがある。

一方、上記実施形態では、上部コア3及び下部コア4が開始部8の幅よりも広がることはない。従って、開始部で導波しない高次モードは、それ以降も導波モードとはならず、上記の問題は生じない。

[0058] 本発明の第3実施形態に係る高次偏波変換素子の改変例を図8A～8Cに示す。図8A～8Cはそれぞれコアの平面図である。これらの光導波路は、第3実施形態と同様に、開始部8の断面が上下非対称なリブ構造で、終了部

9の断面が上下対称な矩形状のコアを有する。

図8Aは、上部コア3の片側に下部コア4がはみ出した段差部を有する。図8Bは、上部コア3の両側に下部コア4がはみ出した段差部を有するが、上部コア3が下部コア4に対して幅方向の中心にはなく、左右非対称である。図8Cでは、テーパ部分における上部コア3及び下部コア4の幅の変化が連続的な変化であるが、線形（直線）でなくて曲線状である。

第3実施形態の光導波路の場合、寸法の具体例として、開始部の断面において、リブ導波路のスラブとなる下部コアの高さが75～115nmであり、コア全体の高さが210～230nmであり、上部コアの幅が600nm以上であること、及び終了部の断面において、コア全体の高さが210～230nmであり、コア全体の幅が620nm以下であることが好ましい。このように、コア全体の高さ及び下部コアの高さを特定の値に統一して、コア幅のみを変更するようにすれば、SOI基板など特定の厚さのコア材料（Si）層を有する基板からエッチング等により下部コアを有する光導波路を作製する工程が容易になる。製造誤差を±10nmとした場合、開始部及び終了部の断面におけるコア全体の高さは、210nmから230nm程度が好ましく、下部コアの高さは、80nmから110nm程度が好ましい。

開始部における上部コアの幅は、終了部におけるコア全体の幅より広いことが好ましく、700nm以上がより好ましい。開始部における上部コアの幅が終了部におけるコア全体の幅以下である場合、開始部における下部コアの幅が終了部におけるコア全体の幅より広いことが好ましい。

[0059] 本発明の第4実施形態に係る高次偏波変換素子を図9A～9Cに示す。図9Aにコア2の平面図を示し、図9B及び9Cにそれぞれ高次偏波変換素子の終了部、開始部の断面図を示す。コア2の周囲には図2Aと同様にクラッド5が設けられるが、図9A～9Cでは図示を省略している。この構造の詳細は、実施例4として後述する。

また、本発明の高次偏波変換素子の第4実施形態の改変例を図10A～10Cに示す。図10A～10Cはそれぞれコアの平面図である。

[0060] 本実施形態の光導波路は、開始部 8 の断面が上下対称な矩形状で、終了部 9 の断面が上下非対称なリブ構造のコアを有する。開始部 8 と終了部 9 との間で、上底の長さは $W1$ から $W2a$ まで、下底の長さは $W1$ から $W2$ まで、光導波路の長手方向に沿って徐々に変化させることで、 TE_1 から TM_0 への変換が可能である。

なお、コア形状の左右に関する対称性は必ずしも必要とせず、図 10A ~ 10C に示すように、上部コア 3 が下部コア 4 に対して中心になくてもよく、また、テーパ部分は連続的な変化であれば線形（直線）でなくともよい。

第 4 実施形態の光導波路の場合、第 1 ~ 3 実施形態の同様の趣旨に基づいて、開始部の断面において、コア全体の高さが 220 nm に等しく、コア全体の幅が 700 nm 以上であり、終了部の断面において、コア全体の高さが 220 nm に等しく、下部コアの高さが 95 nm に等しく、上部コアの幅が 620 nm 以下であることが好ましい。

[0061] 本発明の第 5 実施形態に係る高次偏波変換素子を図 11A ~ 11C に示す。図 11A にコア 2 の平面図を示し、図 11B 及び 11C にそれぞれ終了部、開始部の断面図を示す。コア 2 の周囲には図 2A と同様にクラッド 5 が設けられるが、図 11A ~ 11C では図示を省略している。この構造の詳細は、実施例 5 として後述する。

また、本発明の第 5 実施形態に係る高次偏波変換素子改変例を図 12A ~ 12C に示す。図 12A ~ 12C はそれぞれコアの平面図である。

[0062] 本実施形態の光導波路は、開始部 8 と終了部 9 の断面が上下非対称なリブ構造のコアを有する。開始部 8 と終了部 9 との間で、上底の長さは $W1a$ から $W2a$ まで、下底の長さは $W1$ から $W2$ まで、光導波路の長手方向に沿って徐々に変化させることで、 TE_1 から TM_0 への変換が可能である。

なお、コア形状の左右に関する対称性は必ずしも必要とせず、図 12A ~ 12C に示すように、上部コア 3 が下部コア 4 に対して中心になくてもよく、また、テーパ部分（上部コア 3 が下部コア 4 の幅）は連続的な変化であれば線形（直線）でなくともよい。

第5実施形態の光導波路の場合、第3実施形態の同様の趣旨に基づいて、開始部の断面において、下部コアの高さが95nmであり、コア全体の高さが220nmであり、上部コアの幅が600nm以上であること、及び終了部の断面において、下部コアの高さが95nmであり、コア全体の高さが220nmであり、上部コアの幅が620nm以下であることが好ましい。開始部における上部コアの幅は、終了部における上部コアの幅より広いことが好ましく、700nm以上がより好ましい。開始部における上部コアの幅が終了部における上部コアの幅以下である場合、開始部における下部コアの幅が終了部における上部コアの幅より広いことが好ましい。

[0063] <非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子>

本発明の高次偏波変換素子は、同一基板上の光導波路において、他の素子と組み合わせて用いることができる。例えば、非対称方向性結合器と本発明の高次偏波変換素子とを組み合わせることで偏波変換素子を実現することが可能である。この偏波変換素子は、 TE_0 を非対称方向性結合器によって TE_1 に変換し、 TE_1 を高次偏波変換素子によって TM_0 に変換する。

図13A及び13Bに、本発明の高次偏波変換素子を非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子の一例を示す。図13Aはコアの平面図であり、図13Bは非対称方向性結合器における断面図である。この構造の詳細は、実施例6として後述する。

[0064] 非対称方向性結合器13は2つの矩形状の導波路である第1の光導波路11と第2の光導波路12から構成される。これらの導波路の周囲は、図13Bに示すように、クラッド14で覆われている。第1の光導波路11と第2の光導波路12のうち、第2の光導波路12のみに高次偏波変換素子10が接続されている。

第1の光導波路11には TE_0 が導波する。また、第2の光導波路12には TE_1 が導波する。第1の光導波路11の TE_0 と第2の光導波路12の TE_1 とが近い実効屈折率を持つため、第1の光導波路11から第2の光導波路12へと結合可能である。第1の光導波路11に接続される入力側の導波路を

第1のポート11aとし、第2の光導波路12に接続される入力側の導波路を第2のポート12aとする。第2の光導波路12の出力側にある第3のポート12bは、高次偏波変換素子10の開始部8に接続される。図13Aに示す高次偏波変換素子10は、一例として図4A～4Dと同様な構造を示しているが、特にこれに限定されない。

[0065] 第1のポート11aに入力した TE_0 は、非対称方向性結合器13で第2の光導波路12の TE_1 に結合し、第3のポート12bより TE_1 として出力される。第3のポート12bから出力される TE_1 は、高次偏波変換素子10に入力され、最終的に TM_0 に変換される。

一方、第2のポート12aに TE_0 を入力すると、非対称方向性結合器13では、第2の光導波路12の TE_0 の実効屈折率が第1の光導波路11のどのモードの実効屈折率とも大きく異なる。そのため、モード結合や変換が起きない。さらに高次偏波変換素子10においても TE_0 はモード変換しないため、第3のポート12bから入力される TE_0 は高次偏波変換素子10の終了部9までほとんど損失無く透過する。従って、第1のポート11aと第2のポート12aへ同時に TE_0 を入力すると、本構造の出力部である高次偏波変換素子10の終了部9では、 TE_0 と TM_0 とが合波した出力が得られる。つまり、本構造は、偏波変換と偏波合波の機能を兼ね備えた素子として動作することも可能である。

[0066] なお、本構造は時間に対して可逆なため、出力部から入力された TE_0 と TM_0 の多重光は、それぞれのモードが分離され、第1のポート11a、第2のポート12aから TE_0 として出力される、偏波分離と偏波変換を兼ね備えた素子として動作可能である。

第2の光導波路12の TE_0 の実効屈折率が第1の光導波路11のモードの実効屈折率とも異なる程度としては、非対称方向性結合器13の第1の光導波路11の TE_0 の実効屈折率と第2の光導波路12の TE_0 の実効屈折率の差が0.2以上であることが好ましい。

[0067] 図14A及び14Bに、本実施形態の高次偏波変換素子を非対称方向性結

合器と組み合わせた偏波変換素子の別の一例を示す。図 1 4 A はコアの平面図であり、図 1 4 B は非対称方向性結合器のコアの断面図である。この構造の詳細は、実施例 7 として後述する。

この偏波変換素子では、非対称方向性結合器 1 3 r がリブ型導波路から構成される。2つの光導波路のリブ 1 1 r, 1 2 r の間にスラブ 1 3 s が形成され、各リブ 1 1 r, 1 2 r の外側にもそれぞれスラブ 1 1 s, 1 2 s が形成されている。

[0068] 図 1 4 A 及び 1 4 B の偏波変換素子の機能は図 1 3 A ~ 1 3 B の偏波変換素子と同様であり、第 1 のポート 1 1 a と第 2 のポート 1 2 a へ同時に TE_0 を入力すると、高次偏波変換素子 1 0 の終了部 9 から、 TE_0 と TM_0 とが合波した出力が得られる。これにより、偏波多重を行うための素子として用いることが可能である。

[0069] <DP-QPSK 変調器>

本実施形態の偏波変換素子は、参考文献 (P. Dong, C. Xie, L. Chen, L. L. Buhl, and Y.-K. Chen, "112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon," European Conference and Exhibition on Optical Communication, Vol. 1, p. Th.3.B.1, June 16, 2012) に開示されているような偏波多重 4 値位相変調 (DP-QPSK: Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying) に使用することが可能である。図 1 5 に DP-QPSK 変調器の一例を模式的に示す。この DP-QPSK 変調器 2 0 は、通常的光導波路に TE_0 と TM_0 の 2 つのモードが存在できることを利用して、 TE_0/TM_0 の両モードに独立した QPSK 信号を有する、DP-QPSK 変調を行う。具体的には、入力部 2 1 から TE_0 で入力した光を 2 つの光導波路 2 2, 2 2 に分岐し、QPSK 変調器 2 3, 2 3 により各々 QPSK 信号に変調した後、光導波路 2 4, 2 4 の片側の TE_0 を偏波変換素子 2 5 により TM_0 に変換させて、2 つのモードを偏波ビームコンバイナで同一の光導波路上に合成し、 TE_0 と TM_0 に独立した信号を出力部 2 6 に出力する。

[0070] TE_0 の一方を TM_0 に変換して、もう一方の TE_0 と合波させる偏波変換素

子 2 5 の部分に、例えば図 1 3 A ~ 1 4 B に示す実施形態の偏波変換素子を利用することができる。例えば、図 1 3 A ~ 1 4 B の第 1 のポート 1 1 a 及び第 2 のポート 1 2 a が図 1 5 の光導波路 2 4 に相当する。さらに、図 1 3 A ~ 1 4 B の高次偏波変換素子 1 0 の終了部 9 が図 1 5 の出力部 2 6 に相当する。

なお、 TE_0 と TM_0 を変調する方式は QPSK に限らず、複雑な構成を持つ変調器であっても、本実施形態の偏波変換素子を用いて偏波多重を行うことが可能である。

[0071] <偏波ダイバーシティ・コヒーレント受信機>

本実施形態の偏波変換素子は、参考文献 (C. Doerr et al., “Packaged Monolithic Silicon 112-Gb/s Coherent Receiver,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, pp. 762-764, 2011) で開示されているような、 TE_0 と TM_0 を同時に伝送した偏波多重信号の Si 光導波路上のコヒーレント受信機に使用することが可能である。図 1 6 に、偏波ダイバーシティ・コヒーレント受信機の一例を模式的に示す。このコヒーレント受信機 3 0 は、 TE_0 と TM_0 とを同時に伝送した偏波多重信号の光導波路 3 1 を、偏波変換と偏波ビームスプリッタが同時に行える偏波変換素子 3 2 に接続し、光導波路 3 3 の一方には TE_0 の信号を分岐させる。また、光導波路 3 3 の他方には TM_0 から変換した TE_0 の信号を分岐させる。局発光 3 4 として、一般的に用いられる半導体レーザ光源は片偏波のみ、例えば TE_0 (local) の出力を用いる。このような光源を用いる場合、通常局発光の偏波変換が必要となる。しかし、図 1 6 のコヒーレント受信機 3 0 では、信号光は偏波分離後の光導波路 3 3 にいずれも TE_0 の信号 (signal) が導波されるので、局発光の偏波変換が不要になる。信号光と局発光は、光合波部 3 5 を経て、結合部 3 6 から出力される。

偏波変換素子 3 2 に光導波路型の構造を用いる場合、結合部 3 6 における素子外部との光の結合には、基板側方より結合する逆テーパ型のモードフィールド変換器など、偏波分離機能を持たない結合器を利用することが可能で

ある。結合器には、例えば参考文献 (Qing Fang, et al., “Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for silicon photonics,” Optics Express, Vol. 18, Issue 8, pp. 7763-7769 (2010)) に開示されている、逆テーパ型の構造が開示できる。

[0072] 偏波変換と偏波ビームスプリッタが同時に行える偏波変換素子 32 の部分に、例えば図 13A～14B に示す実施形態の偏波変換素子を利用することができる。例えば、図 13A～14B の高次偏波変換素子 10 の終了部 9 が図 16 の光導波路 31 に相当し、図 13A～14B の第 1 のポート 11a 及び第 2 のポート 12a が図 16 の光導波路 33 に相当する。

[0073] <偏波ダイバーシティ方式>

本実施形態の偏波変換素子は、参考文献 (Hiroshi Fukuda et al., “Silicon photonic circuit with polarization diversity,” Optics Express, Vol. 16, Issue 7, pp. 4872-4880 (2008)) で開示されているような、 TE_0 と TM_0 が同時に伝送される偏波多重伝送や、片方の偏波がランダムに伝送されるときに、両モードに対して同様の操作を与えるための素子を利用したい場合、図 17 に示すような偏波ダイバーシティ方式を実行するために用いることができる。図 17 に示す偏波ダイバーシティ方式 40 では、 TE_0 と TM_0 が同時に伝送される偏波多重信号の光導波路 41 を、偏波変換と偏波ビームスプリッタが同時に行える偏波変換素子 42 に接続し、光導波路 43 の一方には TE_0 の信号を分岐させる。また、光導波路 43 の他方には TM_0 から変換した TE_0 の信号を分岐させる。素子 44 で操作された TE_0 の信号光は、光導波路 45 から偏波変換素子 46 で合成して、 TE_0 と TM_0 が同時に伝送される偏波多重信号の光導波路 47 に出力する。

[0074] 偏波変換素子 42 には、図 16 に示すコヒーレント受信機 30 と同様に、偏波変換と偏波ビームスプリッタとが同時に行える本実施形態の偏波変換素子を用いることができる。

偏波変換素子 46 には、図 15 に示す DP-QPSK 変調器 20 と同様に、偏波変換と偏波ビームコンバイナが同時に行える本発明の偏波変換素子を

用いることができる。

[0075] <分岐部と組み合わせた偏波変換素子>

分岐部と本実施形態の高次偏波変換素子を組み合わせることで、偏波変換が可能である。分岐部としては、 2×1 のMMI（マルチモード干渉計）及びY分岐が挙げられる。これらは、2つの入力部分に入力する電界の位相を調整することで、 TE_1 を発生させることが可能である。もしくは、片側からのみ TE_1 を入力してもよい。そのため、この後段に本実施形態の高次偏波変換素子を接続することで、この TE_1 を TM_0 に変換することができ、偏波変換の機能を持たせることが可能となる。

また、参考文献（Wangqing Yuan, et al., “Mode-evolution-based polarization rotator-splitter design via simple fabrication process,” Optics Express, Vol. 20, Issue 9, pp. 10163-10169 (2012)）では、非対称なY分岐と高次偏波変換素子とを接続することで偏波ビームスプリッタと偏波変換の機能を同時に実現しているが、非対称なY分岐と本実施形態を用いることでも同様の効果を実現することが可能である。

[0076] 図32に、 TE_1 を発生させる変換合波素子の一例を示す。この構造の詳細は、実施例8として後述する。変換合波素子50は、平面矩形状の合波部53における TE_1 の2つのモード分布が、2つの入力部分51、52の TE_0 のモード分布と類似する性質を利用している。2つの入力部分51、52の一方又は両方から TE_0 を入力すると、合波部53からテーパ部分54を経るうちに TE_1 に変換され、 TE_1 として出力部分55から出力される。

各入力部分51、52に入力する2つの TE_0 の位相差を π とすることが好ましい。入力が非対称（反対称）なモード分布を持つことにより、合波後は対称なモード分布を持つ TE_0 は発生しなくなる。これにより、合波後に不必要となる TE_0 の発生を防ぎ、偏波消光比の低下を抑制することができる。

[0077] 変換合波素子50の出力部分55を、例えば図4A～4D等を示す高次偏波変換素子の開始部8に接続すると、出力部分55から出力された TE_1 が、 TM_0 に変換されて、終了部9から TM_0 が出力される。 TM_0 と TE_0 の合波

には、例えば図33に示すような対称方向性結合器60を用いることができる。対称方向性結合器60の構造の詳細は、実施例9に後述する。対称方向性結合器60は、同じコア幅Wを有する2つの導波路61、62が所定の結合長Lの間、所定の間隔Gを介して平行に配置された構造を有する。入力側で、導波路61から TE_0 を、導波路62から TM_0 を入力すると、 TM_0 が導波路61に移行して、導波路61の出力側から偏波多重された信号(TE/TM)を得ることができる。

[0078] 図34及び図35に、図32の変換合波素子50を備えたDP-QPSK変調器の構成例を示す。図中、 TE_0 （基本TEモード）は「TE」、高次TEモードは「 TE_1 」、 TM_0 （基本TMモード）は「TM」と略記した。各QPSK変調器71、72、81、82は、それぞれ2つのマッハツェンダ干渉計を含む。一方のマッハツェンダ干渉計71a、72a、81a、82aは同相成分（I）用であり、もう一方のマッハツェンダ干渉計71b、72b、81b、82bは直交位相成分（Q）用である。

[0079] 図34に示すDP-QPSK変調器70では、2つのQPSK変調器71、72のうち一方のQPSK変調器72のI、Q合波部に変換合波素子50を設けて TE_0 を TE_1 に変換し、高次偏波変換素子10によって TE_1 から TM_0 に変換する。この TM_0 を、対称方向性結合器60により、他方のQPSK変調器71から出力された TM_0 と合波する。

[0080] 図35に示すDP-QPSK変調器80では、一方のQPSK変調器82の2つのマッハツェンダ干渉計82a、82bの合波部にそれぞれ変換合波素子50を設けて、 TE_0 を TE_1 に変換し、高次偏波変換素子10によって TE_1 から TM_0 に変換する。QPSK変調器82のI、Q合波部にTMモード用MMI合波部83を設け、さらに、合波された TM_0 を、対称方向性結合器60により、他方のQPSK変調器81から出力された TM_0 と合波する。

[0081] これらのDP-QPSK変調器70、80によれば、 TM_0 と TE_0 の合波に、非対称の方向性結合器に比べ性能の良い対称方向性結合器60を用いることができる。また、変換合波素子50が合波部を兼ねているため、偏波依

存損失を低減することができる（MMIの過剰損失を0.3 dB以下）。

[0082] 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ず、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。

本発明と同様の原理で、実効屈折率曲線において TE_{2n+1} モード（ n は0以上の整数）と TM_0 が交わる縮退点を本発明と同様の上下非対称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+1} は、 TE モード（ TE_0 , TE_1 , TE_2 , ...）の中で（ $2n+2$ ）番目に実効屈折率が高いモードをいう。 TE_1 モードは、 $n=0$ の TE_{2n+1} モードである。

TE モードの奇数次の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 TM_0 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_1 を含む奇数次の TE モードの E_x は、幅方向に対して反対称、高さ方向に対しては対称な電界分布になる。そのため、屈折率分布を高さ方向に対して非対称にすることで、 TE_{2n+1} の高さ方向の対称性が崩れ、 TM_0 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+1} モードは、 TM_0 との間で変換が可能である。

実施例

[0083] 以下、実施例をもって本発明を具体的に説明する。

<計算例1>

図2A及び2Bに示すようなコア形状が凸型の光導波路の下底を変化させたとき、実効屈折率が高い順に4つのモードの実効屈折率の変化のグラフを図18に示す。波長は $1.55\mu\text{m}$ 、コアはSiで屈折率が3.48、上部クラッド及び下部クラッドは SiO_2 で屈折率が1.44、光導波路の高さが $0.22\mu\text{m}$ 、下部コアの高さが $0.095\mu\text{m}$ 、上部コアの幅が $0.5\mu\text{m}$ とし、上部コアは下部コアの中心に位置している。

[0084] 図18に示すように、実効屈折率が1番目に高いモードは TE_0 であり、実効屈折率が2番目又は3番目に高いモードは、下底（の幅）に依存し、 TE_1 、 TM_0 、又はこれらから変化したモードである。実効屈折率が4番目に高いモードは、図中では特定しないが、さらに高次のモードである。

図18から分かるように、コア断面形状の上下非対称性のため、 TE_1 と TM_0 は縮退することなく、実効屈折率差を常に持つ。図18において、破線の楕円（下底 $0.7\mu m$ 付近）として、モード変換部の概略範囲を示した。このモード変換部では、実効屈折率が2番目に高いモードは、下底が狭いとき TM_0 となり、下底が広いとき TE_1 となる。逆に、実効屈折率が3番目に高いモードは、下底が狭いとき TE_1 となり、下底が広いとき TM_0 となる。よって、同一の実効屈折率曲線（実効屈折率が2番目に高いモードまたは3番目に高いモードのいずれか）をたどることで、それぞれのモードは変換可能である。

[0085] これらのモードの推移をみるために、図19～22にいくつかの下底の幅に対する実効屈折率が2番目に高いモード（#1）と3番目に高いモード（#2）の、それぞれの電界の E_x 成分（幅方向の成分）と E_y 成分（高さ方向の成分）の電界振幅を示す。図19～22に共通して、各図（a）は「#1」の E_x 成分の電界振幅を示し、各図（b）は「#1」の E_y 成分の電界振幅を示し、各図（c）は「#2」の E_x 成分の電界振幅を示し、各図（d）は「#2」の E_y 成分の電界振幅を示す。

[0086] 電界振幅に注目すると、下底の幅が $0.5\mu m$ の図19では、#1が TM_0 で#2が TE_1 となり、反対に下底の幅が $1.2\mu m$ の図22では、#1が TE_1 で#2が TM_0 となっていることが分かる。一方で、下底の幅が $0.6\mu m$ の図20では、#1と#2の電界成分が変化しはじめており、下底の幅が $0.8\mu m$ の図21では、 E_x 成分と E_y 成分のどちらも近い電界振幅を持っていることが分かる。

以上より、連続的に TE_1 と TM_0 とが変換していく様子を見ることができる。このことから、 TE_1 と TM_0 の間で相互に偏波を変換することが可能で

あることが分かる。

[0087] <比較例 1>

比較例 1 では、図 3 A 及び 3 B に示す導波路 101 において、コア 102 が Si、下部クラッド 103 の材料が SiO₂ であり、上部クラッド 104 が空気からなり、コア 102 の高さ H0 が 0.22 μm、開始部の幅 W1 が 0.84 μm であり、終了部の幅 W2 が 0.5 μm であり、長手方向の長さ L0 が 35 μm であり、開始部の矩形導波路からコア幅を長さ方向に対して線形に変化させた構造とした。有限差分時間領域 (Finite-Difference Time Domain: FDTD) 法によるシミュレーションにより求めた高次偏波変換の変換損失 (出力される TM₀ のパワー / 入力される TE₁ のパワー、で表される比) は 0.587 dB であった。

[0088] <実施例 1>

計算例 1 を踏まえて、上部コアが下部コアの中心にくる構造 (上述した第 1 実施形態を参照) を有する実施例 1 の導波路素子を作製する。

図 4 A ~ 4 D に本実施例の素子の図を示す。本実施例では、Si-SiO₂-Si からなる SOI (Silicon on insulator) 基板をもとに導波路を作製する。中間の SiO₂ 層を下部クラッドとして、上部の Si 層をコアとして用いる。コア形成後、上部クラッドとして SiO₂ 層を設ける。

[0089] 下部コア 4 の高さ H2 が 0.095 μm であり、上部コア 3 の高さ (H1-H2 の差) が 0.125 μm であり、下部コア 4 と上部コア 3 とを合わせたコア高さ H1 は 0.22 μm である。開始部 8 では上部コア及び下部コアの幅 W1 が 0.84 μm であり、区間 L2 (長さ 15 μm) では上部コア 3 の幅 W2 が 0.5 μm で下部コア 4 の中央に位置する。区間 L1 (長さ 20 μm) では下部コア 4 の幅 W1 は 0.84 μm であり、終了部 9 では上部コアと下部コアの幅 W2 がともに 0.5 μm である。実施例 1 の構造の区間 L2 では、上部コアの幅 0.5 μm 等のパラメータが計算例 1 と一致する。従って、上で求めた図 18 のグラフのうち、下底の幅が 0.5 ~ 0.84 μm の範囲を実施例 1 に適用することができる。

[0090] また、光の伝搬方向の座標を Z とすると、実施例1の全長に関する Z の断面で計算した実効屈折率曲線を図23に示す。図中の楕円領域付近でモードの変換が行われる。高次偏波変換が行うことが可能であることを示すために、開始部から終了部の間で2番目(#1)と3番目(#2)に実効屈折率の大きい導波モードの E_x 、 E_y 成分を比較する。なお、図23では開始部が $Z = 0 \mu\text{m}$ であり、終了部が $Z = 35 \mu\text{m}$ であり、図4Aの $|V_c$ (中間部)の位置は $Z = 20 \mu\text{m}$ である。開始部断面($Z = 0 \mu\text{m}$)のモードは図24に示し、終了部断面($Z = 35 \mu\text{m}$)のモードは図19と同様になる。これらより、#1のモードは、開始部から終了部の間で主電界が E_x から E_y に、#2のモードは、開始部から終了部の間で主電界が E_y から E_x にそれぞれ変化していることが分かる。また、これらの実効屈折率曲線が交わることなく連続的につながっていることを踏まえると、高次TEから基本TM (基本TMから高次TE)へ変換が可能であることが分かる。また、図21は、 $Z = 21.8 \mu\text{m}$ 付近の電界に相当し、 E_x 、 E_y が同程度になり、変換の過渡的な電界分布が見て取れる。

図18及び図23によれば、実効屈折率が2番目に高いモードと3番目に高いモードとが最も接近する点における両モードの実効屈折率差は0.16である。

[0091] 比較として、後述する実施例2で挙げる上部コアと下部コアの同一の端をそろえた構造では、最も接近する点の実効屈折率差が0.10である。実効屈折率差が大きいほど、高次偏波変換の効率が高いため、上部コアが下部コアの中心にくる構造のほうが、高次偏波変換素子の長さ(テーパ長)を短くすることが可能である。

また、上部コアが幅方向に $+60 \text{ nm}$ ずれた場合でも(上部コアが下部コアの無い範囲にずれた場合は、その範囲に下部コアが新たに作られるとする)、最も接近する点の実効屈折率差は0.15であり、実効屈折率曲線は分離する(縮退しない)ので、高次偏波変換が可能である。

[0092] 以上の構造において、 TE_1 を開始部8に入力し場合に、終了部9から出力

される TM_0 の変換損失（出力される TM_0 のパワー／入力される TE_1 のパワー、で表される比）の波長依存性をFDTD法により求めた。その結果、高次偏波変換に対してほとんど損失が無いことが確認された。

[0093] 図25に前記変換損失の波長依存性を示す。これより、1530～1630nmの広帯域にわたって、変換損失が0.05dB以下であることが分かる。波長1550nmの変換損失は、0.004dBである。上述した比較例1の構造と比べると、実施例1では同様の入力、終了部のコア形状を持ち、長手方向の長さも同一である。一方、比較例1の変換損失は0.587dB、実施例1の変換損失は0.004dBとなり、実施例1は比較例1より小さい損失で変換が可能である。

[0094] また、実施例1の構造に関して、波長1550nmにおける電界をFDTD法で計算した結果を図26に示す。なお、図26では、開始部8が $Z = 20\mu m$ 、終了部9が $Z = 55\mu m$ の位置にあり、図26(a)が E_x 成分、図26(b)が E_y 成分を示す。入力された TE_1 （ E_x 成分が主成分）が、本構造によって最終的に TM_0 （ E_y 成分が主成分）に移り変わっている様子が見て取れる。

[0095] さらに同じ構造に対して、開始部8に TE_0 を入力したときの、終了部9から出射される TE_0 の透過損失（出力される TE_0 のパワー／入力される TE_0 のパワー、で表される比）を求めると、0.001dB以下となった（波長 $1.55\mu m$ ）。これにより、 TE_0 は小さな損失で透過することが分かる。

[0096] <実施例2>

図5A～5Dに示すように、上部コアと下部コアの端が一致する構造（上述した第2実施形態を参照）の高次偏波変換素子を、実施例1と同様の方法で作製する。

下部コア4の高さ H_2 が $0.095\mu m$ であり、上部コア3の高さ（ $H_1 - H_2$ の差）が $0.125\mu m$ であり、下部コア4と上部コア3とを合わせたコア高さ H_1 は $0.22\mu m$ である。開始部8では上部コア及び下部コアの幅 W_1 が $0.84\mu m$ であり、区間 L_2 （長さ $15\mu m$ ）で上部コア3の

幅 W_2 が $0.5\mu m$ である。区間 L_1 (長さ $20\mu m$)で下部コア4の幅 W_1 は $0.84\mu m$ であり、区間 L_1 と L_2 の全長にわたって上部コアと下部コアの端が一致するように位置する。終了部9では上部コアと下部コアの幅 W_2 がともに $0.5\mu m$ である。

[0097] 以上の構造において、光の波長 $1550nm$ のとき、 TE_1 を開始部8に入力した場合に、終了部9から出力される TM_0 の変換損失(出力される TM_0 のパワー／入力される TE_1 のパワー、で表される比)を $FDTD$ により求めた。その結果、変換損失が $0.26dB$ となり、同じ長さである実施例1の素子よりも変換効率は落ちるが、小さい損失で変換できていることが分かる。

[0098] <実施例3>

図6A～6Cに示すように、開始部8の断面形状がリゾ導波路で、終了部9の断面形状が矩形導波路となり、上部コア3と下部コア4との幅方向の中心が一致する構造(上述した第3実施形態を参照)の高次偏波変換素子を、実施例1と同様の方法で作製する。

下部コア4の高さ H_2 が $0.095\mu m$ であり、上部コア3の高さ(H_1-H_2 の差)が $0.125\mu m$ であり、下部コア4と上部コア3とを合わせたコア高さ H_1 は $0.22\mu m$ である。開始部8では、上部コア3の幅 W_1 が $1\mu m$ であり、下部コア4の幅 W_1 が $4\mu m$ である。終了部9では、上部コアと下部コアとの幅 W_2 がともに $0.5\mu m$ である。開始部8の最大のコア幅が $4\mu m$ であり、有限ではあるが、この断面を通る TE_1 の分布は開始部8の下部コア4の両端よりも十分内側にある。そのため、スラフ幅が十分に大きく、リゾ導波路とみなすことが可能である。

[0099] 図27は、実施例3の構造において各断面(＃で表記)での実効屈折率が高い順に4つのモードの実効屈折率の変化を表すグラフである。開始部から終了部までを長手方向に10等分して、開始部(＃0)から終了部(＃10)まで順に番号を付ける。＃の番号が大きいほど下底が小さくなる点を踏まえれば、4つのモードは、計算例1の図18と同様であることが分かる。図

27において#9付近に示した破線の楕円（モード変換部）で TE_1 と TM_0 の実効屈折率が分離しており、 TE_1 と TM_0 の間で高次偏波変換が可能であることが分かる。このときの最小の実効屈折率差は、0.15である。

[0100] <実施例4>

図9A～9Cに示すように、開始部8の断面形状が矩形導波路で、終了部9の断面形状が凸型となり、上部コア3と下部コア4の幅方向の中心が一致する構造（上述した第4実施形態を参照）の高次偏波変換素子を、実施例1と同様の方法で作製する。

下部コア4の高さ H_2 が $0.095\mu m$ 、上部コア3の高さ（ $H_1 - H_2$ の差）が $0.125\mu m$ 、合わせたコア高さ H_1 は $0.22\mu m$ である。開始部8では、上部コアと下部コアの幅 W_1 がともに $0.8\mu m$ である。終了部9では、上部コア3の幅 W_{2a} が $0.44\mu m$ であり、下部コア4の幅 W_2 が $0.5\mu m$ である。この場合、下底と上底（単位 μm ）の寸法関係は、「上底 $=0.8 - 1.2 \times (0.8 - \text{下底})$ 」である。

[0101] 図28は、実施例4の構造において下底の寸法に対して実効屈折率が高い順に4つのモードの実効屈折率の変化を表すグラフである。4つのモードは、計算例1の図18と同様であることが分かる。下底 $0.7\mu m$ 付近に示した破線の楕円（モード変換部）で TE_1 と TM_0 の実効屈折率が分離している。従って、 TE_1 と TM_0 の間で高次偏波変換が可能であることが分かる。

[0102] <実施例5>

図11A～11Cに示すように、開始部8と終了部9の断面形状が凸型となり、上部コア3と下部コア4の幅方向の中心が一致する構造（上述した第5実施形態を参照）の高次偏波変換素子を、実施例1と同様の方法で作製する。

下部コア4の高さ H_2 が $0.095\mu m$ 、上部コア3の高さ（ $H_1 - H_2$ の差）が $0.125\mu m$ であり、合わせたコア高さ H_1 は $0.22\mu m$ である。開始部8では、上部コア3の幅 W_{1a} が $0.7\mu m$ であり、下部コア4の幅 W_1 が $1.1\mu m$ である。終了部9では、上部コア3の幅 W_{2a} が $0.$

3 μm であり、下部コア4の幅 W_2 が0.7 μm である。この場合、上底と下底（単位 μm ）の寸法関係は、「下底＝上底＋0.4」である。

[0103] 図29は、実施例5の構造において上底の寸法に対して実効屈折率が高い順に4つのモードの実効屈折率の変化を表すグラフである。4つのモードは、計算例1の図18と同様であることが分かる。上底0.5 μm 付近に示した破線の楕円（モード変換部）で TE_1 と TM_0 の実効屈折率が分離している。従って、 TE_1 と TM_0 の間で高次偏波変換が可能であることが分かる。

[0104] <実施例6>

図13A及び13Bに、実施例1の高次偏波変換素子を非対称方向性結合器と組み合わせた偏波変換素子の1つの実施例を示す。

図13Bに示す非対称方向性結合器13の断面において、第1の光導波路11のコア幅 E は0.4 μm であり、第2の光導波路12のコア幅 F は0.84 μm であり、第1の光導波路11及び第2の光導波路12のコアの高さ H はともに0.22 μm であり、2つの導波路の間隔 G は0.35 μm とする。

第1の光導波路11は、長さ $L = 54 \mu\text{m}$ の直線部とそれに接続される半径40 μm の曲げ半径を持つ曲げ導波路からなる。第2の光導波路12は、長さ $L = 54 \mu\text{m}$ の直線部とそれに接続される半径40 μm の曲げ半径を持つ曲げ導波路からなる。各導波路の直線部は互いに平行で、両端面がそれぞれ同一平面上にある。

第1のポート11aに入力した TE_0 が、非対称方向性結合器13で第2の光導波路12の TE_1 に結合し、第3のポート12bより TE_1 として出力されるとき、 TE_0 から TE_1 に変換される変換損失を、FDTD法によるシミュレーションで求めた。本構造によれば、変換損失は、波長が1550 nmのとき、0.105 dBとなった。このことより、本構造によって TE_0 と TE_1 との間の変換が可能であることが分かる。

高次偏波変換素子10の変換損失が実施例1で述べたように0.004 dBであるので、非対称方向性結合器13と高次偏波変換素子10を合わせた

偏波変換素子として全体の変換損失は、 0.109 dB となり、偏波変換が可能であることが分かる。

[0105] <実施例 7>

図 1 4 A 及び 1 4 B に示すように非対称方向性結合器がリブ型導波路である偏波変換素子も作製可能である。図 1 4 A 及び図 1 4 B に示す非対称方向性結合器 1 3 r において、リブ型導波路の長さ L_r は $20.8\text{ }\mu\text{m}$ である。第 1 の光導波路のリブ 1 1 r の幅 W_{1r} は $0.4\text{ }\mu\text{m}$ であり、第 2 の光導波路のリブ 1 2 r の幅 W_{2r} は $0.95\text{ }\mu\text{m}$ であり、リブ 1 1 r, 1 2 r の高さ H_{1r} は $0.22\text{ }\mu\text{m}$ である。第 1 の光導波路の外側のスラブ 1 1 s の幅 W_{1s} は $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以上、第 2 の光導波路の外側のスラブ 1 2 s の幅 W_{2s} は $1.1\text{ }\mu\text{m}$ 以上、2 つの導波路の間のスラブ 1 3 s の幅 W_{3s} は $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、スラブの高さ H_{1s} は $0.095\text{ }\mu\text{m}$ である。

[0106] 高次偏波変換素子 1 0 は、実施例 1 と同様に作製される。ただし、本実施例では、開始部 8 の幅 W_1 をリブ 1 2 r の幅 W_{2r} と同じ $0.95\text{ }\mu\text{m}$ とし、終了部 9 の幅 W_2 を $0.6\text{ }\mu\text{m}$ とする。また、上部コア 3 の幅が変化する区間の長さ L_1 は $15\text{ }\mu\text{m}$ 以上とし、下部コア 4 の幅が変化する区間の長さ L_2 は $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上とする。このような実施例 7 の偏波変換素子について、FDTD 法によるシミュレーションで求めた損失の波長依存性の結果を図 3 0 及び図 3 1 に示す。

[0107] 図 3 0 は、偏波変換損失の波長依存性を示すグラフである。偏波変換損失（図 3 0 の loss）は、波長 $1.53\sim 1.63\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で、 $0.4\sim 3.3\text{ dB}$ 程度である。また、図 3 1 は、 TE_0 の透過損失の波長依存性を示すグラフである。この透過損失（図 3 1 の loss）は、波長 $1.53\sim 1.63\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で、 $0.14\sim 0.16\text{ dB}$ 程度である。これらのグラフより、 TE_0 と TE_1 間の変換が可能であり、 TE_0 はほとんど損失を受けることなく透過することから、偏波多重も可能であることが分かる。

[0108] <実施例 8>

図 3 2 に示す、 TE_1 (TE_1) を発生させる変換合波素子を、実施例 1 と

同様に、 $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}$ からなるSOI (Silicon on insulator) 基板をもとに作製する。中間の SiO_2 層を下部クラッドとして、上部の Si 層をコアとして用いる。コア形成後、上部クラッドとして SiO_2 層を設ける。

入力部分51, 52の幅 W_c は600nmであり、入力部分51と入力部分52との間隔 W_d は350nmであり、合波部53の幅 W_a は1700nmであり、出力部分55の幅 W_b は840nmである。合波部53の長さ L_a は1000nmであり、テーパ部分54の長さ L_b は6000nmである。

[0109] 入力部分(幅600nm)の断面における TE_0 と合波部(幅1700nm)の断面における TE_1 のモード分布のシミュレーション結果を図36(a)及び図36(b)に示す。入力部分51, 52の断面では、 TE_0 がそれぞれ導波路の幅方向に長い楕円状のモード分布を1つずつ持ち、合波部53の断面では、 TE_1 が幅方向に2つ並んだモード分布を持つが、入力部分51, 52の断面におけるモード分布と合波部53の断面におけるモード分布が類似する。このことにより、本実施例の変換合波素子50は、入力部分51, 52の TE_0 が合波部53の TE_1 に結合し、 TE_0 を TE_1 に変換することが可能である。

[0110] 有限要素法(FEM: finite element method)による本実施例の変換合波素子の過剰損失のシミュレーションの結果を図37に示す。導波路コアの幅の製造誤差(error)が $\pm 25\text{nm}$ でも、1530~1630nm(Cバンド及びLバンドに相当)にわたって過剰損失は0.35dB未満となった。このことから、本構造が高い製造トレランスと小さな波長依存性を有することが分かる。

[0111] FDTD法による本実施例の変換合波素子の電界シミュレーションの結果を図38に示す。この図では、電界の値を+1から-1の範囲で規格化して表示し、+1は白色、-1は黒色である。図38より、2つの入力部分から入力する TE_0 の節が合波部で横並びに結合し、 TE_1 モードとして出力される様子が見て取れる。 TE_1 モードの分布は、 Z が等しい導波路幅方向におい

て、正負の符号が反対である。上述したように、入力する2つの TE_0 の位相差を π とすることにより、合波後は対称なモード分布を持つ TE_0 は発生しなくなる。 TE_1 変換後の過剰損失は0.25 dBにすることが可能である。

[0112] <実施例9>

図33に示す、対称方向性結合器を、実施例1と同様に、 $Si-SiO_2-Si$ からなるSOI (Silicon on insulator) 基板をもとに作製する。中間の SiO_2 層を下部クラッドとして、上部の Si 層をコアとして用いる。コア形成後、上部クラッドとして SiO_2 層を設ける。各導波路61, 62の幅 W は500 nmであり、導波路61, 62の間隔 G は350 nmである。

[0113] 本実施例の対称方向性結合器60は、 TE_0 の結合長と TM_0 の結合長に差があることを利用して、2つの導波路61, 62が平行に配置される長さ L を適切に設定することにより、一方の導波路から他方の導波路へ、 TM_0 のみを移すことができる。つまり、 TM_0 の結合損失が小さく、 TE_0 の結合損失が大きい（他方の導波路に対して、 TM_0 は結合しやすく、 TE_0 は結合しにくい）方向性結合器が得られる。

FDTD法によるシミュレーションの結果、導波路コアの製造誤差が ± 25 nmでも、過剰損失は小さく、1530~1630 nm (Cバンド及びLバンドに相当) という広い波長範囲で、 TM_0 の結合損失は0.6 dB未満、 TE_0 の結合損失は12 dB以上となった。このことから、本構造が高い製造トレランスと小さな波長依存性を有することが分かる。

[0114] <実施例10>

第1実施形態に基づく構造を有する実施例10の高次偏波変換素子を図43Aに示し、その中央部 ($Z=0.5$) における断面図を43Bに示す。ここで、図43Aの座標は、素子全長を1とした規格化された値を示している。コア2は Si で形成され、クラッド5は SiO_2 で形成される。開始部8 ($Z=0$) における幅 $W1=850$ nm、終了部9 ($Z=1$) の幅 $W2=500$ nm、中央部 ($Z=0.5$) における上部コア3の幅及び下部コア4の幅をそれぞれ $W3=500$ nm、 $W4=850$ nmに設定した。上部コア3の

幅及び下部コア4ともに開始部、中央部、終了部は直線で結ばれている。また、コア2の高さ及び下部コア4の高さはそれぞれ $H_1 = 220 \text{ nm}$ 、 $H_2 = 90 \text{ nm}$ で一定とした。

図43A及び43Bに示す高次偏波変換素子は、SOI基板のS1層をエッチングで削り、その上からSiO₂を堆積させることで作製可能である。本実施例で上記実施形態に係る高次偏波変換が可能であることをシミュレーションを用いて示す。

まず、高次偏波変換部の定義について述べる。導波モードの支配的な電界成分が E_x か E_y かを定量化に示すために、以下の式(1)及び式(2)のようにそれぞれの割合を示す量 R_{TE} 、 R_{TM} を定義する。

[数1]

$$R_{TE} = \frac{\left| \int_S E_x H_y ds \right|}{\left| \int_S E_x H_y ds \right| + \left| \int_S E_y H_x ds \right|} \quad (1)$$

[数2]

$$R_{TM} = \frac{\left| \int_S E_y H_x ds \right|}{\left| \int_S E_x H_y ds \right| + \left| \int_S E_y H_x ds \right|} \quad (2)$$

ここで、 H_x 、 H_y はそれぞれ幅方向と高さ方向の磁界成分であり、積分は幅方向、高さ方向を含む平面全体で行う場合を想定する。 E_x (E_y) が支配的な導波モードでは、 H_y (H_x) が支配的であり、電界成分と磁界成分の積の積分値は、電力の次元を持つことから、 R_{TE} (R_{TM}) は、 E_x (E_y) の電力割合を示している。本明細書では、 E_x (E_y) が支配的であるとは、 R_{TE} (R_{TM}) が0.7以上の場合をいい、 $0.3 < R_{TE} < 0.7$ ($0.3 < R_{TM} < 0.7$) のとき、ハイブリッドモードと呼ぶ。したがって、高次偏波変換部は、光の進行方向に対して、 $0.3 < R_{TE} < 0.7$ ($0.3 <$

$R_{TM} < 0$ 、7)の導波モードを持つ範囲と定義される。

図43Aの高次偏波変換部を調べるため、光の進行方向の座標(z)に対して、実施例10の高次偏波変換素子を導波するモードの実効屈折率のグラフ(実効屈折率の大きい順に、#0、#1、#2と呼称している)と、#1の R_{TE} 、 R_{TM} を計算した。それぞれの結果を図44及び45に示す。図44は本実施例の実効屈折率を示し、図45は本実施例の R_{TE} 、 R_{TM} を示す。図44において、#0は TE_0 であり、#1は開始部8で TE_1 、#2は開始部8で TM_0 となる。図44より、#1の実効屈折率は、光の進行方向に対して単調に減少し、効率的に終了部の実効屈折率へと接続されていることが分かる。図45を見ると、開始部では E_x 成分が支配的であるが、素子の中央付近でハイブリッドモードが生じ、その後終了部にかけて E_y 成分が支配的となる。即ち、2段テーパ導波路構造により、高次偏波変換が可能であることが示されている。また、ハイブリッドモードが素子の中央部にあることから、高次偏波変換部は、その中央部に位置することも示される。

[0115] <比較例2>

続いて、実施例10に対する比較例2の高次偏波変換素子の構造を図46Aに示し、その中央部($Z=0.5$)における断面図を46Bに示す。ここで、図46A及びBにおいてコア2の幅以外は実施例10と同様である。比較例2において開始部8($Z=0$)における幅 $W1=850\text{ nm}$ 、終了部9($Z=1$)の幅 $W2=500\text{ nm}$ 、中央部($Z=0.5$)における上部コア3の幅及び下部コアの幅をそれぞれ $W3=550\text{ nm}$ 、 $W4=1550\text{ nm}$ に設定した。

図47に、比較例2の構造に対して、光の進行方向の座標(z)に対して、実施例の構造中を導波するモードの実効屈折率(実効屈折率の大きい順に、#0、#1、#2と呼称している)を計算した結果を示す。また、図48に#1の R_{TE} 、 R_{TM} を計算した結果を示す。図47及び48より、高次偏波変換部は実施例10に比べ終了部9側で生じていることが分かる。さらに、全素子長に占める高次偏波変換部の割合が狭いことが分かり、高次偏波変換

効率が低いことが示唆される。

実施例 10 と比較例 2 の具体的な高次偏波変換効率と、そのときの全素子長の長さをシミュレーションで計算した結果を図 49 に示す。導波光の波長は 1550 nm とした。図 49 より、同じ変換効率で比較した場合、実施例 10 の方がより短い距離で高い変換効率を得ていることが分かる。例えば、90% の変換効率を得るのに必要な素子長は、実施例 10 では $7\text{ }\mu\text{m}$ 、比較例 2 では $22.5\text{ }\mu\text{m}$ となり、本実施例 10 では比較例 2 の $1/3$ 以下の素子長の短尺化を可能とする。

したがって、平面上に光素子を集積する光回路部品においては、 $1/9$ 以下の面積削減が可能である。

[0116] さらに、図 50 に実施例 10 において、変換効率の波長依存性をシミュレーションで計算した結果を示す。素子長は $10\text{ }\mu\text{m}$ とした。図 50 より、 $1520\text{ nm} \sim 1640\text{ nm}$ の波長範囲で高次偏波変換の変換効率が 94% 以上となり、広い波長範囲で高い変換効率を持つ。この波長範囲は、光通信で用いられる C-band ($1530\text{--}1565\text{ nm}$)、L-band ($1565\text{--}1625\text{ nm}$) を含むため、本実施例は波長分割多重 (WDM) 通信にも適用可能であることが分かる。このような広い波長帯域を得ることが出来るのは、本実施例のように高次偏波変換部を素子の中央に設計することが可能なためである。

[0117] <実施例 11>

上記実施例 10 に基づくデバイスを試作し、評価を行った。本実施例の高次偏波変換素子の構造はコア 2 の幅及び高さ以外は実施例 10 と同様である。本実施例において開始部 8 ($Z=0$) における幅 $W1=860\text{ nm}$ 、終了部 9 ($Z=1$) の幅 $W2=500\text{ nm}$ 、中央部 ($Z=0.5$) における上部コア 3 の幅及び下部コアの幅をそれぞれ $W3=500\text{ nm}$ 、 $W4=860\text{ nm}$ であった。また、コア 2 の高さ及び下部コア 4 の高さはそれぞれ $H1=220\text{ nm}$ 、 $H2=95\text{ nm}$ であった。

図 51 にその測定結果を示す。図 51 より、 $1520\text{--}1640\text{ nm}$ の波

長範囲で、92%以上の高い変換効率を得られることが確かめられた。

符号の説明

[0118] 1…光導波路、2…コア、3…上部コア、4…下部コア、5…クラッド、6…上部クラッド、7…下部クラッド、8…開始部、9…終了部、10…高次偏波変換素子、11…第1の光導波路、12…第2の光導波路、13, 13r…非対称方向性結合器。

請求の範囲

[請求項1]

基板型光導波路を構成する高次偏波変換素子であって、
基板と、

前記基板上に設けられる下部クラッドと、

前記下部クラッド上に設けられ、断面矩形状で一定の高さを有する下部コアと、前記下部コアと同じ材料で形成されかつ前記下部コアの上に連続して配置される断面矩形状で一定の高さを有する上部コアとを有するコアと、

前記コア及び前記下部クラッドの上に設けられ、前記下部クラッドと同じ材料で形成される上部クラッドと、を備え、

前記コアは、前記下部コアの幅と前記上部コアの幅とが同じである開始部から、前記下部コアの幅と前記上部コアの幅とが同じである終了部まで光が導波可能な光導波路を構成し、

少なくとも前記上部コアの幅及び前記下部コアの幅のうちの一方は、前記開始部と前記終了部との間で前記光の導波方向に対して連続的に減少しかつ前記上部コアの幅及び前記下部コアの幅の両方が前記開始部から前記終了部まで増加せず、

前記開始部において、 TE_0 の実効屈折率が TE_1 の実効屈折率よりも大きく、前記 TE_1 の実効屈折率が TM_0 の実効屈折率よりも大きく、

前記光導波路の終了部において、前記 TE_0 の実効屈折率が前記 TM_0 の実効屈折率よりも大きく、前記 TM_0 の実効屈折率が前記 TE_1 の実効屈折率よりも大きく、

前記開始部と前記終了部との間の前記光導波路のうち前記開始部と前記終了部とを除く部分において、前記コアは前記上部コアの幅と前記下部コアの幅とが異なる上下非対称な構造を有し、

前記高次偏波変換素子は、前記開始部の TE_1 と前記終了部の TM_0 との間で高次偏波変換をする高次偏波変換素子。

- [請求項2] 前記開始部と前記終了部との間において、前記下部コアの幅が前記上部コアの幅よりも常に大きくなり、前記光が導波する方向に垂直な断面において前記上部コアの下辺が前記下部コアの上辺に常に含まれる請求項1に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項3] 前記開始部と前記終了部との間において、前記上部コアの幅方向の両端がそれぞれ前記下部コアの前記幅方向の両端と常に重ならない請求項2に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項4] 前記開始部と前記終了部との間において、前記上部コアの幅方向の一つの端が前記下部コアの前記幅方向の一つの端と常に重なる請求項2に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項5] 前記開始部において、前記コアの高さが210nm以上230nm以下であり、前記コアの幅が700nm以上であり、かつ、前記終了部において、前記コアの高さが210nm以上230nm以下であり、前記コアの幅が620nm以下である請求項1に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項6] 前記下部コアと前記上部コアがSiからなり、前記下部クラッドと前記上部クラッドがSiO₂からなる請求項1～5のいずれか1項に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項7] 前記上部コアの幅が前記開始部から中間部まで減少し前記中間部から前記終了部まで一定で、かつ前記下部コアの幅が前記開始部から前記中間部まで一定で、前記中間部から前記終了部までの間で減少する請求項1～6のいずれか1項に記載の高次偏波変換素子。
- [請求項8] 光導波路素子であって、
請求項1～7のいずれか1項に記載の高次偏波変換素子と、
前記高次偏波変換素子が接続されていない第1の光導波路と、前記高次偏波変換素子の前記開始部と接続された第2の光導波路とで構成される方向性結合器と、を備え、
前記第1の光導波路にはTE₀が導波し、前記第2の光導波路には

TE_1 が導波し、前記第1の光導波路の TE_0 が前記第2の光導波路の TE_1 と結合可能である光導波路素子。

[請求項9] 前記第1の光導波路の TE_0 の実効屈折率と前記第2の光導波路の TE_0 の実効屈折率の差が0.2以上である請求項8に記載の光導波路素子。

[請求項10] 請求項8又は9に記載の光導波路素子を備えたDP-QPSK変調器。