

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6798313号
(P6798313)

(45) 発行日 令和2年12月9日(2020.12.9)

(24) 登録日 令和2年11月24日(2020.11.24)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/122 (2006.01)

G O 2 B 6/122 3 1 1

G O 2 B 6/125 (2006.01)

G O 2 B 6/125 3 0 1

請求項の数 9 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2016-551505 (P2016-551505)	(73) 特許権者	000004237
(86) (22) 出願日	平成27年9月15日 (2015.9.15)		日本電気株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2015/004689		東京都港区芝五丁目7番1号
(87) 国際公開番号	W02016/051698	(74) 代理人	100109313
(87) 国際公開日	平成28年4月7日 (2016.4.7)		弁理士 机 昌彦
審査請求日	平成30年8月9日 (2018.8.9)	(74) 代理人	100124154
(31) 優先権主張番号	特願2014-204120 (P2014-204120)		弁理士 下坂 直樹
(32) 優先日	平成26年10月2日 (2014.10.2)	(72) 発明者	加藤 友章
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内
		(72) 発明者	中村 滋
			東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内
		審査官	林 祥恵

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 リブ型光導波路およびそれを用いた光合分波器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板および該基板の上面に形成されたリブ型光導波路からなる多モード光干渉領域を備え、前記多モード光干渉領域のコア領域の両側面はそれぞれ、段差状に形成され、
前記リブ型光導波路における、主電場が前記基板に水平な場合の基本モードの実効屈折率と第1次高次モードの実効屈折率の差と、主電場が前記基板に垂直な場合の基本モードの実効屈折率と第1次高次モードの実効屈折率の差とが、ほぼ同じであることを特徴とする、リブ型光導波路。

【請求項 2】

基板および該基板の上面に形成されたリブ型光導波路からなる多モード光干渉領域を備え、前記多モード光干渉領域の両側面はそれぞれ、段差状に形成され、前記リブ型光導波路における、主電場が前記基板に水平な場合の基本モードの実効屈折率と第1次高次モードの実効屈折率の差と、主電場が前記基板に垂直な場合の基本モードの実効屈折率と第1次高次モードの実効屈折率の差、の比がほぼ1であることを特徴とする、リブ型光導波路。

【請求項 3】

前記段差の幅は伝搬波長以下であり、前記段差の高さは伝搬波長の半分以下である、請求項1または2に記載のリブ型光導波路。

【請求項 4】

基板の上面には、絶縁膜および半導体層が配置され、

10

20

前記リブ型光導波路のコアは、前記半導体層をストライプ状に加工することによって形成される、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載のリブ型光導波路。

【請求項 5】

前記段差は 2 段以上の階段型に形成されている、請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載のリブ型光導波路。

【請求項 6】

単一モードリブ型光導波路からなる M 本の入力光導波路および N 本の出力光導波路と、入力光導波路および出力光導波路と、多モード光干渉領域と、の間を滑らかに接続する M + N 個のリブ型光導波路から成る可逆テーパ領域と、
請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のリブ型光導波路と、

10

を備え、
前記入力光導波路、出力光導波路、多モード光干渉領域および可逆テーパ領域は、前記基板上に形成されていることを特徴とする光合分波器。

【請求項 7】

前記基板の上面には、絶縁膜および半導体層が配置され、
前記入力光導波路、出力光導波路、多モード光干渉領域および可逆テーパ領域のコアは、前記半導体層をストライプ状に加工することによって形成される、請求項 6 に記載の光合分波器。

【請求項 8】

前記入力光導波路および出力光導波路は同一の断面形状を有する、請求項 6 または 7 に記載の光合分波器。

20

【請求項 9】

前記 M + N 個の可逆テーパ領域は全て、同一長さ、同一テーパ幅を有する、請求項 6 乃至 8 のいずれか 1 項に記載の光合分波器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、リブ型光導波路およびそれを用いた光合分波器に関し、特に、半導体系光導波路を用いたリブ型光導波路およびそれを用いた光合分波器に関する。

【背景技術】

30

【0002】

インターネットや映像配信等の広帯域マルチメディア通信サービスの爆発的な需要増加に伴い、幹線系やメトロ系ではより長距離かつ高信頼な高密度波長多重光ファイバ通信システムの導入が進んでいる。

【0003】

こうした大規模な通信ネットワークは、導入コストの低減だけではなく、運用コストの低減も重要である。運用コストを低減するには、需要に応じた動的な伝送容量割り当てや方路切り換え、効率的な保守、冗長構成などを最適化することが必要である。すなわち、通信ネットワークの形を柔軟に変更できることが望ましく、変更コストも小さいことが望ましい。

40

【0004】

ここで、通信ネットワークの形を柔軟に低コストで変更するために、光信号を電気信号へ変換することなく光のまま方路切り換えすることができる光スイッチノードを適用することができる。通信ネットワークの柔軟性は光スイッチノードにおける方路切り換えの自由度に依存することから、ポート数の大きな光スイッチの実現が望まれる。

【0005】

光スイッチにおいてはさらに、通過する際に受ける信号光損失、波長依存性および偏光依存性、非接続経路へのクロストーク等を抑制する必要がある。また、信号光経路の保持・切換に要する消費電力の抑制、光スイッチノードの小型化も重要である。これらはいずれも、光スイッチのポート数の可拡張性に直接関わる課題であり、光スイッチには、小型

50

・低損失・低電力な特性が求められる。

【 0 0 0 6 】

一方、通信中に回線が途切れる等の通信サービス品質に関する不具合の発生を抑制する必要があり、安定した通信状態を提供する必要がある。また、経路切り換えに伴う回線断状態をユーザに意識させないように、高速な経路切り換え特性も求められる。こうした高速な切り換えは、できるだけ小規模の回路で低電力で実行できることが望ましい。

【 0 0 0 7 】

このような光スイッチとして、マイクロエレクトロメカニカルマシン (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems) 型マトリクス光スイッチ、液晶型マトリクス光スイッチ、導波路型マトリクス光スイッチ等がある。MEMS 型マトリクス光スイッチは、シリコン基板上に形成された微小可動鏡の向きを静電的に制御することによって空間伝搬ビームの光路を切り換える光スイッチである。液晶型マトリクス光スイッチは、液晶分子の配向状態を電気的に変えることで空間伝搬ビームの透過率を制御する光スイッチである。導波路型マトリクス光スイッチは、導波路型光干渉計を成す光学材料の屈折率の温度依存性を利用してその干渉状態を変化させることで信号光出力経路を選択する光スイッチである。

【 0 0 0 8 】

MEMS 型マトリクス光スイッチは、挿入損失や信号光クロストークが小さいことから、入出力ポート数の可拡張性の面で有利である。しかし、MEMS 型マトリクス光スイッチは、可動鏡の応答にミリ秒程度かかるため、無瞬断光経路切り換えや光パケット信号切り換えのような高速・高頻度の経路切り換えが必要とされる用途には適さない。また、MEMS 型マトリクス光スイッチは、1 入力多出力の接続状態を作り出す場合、光学特性を犠牲にして、信号光出力ポート間の距離に応じてビームの広がり角を調整する等が必要になる。

【 0 0 0 9 】

液晶型マトリクス光スイッチは、MEMS 型マトリクス光スイッチと同等の応答時定数を有する。液晶型マトリクス光スイッチは、MEMS のような可動部が無いことから、機械的な信頼性が高い。しかしながら、液晶分子の光学特性は温度依存性が大きいことから、液晶型マトリクス光スイッチは、高温環境下では変性・劣化が懸念される。従って、液晶型マトリクス光スイッチは、実システムへの適用時に耐環境性・信頼性面を考慮する必要がある。

【 0 0 1 0 】

導波路型マトリクス光スイッチは、基板上に多数形成された導波路型光干渉計の干渉状態を、電場印加・電流注入・温度等で変化させることにより、光信号出力の経路を選択する。導波路型マトリクス光スイッチは、上述の 2 種類の光スイッチ素子に比べて小型化に適している。特に、石英系材料を用いた導波路型マトリクス光スイッチは、単一モード光ファイバとの結合効率が高く、低損失化の面でも有利である。また、石英系材料を用いた導波路型マトリクス光スイッチは、量産性や信頼性も高い。

【 0 0 1 1 】

ここで、導波路型マトリクス光スイッチは、光導波路材料の屈折率の温度依存性 (熱光学効果) を応用して導波路型光干渉計の干渉条件を熱制御する光ゲートスイッチを基本構成とする。コアと、クラッドや基板と、の間の熱の移動が平衡に達するのに、MEMS 型マトリクス光スイッチと同程度の時間 (ミリ秒程度) を要する。従って、導波路型マトリクス光スイッチは、熱平衡に達するまでの時間を短くするために、光ゲートスイッチにおける加熱領域の体積 (光導波路の断面積) を極力小さくすることが望ましい。

【 0 0 1 2 】

こうした状況のもと、光導波路素子の大幅な小型化が期待できる半導体系光導波路を用いた光スイッチ素子が注目されている。半導体系光導波路を用いた光スイッチ素子に関する技術の一つにシリコンフォトンクス技術がある。シリコンフォトンクス技術においては、絶縁膜 (シリコン基板表面を熱酸化して得られた膜) の上に形成されたシリコン膜 (S

10

20

30

40

50

OI: Silicon On Insulator) をストライプ状に加工し、光導波路コアとして機能させる。SOI 膜からなるコア層(屈折率: 約 3.48 @ 1550 nm) と、誘電体膜(SiO_2 等) からなるクラッド層(屈折率: 約 1.45 @ 1550 nm) との屈折率差が大きいことから、信号光がコア層の中へ強く閉じ込められる。従って、シリコンフォトリソ技術を用いることにより、曲率半径 100 μm 以下の急峻な曲がりでも、挿入損失を実用的な範囲内に抑えることができる。また、シリコンフォトリソ技術は、先端 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセス技術に裏付けられた高い精度加工や量産性を期待でき、さらに、駆動回路とのモノリシック集積化なども期待できる。

【0013】

10

シリコンフォトリソ技術を用いて M 入力 N 出力(以下、 $M \times N$: M, N は 2 以上の自然数)マトリクス光スイッチを実現する場合、 $M \times N$ の導波路型光スイッチを半導体基板上の 2 次元格子点上に配置し、これらを縦横に結ぶ光導波路群を同一半導体基板上に配置する。この場合、光導波路群は半導体基板上で互いに交差される。

【0014】

マトリクス光スイッチに入力された信号光は、交差領域を通過する時に散乱され、損失が生じる。散乱の度合いは、光導波路の断面のサイズと信号光の基本伝搬モードのサイズ(モード径)との比に相関がある。ここで、コア層とクラッド層の屈折率差が大きく、光閉じ込めが強いシリコンフォトリソ技術を用いた光導波路は、交差領域における信号光の散乱の影響が顕著に表れる。一方、コアとクラッドの屈折率差が小さく、光閉じ込めが弱い(弱導波: weakly guiding)石英系等の光導波路においては、信号光は平面波に近い振る舞いを示すため、交差領域を通過する時に散乱されにくい。

20

【0015】

そこで、交差領域における信号光の散乱の影響を低減するために、シリコンフォトリソ技術を用いたマトリクス光スイッチを、2 次元の薄いスラブ光導波路の一部を厚くすることによって形成されるリブ型光導波路を用いて構成することが提案されている。

【0016】

リブ型光導波路の基本伝搬モードの電磁場は、リブ側壁とクラッド層との屈折率境界面より内側(シリコン層内側)にほぼ閉じ込められた断面分布となる。シリコン細線に比べて実効断面積を 1 桁程度広くできることから、リブ側壁とクラッド層との屈折率境界面を意識すること無く、リブに沿って伝搬可能である。この場合、光導波路の交差領域における信号光の散乱を小さくすることができる。シリコンフォトリソ技術を応用したリブ型光導波路ベースの光スイッチ素子は、例えば、特許文献 1、2 等に開示されている。また、シリコンフォトリソ技術を応用したリブ型光導波路ベースの、2 入力 2 出力(2×2)の多モード干渉型(MMI: Multi-Mode Interference)光合分波器を用いたマトリクス光スイッチの開発例も報告されている。さらに、光導波路に関連する技術が特許文献 3 に開示されている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0017】

40

【特許文献 1】特開 2001-183710 号公報

【特許文献 2】特表 2002-514783 号公報

【特許文献 3】特開平 4-247408 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

上述のように、幹線系波長多重光ファイバ通信ネットワークシステムへの適用されるマトリクス光スイッチを設計するにあたり、波長無依存化・偏光無依存化が必要である。石英系光導波路やシリコン細線では、コア層の電磁場分布を光ファイバの真円の電磁場分布に近づけて両者の結合効率を高めるために、コア層の断面形状を正方形に形成することが

50

一般的である。正方形のコア層の場合、基板に平行なモード (E^X_{11} モード、 $TE - 1$ like モード) と、垂直なモード (E^Y_{11} モード、 $TM - 1$ like モード) のそれぞれの固有値 (実効屈折率) は縮退する。それぞれの伝搬特性が同一で見分けが付かなくなることから、偏光依存性は示さない。

【0019】

一方、光導波路の交差領域における散乱が小さいリブ型光導波路の場合、コア層の基板に垂直な面内で断面形状は非対称である。 E^X_{11} モードと E^Y_{11} モードのそれぞれの伝搬特性は一般に異なり、偏光依存性を示す。偏光依存性は、断面形状を最適に設計することによって特定波長において打ち消すことはできるが、広い波長帯にわたって打ち消すことは困難である。さらに、マトリクス光スイッチの場合、光合分波器やテーパ状の光導波路入力部は、入出力光導波路とは異なる断面形状を有する。これらの偏光依存性や波長依存性は入出力光導波路のものとは異なり、最適な偏光依存性や波長依存性を与える形状パラメータを見出すことは容易では無い。さらに、最適な形状パラメータを見出せた場合でも、量産性や安定した製造歩留りが得られるとは限らない。

【0020】

本発明は上記の課題に鑑みてなされたものであり、偏光依存性や波長依存性等が小さい、実用的なリブ型光導波路およびそれを用いた光合分波器を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0021】

上記目的を達成するために本発明に係るリブ型光導波路は、基板および該基板の上面に形成されたリブ型光導波路からなる多モード光干渉領域を備え、多モード光干渉領域の両側面はそれぞれ、段差状に形成されていることを特徴とする。

【0022】

上記目的を達成するために本発明に係る光合分波器は、単一モードリブ型光導波路からなるM本の入力光導波路およびN本の出力光導波路と、入力光導波路および出力光導波路と多モード光干渉領域との間を滑らかに接続する $M+N$ 個のリブ型光導波路から成る可逆テーパ領域と、上記のリブ型光導波路と、を備え、入力光導波路、出力光導波路、多モード光干渉領域および可逆テーパ領域は、基板上に形成されていることを特徴とする。

【発明の効果】

【0023】

上述した本発明の態様によれば、偏光依存性や波長依存性等が小さい、実用的なリブ型光導波路およびそれを用いた光合分波器を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1A】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 の斜視図である。

【図1B】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 の A - A' 線における断面図である。

【図2A】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 において、狭幅段差部 620a、620b の断面形状を変化させた時の、 E^X モードの実効屈折率差の変化を示す図である。

【図2B】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 において、狭幅段差部 620a、620b の断面形状を変化させた時の、 E^Y モードの実効屈折率差の変化を示す図である。

【図3】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 において、 E^X モードと E^Y モードの実効屈折率差の比をプロットした図である。

【図4】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 において、テーパ型光導波路 500 およびリブ型 MMI 領域 600 の寸法を変化させた時の E^X モードに対する透過率の変化を示す図である。

【図5】第1の実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 100 において、テーパ型光導波路 500 およびリブ型 MMI 領域 600 の寸法を変化させた時の偏光依存性を示す図であ

10

20

30

40

50

る。

【図6A】第2の実施形態に係る 2×2 MMI光合分波器100Bの斜視図である。

【図6B】第2の実施形態に係る 2×2 MMI光合分波器100BのB-B'線における断面図である。

【図7】リブ型光導波路10の上面図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

<第1の実施形態>

本発明に係る第1の実施形態について説明する。本実施形態においては、半導体リブ型光導波路をベースとする 2×2 MMI光合分波器を適用する。本実施形態に係る 2×2 MMI光合分波器の斜視図を図1Aに、図1AのA-A'線において切断した時の断面図を図1Bに示す。図1A、図1Bにおいて、 2×2 MMI光合分波器100は、SOI基板(SOI: Semiconductor-on-Insulator)200、入力光導波路300a、300b、出力光導波路400a、400b、テーパ型光導波路500a、500b、500c、500d、リブ型MMI領域600を備える。なお、特に区別する必要がない場合、入力光導波路300a、300b、出力光導波路400a、400b、テーパ型光導波路500a、500b、500c、500dを、単に、入力光導波路300、出力光導波路400、テーパ型光導波路500と記載する。

【0026】

SOI基板200は、半導体スラブ領域であり、基板210の上面に絶縁膜220を配置し、その表面にSOI層230を配置することによって形成される。そして、SOI層230へ光導波路パターンを高精度露光し、ドライエッチング加工することによって、入力光導波路300、出力光導波路400、テーパ型光導波路500およびリブ型MMI領域600が形成される。

【0027】

入力光導波路300a、300bは、直線状半導体リブ領域であり、SOI基板200のSOI層230の一端側領域に形成され、一対の入力側の単一モード光導波路を成す。入力光導波路300a、300bに入力された光信号は、連続するテーパ型光導波路500a、500bを介してリブ型MMI領域600へ入力される。

【0028】

出力光導波路400a、400bは、直線状半導体リブ領域であり、SOI基板200のSOI層230の他端側領域に形成され、一対の出力側の単一モード光導波路を成す。出力光導波路400a、400bは、連続するテーパ型光導波路500c、500dを介してリブ型MMI領域600から入力された光信号を、接続された光ファイバ等へ出力する。本実施形態において、入力光導波路300a、300bおよび出力光導波路400a、400bは、同一の断面形状を有する。

【0029】

テーパ型光導波路500は、入力光導波路300または出力光導波路400と、リブ型MMI領域600と、を滑らかに接続する。本実施形態では、4つのテーパ型光導波路500a、500b、500c、500dを全て、同一長形状に形成した。図1Aにおいて、テーパ型光導波路500aは入力光導波路300aとリブ型MMI領域600のMMI部610とを滑らかに接続し、テーパ型光導波路500bは入力光導波路300bとMMI部610とを滑らかに接続する。また、テーパ型光導波路500cは出力光導波路400aとリブ型MMI領域600のMMI部610とを滑らかに接続し、テーパ型光導波路500dは出力光導波路400bとMMI部610とを滑らかに接続する。

【0030】

リブ型MMI領域600は、半導体から成り、テーパ型光導波路500aを介して入力光導波路300aから入力された光信号と、テーパ型光導波路500bを介して入力光導波路300bから入力された光信号と、を干渉させる。そして、リブ型MMI領域600は、干渉させた光信号をテーパ型光導波路500c、500dを介して出力光導波路400

0 a、4 0 0 bへ出力する。本実施形態に係るリブ型MMI領域6 0 0は、入力光導波路3 0 0から出力光導波路4 0 0へ向かう方向（以下、長手方向と記載する）に延びる両側壁に、有限幅の薄い段差部が形成されている。以下、この段差部を狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bと記載し、段差部6 2 0 a、6 2 0 bに挟まれたリブ型干渉部をMMI部6 1 0と記載する。ここで、段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅wは伝搬波長以下に、高さhは伝搬波長の半以下に形成される。狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅w、高さhは、図1 Bのように表される。

【0 0 3 1】

上記のように構成された2 × 2 MMI光合分波器1 0 0において、狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの断面形状を変化させた時の、リブ型MMI領域6 0 0の基本モードの固有値（実効屈折率 n_{11} ）と第1高次モードの固有値（実効屈折率 n_{12} ）の差 $n_{11} - n_{12}$ （以下、実効屈折率差）を図2 A、図2 Bに示す。実効屈折率差は、リブ型MMI領域6 0 0における基本モードと第1高次モードの干渉周期（ビート長）に反比例し、リブ型MMI領域6 0 0の最適長を決定する重要なパラメータである。なお、図2 A、図2 Bにおいては、実効屈折率差nの添字を、電場の記号Eを用いて表記しているが、本明細書における表記と同じ意味である。

【0 0 3 2】

図2 Aは、主電場が基板に水平な場合（E^xモード）の実効屈折率差（ $n_{11}^x - n_{12}^x$ ）、図2 Bは、主電場が基板に垂直な場合（E^yモード）の実効屈折率差（ $n_{11}^y - n_{12}^y$ ）である。図2 A、図2 Bにおいて、横軸は狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅w、縦軸は狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの高さh、狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの断面はともに矩形で同一形状、とする。計算にあたっては、コア層の材料にシリコン（屈折率3.48）、クラッド層の材料にSiO₂（屈折率1.447）を適用し、信号光波長は1550 nmとした。また、MMI部6 1 0の幅を7 μm、リブ高さを0.9 μm、スラブ厚さを0.6 μmとした。

【0 0 3 3】

図2 A、図2 Bにおいて、実効屈折率差の絶対値は、E^xモード、E^yモードともに約 5×10^{-3} の量で、これは波長1550 nmの信号光に対するMMI最適長に換算すると200 μm強に相当する。

【0 0 3 4】

一般的な半導体リブ型光導波路ベースのMMI光合分波器は、MMI部6 1 0の両脇に狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bが配置されない。この状態は、図2 A、図2 Bの左下原点（幅w、高さhが共にゼロ）に相当する。実効屈折率差が一定（つまりビート長が一定）の場合、図2 A、図2 Bのプロットした範囲では、狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅wおよび高さhは反比例の関係にある。この傾向は、E^xモード、E^yモードの双方に共通しているが、実効屈折率差の絶対値自体は両モード間で若干のずれが見られる。

【0 0 3 5】

この実効屈折率差の絶対値の偏光間のずれ、言い換えれば、リブ型MMI領域6 0 0における両偏光間の最適長のずれを直観的に示すために、図3に、E^xモードとE^yモードの実効屈折率差の比（ $n_{11}^x - n_{12}^x$ ） / （ $n_{11}^y - n_{12}^y$ ）を示す。

【0 0 3 6】

図3において、実効屈折率差の偏光間の比は、狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅wや高さhが増加するとともに単調減少する。この比が1であれば、リブ型MMI領域6 0 0における各偏光の最適長が一致する、すなわち、入出力光導波路の影響が無いと仮定すれば、2 × 2 MMI光合分波器の偏光無依存動作を実現できる可能性がある。

【0 0 3 7】

実効屈折率差の比は、図3の左下原点近傍で1.025程度である一方、高さhが約0.5 μm、幅wが約1 μmのあたりでは1になる。これは、MMI部6 1 0の両脇に設ける狭幅段差部6 2 0 a、6 2 0 bの幅wおよび高さhを調整することにより、2 × 2 MMI光合分波器1 0 0の偏光依存性のある範囲内で調整できることを意味する。すなわち、

10

20

30

40

50

MMI部610におけるビート長が両偏光間で一致する場合、リブ型MMI領域600に絞って考えると、偏光無依存動作を実現可能な狭幅段差部620a、620bを設計できる。なお、狭幅段差部620a、620bは、マスクを1枚、リソグラフィ工程を1回、コア層のエッチング工程を1回、それぞれ追加することで形成可能であるため、量産性や製造歩留りへの影響も限られたものに留まる。

【0038】

なお、上記の議論は、狭幅段差部620a、620bが配置されたリブ型MMI領域600における実効屈折率差（ビート長）だけに着目した場合である。これは、リブ型MMI領域600における基本モードおよび第1高次モードを、いずれも理想的な平面波で励振できた場合に相当する。しかし、リブ型MMI領域600と、入力光導波路300および出力光導波路400と、の間には可逆テーパ光導波路領域が配置されるのが一般的である。これにより、入出力両端に接続する2つの光導波路の2次元電磁場分布が連続的に変化する。信号光は、可逆テーパ光導波路領域を伝搬するに連れてビーム形状（主にビーム幅）が連続的に変化（主にビーム幅が拡大ないしは縮小）し、同時に、等位相面（波面）が平面から歪む（曲率が変化する）。なお、可逆テーパ光導波路領域を、SOI層230をストライプ状に加工して形成した半導体から成るテーパ型光導波路500a-500dで形成する場合、可逆テーパ光導波路領域自体が偏光依存性を有する。

【0039】

等位相面（波面）の曲率は、伝搬距離に比例する量と考えられ、テーパ型光導波路500a-500dの長さが波長に比べて十分長ければ、平面波に近い振る舞いになる。テーパ型光導波路500a-500dの長さを大きくする（テーパ幅を緩やかに変化させる）ほどモード形状変化に伴う損失（モード変換損失）が抑えられる一方、光吸収や散乱に伴う損失が大きくなる。テーパ型光導波路500a-500dの長さを波長に比べて十分長くできない場合、伝搬する信号光の電磁場分布の等位相面（波面）は湾曲した状態のままになる。この場合、リブ型MMI領域600において、信号光は、平面波で励振されるのではなく、等位相面（波面）が歪んだ状態で励振される。これは、有限の損失を招き、この損失自体にも偏光依存性が現れる。

【0040】

以上から、ビート長に関する議論に、テーパ型光導波路500a-500dが示す偏光依存性の寄与分を加えたものが、実際の 2×2 MMI光合分波器100で生じる現象となる。ここで、リブ型MMI領域600における実効屈折率差の絶対値の偏光間の比 $(n_{11}^x - n_{12}^x) / (n_{11}^y - n_{12}^y)$ が1.02前後の場合は、 E^x モードの実効屈折率差の方が E^y モードのそれよりも約2%大きくなる断面形状の場合と等価となる。この場合、テーパ型光導波路500a-500dおよびリブ型MMI領域600を備える 2×2 MMI光合分波器100が偏光無依存動作することを、電磁場解析を通じて別途確認した。

【0041】

なお、図3に示すように、リブ型MMI領域600の実効屈折率差において、狭幅段差部620a、620bの高さhと幅wは反比例に近い関係にある。従って、狭幅段差部620a、620bの面積が同一であれば、光合分波特性も概ね同じ傾向を示すと考えられる。しかしながら、狭幅段差部620a、620bの幅wを広くするに連れて外に広がるスラブ領域への放射が助長され、挿入損失が増加する。従って、狭幅段差部620a、620bの幅wは、コア材質中の信号光波長と同程度に抑えることが望ましい。一方、狭幅段差部620a、620bの高さhは、コア材質中の信号光波長の半分以下に抑えることが望ましい。

【0042】

また、狭幅段差部620a、620bの断面積だけで偏光依存性が決まるのであれば、例えば、狭幅段差部620a、620bの断面形状を直角三角形等に形成することもできる。実際に、リブ型MMI領域600を形成する際の製造条件、特に、エッチング条件の選び方によっては、リブ側壁が基板に垂直な面から傾斜してしまう場合がある。しかし、

10

20

30

40

50

リブ型MMI領域600のリブ側壁に傾斜を生じさせる場合、入力光導波路300、出力光導波路400およびテーパ型光導波路500のリブ側壁も傾斜させることになる。この場合、入力光導波路300および出力光導波路400の基本モードの電磁場分布が想定した形状から外れ、偏光無依存の設計が難しくなる。従って、狭幅段差部620a、620bの断面形状は、矩形とするのが実用的である。

【0043】

(実施例)

第1の実施形態で説明した 2×2 MMI光合分波器100の動作について説明する。基板210上に厚さ $3 \mu\text{m}$ の SiO_2 膜から成る絶縁膜220および厚さ $1.5 \mu\text{m}$ の半導体層であるSOI層230を配置することによってSOI基板200を形成した。さらに、SOI基板200上のSOI層230をフォトリソグラフィ技術を用いて光導波路パターンを高精度加工することにより、第1の実施形態で説明した 2×2 MMI光合分波器100を形成する。

【0044】

入力光導波路300および出力光導波路400は、Siをコア、 SiO_2 をクラッドとするリブ型光導波路であり、リブ幅 $1.4 \mu\text{m}$ 、リブ高さ $0.9 \mu\text{m}$ 、スラブ厚さ $0.6 \mu\text{m}$ である。また、波長 $1530 \sim 1610 \text{ nm}$ 帯において、 E^x モード、 E^y モードの両偏光ともに単一モード伝搬条件を満たす。リブ型MMI領域600のMMI部610は、幅 $7 \mu\text{m}$ 、長さ $234 \mu\text{m}$ 、リブ高さ $0.9 \mu\text{m}$ 、スラブ厚さ $0.6 \mu\text{m}$ に形成した。また、狭幅段差部620a、620bは共に、高さ $h0.2 \mu\text{m}$ 、幅 $w0.5 \mu\text{m}$ に形成した。そして、上記の入力光導波路300および出力光導波路400とリブ型MMI領域600とを、リブ高さ $0.9 \mu\text{m}$ 、スラブ厚さ $0.6 \mu\text{m}$ 、幅が $1.4 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m}$ まで線形に変化する長さ $50 \mu\text{m}$ のテーパ型光導波路500(可逆水平テーパ領域)によって滑らかに接続した。

【0045】

これらは、光源にArFを用いた縮小投影露光装置と位相シフトマスクを用いた高精度フォトリソグラフィ、ならびに低損傷のドライエッチング技術などの最先端CMOSプロセスを応用して、幅・厚さともに $\pm 20 \text{ nm}$ 以内の精度で高精度に加工される。また、リブ型MMI領域600近傍のプロセスは、SOI基板200の表面に設けるエッチング阻止膜として、予め段差加工されたSiN膜(製造過程で除去されるため図示せず)を設けることにより、1回のドライエッチング工程でMMI部610とその両脇の狭幅段差部620a、620bを一体形成する。

【0046】

上記のようにして形成した 2×2 MMI光合分波器100の E^x モードに対する透過率を図4に、 E^x モードに対する透過率と E^y モードに対する透過率比(すなわち透過率の偏光依存性)を図5に示す。ここで、図4、図5の横軸は、テーパ型光導波路500のテーパ端部(MMI部610に接する幅広側)の幅、縦軸はリブ型MMI領域600の長さである。信号光波長は 1590 nm である。なお、透過率は、式(1)のように定義される。

【0047】

$$10 \log \{ (P_{\text{bar}} + P_{\text{cross}}) / P_{\text{in}} \} \quad (\text{単位: dB}) \cdots \text{式(1)}$$

式(1)において、 P_{bar} は入力光導波路300の一方から入力された電力 P_{in} の信号光が直進した先にある出力光導波路400のポート(バー出力ポート)へ出力される電力、 P_{cross} はMMI部610の対角線の先にある出力光導波路400のポート(クロス出力ポート)へ出力される電力である。

【0048】

図4から分かるように、 E^x モードに対する挿入損失のテーパ端部の幅およびMMI長依存性は、少しずつ大きさが異なるトラック状の等高線群を成す。透過率の最大値(挿入損失の最小値)は $-0.04 \sim -0.06 \text{ dB}$ ($+0.04 \sim +0.06 \text{ dB}$)で、Siを光導波路コア材に用いた $1.5 \mu\text{m}$ 帯向け 2×2 光合分波器として良好な値が実現でき

10

20

30

40

50

ている。

【 0 0 4 9 】

図 5 中の白線は、 E^x モードと E^y モードの透過率比が 1 (= 0 d B)、すなわち、偏光無依存となる条件である。これらから、透過率が最大 (挿入損失が最小) かつ偏光無依存となる実用的な 2×2 MMI 光合分波器を設計する場合、図 4 における透過率が最大となる領域と、図 5 における白線とが互いに重なりあう条件 (テーパ端部の幅、MMI 部の長さ) とすれば良い。具体的には、例えば MMI 部 6 1 0 の長さを $232 \mu\text{m}$ 、テーパ型光導波路 5 0 0 のテーパ端部の幅を $3.3 \mu\text{m}$ とすれば良い。

【 0 0 5 0 】

信号光波長 $1570 \text{ nm} \sim 1610 \text{ nm}$ の場合も信号光波長 1590 nm の場合と同様、 E^x モードに対する透過率、ならびに E^x モードに対する透過率と E^y モードに対する透過率比を計算した (図示せず)。そして、これらの結果から、 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 の MMI 部 6 1 0 の長さを $232 \mu\text{m}$ 、テーパ端部の幅を $3.3 \mu\text{m}$ とした。

【 0 0 5 1 】

このように設計された 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 は、断面が正方形ではない Si コアを用いるリブ型光導波路であるにも関わらず、信号光波長 $1570 \sim 1610 \text{ nm}$ において、マトリクス光スイッチを構成する際に実用的な信号光分岐特性を有する。具体的には、挿入損失は E^x モードが $0.08 \sim 0.09 \text{ dB}$ 、 E^y モードが $0.07 \sim 0.08 \text{ dB}$ 、偏光依存性損失は $\pm 0.01 \text{ dB}$ 以内であった。

【 0 0 5 2 】

以上のように、本実施形態によれば、入出力テーパ導波路を含めた 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 において、合分波特性における偏光依存性や波長依存性を広い波長域にわたって実用上支障の無いレベルまで抑えられる構造を、実用的な手段により、必要最小限の工程追加で実現できることが分かった。

【 0 0 5 3 】

なお、MMI 部 6 1 0 の長手方向に延びる両側壁に狭幅段差部 6 2 0 a、6 2 0 b が配置されたリブ型 MMI 領域 6 0 0 は、MMI 光合分波器以外にも、ROADM (reconfigurable optical add / drop multiplexer)、 90° ハイブリッド、ADM のマトリクススイッチ等に配置することができる。

【 0 0 5 4 】

< 第 2 の実施形態 >

第 2 の実施形態について説明する。本実施形態に係る 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 B の斜視図を図 6 A に、B - B' 線において切断した時の断面図を図 6 B に示す。本実施形態では、狭幅段差部 6 2 0 a B、6 2 0 b B を、第 1 の実施形態の実施例で説明した直方体型の狭幅段差部 6 2 0 a、6 2 0 b の面積を維持したまま、角部を直方体状に切欠くことによって階段状に形成した。

【 0 0 5 5 】

具体的には、本実施形態に係る狭幅段差部 6 2 0 a B、6 2 0 b B は、幅 $0.4 \mu\text{m}$ × 高さ $0.2 \mu\text{m}$ の下段部と、幅 $0.2 \mu\text{m}$ の高さ $0.2 \mu\text{m}$ の上段部とが一体に形成されている。それ以外は、第 1 の実施形態の実施例で説明した 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 と同様である。なお、製造方法は、上記の実施例の場合に対して、狭幅段差部 6 2 0 a B、6 2 0 b B のリソグラフィ工程用に、マスク 1 枚、エッチング阻止膜のドライエッチング加工を 1 回、それぞれ追加している。

【 0 0 5 6 】

図 6 A、図 6 B の 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 B も、第 1 の実施形態の実施例で説明した図 1 の 2×2 MMI 光合分波器 1 0 0 と同様に、断面が正方形ではない Si コアを用いるリブ型光導波路ではあるが、マトリクス光スイッチを構成する際に用いる 2×2 光合分波器として実用的な信号光分岐特性が得られる。具体的には、信号光波長 $1570 \sim 1610 \text{ nm}$ にわたって、損失は E^x モードが $0.08 \sim 0.09 \text{ dB}$ 、 E^y モードが $0.07 \sim 0.08 \text{ dB}$ 、偏光依存性損失は $\pm 0.01 \text{ dB}$ 以内となった。

【 0 0 5 7 】

上記の実施形態ではいずれも、コアの材質として S i を用いた例を示したが、S i 以外の誘電体をコアとして用いた場合でも同様な効果が期待できる。また、化合物半導体などの場合には S O I 基板 2 0 0 を用いることが適切ではないため、積層方向（基板に垂直な方向）の光閉じ込めが小さくなる。しかし、この場合も設計思想は応用可能であり、M M I 領域の両脇に、実効屈折率差の偏光依存性を抑えるために、断面形状に適切な摂動を与える加工を施せば良い。さらに、入出力光導波路の数は 2 本ずつに限定されず、M 入力 N 出力（ $M \times N$ ）の M M I 光合分波器に適用することができる。

【 0 0 5 8 】

なお、上記の実施形態に係るリブ型光導波路は、図 7 に示す最小構成部材によって形成することができる。すなわち、リブ型光導波路 1 0 は、基板 2 0 と基板 2 0 の上面に形成されたリブ型光導波路からなる多モード光干渉領域 3 0 によって形成することができる。ここで、多モード光干渉領域 3 0 の両側面はそれぞれ、段差状 3 1、3 2 に形成されていることが特徴である。

10

【 0 0 5 9 】

本願発明は上記実施形態に限定されるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計の変更等があってもこの発明に含まれる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 6 0 】

本願発明は、 $M \times N$ のマトリクス光スイッチ等に用いられる、同一基板上に、入出力光導波路および多モード干渉領域が形成された、導波路型光スイッチ全般に適用することができる。

20

【 0 0 6 1 】

この出願は、2 0 1 4 年 1 0 月 2 日に出願された日本出願特願 2 0 1 4 - 2 0 4 1 2 0 を基礎とする優先権を主張し、その開示の全てをここに取り込む。

【 符号の説明 】

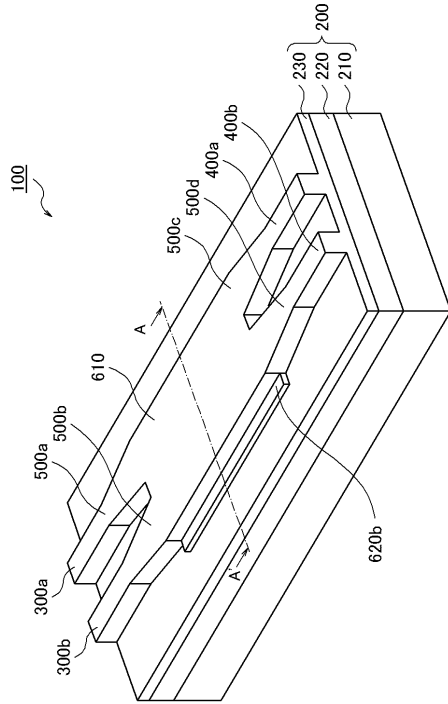
【 0 0 6 2 】

- 1 0 リブ型光導波路
- 2 0 基板
- 3 0 多モード光干渉領域
- 1 0 0 2 × 2 M M I 光合分波器
- 2 0 0 S O I 基板
- 2 1 0 基板
- 2 2 0 絶縁膜
- 2 3 0 S O I 層
- 3 0 0 a、3 0 0 b 入力光導波路
- 4 0 0 a、4 0 0 b 出力光導波路
- 5 0 0 a、5 0 0 b、5 0 0 c、5 0 0 d テーパー型光導波路
- 6 0 0 リブ型 M M I 領域
- 6 1 0 M M I 部
- 6 2 0 a、6 2 0 b 狭幅段差部

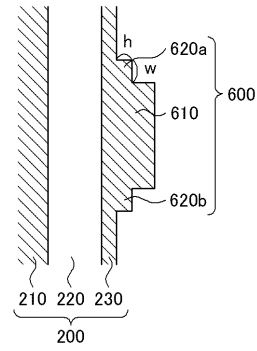
30

40

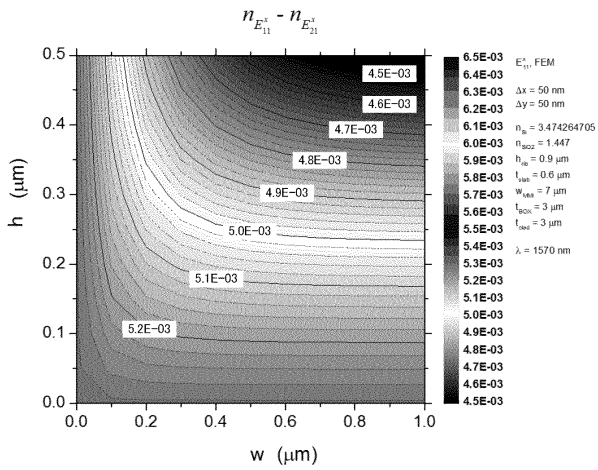
【図 1 A】



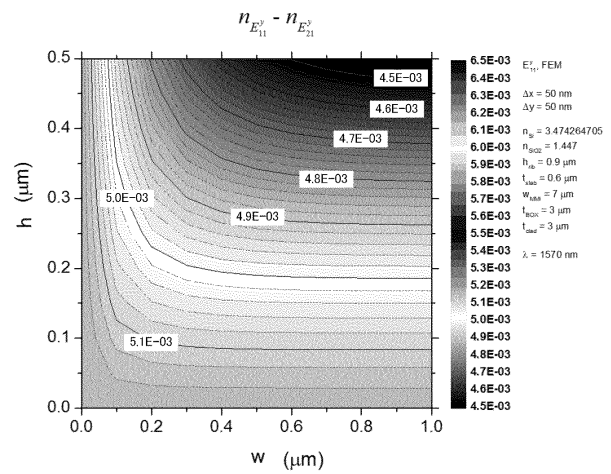
【図 1 B】



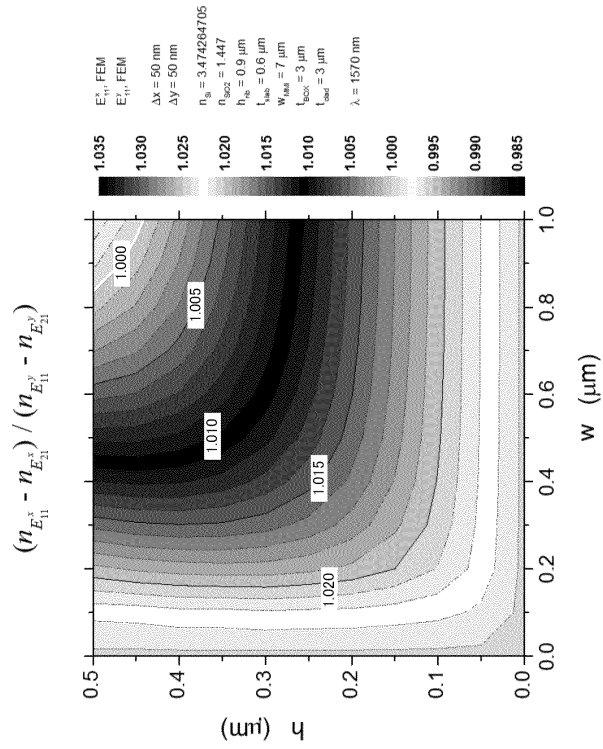
【図 2 A】



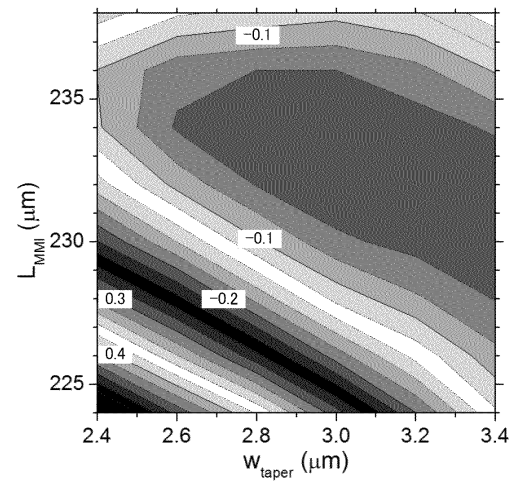
【図 2 B】



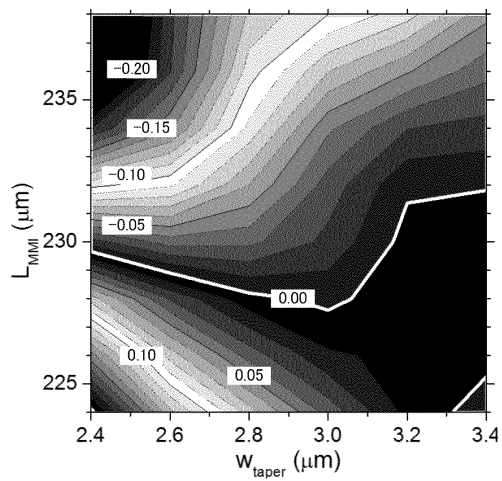
【図 3】



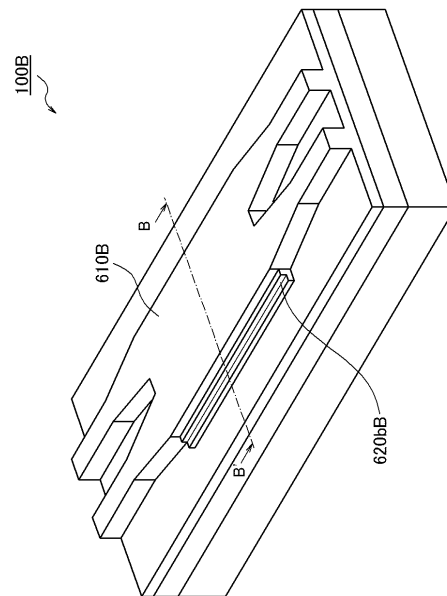
【図 4】



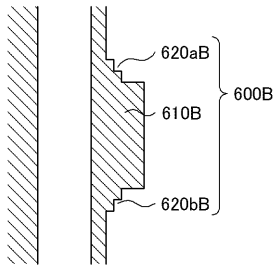
【図 5】



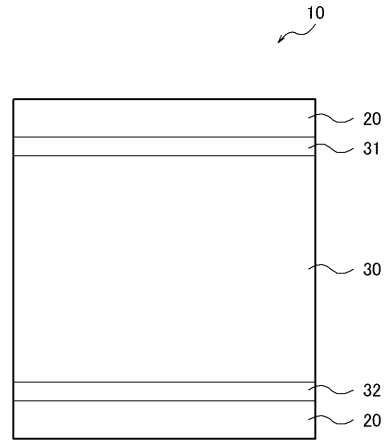
【図 6 A】



【図 6 B】



【図 7】



フロントページの続き

(56)参考文献 特表2009-510505(JP,A)
特開昭51-057457(JP,A)
米国特許第07116880(US,B1)
特開2010-256707(JP,A)
特表2008-543077(JP,A)
英国特許出願公開第02438222(GB,A)
米国特許出願公開第2002/0197012(US,A1)
米国特許出願公開第2005/0213912(US,A1)
国際公開第2014/103432(WO,A1)
R. Halir, et al., High performance multimode interference couplers for coherent communications in silicon, Proceedings of SPIE, 2011年 9月 8日, Vol.8007, 80071B, pp .1-7

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/12 - 6/14
G02B 6/28
G02F 1/00 - 1/125
G02F 1/21 - 1/39
JSTPlus/JST7580(JDreamIII)
IEEE Xplore