(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2018-156059
(P2018-156059A)
(43)公開日　平成30年10月4日(2018.10.4)

| (51)Int.Cl. | | F I | | | テーマコード（参考） |
|---|---|---|---|---|---|
| G02F 1/295 | (2006.01) | G02F | 1/295 | | 2H141 |
| G02B 26/06 | (2006.01) | G02B | 26/06 | | 2K102 |
| G01S 7/481 | (2006.01) | G01S | 7/481 | A | 5J084 |

審査請求 未請求　請求項の数 27　ＯＬ　（全 82 頁）

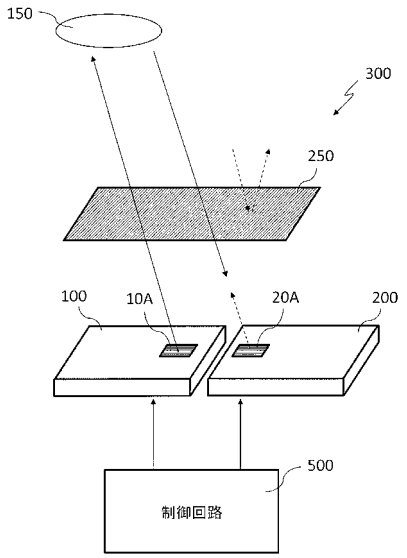
(21)出願番号　特願2017-223060 (P2017-223060)
(22)出願日　平成29年11月20日 (2017.11.20)
(31)優先権主張番号　特願2017-50500 (P2017-50500)
(32)優先日　平成29年3月15日 (2017.3.15)
(33)優先権主張国　日本国 (JP)

(71)出願人　314012076
パナソニックＩＰマネジメント株式会社
大阪府大阪市中央区城見２丁目１番６１号
(74)代理人　100101683
弁理士　奥田　誠司
(74)代理人　100155000
弁理士　喜多　修市
(74)代理人　100180529
弁理士　梶谷　美道
(74)代理人　100125922
弁理士　三宅　章子
(74)代理人　100135703
弁理士　岡部　英隆
(74)代理人　100188813
弁理士　川喜田　徹

最終頁に続く

(54)【発明の名称】光スキャンシステム

(57)【要約】
【課題】光によるスキャンおよび受光が可能な新規なシステムを提供する。
【解決手段】光スキャンシステムは、光スキャンデバイスと、受光デバイスと、を備える。光スキャンデバイスは、光を伝搬させることにより前記光を出射光として出射する第１の導波路を複数含む第１の導波路アレイと、前記複数の第１の導波路からの前記出射光の出射方向を変化させる第１の調整素子と、を備える。前記受光デバイスは、前記複数の第１の導波路からの前記出射光が対象物によって反射された場合に反射光が入射する位置に配置された第２の導波路を複数含む第２の導波路アレイと、前記複数の第２の導波路による前記反射光の受光方向を変化させる第２の調整素子と、を備える。前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の配列間隔は、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている。
【選択図】図７４



【特許請求の範囲】
【請求項１】
光スキャンデバイスと、
受光デバイスと、
を備え、
前記光スキャンデバイスは、
光を伝搬させることにより、伝搬方向に交差する方向に前記光を出射光として出射する第１の導波路を複数含む第１の導波路アレイと、
前記複数の第１の導波路の各々を伝搬する前記光の位相を調整することにより、前記複数の第１の導波路からの前記出射光の出射方向を変化させる第１の調整素子と、
を備え、
前記受光デバイスは、
前記複数の第１の導波路からの前記出射光が対象物によって反射された場合に反射光が入射する位置に配置された第２の導波路であって、前記反射光を受光して伝搬光として伝搬させる第２の導波路を複数含む第２の導波路アレイと、
前記複数の第２の導波路の各々を伝搬する前記伝搬光の位相を調整することにより、前記複数の第２の導波路による前記反射光の受光方向を変化させる第２の調整素子と、
を備え、
前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の配列間隔は、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている、
光スキャンシステム。
【請求項２】
前記光スキャンデバイスおよび前記受光デバイスを同期して制御する制御回路をさらに備え、
前記制御回路は、前記第１の調整素子を制御して前記出射方向を変化させ、前記第２の調整素子を制御して前記受光方向を変化させる、
請求項１に記載の光スキャンシステム。
【請求項３】
前記制御回路は、前記複数の第１の導波路から出射される前記出射光の出射角度と、前記複数の第２の導波路によって受光される前記反射光の入射角度とを実質的に一致させる、
請求項２に記載の光スキャンシステム。
【請求項４】
前記複数の第２の導波路に接続され、前記複数の第２の導波路からの前記伝搬光の合成光を検出する光検出器をさらに備える、
請求項１から３のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項５】
前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の前記配列間隔は、前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の前記配列間隔よりも大きい、
請求項１から４のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項６】
前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の各々の配列方向における幅は、前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の各々の配列方向における幅よりも大きい、
請求項１から５のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項７】
前記光スキャンデバイスにおいて、前記複数の第１の導波路の各々は、前記出射光が出射される側に位置する光出射面を有し、
前記複数の第１の導波路の各々の前記光出射面は、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあり、

前記受光デバイスにおいて、前記複数の第２の導波路の各々は、前記反射光が入射する側に位置する光入射面を有し、
前記複数の第２の導波路の各々の前記光入射面は、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にあり、
前記第１の平面内で前記複数の第１の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心と前記第２の平面内で前記複数の第２の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心の間の距離は、２０ｍｍ以下である、
請求項１から６のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項８】
前記光スキャンデバイスにおいて、前記複数の第１の導波路の各々は、前記出射光が出射される側に位置する光出射面を有し、
前記複数の第１の導波路の各々の前記光出射面は、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあり、
前記受光デバイスにおいて、前記複数の第２の導波路の各々は、前記反射光が入射する側に位置する光入射面を有し、
前記複数の第２の導波路の各々の前記光入射面は、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にあり、
前記第２の平面内で前記複数の第２の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の面積は、前記第１の平面内で前記複数の第１の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の面積よりも大きい、
請求項１から６のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項９】
前記光スキャンデバイスの前記複数の第１の導波路から出射された前記出射光が前記反射光として前記受光デバイスの前記複数の第２の導波路によって受光される光経路上に配置され、前記出射光の波長域に含まれる特定の波長域の光を選択的に透過させるフィルタをさらに備える、
請求項１から８のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１０】
前記フィルタは、前記第１の導波路アレイおよび前記第２の導波路アレイの両方を覆っている、
請求項９に記載の光スキャンシステム。
【請求項１１】
前記複数の第１の導波路は、第１の方向に配列されており、
前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向は、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、
前記出射光の前記出射方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、
前記複数の第１の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である、
請求項１から１０のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１２】
前記複数の第１の導波路は、第１の方向および第２の方向に２次元的に配列されており、
前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向は前記第２の方向であり、
前記出射光の前記出射方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、
前記複数の第１の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である、
請求項１から１０のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１３】
前記複数の第１の導波路は、第１の方向に配列されており、

前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向は、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、
前記出射光の前記出射方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、
前記複数の第１の導波路のそれぞれは、
前記第３の方向に交差する反射面を有する第１のミラーであって、前記第２の方向に延びる第１のミラーと、
前記第１のミラーの前記反射面に対向する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第２のミラーと、
前記第１のミラーと前記第２のミラーの間に位置し、前記光が伝搬する光導波層と、
を備え、
前記第１のミラーは、前記第２のミラーよりも高い光透過率を有し、前記光が当該第１のミラーを透過して前記出射光として出射し、
前記第１の調整素子は、前記複数の第１の導波路の各々において、前記光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、前記光の前記位相調整を行う、請求項１から１０のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１４】
前記第１の調整素子は、さらに、前記複数の第１の導波路の各々を伝搬する前記光に位相シフトを与えることにより、前記複数の第１の導波路から出射される光の方向を変化させる、請求項１３に記載の光スキャンシステム。
【請求項１５】
前記複数の第２の導波路は、第１の方向に配列されており、
前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向は、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、
前記複数の第２の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である、
請求項１から１４のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１６】
前記複数の第２の導波路は、第１の方向および第２の方向に２次元的に配列されており、
前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向は前記第２の方向であり、
前記複数の第２の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である、
請求項１から１４のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１７】
前記複数の第２の導波路は、第１の方向に配列されており、
前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向は、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、
前記反射光の前記受光方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、

前記複数の第２の導波路のそれぞれは、
前記第３の方向に交差する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第１のミラーと、
前記第１のミラーの前記反射面に対向する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第２のミラーと、
前記第１のミラーと前記第２のミラーの間に位置し、前記伝搬光が伝搬する光導波層と、
を備え、
前記第２の調整素子は、前記複数の第２の導波路の各々において、前記光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、前記伝搬光の前記位相調整を行う、

請求項１から１４のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項１８】
前記複数の第１の導波路のそれぞれにおいて、前記第１のミラーの前記第１の方向の幅および／または前記第２のミラーの前記第１の方向の幅は、前記光導波層の前記第１の方向の幅よりも幅より長い、
請求項１３または１４に記載の光スキャンシステム。
【請求項１９】
前記光スキャンデバイスは、一体に構成された第３のミラーをさらに備え、
前記複数の第１の導波路の各々の前記第１のミラーは、前記第３のミラーの一部である、
請求項１８に記載の光スキャンシステム。
【請求項２０】
前記光スキャンデバイスは、一体に構成された第４のミラーをさらに備え、
前記複数の第１の導波路の各々の前記第２のミラーは、前記第４のミラーの一部である、
請求項１８または１９に記載の光スキャンシステム。
【請求項２１】
前記光スキャンデバイスは、前記複数の第１の導波路のうちの隣接する２つの第１の導波路の前記光導波層の間に配置され、前記光導波層よりも屈折率が低い材料をさらに備える、
請求項１８から２０のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項２２】
前記材料は、前記隣接する２つの第１の導波路の前記光導波層に直接接触する、
請求項２１に記載の光スキャンシステム。
【請求項２３】
前記複数の第２の導波路のそれぞれにおいて、前記第１のミラーの前記第１の方向の幅および／または前記第２のミラーの前記第１の方向の幅は、前記光導波層の前記第１の方向の幅よりも幅より長い、
請求項１７に記載の光スキャンシステム。
【請求項２４】
前記受光デバイスは、一体に構成された第３のミラーをさらに備え、
前記複数の第２の導波路の各々の前記第１のミラーは、前記第３のミラーの一部である、
請求項２３に記載の光スキャンシステム。
【請求項２５】
前記受光デバイスは、一体に構成された第４のミラーをさらに備え、
前記複数の第２の導波路の各々の前記第２のミラーは、前記第４のミラーの一部である、
請求項２３または２４に記載の光スキャンシステム。
【請求項２６】
前記受光デバイスは、前記複数の第２の導波路のうちの隣接する２つの第２の導波路の前記光導波層の間に配置され、前記光導波層よりも屈折率が低い材料をさらに備える、
請求項２３から２５のいずれかに記載の光スキャンシステム。
【請求項２７】
前記材料は、前記隣接する２つの第２の導波路の前記光導波層に直接接触する、
請求項２６に記載の光スキャンシステム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本開示は、光スキャンシステムに関する。

【背景技術】
【０００２】
従来、光で空間を走査（スキャン）できる種々のデバイスが提案されている。
【０００３】
特許文献１は、ミラーを回転させる駆動装置を用いて、光によるスキャンを行うことができる構成を開示している。
【０００４】
特許文献２は、２次元的に配列された複数のナノフォトニックアンテナ素子を有する光フェーズドアレイを開示している。それぞれのアンテナ素子は可変光遅延線（すなわち、位相シフタ）に光学的に結合される。この光フェーズドアレイでは、コヒーレント光ビームが導波路によってそれぞれのアンテナ素子に誘導され、位相シフタによって光ビームの位相がシフトされる。これにより、遠視野放射パターンの振幅分布を変化させることができることが開示されている。
【０００５】
特許文献３は、内部を光が導波する光導波層、および光導波層の上面および下面に形成された第１分布ブラッグ反射鏡を備える導波路と、導波路内に光を入射させるための光入射口と、光入射口から入射して導波路内を導波する光を出射させるために導波路の表面に形成された光出射口とを備える光偏向素子を開示している。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００６】
【特許文献１】国際公開第２０１３／１６８２６６号
【特許文献２】特表２０１６－５０８２３５号公報
【特許文献３】特開２０１３－１６４９１号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００７】
本開示の一態様は、光によるスキャンを行う光スキャンデバイスと、比較的簡単な構成で受光できる受光デバイスとを備えた光スキャンシステムを提供する。
【課題を解決するための手段】
【０００８】
本開示の一態様に係る光スキャンシステムは、光スキャンデバイスと、受光デバイスと、を備える。前記光スキャンデバイスは、光を伝搬させることにより、伝搬方向に交差する方向に前記光を出射光として出射する第１の導波路を複数含む第１の導波路アレイと、前記複数の第１の導波路の各々を伝搬する前記光の位相を調整することにより、前記複数の第１の導波路からの前記出射光の出射方向を変化させる第１の調整素子と、を備える。前記受光デバイスは、前記複数の第１の導波路からの前記出射光が対象物によって反射された場合に反射光が入射する位置に配置された第２の導波路であって、前記反射光を受光して伝搬光として伝搬させる第２の導波路を複数含む第２の導波路アレイと、前記複数の第２の導波路の各々を伝搬する前記伝搬光の位相を調整することにより、前記複数の第２の導波路による前記反射光の受光方向を変化させる第２の調整素子と、を備える。前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の配列間隔は、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている。
【０００９】
本開示の包括的または具体的な態様は、デバイス、システム、方法、またはこれらの任意の組み合わせによって実現されてもよい。
【発明の効果】
【００１０】
本開示の一態様によれば、比較的簡単な構成で、光による１次元スキャンまたは２次元スキャンを行いながら、対象領域の情報を取得することができる。

【図面の簡単な説明】
【００１１】
【図１】図１は、本開示の例示的な実施形態における光スキャンデバイスの構成を模式的に示す斜視図である。
【図２】図２は、１つの導波路素子の断面の構造および伝搬する光の例を模式的に示す図である。
【図３】図３は、シミュレーションにおいて用いた計算モデルを模式的に示す図である。
【図４Ａ】図４Ａは、光導波層の一例における屈折率と光の出射角度との関係を計算した結果を示している。
【図４Ｂ】図４Ｂは、光導波層の他の例における屈折率と光の出射角度との関係を計算した結果を示している。
【図５】図５は、光スキャンデバイスの例を模式的に示す図である。
【図６Ａ】図６Ａは、比較例の構成を模式的に示す断面図である。
【図６Ｂ】図６Ｂは、他の比較例の構成を模式的に示す断面図である。
【図７】図７は、導波路の屈折率を変化させたときの結合効率の変化を示すグラフである。
【図８】図８は、複数の第１の導波路と複数の第２の導波路との接続を模式的に示す図である。
【図９】図９は、光導波層の両隣にスペーサが配置されている構成例を模式的に示す、導波路素子の断面図である。
【図１０】図１０は、導波路アレイの構成例を模式的に示す、光スキャンデバイスの断面図である。
【図１１】図１１は、光導波層内の導波光の伝搬を模式的に示す図である。
【図１２】図１２は、本開示の例示的な実施形態における光スキャンデバイスの構造の一部を模式的に示す断面図である。
【図１３】図１３は、光スキャンデバイスの構造の他の例を模式的に示す断面図である。
【図１４】図１４は、光スキャンデバイスの構造のさらに他の例を模式的に示す断面図である。
【図１５】図１５は、２つの多層反射膜で挟まれた光導波層２への光の入射の一例を示している。
【図１６Ａ】図１６Ａは、グレーティングを介して第１の導波路に光が導入される例を示している。
【図１６Ｂ】図１６Ｂは、第１の導波路の端面から光が入力される例を示している。
【図１６Ｃ】図１６Ｃは、レーザー光源から第１の導波路に光が入力される例を示している。
【図１７】図１７は、第１の導波路から第２の導波路への導波光の結合効率の$d_2$依存性を示している。
【図１８】図１８は、他の例における結合効率の$d_2$依存性を示している。
【図１９】図１９は、結合効率が０．５以上になる場合と、結合効率が０．５未満になる場合とを分類した図である。
【図２０】図２０は、第１の導波路における光導波層の厚さ方向の中心と、第２の導波路における光導波層の厚さ方向の中心とがずれた構成を示す図である。
【図２１】図２１は、第１の導波路から第２の導波路への光の結合効率の$\Delta z$依存性を示す図である。
【図２２Ａ】図２２Ａは、更に他の例における結合効率の$d_2$依存性を示している。
【図２２Ｂ】図２２Ｂは、更に他の例における結合効率の$d_2$依存性を示している。
【図２３Ａ】図２３Ａは、計算モデルを示す図である。
【図２３Ｂ】図２３Ｂは、光の伝搬を示す計算結果を示す図である。
【図２４Ａ】図２４Ａは、他の実施形態における光スキャンデバイスを示す断面図である。

【図２４Ｂ】図２４Ｂは、結合効率のギャップ幅依存性の計算結果を示す図である。
【図２５Ａ】図２５Ａは、導波路アレイの出射面に垂直な方向に光を出射する導波路アレイの断面を示す図である。
【図２５Ｂ】図２５Ｂは、導波路アレイの出射面に垂直な方向とは異なる方向に光を出射する導波路アレイの断面を示す図である。
【図２６】図２６は、３次元空間における導波路アレイを模式的に示す斜視図である。
【図２７Ａ】図２７Ａは、ｐがλよりも大きい場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。
【図２７Ｂ】図２７Ｂは、ｐがλよりも小さい場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。
【図２７Ｃ】図２７Ｃは、ｐがλ／２に実質的に等しい場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。
【図２８】図２８は、位相シフタが導波路素子に直接的に接続されている構成の例を示す模式図である。
【図２９】図２９は、導波路アレイおよび位相シフタアレイを、光出射面の法線方向から見た模式図である。
【図３０】図３０は、位相シフタにおける導波路が、導波路素子における光導波層と、他の導波路を介して繋がる構成の例を模式的に示す図である。
【図３１】図３１は、光分岐器にカスケード状に並ぶ複数の位相シフタを挿入した構成例を示す図である。
【図３２Ａ】図３２Ａは、第１調整素子の構成の一例を模式的に示す斜視図である。
【図３２Ｂ】図３２Ｂは、第１調整素子の他の構成例を模式的に示す斜視図である。
【図３２Ｃ】図３２Ｃは、第１調整素子のさらに他の構成例を模式的に示す斜視図である。
【図３３】図３３は、ヒーターを含む調整素子と導波路素子とを組み合わせた構成の例を示す図である。
【図３４】図３４は、支持部材でミラーが保持された構成例を示す図である。
【図３５】図３５は、ミラーを移動させる構成の一例を示す図である。
【図３６】図３６は、光の伝搬を妨げない位置に電極配置した構成例を示す図である。
【図３７】図３７は、圧電素子の例を示す図である。
【図３８Ａ】図３８Ａは、ユニモルフの構造を有する支持部材の構成例を示す図である。
【図３８Ｂ】図３８Ｂは、支持部材が変形した状態の例を示す図である。
【図３９Ａ】図３９Ａは、バイモルフの構造を有する支持部材の構成例を示す図である。
【図３９Ｂ】図３９Ｂは、支持部材が変形した状態の例を示す図である。
【図４０】図４０は、アクチュエータの例を示す図である。
【図４１Ａ】図４１Ａは、支持部材の先端の傾きを説明するための図である。
【図４１Ｂ】図４１Ｂは、伸縮する方向の異なる２つのユニモルフ型の支持部材を直列に繋ぎ合わせた例を示す図である。
【図４２】図４２は、複数の第１のミラーを保持する支持部材をアクチュエータで一括して駆動する構成の例を示す図である。
【図４３】図４３は、複数の導波路素子における第１のミラーが１つのプレート状のミラーである構成例を示す図である。
【図４４】図４４は、それぞれの導波路素子の電極から配線を共通に取り出す構成の例を示す図である。
【図４５】図４５は、一部の電極および配線を共通にした構成の例を示す図である。
【図４６】図４６は、複数の導波路素子に対して共通の電極を配置した構成の例を示す図である。
【図４７】図４７は、位相シフタアレイを配置する領域を大きく確保して、導波路アレイを小さく集積した構成の例を模式的に示す図である。
【図４８】図４８は、２つの位相シフタアレイが、導波路アレイの両側にそれぞれ配置さ

れた構成例を示す図である。
【図４９Ａ】図４９Ａは、導波路素子の配列方向および導波路素子が延びる方向が直交していない導波路アレイの構成例を示している。
【図４９Ｂ】図４９Ｂは、導波路素子の配列間隔が一定でない導波路アレイの構成例を示している。
【図５０Ａ】図５０Ａは、本実施形態における光スキャンデバイスを模式的に示す図である。
【図５０Ｂ】図５０Ｂは、図５０Ａに示した光スキャンデバイスの断面図である。
【図５０Ｃ】図５０Ｃは、図５０Ａに示した光スキャンデバイスの他の断面図である。
【図５１Ａ】図５１Ａは、第２のミラーと導波路の間に誘電体層が配置された構成例を示す図である。
【図５１Ｂ】図５１Ｂは、第１の導波路の上に第２の誘電体層がさらに配置された構成例を示す図である。
【図５２】図５２は、第２のミラーが第１の導波路と基板の間の領域に配置されていない構成例を示す図である。
【図５３】図５３は、第２のミラーが第１の導波路１と基板５０との間において薄くなっている構成例を示す図である。
【図５４Ａ】図５４Ａは、第２のミラーの厚さが段階的に変化する構成例を示す図である。
【図５４Ｂ】図５４Ｂは、上部電極、第１のミラー、および第２の基板が、第１の導波路の保護層６１、および第２の導波路１０の光導波層２０の上に跨って配置されている構成例を示す図である。
【図５４Ｃ】図５４Ｃは、図５４Ｂの構成例の製造過程の一部を示す図である。
【図５５】図５５は、複数の第２の導波路の断面を示す図である。
【図５６】図５６は、第１の導波路および第２の導波路が反射型導波路である構成例を示す図である。
【図５７】図５７は、上部電極が第１のミラーの上に配置されており、下部電極が第２のミラーの下に配置されている構成例を示す図である。
【図５８】図５８は、第１の導波路が２つの部分に分離された例を示す図である。
【図５９】図５９は、電極が、各光導波層と、各光導波層に隣接する光導波層２０との間に配置されている構成例を示す図である。
【図６０】図６０は、第１のミラーが厚く、第２のミラーが薄い構成例を示す図である。
【図６１】図６１は、本実施形態おける光スキャンデバイスの断面図である。
【図６２】図６２は、光ロスの割合と$y_1$の関係を示す図である。
【図６３】図６３は、本実施形態おける導波路アレイの別の構成例を模式的に示す、光スキャンデバイスの断面図である。
【図６４Ａ】図６４Ａは、図１０の構成例における、電界強度分布の計算結果を示す図である。
【図６４Ｂ】図６４Ｂは、図６３の構成例における、電界強度分布の計算結果を示す図である。
【図６５】図６５は、本実施形態において、異なる屈折率を有するスペーサが存在する構成例を模式的に示す、光スキャンデバイスの断面図である。
【図６６】図６６は、本実施形態の変形例における導波路素子の構成例を模式的に示す、光スキャンデバイスの断面図である。
【図６７】図６７は、回路基板上に光分岐器、導波路アレイ、位相シフタアレイ、および光源などの素子を集積した光スキャンデバイスの構成例を示す図である。
【図６８】図６８は、光スキャンデバイスから遠方にレーザーなどの光ビームを照射して２次元スキャンを実行している様子を示す模式図である。
【図６９】図６９は、測距画像を生成することが可能なＬｉＤＡＲシステムの構成例を示すブロック図である。

【図７０】図７０は、全反射導波路の概略構成を示す図である。
【図７１】図７１は、全反射導波路の電界強度分布を示す図である。
【図７２】図７２は、スローライト導波路の概略構成を示す図である。
【図７３】図７３は、スローライト導波路の電界強度分布を示す図である。
【図７４】図７４は、光スキャンシステムの構成例を模式的に示す図である。
【図７５】図７５は、光スキャンデバイスにおける導波路アレイ、および受光デバイスにおける導波路アレイの配置例を示す図である。
【図７６】図７６は、光スキャンデバイスにおける導波路アレイ、および受光デバイスにおける導波路アレイから出射する回折光の例を示す図である。
【図７７】図７７は、光スキャンデバイスにおける導波路アレイの発光面、および受光デバイスにおける導波路アレイの受光面の大きさの例を説明するための図である。
【図７８】図７８は、１次元フェーズドアレイの構成例を示す図である。
【図７９】図７９は、２次元フェーズドアレイの構成例を示す図である。
【図８０】図８０は、回路基板上に合波器、導波路アレイ、位相シフタアレイ、および光検出器などの素子を集積した受光デバイスの構成例を示す図である。
【図８１】図８１は、導波路アレイを含まない光スキャンデバイスの構成例を模式的に示す図である。
【発明を実施するための形態】
【００１２】
本開示において、「光」とは、可視光（波長が約４００ｎｍ～約７００ｎｍ）だけでなく、紫外線（波長が約１０ｎｍ～約４００ｎｍ）および赤外線（波長が約７００ｎｍ～約１ｍｍ）を含む電磁波を意味する。本明細書において、紫外線を「紫外光」と称し、赤外線を「赤外光」と称することがある。
【００１３】
本開示において、光による「スキャン」とは、光の方向を変化させることを意味する。「１次元スキャン」とは、光の方向を、当該方向に交差する方向に沿って直線的に変化させることを意味する。「２次元スキャン」とは、光の方向を、当該方向に交差する平面に沿って２次元的に変化させることを意味する。「光スキャンデバイス」とは、光によるスキャンを行うことが可能な発光デバイスを意味する。「光スキャンシステム」とは、光スキャンデバイスと受光デバイスとを備えるシステムを意味する。
【００１４】
本開示において、回路、ユニット、装置、部材又は部の全部又は一部、又はブロック図の機能ブロックの全部又は一部は、半導体装置、半導体集積回路（ＩＣ）、又はＬＳＩ（ｌａｒｇｅ ｓｃａｌｅ ｉｎｔｅｇｒａｔｉｏｎ）を含む一つ又は複数の電子回路によって実行されてもよい。ＬＳＩ又はＩＣは、一つのチップに集積されてもよいし、複数のチップを組み合わせて構成されてもよい。例えば、記憶素子以外の機能ブロックは、一つのチップに集積されてもよい。ここでは、ＬＳＩまたはＩＣと呼んでいるが、集積の度合いによって呼び方が変わり、システムＬＳＩ、ＶＬＳＩ（ｖｅｒｙ ｌａｒｇｅ ｓｃａｌｅ ｉｎｔｅｇｒａｔｉｏｎ）、若しくはＵＬＳＩ（ｕｌｔｒａ ｌａｒｇｅ ｓｃａｌｅ ｉｎｔｅｇｒａｔｉｏｎ）と呼ばれるものであってもよい。ＬＳＩの製造後にプログラムされる、Ｆｉｅｌｄ Ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ Ｇａｔｅ Ａｒｒａｙ（ＦＰＧＡ）、又はＬＳＩ内部の接合関係の再構成又はＬＳＩ内部の回路区画のセットアップができるｒｅｃｏｎｆｉｇｕｒａｂｌｅ ｌｏｇｉｃ ｄｅｖｉｃｅも同じ目的で使うことができる。
【００１５】
さらに、回路、ユニット、装置、部材又は部の全部又は一部の機能又は操作は、ソフトウエア処理によって実行することが可能である。この場合、ソフトウエアは一つ又は複数のＲＯＭ、光学ディスク、ハードディスクドライブなどの非一時的記録媒体に記録され、ソフトウエアが処理装置（ｐｒｏｃｅｓｓｏｒ）によって実行されたときに、そのソフトウエアで特定された機能が処理装置および周辺装置によって実行される。システム又は装

置は、ソフトウエアが記録されている一つ又は複数の非一時的記録媒体、処理装置、及び必要とされるハードウエアデバイス、例えばインターフェース、を備えていても良い。

【００１６】

以下の説明において、必要以上に詳細な説明は省略する場合がある。例えば、既によく知られた事項の詳細説明および実質的に同一の構成に対する重複する説明を省略することがある。これは、以下の説明が不必要に冗長になることを避け、当業者の理解を容易にするためである。なお、発明者らは、当業者が本開示を十分に理解するために添付図面および以下の説明を提供するのであって、これらによって特許請求の範囲に記載の主題を限定することを意図するものではない。以下の説明において、同一または類似する構成要素については、同じ参照符号を付している。

【００１７】

本開示の実施形態を説明する前に、本開示の基礎となった知見を説明する。

【００１８】

本発明者らは、従来よりも簡単な構成で光のスキャンまたは受光が可能な光スキャンシステムの開発を検討している。本発明者らは、例えば、対向する一対のミラーと、それらのミラーに挟まれた光導波層とを有する導波路素子を用いたり、表面にグレーティングを有する誘電体導波路を用いたりすることにより、複雑な機構を用いることなく光のスキャンまたは受光が可能になることを見出した。これらの導波路素子または誘電体導波路（以下、まとめて単に「導波路」と称することがある。）における屈折率等の光学特性を変化させることにより、光の出射方向または受光可能な入射光の方向を変化させることができる。

【００１９】

上記のような導波路構造は、光スキャンデバイスおよび受光デバイスの両方に用いてもよいし、一方にのみ用いてもよい。例えば、受光デバイスについては上記のような導波路構造を採用し、光スキャンデバイスについては、例えば特許文献１から３に開示されているような従来の構造を採用してもよい。光スキャンデバイスは、以下に詳しく説明する構造以外にも、例えば、レーザーなどの光源と、ＭＥＭＳミラーなどの可動式のミラーとを備えた構造によっても実現できる。

【００２０】

本開示における光スキャンデバイスまたは受光デバイスに用いられ得る導波路構造の一例として、一対のミラーと光導波層とを有する導波路素子の構成を説明する。ここでは当該導波路構造が光スキャンデバイスに適用された場合の例を説明する。導波路素子における一対のミラーの一方は、他方に比べて高い光透過率を有し、光導波層を伝搬する光の一部を外部に出射させる。出射した光の方向（または出射角度）は、後述するように、光導波層の屈折率および／または厚さを調整することにより、変化させることができる。より具体的には、屈折率および／または厚さを変化させることにより、出射光の波数ベクトル（ｗａｖｅ　ｖｅｃｔｏｒ）の、光導波層の長手方向に沿った方向の成分を変化させることができる。これにより、１次元的なスキャンが実現される。

【００２１】

さらに、複数の導波路素子のアレイを用いた場合には、２次元的なスキャンを実現することもできる。より具体的には、複数の導波路素子に供給する光に適切な位相差を与え、その位相差を調整することにより、複数の導波路素子から出射する光が強め合う方向を変化させることができる。位相差の変化により、出射光の波数ベクトルの、光導波層の長手方向に沿った方向に交差する方向の成分が変化する。これにより、２次元的なスキャンを実現することができる。なお、２次元的なスキャンを行う場合でも、複数の光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を異なる量変化させる必要はない。すなわち、複数の光導波層に供給する光に適切な位相差を与え、かつ、複数の光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を同期して同量変化させることにより、２次元的なスキャンを行うことができる。このように、本開示の実施形態によれば、比較的簡単な構成で、光による２次元スキャンを実現することができる。

【００２２】
以上の基本原理は、光を出射する用途だけでなく、光信号を受信する用途にも同様に適用できる。光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、受信できる光の方向を１次元的に変化させることができる。さらに、一方向に配列された複数の導波路素子にそれぞれ接続された複数の位相シフタによって光の位相差を変化させれば、受信できる光の方向を２次元的に変化させることができる。
【００２３】
本開示の実施形態による光スキャンデバイスおよび受光デバイスは、例えば、ＬｉＤＡＲ（Ｌｉｇｈｔ Ｄｅｔｅｃｔｉｏｎ ａｎｄ Ｒａｎｇｉｎｇ）システムのような光スキャンシステムにおけるアンテナとして用いられ得る。ＬｉＤＡＲシステムは、ミリ波などの電波を用いたレーダシステムと比較して、短波長の電磁波（可視光、赤外線、または紫外線）を用いるため、高い分解能で物体の距離分布を検出することができる。そのようなＬｉＤＡＲシステムは、例えば自動車、ＵＡＶ（Ｕｎｍａｎｎｅｄ Ａｅｒｉａｌ Ｖｅｈｉｃｌｅ、所謂ドローン）、ＡＧＶ（Ａｕｔｏｍａｔｅｄ Ｇｕｉｄｅｄ Ｖｅｈｉｃｌｅ）などの移動体に搭載され、衝突回避技術の１つとして使用され得る。
【００２４】
本開示は、上記のような光スキャンデバイスと、受光デバイスとを備える光スキャンシステムに関する。
【００２５】
本開示は、以下の項目に記載の光スキャンシステムを含む。
【００２６】
本開示の第１の項目に係る光スキャンシステムは、光スキャンデバイスと、受光デバイスと、を備える。前記光スキャンデバイスは、光を伝搬させることにより、伝搬方向に交差する方向に前記光を出射光として出射する第１の導波路を複数含む第１の導波路アレイと、前記複数の第１の導波路の各々を伝搬する前記光の位相を調整することにより、前記複数の第１の導波路からの前記出射光の出射方向を変化させる第１の調整素子と、を備える。前記受光デバイスは、前記複数の第１の導波路からの前記出射光が対象物によって反射された場合に反射光が入射する位置に配置された第２の導波路であって、前記反射光を受光して伝搬光として伝搬させる第２の導波路を複数含む第２の導波路アレイと、前記複数の第２の導波路の各々を伝搬する前記伝搬光の位相を調整することにより、前記複数の第２の導波路による前記反射光の受光方向を変化させる第２の調整素子と、を備える。前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の配列間隔は、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている。
【００２７】
この光スキャンシステムでは、複数の第１の導波路が光を伝搬させることによって光を出射光として出射し、第１の調整素子が伝搬する光の位相を調整することによって出射光の出射方向を変化させる。出射光が対象物によって反射された場合に、複数の第１の導波路が反射光を受光して伝搬光として伝搬させ、第２の調整素子が伝搬光の位相を調整することによって反射光の受光方向を変化させる。
【００２８】
ここで、複数の第１の導波路の配列間隔は、複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている。よって、反射光に含まれる高次回折光の受光を低減することができ、混信を抑制することができる。
【００２９】
本開示の第２の項目に係る光スキャンシステムは、第１の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスおよび前記受光デバイスを同期して制御する制御回路をさらに備える。前記制御回路は、前記第１の調整素子を制御して前記出射方向を変化させ、前記第２の調整素子を制御して前記受光方向を変化させる。
【００３０】
この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスからの光の出射と、受光デバイスに

おける対象物からの反射光の受光を同期させることにより、どの方向に出射された光が、反射光として戻ってきたかを把握することができる。また、出射方向の変化に伴い、受光感度が最大になるように受光方向を変化させることができる。

【００３１】

本開示の第３の項目に係る光スキャンシステムは、第２の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記制御回路が、前記複数の第１の導波路から出射される前記出射光の出射角度と、前記複数の第２の導波路によって受光される前記反射光の入射角度とを実質的に一致させる。

【００３２】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスが光を出射してから受光デバイスが反射光を受光するまでの時間から、光スキャンシステムと対象物との距離が算出され得る。光スキャンデバイスからの出射光の出射角度が、受光デバイスにおける反射光の入射角度と実質的に一致すれば、光スキャンシステムから対象物まで方向を容易に知ることができる。

【００３３】

本開示の第４の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第３の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第２の導波路に接続され、前記複数の第２の導波路からの前記伝搬光の合成光を検出する光検出器をさらに備える。

【００３４】

この光スキャンシステムでは、複数の第２の導波路からの伝搬光の合成光を検出することができる。

【００３５】

本開示の第５の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第４の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の前記配列間隔が、前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の前記配列間隔よりも大きい。

【００３６】

この光スキャンシステムでは、微細加工の条件が緩和され、受光デバイスにおける第２の導波路アレイの作製が比較的容易になる。

【００３７】

本開示の第６の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第５の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記受光デバイスにおける前記複数の第２の導波路の各々の配列方向における幅が、前記光スキャンデバイスにおける前記複数の第１の導波路の各々の配列方向における幅よりも大きい。

【００３８】

この光スキャンシステムでは、微細加工の条件が緩和され、第２の導波路アレイにおける各第２の導波路の作製が比較的容易になる。

【００３９】

本開示の第７の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第６の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスでは、前記複数の第１の導波路の各々が、前記出射光が出射される側に位置する光出射面を有し、前記複数の第１の導波路の各々の前記光出射面が、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあり、前記受光デバイスでは、前記複数の第２の導波路の各々が、前記反射光が入射する側に位置する光入射面を有し、前記複数の第２の導波路の各々の前記光入射面が、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にある。前記第１の平面内で前記複数の第１の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心と前記第２の平面内で前記複数の第２の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心の間の距離は、２０ｍｍ以下である。

【００４０】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおける第２の導波路アレイが、光スキャンデバイスにおける第１の導波路アレイから１ｍ以上離れた対象物からの反射光を、出射

光と反平行な方向から戻ってきた光として受光することができる。これにより、出射角度と受光角度との差を補正することなく、光スキャンシステムから対象物までの方向を知ることができる。

【００４１】

本開示の第８の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第６の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスでは、前記複数の第１の導波路の各々が、前記出射光が出射される側に位置する光出射面を有し、前記複数の第１の導波路の各々の前記光出射面が、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあり、前記受光デバイスでは、前記複数の第２の導波路の各々が、前記反射光が入射する側に位置する光入射面を有し、前記複数の第２の導波路の各々の前記光入射面が、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にある。前記第２の平面内で前記複数の第２の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の面積は、前記第１の平面内で前記複数の第１の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の面積よりも大きい。

【００４２】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおける光入射面が、光スキャンデバイスにおける光出射面よりも大きい。したがって、受光デバイスは、より多くの反射光を受光することができるため、受光デバイスの受光感度が高くなる。

【００４３】

本開示の第９の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第８の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスの前記複数の第１の導波路から出射された前記出射光が前記反射光として前記受光デバイスの前記複数の第２の導波路によって受光される光経路上に配置され、前記出射光の波長域に含まれる特定の波長域の光を選択的に透過させるフィルタをさらに備える。

【００４４】

この光スキャンシステムでは、フィルタによって特定の波長域以外の光は除去される。これにより、受光デバイスが反射光を受光するとき、外乱光の影響を低減することができる。

【００４５】

本開示の第１０の項目に係る光スキャンシステムは、第９の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記フィルタが、前記第１の導波路アレイおよび前記第２の導波路アレイの両方を覆っている。

【００４６】

この光スキャンシステムでは、フィルタが第１の導波路アレイおよび第２の導波路アレイの両方を覆っていても、第９の項目に係る光スキャンシステムと同じ作用効果が得られる。

【００４７】

本開示の第１１の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第１０の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第１の導波路が、第１の方向に配列されている。前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向は、前記第１の方向に交差する第２の方向である。前記出射光の前記出射方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向である。前記複数の第１の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である。

【００４８】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおける第１の方向に配列された複数の第１の導波路から、グレーティングに起因する回折により、誘電体導波路内を伝搬する光の少なくとも一部は、外部に出射される。各第１の導波路を伝搬する光の位相を調整することにより、光の出射方向である第３の方向の、第１の方向の成分を変化させることができる。各第１の導波路における屈折率を変調することにより、光の出射方向である第３の方向の、第２の方向の成分を変化させることができる。これにより、２次元スキャンが可能になる。

【００４９】
本開示の第１２の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第１０の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第１の導波路が、第１の方向および第２の方向に２次元的に配列されている。前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向は前記第２の方向である。前記出射光の前記出射方向は、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向である。前記複数の第１の導波路の各々は、グレーティングを有する誘電体導波路である。
【００５０】
この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおける第１の方向および第２の方向に配列された複数の第１の導波路から、グレーティングに起因する回折により、誘電体導波路内を伝搬する光の少なくとも一部は、外部に出射される。各第１の導波路を伝搬する光の位相を調整することにより、光の出射方向である第３の方向の、第１および第２の方向の成分を変化させることができる。これにより、２次元スキャンが可能になる。
【００５１】
本開示の第１３の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第１０の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第１の導波路が、第１の方向に配列されており、前記複数の第１の導波路の各々における前記光の前記伝搬方向が、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、前記出射光の前記出射方向が、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、前記複数の第１の導波路のそれぞれが、前記第３の方向に交差する反射面を有する第１のミラーであって、前記第２の方向に延びる第１のミラーと、前記第１のミラーの前記反射面に対向する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第２のミラーと、前記第１のミラーと前記第２のミラーの間に位置し、前記光が伝搬する光導波層と、を備える。前記第１のミラーは、前記第２のミラーよりも高い光透過率を有し、前記光が当該第１のミラーを透過して前記出射光として出射する。前記第１の調整素子は、前記複数の第１の導波路の各々において、前記光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、前記光の前記位相調整を行う。
【００５２】
この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおける各第１の導波路の光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、光スキャンデバイスからの出射光の出射方向である第３の方向の第２の方向の成分を変えることができる。
【００５３】
本開示の第１４の項目に係る光スキャンシステムは、第１３の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記第１の調整素子が、さらに、前記複数の第１の導波路の各々を伝搬する前記光に位相シフトを与えることにより、前記複数の第１の導波路から出射される光の方向を変化させる。
【００５４】
この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおける各第１の導波路を伝搬する光に位相シフトを与えることにより、光スキャンデバイスからの出射光の出射方向である第３の方向の第１の方向の成分を変えることができる。
【００５５】
本開示の第１５の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第１４の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第２の導波路が、第１の方向に配列されており、前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向が、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、前記複数の第２の導波路の各々が、グレーティングを有する誘電体導波路である。
【００５６】
この光スキャンシステムでは、第１１の項目に係る光スキャンシステムと同じ作用効果により、２次元方向における受光が可能になる。
【００５７】
本開示の第１６の項目に係る光スキャンシステムは、第１から第１４の項目のいずれか

に係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第２の導波路が、第１の方向および第２の方向に２次元的に配列されており、前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向が前記第２の方向であり、前記複数の第２の導波路の各々が、グレーティングを有する誘電体導波路である。

【００５８】

この光スキャンシステムでは、第１２の項目に係る光スキャンシステムと同じ作用効果により、２次元方向における受光が可能になる。

【００５９】

本開示の第１７の項目に係る光スキャンシステムは、第１から１４の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第２の導波路が、第１の方向に配列されており、前記複数の第２の導波路の各々における前記伝搬光の伝搬方向が、前記第１の方向に交差する第２の方向であり、前記反射光の前記受光方向が、前記第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向であり、前記複数の第２の導波路のそれぞれが、前記第３の方向に交差する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第１のミラーと、前記第１のミラーの前記反射面に対向する反射面を有し、前記第２の方向に延びる第２のミラーと、前記第１のミラーと前記第２のミラーの間に位置し、前記伝搬光が伝搬する光導波層と、を備える。前記第２の調整素子は、前記複数の第２の導波路の各々において、前記光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、前記伝搬光の前記位相調整を行う。

【００６０】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおける各第２の導波路の光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、受光デバイスにおける反射光の受光方向である第３の方向の第２の方向の成分を変えることができる。

【００６１】

本開示の第１８の項目に係る光スキャンシステムは、第１３または第１４の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第１の導波路のそれぞれにおいて、前記第１のミラーの前記第１の方向の幅および／または前記第２のミラーの前記第１の方向の幅が、前記光導波層の前記第１の方向の幅よりも長い。

【００６２】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおいて、各第１の導波路における光導波層からの導波光の漏れを抑制することができる。その結果、光スキャンに用いられる光量の低下は抑制される。

【００６３】

本開示の第１９の項目に係る光スキャンシステムは、第１８の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスが、一体に構成された第３のミラーをさらに備える。前記複数の第１の導波路の各々の前記第１のミラーは、前記第３のミラーの一部である。

【００６４】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおいて、原理的に第１のミラーからの光ロスを最小化することができる。

【００６５】

本開示の第２０の項目に係る光スキャンシステムは、第１８または第１９の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスが、一体に構成された第４のミラーをさらに備える。前記複数の第１の導波路の各々の前記第２のミラーは、前記第４のミラーの一部である。

【００６６】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおいて、原理的に第２のミラーからの光ロスを最小化することができる。

【００６７】

本開示の第２１の項目に係る光スキャンシステムは、第１８から第２０の項目のいずれ

かに係る光スキャンシステムにおいて、前記光スキャンデバイスが、前記複数の第１の導波路のうちの隣接する２つの第１の導波路の前記光導波層の間に配置され、前記光導波層よりも屈折率が低い材料をさらに備える。

【００６８】

この光スキャンシステムでは、光スキャンデバイスにおける各第１の導波路において、導波光は、光導波層内を、第１の方向および第１の方向に反対の方向において全反射により閉じ込められながら、第２の方向に伝搬する。

【００６９】

本開示の第２２の項目に係る光スキャンシステムは、第２１の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記材料が、前記隣接する２つの第１の導波路の前記光導波層に直接接触する。

【００７０】

この光スキャンシステムでは、上記の材料が、隣接する２つの第１の導波路の光導波層に直接接触していても、第２１の項目に係る光スキャンシステムと同じ作用効果が得られる。

【００７１】

本開示の第２３の項目に係る光スキャンシステムは、第１７の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記複数の第２の導波路のそれぞれにおいて、前記第１のミラーの前記第１の方向の幅および／または前記第２のミラーの前記第１の方向の幅が、前記光導波層の前記第１の方向の幅よりも長い。

【００７２】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおいて、各第２の導波路における光導波層からの導波光の漏れを抑制することができる。

【００７３】

本開示の第２４の項目に係る光スキャンシステムは、第２３の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記受光デバイスが、一体に構成された第３のミラーをさらに備える。前記複数の第２の導波路の各々の前記第１のミラーは、前記第３のミラーの一部である。

【００７４】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおいて、原理的に第１のミラーからの光ロスを最小化することができる。

【００７５】

本開示の第２５の項目に係る光スキャンシステムは、第２３または第２４の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、第２３または２４の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記受光デバイスが、一体に構成された第４のミラーをさらに備える。前記複数の第２の導波路の各々の前記第２のミラーは、前記第４のミラーの一部である。

【００７６】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおいて、原理的に第２のミラーからの光ロスを最小化することができる。

【００７７】

本開示の第２６の項目に係る光スキャンシステムは、第２３から第２５の項目のいずれかに係る光スキャンシステムにおいて、前記受光デバイスが、前記複数の第２の導波路のうちの隣接する２つの第２の導波路の前記光導波層の間に配置され、前記光導波層よりも屈折率が低い材料をさらに備える。

【００７８】

この光スキャンシステムでは、受光デバイスにおける各第２の導波路において、導波光は、光導波層内を、第１の方向および第１の方向に反対の方向において全反射により閉じ込められながら、第２の方向に伝搬する。

【００７９】

本開示の第２７の項目に係る光スキャンシステムは、第２６の項目に係る光スキャンシステムにおいて、前記材料が、前記隣接する２つの第２の導波路の前記光導波層に直接接

触する。　この光スキャンシステムでは、上記の材料が、隣接する２つの第１の導波路の光導波層に直接接触していても、第２６の項目に係る光スキャンシステムと同じ作用効果が得られる。

【００８０】

＜光スキャンデバイスの構成例＞

以下、一例として、２次元スキャンを行う光スキャンデバイスの構成を説明する。

【００８１】

図１は、本開示の例示的な実施形態における光スキャンデバイス１００の構成を模式的に示す斜視図である。光スキャンデバイス１００は、第１の方向（図１におけるＹ方向）に規則的に配列された複数の導波路素子１０を含む導波路アレイを備える。複数の導波路素子１０の各々は、第１の方向に交差する第２の方向（図１におけるＸ方向）に延びた形状を有する。複数の導波路素子１０は、第２の方向に光を伝搬させながら、第１および第２の方向に平行な仮想的な平面に交差する第３の方向Ｄ３に光を出射させる。本実施形態では、第１の方向（Ｙ方向）と第２の方向（Ｘ方向）とが直交しているが、両者が直交していなくてもよい。本実施形態では、複数の導波路素子１０がＹ方向に等間隔で並んでいるが、必ずしも等間隔に並んでいる必要はない。

【００８２】

なお、本願の図面に示される構造物の向きは、説明のわかりやすさを考慮して設定されており、本開示の実施形態が現実に実施されるときの向きをなんら制限するものではない。また、図面に示されている構造物の全体または一部分の形状および大きさも、現実の形状および大きさを制限するものではない。

【００８３】

複数の導波路素子１０のそれぞれは、互いに対向する第１のミラー３０および第２のミラー４０（以下、単にミラーと呼ぶ場合がある）と、ミラー３０とミラー４０の間に位置する光導波層２０とを有する。ミラー３０および４０の各々は、第３の方向Ｄ３に交差する反射面を、光導波層２０との界面に有する。ミラー３０および４０、ならびに光導波層２０は、第２の方向（Ｘ方向）に延びた形状を有している。

【００８４】

なお、後述するように、複数の導波路素子１０の複数の第１のミラー３０は、一体に構成された第３のミラーの複数の部分であってもよい。また、複数の導波路素子１０の複数の第２のミラー４０は、一体に構成された第４のミラーの複数の部分であってもよい。さらに、複数の導波路素子１０の複数の光導波層２０は、一体に構成された光導波層の複数の部分であってもよい。少なくとも、（１）各第１のミラー３０が他の第１のミラー３０と別体に構成されているか、（２）各第２のミラー４０が他の第２のミラー４０と別体に構成されているか、（３）各光導波層２０が他の光導波層２０と別体に構成されていることにより、複数の導波路を形成することができる。「別体に構成されている」とは、物理的に空間を設けることのみならず、間に屈折率が異なる材料を挟み、分離することも含む。

【００８５】

第１のミラー３０の反射面と第２のミラー４０の反射面とは略平行に対向している。２つのミラー３０および４０のうち、少なくとも第１のミラー３０は、光導波層２０を伝搬する光の一部を透過させる特性を有する。言い換えれば、第１のミラー３０は、当該光について、第２のミラー４０よりも高い光透過率を有する。このため、光導波層２０を伝搬する光の一部は、第１のミラー３０から外部に出射される。このようなミラー３０および４０は、例えば誘電体による多層膜（「多層反射膜」と称することもある。）によって形成される多層膜ミラーであり得る。

【００８６】

それぞれの導波路素子１０に入力する光の位相を制御し、さらに、これらの導波路素子１０における光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を同期して同時に変化させることで、光による２次元スキャンを実現することができる。

【００８７】
本発明者らは、そのような２次元スキャンを実現するために、導波路素子１０の動作原理について詳しく分析を行った。その結果に基づき、複数の導波路素子１０を同期して駆動することで、光による２次元スキャンを実現することに成功した。
【００８８】
図１に示されるように、各導波路素子１０に光を入力すると、各導波路素子１０の出射面から光が出射される。出射面は、第１のミラー３０の反射面の反対側に位置する。その出射光の方向Ｄ３は、光導波層の屈折率、厚さ、および光の波長に依存する。本実施形態では、各導波路素子１０から出射される光が概ね同じ方向になるように、各光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方が同期して制御される。これにより、複数の導波路素子１０から出射される光の波数ベクトルのＸ方向の成分を変化させることができる。言い換えれば、出射光の方向Ｄ３を、図１に示される方向１０１に沿って変化させることができる。
【００８９】
さらに、複数の導波路素子１０から出射される光は同じ方向を向いているので、出射光は互いに干渉する。それぞれの導波路素子１０から出射される光の位相を制御することにより、干渉によって光が強め合う方向を変化させることができる。例えば、同じサイズの複数の導波路素子１０がＹ方向に等間隔で並んでいる場合、複数の導波路素子１０には、一定量ずつ位相の異なる光が入力される。その位相差を変化させることにより、出射光の波数ベクトルの、Ｙ方向の成分を変化させることができる。言い換えれば、複数の導波路素子１０に導入される光の位相差をそれぞれ変化させることにより、干渉によって出射光が強め合う方向Ｄ３を、図１に示される方向１０２に沿って変化させることができる。これにより、光による２次元スキャンを実現することができる。
【００９０】
以下、光スキャンデバイス１００の動作原理をより詳細に説明する。
【００９１】
＜導波路素子の動作原理＞
図２は、１つの導波路素子１０の断面の構造および伝搬する光の例を模式的に示す図である。図２では、図１に示すＸ方向およびＹ方向に垂直な方向をＺ方向とし、導波路素子１０のＸＺ面に平行な断面が模式的に示されている。導波路素子１０において、一対のミラー３０とミラー４０が光導波層２０を挟むように配置されている。光導波層２０のＸ方向における一端から導入された光２２は、光導波層２０の上面（図２における上側の表面）に設けられた第１のミラー３０および下面（図２における下側の表面）に設けられた第２のミラー４０によって反射を繰り返しながら光導波層２０内を伝搬する。第１のミラー３０の光透過率は第２のミラー４０の光透過率よりも高い。このため、主に第１のミラー３０から光の一部を出力することができる。
【００９２】
通常の光ファイバーなどの導波路では、全反射を繰り返しながら光が導波路に沿って伝搬する。これに対して、本実施形態における導波路素子１０では、光は光導波層２０の上下に配置されたミラー３０および４０によって反射を繰り返しながら伝搬する。このため、光の伝搬角度（すなわち、ミラー３０または４０と光導波層２０との界面への入射角度）に制約がなく、ミラー３０または４０に対して、より垂直に近い角度で入射する光も伝搬できる。すなわち、全反射の臨界角よりも小さい角度（すなわち、より垂直に近い角度）で界面に入射する光も伝搬できる。このため、光の伝搬方向における光の群速度は自由空間における光速に比べて大きく低下する。これにより、導波路素子１０は、光の波長、光導波層２０の厚さ、および光導波層２０の屈折率の変化に対して光の伝搬条件が大きく変化するという性質を持つ。
【００９３】
導波路素子１０の光の伝搬について、より詳しく説明する。光導波層２０の屈折率を$n_w$、光導波層２０の厚さをｄとする。ここで、光導波層２０の厚さｄは、ミラー３０また

は４０の反射面の法線方向における光導波層２０のサイズである。光の干渉条件を考慮すると、波長λの光の伝搬角度θ$_w$は、以下の式（１）を満たす。

【数１】

$$2dn_w\cos\theta_w = m\lambda \qquad (1)$$

【００９４】

ｍはモード次数である。式（１）は、光導波層２０内の光が厚さ方向に定在波を形成する条件に相当する。光導波層２０内の波長λ$_g$がλ／ｎ$_w$のとき、光導波層２０の厚さ方向における波長λ$_g$，はλ／（ｎ$_w$ｃｏｓθ$_w$）であると考えることができる。光導波層２０の厚さｄが、光導波層２０の厚さ方向における波長λ$_g$，の半分λ／（２ｎ$_w$ｃｏｓθ$_w$）の整数倍と等しいとき、定在波が形成される。この条件から式（１）が得られる。なお、式（１）におけるｍは定在波の腹（ａｎｔｉ－ｎｏｄｅ）の数を表す。

【００９５】

ミラー３０および４０が多層膜ミラーである場合、反射時にミラー内部にも光が侵入する。このため、厳密には、光が侵入した分の光路長に対応する項を式（１）の左辺に付け加える必要がある。しかし、ミラー内部への光の侵入の影響よりも光導波層２０の屈折率ｎ$_w$および厚さｄの影響の方が遥かに大きいため、式（１）によって基本的な動作を説明できる。

【００９６】

光導波層２０内を伝搬する光が、第１のミラー３０を通じて外部（典型的には空気）に出射されるときの出射角度θは、スネルの法則にしたがって以下の式（２）のように記述できる。

【数２】

$$\sin\theta = n_w\sin\theta_w \qquad (2)$$

【００９７】

式（２）は、光の出射面において、空気側の光の面方向における波長λ／ｓｉｎθと、導波路素子１０側の光の伝搬方向の波長λ／（ｎ$_w$ｓｉｎθ$_w$）とが等しいという条件から得られる。

【００９８】

式（１）および式（２）より、出射角度θは、以下の式（３）のように記述できる。

【数３】

$$\sin\theta = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \qquad (3)$$

【００９９】

式（３）からわかるように、光の波長λ、光導波層２０の屈折率ｎ$_w$、または光導波層２０の厚さｄのいずれかを変えることで光の出射方向を変えることができる。

【０１００】

例えば、ｎ$_w$＝２、ｄ＝３８７ｎｍ、λ＝１５５０ｎｍ、ｍ＝１の場合、出射角度は０°である。この状態から、屈折率をｎ$_w$＝２．２に変化させると、出射角度は約６６°に変化する。一方、屈折率を変えずに厚さをｄ＝４２０ｎｍに変化させると、出射角度は約

５１°に変化する。屈折率も厚さも変化させずに波長をλ＝１５００ｎｍに変化させると、出射角度は約３０°に変化する。このように、光の波長λ、光導波層２０の屈折率$n_w$、または光導波層２０の厚さｄのいずれかを変えることにより、光の出射方向を大きく変えることができる。

【０１０１】

この原理を利用して、光導波層２０内を伝搬する光の波長を変化させる波長可変手段を設けることによって光の出射方向を制御することが考えられる。しかしながら、波長可変手段をレーザーなどの光源に組み込むと、光源の構成が複雑になる。

【０１０２】

そこで、本実施形態における光スキャンデバイス１００は、光導波層２０の屈折率$n_w$および厚さｄの一方または両方を制御することで、光の出射方向を制御する。本実施形態では、光の波長λは、動作中に変化せず、一定に維持される。波長λは、特に限定されない。例えば、波長λは、一般的なシリコン（Ｓｉ）により光を吸収することで光を検出するフォトディテクタまたはイメージセンサで高い検出感度が得られる４００ｎｍ～１１００ｎｍ（可視光から近赤外光）の波長域に含まれ得る。他の例では、波長λは、光ファイバーまたはＳｉ導波路において伝送損失の比較的小さい１２６０ｎｍ～１６２５ｎｍの近赤外光の波長域に含まれ得る。なお、これらの波長範囲は一例である。使用される光の波長域は、可視光または赤外光の波長域に限定されず、例えば紫外光の波長域であってもよい。本実施形態では波長の制御は行われないが、屈折率および／または厚さの制御に加えて、波長を変化させる制御を行ってもよい。

【０１０３】

本発明者らは、上記のような特定方向への光の出射が実際に可能であるかを光学解析によって検証した。光学解析は、サイバネット社のＤｉｆｆｒａｃｔＭＯＤを用いた計算によって行った。これは、厳密結合波解析（ＲＣＷＡ：Ｒｉｇｏｒｏｕｓ　Ｃｏｕｐｌｅｄ－Ｗａｖｅ　Ａｎａｌｙｓｉｓ）に基づいたシミュレーションであり、波動光学の効果を正確に計算することができる。

【０１０４】

図３は、本シミュレーションにおいて用いた計算モデルを模式的に示す図である。この計算モデルでは、基板５０上に、第２のミラー４０と、光導波層２０と、第１のミラー３０とが、この順に積層されている。第１のミラー３０および第２のミラー４０は、いずれも誘電体多層膜を含む多層膜ミラーである。第２のミラー４０は、相対的に屈折率の低い低屈折率層４２および相対的に屈折率の高い高屈折率層４４を交互に６層ずつ（計１２層）積層した構造を有する。第１のミラー３０は、低屈折率層４２および高屈折率層４４を交互に２層ずつ（すなわち、計４層）積層した構造を有する。ミラー３０とミラー４０の間に光導波層２０が配置されている。導波路素子１０および基板５０以外の媒質は空気である。

【０１０５】

このモデルを用いて、光の入射角度を変化させながら入射光に対する光学応答を調べた。これは、空気からの入射光と光導波層２０とが、どの程度結合するかを調べることに対応している。入射光が光導波層２０と結合する条件では、光導波層２０を伝搬した光が外部に出射されるという逆の過程も起きる。よって、入射光が光導波層２０と結合する場合の入射角度を求めることは、光導波層２０を伝搬した光が外部に出射する際の出射角度を求めることに相当する。入射光が光導波層２０と結合すると、光導波層２０内において光の吸収および散乱によるロスが生じる。つまり、大きなロスが生じる条件では、入射光が光導波層２０に強く結合しているということになる。吸収などによる光のロスがなければ、光の透過率および反射率の合計が１になるが、ロスがあれば、透過率および反射率の合計は１よりも小さくなる。本計算では、光の吸収の影響を取り入れるために、光導波層２０の屈折率に虚部を導入し、１から透過率および反射率の合計を引いた値をロスの大きさとして計算した。

【０１０６】

本シミュレーションでは、基板５０はＳｉ、低屈折率層４２は$SiO_2$（厚さ２６７ｎｍ）、高屈折率層４４はＳｉ（厚さ１０８ｎｍ）であるものとした。波長λ＝１．５５μｍの光を、角度を様々に変えて入射したときのロスの大きさを計算した。

【０１０７】

図４Ａは、光導波層２０の厚さｄが７０４ｎｍの場合における光導波層２０の屈折率$n_w$と、モード次数ｍ＝１の光の出射角度θとの関係を計算した結果を示している。白い線はロスが大きいことを表している。図４Ａに示されているように、$n_w$＝２．２付近でモード次数ｍ＝１の光の出射角度がθ＝０°となる。$n_w$＝２．２に近い屈折率をもつ物質には、例えばニオブ酸リチウムがある。

【０１０８】

図４Ｂは、光導波層２０の厚さｄが４４６ｎｍの場合における光導波層２０の屈折率$n_w$と、モード次数ｍ＝１の光の出射角度θとの関係を計算した結果を示している。図４Ｂに示されているように、$n_w$＝３．４５付近でモード次数ｍ＝１の光の出射角度がθ＝０°となる。$n_w$＝３．４５に近い屈折率をもつ物質には、例えばシリコン（Ｓｉ）が挙げられる。

【０１０９】

このように、光導波層２０の厚さｄを調整することにより、特定の光導波層２０の屈折率$n_w$に対して、特定のモード次数（例えばｍ＝１）の光の出射角度θが０°となるように設計できる。

【０１１０】

図４Ａおよび図４Ｂに示すように、屈折率の変化に応じて、出射角度θが大きく変わることが確認できた。後述するように、屈折率は、例えばキャリア注入、電気光学効果、および熱光学効果などの様々な方法によって変化させることができる。そのような方法による屈折率の変化は０．１程度とあまり大きくない。そのため、これまでは、そのような小さな屈折率の変化では出射角度はそれほど大きく変化しないと考えられていた。しかし、図４Ａおよび図４Ｂに示すように、出射角度がθ＝０°となる屈折率付近では、屈折率が０．１増加すると出射角度θが０°から約３０°にまで変化することがわかった。このように、本実施形態における導波路素子１０では、小さい屈折率変化であっても、出射角度を大きく調整することが可能である。

【０１１１】

同様に、図４Ａおよび図４Ｂの比較からわかるように、光導波層２０の厚さｄの変化に応じて、出射角度θが大きく変わることが確認できた。後述するように、厚さｄは、例えば２つのミラーの少なくとも一方に接続されたアクチュエータによって変化させることができる。厚さｄの変化が小さくても、出射角度を大きく調整することができる。

【０１１２】

このように、光導波層２０の屈折率$n_w$および／または厚さｄを変化させることにより、導波路素子１０から出射される光の方向を変えることができる。これを実現するために、本実施形態における光スキャンデバイス１００は、各導波路素子１０における光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させる第１調整素子を備える。第１調整素子の構成例については、後述する。

【０１１３】

以上のように、導波路素子１０を用いれば、光導波層２０の屈折率$n_w$および厚さｄの少なくとも一方を変化させることで、光の出射方向を大きく変えることができる。これにより、ミラー３０から出射される光の出射角度を、導波路素子１０に沿った方向に変化させることができる。少なくとも１つの導波路素子１０を用いることにより、このような１次元のスキャンを実現することができる。

【０１１４】

図５は、単一の導波路素子１０によって１次元スキャンを実現する光スキャンデバイス１００の例を模式的に示す図である。この例では、Ｙ方向に広がりのあるビームスポットが形成される。光導波層２０の屈折率を変化させることにより、ビームスポットをＸ方向

に沿って移動させることができる。これにより、１次元スキャンが実現される。ビームスポットがＹ方向に広がりをもつため、一軸方向のスキャンであっても、２次元的に拡がる比較的広いエリアをスキャンすることができる。２次元スキャンが不要な用途では、図５に示すような構成も採用し得る。

【０１１５】

２次元スキャンを実現する場合には、図１に示すように、複数の導波路素子１０が配列された導波路アレイが用いられる。複数の導波路素子１０内を伝搬する光の位相が特定の条件を満たすとき、光は特定の方向に出射する。その位相の条件が変化すると、光の出射方向が導波路アレイの配列方向にも変化する。すなわち、導波路アレイを用いることにより、２次元スキャンを実現することができる。２次元スキャンを実現するためのより具体的な構成の例については後述する。

【０１１６】

以上のように、少なくとも１つの導波路素子１０を用いて、導波路素子１０における光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、光の出射方向を変化させることができる。しかし、導波路素子１０に光を効率的に導入する構成については、改善の余地があった。本開示の実施形態における導波路素子１０は、光の全反射を利用する一般的な導波路（以下、「全反射導波路」と称することがある。）とは異なり、光導波層が一対のミラー（例えば多層反射膜）に挟まれた導波路構造（以下、「反射型導波路」と称することがある。）を備える。このような反射型導波路への光の結合については、これまでに十分に検討されてこなかった。本発明者らは、光導波層２０に光を効率的に導入するための新規な構造に想到した。

【０１１７】

図６Ａは、空気およびミラー３０を介して間接的に光が光導波層２０に入力される構成の例（比較例）を模式的に示す断面図である。本比較例では、反射型導波路である導波路素子１０の光導波層２０対して、外部から空気およびミラー３０を介して間接的に伝播光が導入される。光導波層２０に光を導入するためには、光導波層２０の内部における導波光の反射角$\theta_w$に対して、スネルの法則（$n_{in}\sin\theta_{in}=n_w\sin\theta_w$）を満たす必要がある。ここで、$n_{in}$は外部媒質の屈折率、$\theta_{in}$は伝播光の入射角、$n_w$は光導波層２０の屈折率である。この条件を考慮して入射角$\theta_{in}$を調整することにより、光の結合効率を最大化することができる。さらに、この例では、第１のミラー３０の一部に多層反射膜の膜数を減らした部分が設けられている。その部分から光が入力されることで結合効率を高めることができる。しかし、このような構成では、光導波層２０の伝搬定数の変化（$\theta_{wav}$の変化）に応じて、光導波層２０への光の入射角$\theta_{in}$を変化させる必要が生じる。

【０１１８】

光導波層２０の伝搬定数の変化が生じても、光が常に導波路に結合できる状態を保つために、多層反射膜の膜数を減らした部分へ角度広がりのあるビームを入射する方法がある。そのような方法の一例として、図６Ｂに示すように、導波路素子１０に、ミラー３０の法線方向に対して角度$\theta_{in}$だけ傾けて配置された光ファイバー７によって、外部から空気およびミラー３０を介して間接的に光を入射した場合の結合効率について検討する。簡単のため光を光線として考える。通常のシングルモードファイバーの開口数（ＮＡ）は０．１４程度である。これは角度に換算すると約±８度である。導波路に結合する光の入射角度の範囲は、導波路から出射される光の広がり角と同程度である。出射光の広がり角$\theta_{div}$は、以下の式（４）で表される。

【数４】

$$\theta_{div} \approx \frac{\lambda}{L \cos \theta_{out}} \qquad (4)$$

【０１１９】
ここでＬは伝搬長、λは光の波長、θ$_{out}$は光の出射角である。Ｌを１０μｍ以上とすると、θ$_{div}$は大きくても１度以下である。したがって、光ファイバー７からの光の結合効率は、１／１６×１００％（すなわち、約６．３％）以下である。さらに、光の入射角θ$_{in}$を固定し、導波路の屈折率ｎ$_{w}$を変化させることによって光の出射角θ$_{out}$を変化させたときの結合効率の変化を計算した結果を図７に示す。結合効率は、入射光のエネルギーに対する導波光のエネルギーの比を表す。図７に示す結果は、入射角θ$_{in}$を３０°、導波路膜厚を１．１２５μｍ、波長を１．５５μｍとして、結合効率を計算することによって得られた。この計算では、屈折率ｎ$_{w}$を１．４４～１．７８の範囲で変化させることにより、出射角θ$_{out}$を１０°～６５°の範囲で変化させた。図７に示すように、このような構成では、結合効率は最大でも７％に満たない。また、出射角θ$_{out}$を、結合効率がピークになる出射角から２０°以上変化させると、結合効率はさらに半分以下に低下する。
【０１２０】
このように、光スキャンのために導波路の屈折率等を変化させることによって伝搬定数を変化させると、結合効率はさらに低下する。結合効率を維持するためには、伝搬定数の変化に応じて光の入射角θ$_{in}$を変化させる必要がある。しかし、光の入射角θ$_{in}$を変化させる機構を導入することは、装置構成の複雑化を招く。本発明者らは、屈折率または厚さを変化させる導波路を有する領域の前段に、屈折率および厚さが一定に維持される導波路を有する領域を設けることにより、光入射角を固定する事ができることを見出した。
【０１２１】
また、異なる２つの導波路における導波光の結合を考える際に重要な要因が２点ある。１つ目は、伝搬光の伝搬定数であり、２つ目はモードの電界強度分布である。これらが２つの導波路において近いほど結合効率は高くなる。導波路における伝搬光の伝搬定数βは、簡単のため幾何光学的に考えると、β＝ｋ・ｓｉｎθ$_{w}$＝（２πｎ$_{w}$ｓｉｎθ$_{w}$）／λで表される。波数をｋ、導波角度をθ$_{w}$、導波層屈折率をｎ$_{w}$とする。全反射型の導波路では、全反射を用いて導波光を導波層に閉じ込めているため、全反射条件であるｎ$_{w}$ｓｉｎθ$_{w}$＞１を満たす。一方、スローライト導波路では、導波路の上下に存在する多層反射膜により光を導波路に閉じ込め、導波光の一部を多層反射膜越しに射出するため、ｎ$_{w}$ｓｉｎθ$_{w}$＜１となる。全反射型導波路と、導波光の一部を射出するスローライト導波路では、伝搬定数は等しくなり得ない。電界強度分布について、図７０に示すような全反射導波路の電界強度分布は、図７１のような、ピークを導波路内に持ち、導波路外では単調減少する。しかし、図７２に示すようなスローライト導波路においては、電界強度分布は図７３に示すようになる。導波路内にピークを持つ事は変わらないが、導波光が誘電多層膜内において光の干渉により反射するため、図７３に示すように電界強度は誘電多層膜に深く染み出し、また振動的に変化する。以上のように、全反射型導波路とスローライト導波路では、導波光の伝搬定数、電界強度分布共に大きく異なる。よって、全反射型導波路とスローライト導波路を直接的に繋げることは考えられていなかった。本発明者らは、可変の屈折率および／または可変の厚さを有する光導波層に、直接的に全反射導波路を繋げることができることを発見した。
【０１２２】
さらに、本発明者らは、そのような２種類の導波路を、共通の基板上に配置することにより、光スキャンデバイスの作製を容易にできることを見出した。すなわち、一体に形成

された一つの基板上に２種類の導波路を配置してもよい。一般的な導波路は、半導体プロセスを用いて、基板上に作製される。例えば、蒸着またはスパッタリングなどによる成膜と、リソグラフィーまたはエッチングなどによる微細加工とを組み合わせることによって、基板の上に導波路の構造を作製するのが一般的である。基板の材料として、Ｓｉ、$ＳｉＯ_2$、ＧａＡｓ、ＧａＮなどが挙げられる。

【０１２３】

反射型導波路も、同様の半導体プロセスを用いて作製され得る。反射型導波路では、光導波層を挟む一対のミラーのうち、一方のミラーから光を透過させることよって、光を出射させる。ほとんどの場合、ミラーは、低コストで入手可能なガラス基板の上に作製される。ガラス基板の代わりに、Ｓｉ、$ＳｉＯ_2$、ＧａＡｓ、ＧａＮなどの基板を用いてもよい。

【０１２４】

反射型導波路に別の導波路を接続することによって、光を反射型導波路に導入することができる。

【０１２５】

図８は、基板５０Ａの上に作製された複数の第１の導波路１と、別の基板５０Ｂの上に作製された複数の第２の導波路１０との接続を模式的に示す図である。２つの基板５０Ａ、５０Ｂは、ＸＹ平面に平行に配置されている。複数の第１の導波路１および複数の第２の導波路１０は、Ｘ方向に延び、Ｙ方向に配列されている。第１の導波路１は、例えば、光の全反射を利用する一般的な導波路である。第２の導波路１０は、反射型導波路である。別々の基板５０Ａ、５０Ｂの上にそれぞれ配置された第１の導波路１および第２の導波路１０を位置合わせして接続することによって、第１の導波路１から第２の導波路１０へ光を導入することができる。

【０１２６】

第１の導波路１から第２の導波路１０へ効率よく光を導入するためには、１０ｎｍオーダーの極めて高精度の位置合わせが望まれる。また、高精度の位置合わせができたとしても、２つの基板５０Ａ、５０Ｂの熱膨張係数が異なる場合、温度変化により、位置合わせがずれるおそれがある。例えば、Ｓｉ、$ＳｉＯ_2$、ＧａＡｓおよびＧａＮの熱膨張係数は、それぞれおよそ４、０．５、６および５（$×１０^{－６}$／Ｋ）であり、ガラス基材としてよく使われるＢＫ７の熱膨張係数は、９（$×１０^{－６}$／Ｋ）である。別々の基材としてどの材料を組み合わせても、$１×１０^{－６}$／Ｋ以上の熱膨張係数の違いが生じる。例えば、複数の第１の導波路１および複数の第２の導波路１０の配列方向（図中ではＹ方向）における２つの基板５０Ａ、５０Ｂのサイズが１ｍｍである場合、１℃の温度変化によって、２つの基板５０Ａ、５０Ｂの位置合わせは、１ｎｍずれる。さらに、数十℃の温度変化によって、２つの基板５０Ａ、５０Ｂの位置合わせは、数十～百ｎｍのオーダーで大きくずれる。その結果、第１の導波路１から第２の導波路１０へ効率よく光を導入することができなくなる。

【０１２７】

本発明者らは、同じ基板の上に第１の導波路および第２の導波路を配置することにより、上記の課題を解決できることに想到した。共通の基板上にこれらの導波路を配置することにより、第１の導波路および第２の導波路の位置合わせが容易になる。さらに、熱膨張による第１の導波路および第２の導波路の位置合わせのずれが抑制される。その結果、第１の導波路から第２の導波路へ効率よく光を導入することができる。

【０１２８】

本開示のある態様における光スキャンデバイスは、第１の導波路と、前記第１の導波路に繋がる第２の導波路と、前記第１および第２の導波路を支持する基板とを備える。前記第２の導波路は、多層反射膜を有する１のミラーと、前記第１のミラーの前記多層反射膜に対向する多層反射膜を有する第２のミラーと、前記第１のミラーおよび前記第２のミラーの間に位置し、前記第１の導波路に入力され前記第１の導波路を伝搬した光を伝搬させる光導波層と、を有する。前記第１のミラーは、前記第２のミラーよりも高い光透過率を

有し、前記光導波層内を伝搬する光の一部を、前記光導波層の外部に出射する。光スキャンデバイスは、前記光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることによって出射光の方向を変化させる調整素子をさらに備える。

【０１２９】

上記態様における「第２の導波路」は、前述の実施形態における「導波路素子」に相当する。本開示の実施形態では、第２の導波路の前段に、屈折率も厚さも一定に維持される第１の導波路が設けられ、第１の導波路に光が入力される。第１の導波路は、入力された光を伝搬させ、第２の導波路の端面から入力する。第１の導波路と第２の導波路とは、端面同士が直接接続されていてもよいし、例えば、端面間にギャップがあってもよい。本明細書において「第１の導波路と第２の導波路とが繋がる」とは、第１の導波路と第２の導波路との間で光の授受が可能な態様で両者が位置していることを意味する。「第１の導波路と第２の導波路とが繋がる」形態は、第１の導波路と第２の導波路とが直接接続されている（すなわち接触している）形態だけでなく、伝搬する光の波長よりも十分に短いギャップを介して両者が配置されている形態も含む。また、本開示で、ＡがＢに「直接的に繋がる」とは、ＡとＢの間で光の授受が可能なように、Ａの何れかの部分とＢの何れかの部分とがギャップなしに接触することをいう。

【０１３０】

上記構成によれば、第１の導波路を第２の導波路（導波路素子）の前段に設けることにより、第１の導波路に入射する光の入射角を一定に維持しても、スキャンによる結合効率の低下（すなわちエネルギーのロス）を抑制することができる。

【０１３１】

上記構成によれば、同じ基板の上に第１の導波路および第２の導波路を配置することによって、第１の導波路および第２の導波路の位置合わせが容易になる。さらに、熱膨張による第１および第２の導波路の位置合わせのずれが抑制される。その結果、第１の導波路から第２の導波路へ効率よく光を導入することができる。

【０１３２】

さらに、第１の導波路の前段に第３の導波路が設けられていてもよい。そのような第３の導波路は、第１の導波路に繋がり、第３の導波路を伝搬した光を、第１の導波路に入力する。ある実施形態において、第３の導波路は全反射導波路であり、第２の導波路は反射型導波路であり得る。第１および第２の導波路を支持する基板は、第３の導波路をさらに支持していてもよい。

【０１３３】

図９は、第１のミラー３０と第２のミラー４０の間に位置する光導波層２０の両隣に、スペーサ７３が配置されている構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における導波路素子１０の断面図である。スペーサ７３の屈折率$n_{low}$は、光導波層の屈折率$n_w$よりも低い（$n_{low} < n_w$）。スペーサ７３は、例えば、空気でもよい。スペーサ７３は、光導波層よりも低い屈折率を有する限り、例えば、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、ＳｉＮ、ＡｌＮ、$SiO_2$などであってもよい。

【０１３４】

図１０は、図９における導波路素子１０をＹ方向に配列した導波路アレイ１０Ａの構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。図１０の構成例では、Ｙ方向において、第１のミラー３０の幅は、光導波層２０の幅と同じである。そのため、第１のミラー３０が存在しない領域から導波光が漏れるという課題がある。従来では、複数の反射型導波路も含め、複数の導波路素子１０をアレイ化する際に、第１および第２のミラー３０および４０の少なくとも一方の幅を光導波層２０の幅よりも長くすることにより、導波光の漏れを防ぐという発想はなかった。

【０１３５】

光スキャンの性能を向上させるためには、導波路アレイ１０Ａにおける各導波路素子１０を、細線化することが望ましい。この場合、導波光が漏れるという課題はより顕著になる。

【０１３６】
導波光が漏れる理由を説明する。
【０１３７】
図１１は、光導波層２０内において、導波光がＸ方向に伝搬することを模式的に示す図である。$n_w > n_{low}$であることから、導波光は、±Ｙ方向において全反射により閉じ込められながら、Ｘ方向に伝搬する。しかし、実際には、光導波層２０のＹ方向における端面から外側へ染み出す、エバネッセント光が存在する。また、図２に示すように、導波光は、±Ｚ方向において第１および第２のミラー３０および４０により反射されながら、全反射角$\theta_{in}$よりも小さい角度で、Ｘ方向に伝搬する。このとき、図１０に示す第１のミラー３０が存在しない領域では、エバネッセント光は、反射されず、外に漏れ出る。この意図しない光ロスにより、光スキャンに用いられる光量は低下し得る。
【０１３８】
本発明者らは、複数の導波路素子１０の配列方向において、第１および第２のミラー３０および４０の少なくとも一方の幅を、光導波層２０の幅よりも長くすることにより、上記の課題を解決できることに想到した。これにより、上記の意図しない光ロスを低減することができる。その結果、光スキャンに用いられる光量の低下は抑制される。
【０１３９】
（実施形態）
図１２は、本開示の例示的な実施形態における光スキャンデバイスの構造の一部を模式的に示す断面図である。この光スキャンデバイスは、第１の導波路１と、第１の導波路に繋がる第２の導波路（導波路素子）１０とを備える。第２の導波路１０は、多層反射膜を有する第１のミラー３０と、第１のミラー３０の多層反射膜に対向する多層反射膜を有する第２のミラー４０と、第１のミラー３０および第２のミラー４０の間に位置する光導波層２０とを有する。光導波層２０は、第１の導波路１に入力され第１の導波路１を伝搬した光を伝搬させる。光導波層２０は、第１の導波路１の導波方向と同じ方向に光を伝搬させる。第１のミラー３０は、第２のミラー４０よりも高い光透過率を有し、光導波層２０内を伝搬する光の一部を、光導波層２０の外部に出射する。図１２には示されていないが、光スキャンデバイス１００は、光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させる調整素子をさらに備える。光導波層２０は、例えば、電圧が印加された場合に、光導波層２０を伝搬する光に対する屈折率が変化する材料を含む。調整素子は、光導波層２０に電圧を印加することにより、光導波層２０の屈折率を変化させることで、第２の導波路１０から出射される光の方向を変化させる。
【０１４０】
第１の導波路１は、対向する２つの多層反射膜３、４と、２つの多層反射膜３、４に挟まれた光導波層２とを有する。第１の導波路１における多層反射膜３、４は、導波光をロスなく伝えるために、第２の導波路１０における光出射側の多層反射膜（すなわち、第１のミラー３０）よりも高い反射率（すなわち、低い透過率）をもつことが望ましい。よって、多層反射膜３、４の膜厚は、第１のミラー３０における膜厚よりも大きいことが望ましい。第１の導波路１の屈折率、すなわち、第１の導波路１における光導波層２の屈折率は、変化しない又は光導波層２０の屈折率と異なる量変化する。また、光導波層２の厚さは、変化しない又は光導波層２０の厚さと異なる量変化する。第１の導波路１は、第２の導波路１０における光導波層２０に直接的に繋がっている。例えば、第１の導波路１における光導波層２の端面は、第２の導波路１０における光導波層２０の端面に接続されている。この例における多層反射膜３は、隣接する部位よりも膜厚が薄い（すなわち反射率が低い）箇所３ａを有する。この箇所３ａ（「光入力部３ａ」とも称する。）から光が入力される。このように反射率の低い領域から光を入力することにより、効率よく光導波層２に光を導入することができる。光導波層２は、光入力部３ａに入射した光を伝搬させ、第２の導波路１０における光導波層２０の端面に入力する。これにより、光導波層２から光導波層２０へ光を伝搬させ、ミラー３０から出射することができる。
【０１４１】

第２の導波路１０においては、光を出射する必要があることから、第１のミラー３０の多層反射膜の反射率は、第２のミラー４０の多層反射膜の反射率よりも低い。第１の導波路１においては、光を出射させないようにするために、多層反射膜３、４の反射率が、第２のミラー４０の反射率と同程度の大きさに設計されている。

【０１４２】

このような構造により、光スキャンデバイスは、後述するように、光を効率よく第２の導波路１０から出射することができる。

【０１４３】

図１３は、光スキャンデバイスの構造の他の例を模式的に示す断面図である。この例では、第１の導波路１が、多層反射膜３、４を有していない。第１の導波路１は、全反射によって光を伝搬させる。第１の導波路１は、表面の一部にグレーティング５を有している。グレーティング５を介して光が入力される。この例では、グレーティング５が設けられている箇所が、光入力部として機能する。グレーティング５を設けることにより、光を導波路１内に導入することが容易になる。この例のように多層反射膜３、４がない場合は、導波角度$\theta_{w1}$が全反射条件を満たすように設計される。この場合も、第１の導波路１の屈折率は、変化しない又は光導波層２０と異なる量変化する。また、第１の導波路１の厚さ、すなわち、光導波層２の厚さは、変化しない又は光導波層２０の厚さと異なる量変化する。また、第１の導波路１は、第２の導波路１０における光導波層２０に直接的に繋がっている。また、光導波層２０は、第１の導波路１の導波方向と同じ方向に光を伝搬させる。

【０１４４】

図１４は、光スキャンデバイスの構造のさらに他の例を模式的に示す断面図である。この例における光スキャンデバイスは、第１の導波路１に繋がる第３の導波路１’をさらに備えている。第１の導波路１は、反射型導波路であり、対向する２つの多層反射膜３、４と、その間の光導波層２とを有する。一方、第３の導波路１’は、全反射によって光を伝搬させる全反射導波路である。第３の導波路１’の屈折率は、変化しない又は光導波層２０と異なる量変化する。また、第３の導波路１’の厚さ、すなわち、光導波層２’の厚さは、変化しない又は光導波層２０の厚さと異なる量変化する。また、第３の導波路１’は、第２の導波路１０における光導波層２０に直接的に繋がっている。また、光導波層２０は、第３の導波路１’の導波方向と同じ方向に光を伝搬させる。第３の導波路１’は、図１３の例における第１の導波路１と同様、表面の一部にグレーティング５’を有している。グレーティング５’を介して光源からの光が第３の導波路１’内に入力される。この例では、グレーティング５’が設けられている箇所が光入力部として機能する。第２の導波路１０における光導波層２０は、不図示の調整素子（例えば、変調素子）によって屈折率または厚さが変調される。一方、第１の導波路１については、そのような変調機能はない。第１の導波路１からの光の出射を抑えるために、第１の導波路１の反射ミラー（すなわち、多層反射膜３、４）の反射率は、第２の導波路１０の第１のミラー３０の反射率よりも高く設定されている。第２の導波路１０における第１のミラー３０の反射率は、第２のミラー４０の反射率よりも低く設定されている。このような構成により、第３の導波路１’に入力された光は、第３の導波路１’および第１の導波路１を伝搬して第２の導波路１０に入力される。当該光は、第２の導波路１０の光導波層２０をさらに伝搬しながら、第１のミラー３０を介して外部に出射される。

【０１４５】

図１５および図１６Ａから図１６Ｃは、第１の導波路１に光が入力される構成において、第１の導波路１への光の入力方法の例を示す図である。図１５は、図１２に示す例のように、２つの多層反射膜で挟まれた光導波層２への光の入射の一例を示している。図示されるように、多層反射膜の膜厚の薄い箇所（すなわち、反射率の低い箇所）３ａに光を入射することにより、効率よく光を光導波層２に導入することができる。図１６Ａは、図１３に示す例のように、第１の導波路１の表面に設けられたグレーティング５を介して第１の導波路１に光が導入される例を示している。図１６Ｂは、第１の導波路１の端面から光

が入力される例を示している。図１６Ｃは、第１の導波路１の表面に設けられたレーザー光源６から、当該表面を介して光が入力される例を示している。図１６Ｃのような構成は、例えば、Ｍ．Ｌａｍｐｏｎｉ ｅｔ ａｌ．，“Ｌｏｗ－Ｔｈｒｅｓｈｏｌｄ Ｈｅｔｅｒｏｇｅｎｅｏｕｓｌｙ Ｉｎｔｅｇｒａｔｅｄ ＩｎＰ／ＳＯＩ Ｌａｓｅｒｓ Ｗｉｔｈ ａ Ｄｏｕｂｌｅ Ａｄｉａｂａｔｉｃ Ｔａｐｅｒ Ｃｏｕｐｌｅｒ”，ＩＥＥＥ ＰＨＯＴＯＮＩＣＳ ＴＥＣＨＮＯＬＯＧＹ ＬＥＴＴＥＲＳ，ＶＯＬ．２４，ＮＯ．１，ＪＡＮＵＡＲＹ １，２０１２，ｐｐ ７６－７８．に開示されている。この文献の開示内容全体を本願明細書に援用する。以上の構成によれば、効率よく光を導波路１に入射させることができる。

【０１４６】

図１５から図１６Ｃに示す光の入力方法は、いずれも、図１４に示す第３の導波路１’を用いる構成においても適用できる。図１４に示す例では、第３の導波路１’の表面の一部にグレーティング５’が設けられているが、グレーティング５’が設けられていなくてもよい。例えば図１６Ｂまたは図１６Ｃに示す光の入力方法を第３の導波路１’に適用することができる。図１６Ｂに示す光の入力方法を第３の導波路１’に適用する場合、第３の導波路１’は、第３の導波路１’の端面から入射した光を伝搬させ、第１の導波路１の端面に入力する。図１６Ｃに示す光の入力方法を第３の導波路１’に適用する場合、第３の導波路１’の表面に設けられたレーザー光源から、当該表面を介して光が入力される。第３の導波路１’は、入力された光を伝搬させ、第１の導波路１の端面に入力する。また、第３の導波路１’が全反射導波路である必要はなく、図１５に示すような反射型導波路であってもよい。

【０１４７】

図１２および図１３に示すように、第１の導波路１の光導波層２の屈折率を$n_{w1}$、第２の導波路１０の光導波層２０の屈折率を$n_{w2}$、第２の導波路１０からの光の出射角をθ、第１の導波路１における導波光の反射角を$\theta_{w1}$、第２の導波路１０における導波光の反射角を$\theta_{w2}$とする。また、図１４に示すように、第３の導波路１’における光導波層２’の屈折率を$n_{w3}$、第３の導波路１’における導波光の反射角を$\theta_{w3}$とする。本実施形態では、第２の導波路１０から光を外部（例えば、屈折率が１の空気層）に取り出すために、$n_{w2}\sin\theta_{w2}=\sin\theta<1$が満足される。

【０１４８】

＜導波光結合の原理＞

以下、図１２および図１３を参照しながら、導波路１、１０間の導波光の結合の原理を説明する。簡単のため、導波路１、１０内を伝搬する光を近似的に光線であると考える。導波路１０の上下の多層反射膜と光導波層２０との界面、および導波路１の上下の多層反射膜と光導波層２との界面（または、光導波層２と外部媒質との界面）で、光が完全に反射されると仮定する。第１の導波路１における光導波層２の厚さを$d_1$、第２の導波路１０における光導波層２０の厚さを$d_2$とする。導波路１、１０のそれぞれにおいて、伝播光が存在する条件は、以下の式（５）、（６）で表される。

$$2d_1 n_{w1}\cos\theta_{w1}=m\lambda \quad (5)$$

$$2d_2 n_{w2}\cos\theta_{w2}=m\lambda \quad (6)$$

ここで、λは光の波長、ｍは１以上の整数である。

【０１４９】

導波路１、１０の界面について、スネルの法則を考慮すると、式（７）が成立する。

$$n_{w1}\sin(90°-\theta_{w1})=n_{w2}\sin(90°-\theta_{w2}) \quad (7)$$

【０１５０】

式（７）を変形すると、次の式（８）が得られる。

$$n_{w1}\cos\theta_{w1}=n_{w2}\cos\theta_{w2} \quad (8)$$

【０１５１】

式（５）および（８）が成立するとき、$d_1$と$d_2$とが等しい場合には、$n_{w2}$が変化した場合においても式（６）は成立する。つまり、光導波層２０の屈折率が変化した場合

においても、光導波層２から光導波層２０に光が効率よく伝搬するということとなる。

【０１５２】

上式の導出に際しては簡単のため光を光線として考えたが、実際には厚さ$d_1$、$d_2$が波長λと同程度（長くとも波長の１０倍以下）であるため、導波光は波動性を有する。したがって、厳密には、上記の屈折率$n_{w1}$、$n_{w2}$として、光導波層２、２０の材料の屈折率ではなく、有効屈折率を考慮する必要がある。また、光導波層２の厚さ$d_1$と光導波層２０の厚さ$d_2$とが同一ではない場合、または厳密に式（８）を満たしていない場合においても光は光導波層２から光導波層２０へ導波され得る。これは、光導波層２から光導波層２０への光の伝達が近接場を通じて行われるからである。すなわち、光導波層２の電場分布と光導波層２０における電場分布の重なりがあれば、光導波層２から光導波層２０へ光が伝達される。

【０１５３】

以上の議論は、図１４に示す例における第３の導波路１’と第１の導波路１との間の導波光についても同様に成立する。

【０１５４】

＜計算結果＞

本実施形態の効果を確認するため、本発明者らは、条件を様々に変えて、光の結合効率を計算した。計算には、Ｐｈｏｔｏｎ　Ｄｅｓｉｇｎ社のＦＩＭＭＷＡＶＥを用いた。

【０１５５】

まず、図１２に示すように、導波路１、１０共に多層反射膜に挟まれている構成について、結合効率を計算した。以下の計算では、導波路１から導波路１０に伝搬する光のモードの次数は、ｍ＝２であるが、導波路１と導波路１０の光のモードの次数が同じであれば、同様の原理により光は結合する。このため、光のモードの次数はｍ＝２に限らない。

【０１５６】

図１７は、$n_{w1}$を１．４５、$d_1$を１．２７μｍ、波長λを１．５５μｍとした場合の導波路１から導波路１０への導波光の結合効率の$d_2$依存性を示している。横軸は、$d_2$を、導波光を光線と仮定した場合のカットオフ膜厚$d_{cutoff}$（＝mλ／（$2n_{w2}$））で割った値である。縦軸は、ピーク値を１として規格化された結合効率である。計算は、導波光が存在できなくなるカットオフ条件を満たす下限値から、光が外部に射出される上限値まで行った。また、$n_{w2}$が１．３、１．６、１．９、２．２、２．５のそれぞれの場合について計算を行った。第１の導波路１における厚さ方向の中心と、第２の導波路１０における厚さ方向の中心とは同一とした。図１７に示す結果から、$d_2／d_{cutoff}$が大きいほど結合効率が高くなることがわかる。$d_2／d_{cutoff}$が小さくなるに従い、モードが存在できなくなり、結合効率は低下する。

【０１５７】

図１８は、$n_{w1}$を３．４８、$d_1$を０．５μｍに変更して同様の方法で行った計算の結果を示している。この場合も、導波路１から導波路１０に伝搬する光のモードの次数は、ｍ＝２であるが、前述のとおり光のモードの次数はｍ＝２に限らない。図１８からわかるように、$d_2／d_{cutoff}$が大きいほど結合効率が高く、$d_2／d_{cutoff}$が小さくなるに従い、モードが存在できなくなり、結合効率は低下する。

【０１５８】

図１７および図１８において、$d_2／d_{cutoff}$が１よりも低い値においてもモードが存在している（すなわち導波光が結合している）のは、多層反射膜によって反射される際の光の染み出しに起因して、光導波層２の有効厚さが$d_2$よりも厚くなるからである。$d_2$の上限については、光が外部に出射しなくなる値である。この値は、導波光を光線として考え、各導波路の上下の多層反射膜が光を導波路との界面において完全に反射させると仮定すると、導波光の反射角が大気に対し全反射角度になるときの$d_2$である。このとき、次の式（９）が満たされる。

$$n_{w2}\sin\theta_{w2}=1 \qquad (9)$$

【０１５９】

式（６）、式（９）、および$d_{cutoff}=m\lambda/(2n_{w2})$より、次の式（１０）が成立する。

$$d_2/d_{cutoff}=n_{w2}/\sqrt{(n_{w2}^2-1)} \quad (10)$$

【０１６０】

多層反射膜で反射される際の光の染み出しに起因して、導波光の有効屈折率が$n_{w2}$よりも低くなる。そのため、式（６）よりも$d_2$の上限値は大きくなる。

【０１６１】

本実施形態の構成において、図６Ｂに示す構成よりも結合効率が高くなることが望ましい。例えば、図１７および図１８の結果より、以下の式が満たされることにより、結合効率が図７に示すピーク値よりも高い７％以上であるという条件が満たされる。

$$0.95\times d_{cutoff}<d_2<1.5\times d_{cutoff}$$

$$(0.95\times m\lambda/(2n_{w2})<d_2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2}))$$

【０１６２】

図１９は、横軸を$d_2/d_{cutoff}$、縦軸を屈折率比（$|n_{w1}-n_{w2}|/n_{w1}$）とし、結合効率が０．５以上になる場合と、結合効率が０．５未満になる場合とを分類した図である。例えば、屈折率比が０．４よりも小さく、かつ、以下の式が満たされることにより、結合効率が０．５（５０％）以上という条件が満たされる。

$$0.95\times d_{cutoff}<d_2<1.5\times d_{cutoff}$$

【０１６３】

本実施形態においては、第１の導波路１の屈折率$n_{w1}$は、第２の導波路１０の屈折率$n_{w2}$よりも大きい（$n_{w1}>n_{w2}$）。しかし、本開示はこのような構成に限定されず、$n_{w1}\leqq n_{w2}$であってもよい。

【０１６４】

図２０は、第１の導波路１における光導波層２の厚さ方向の中心と、第２の導波路１０における光導波層２０の厚さ方向の中心とがΔｚだけずれた構成を示す図である。Δｚの正負は、図２０に示すように、第２の導波路１０の光導波層２０の厚さ方向の中心線が、第１の導波路１の光導波層２の厚さ方向の中心線よりも光放射側（すなわち、第１のミラー３０の側）にあるときを正とする。第１の導波路１の光導波層２の厚さ$d_1$と第２の導波路１０の光導波層２０の厚さ$d_2$との差の絶対値をΔｄとする。$\Delta z=\Delta d/2$のとき、導波路１の光導波層２の下部（すなわち、光放射側とは反対の側）と導波路１０の光導波層２０の下部のＺ方向の位置が一致する。

【０１６５】

図２１は、第１の導波路１から第２の導波路１０への光の結合効率のΔｚ依存性を示す図である。図２１の結果は、$n_{w1}$を２．２、波長λを１．５５μｍ、$n_{w2}$を２．２、Δｄを０．１２μｍとして、Δｚを変えて結合効率を計算することによって得られた。図２１に示す結合効率は、Δｚ＝０の場合の値で規格化されている。光導波層２、２０の厚さ方向の中心線がＺ方向にずれている場合、結合効率はΔｚがゼロ（０）の場合よりも低くなる。しかし、$-\Delta d/2<\Delta z<\Delta d/2$の場合には、Δｚが０の場合の結合効率の９０％以上になり、比較的高い結合効率を維持できる。

【０１６６】

図１３に示す例のように、第１の導波路１が全反射によって光を導波する構成についても、基本的な原理は同じであり、導波路１、１０を伝搬する導波光は互いに結合し得る。図１３に示す構成についても、第１の導波路１から第２の導波路１０への導波光の結合効率の$d_2$依存性を計算によって求めた。図２２Ａは、$n_{w1}$を２．２、$d_1$を０．７μｍ、波長λを１．５５μｍとした場合における結合効率の$d_2$依存性を示している。図２２Ｂは、$n_{w1}$を３．４８、$d_1$を０．４６μｍ、波長λを１．５５μｍとした場合における結合効率の$d_2$依存性を示している。例えば、以下の式が満たされることにより、結合効率が７％以上になるという条件が満たされる。

$$0.95\times d_{cutoff}<d_2<1.5\times d_{cutoff}$$

（すなわち、$0.95\times m\lambda/(2n_{w2})<d_2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2})$）

【０１６７】
また、例えば、以下の式が満たされることにより、結合効率が５０％以上という条件が満たされる。
$1.2\times d_{cutoff}<d2<1.5\times d_{cutoff}$
（すなわち、$1.2\times m\lambda/(2n_{w2})<d_2<1.5\times m\lambda/(2n_{w2})$）
【０１６８】
図１３の構成においても、$n_{w1}>n_{w2}$でもよいし、$n_{w1}\leqq n_{w2}$でもよい。
【０１６９】
上述した通り、導波路１から導波路１０に伝搬する光のモードの次数はｍ＝２に限定されない。例えば、$n_{w1}=1.883$、$d_1=0.3\mu m$、$n_{w2}=1.6$、$d_2=0.55\mu m$の条件で、図２３Ａの様なモデルを用いて計算すると、図２３Ｂに示すように、光が導波路に結合することがわかる。
【０１７０】
次に、第１の導波路１と第２の導波路１０との間にギャップがある場合を検討する。
【０１７１】
図２４Ａは、本実施形態の変形例を示す断面図である。この例では、第２の導波路１０における光導波層２０は、ギャップ（例えば空隙）を介して第１の導波路１に繋がっている。このように、第１の導波路１と第２の導波路１０との間にギャップが存在する場合であっても、導波モードの近接場を介して光が結合するため、ギャップ幅（Ｘ方向の幅）が波長λに比べて十分小さければ、導波光は導波路１、１０の間で結合する。これは、図６Ａまたは図６Ｂのように、自由空間における伝播光から導波モードへと結合させる方法とは異なる。
【０１７２】
図２４Ｂは、結合効率のギャップ幅依存性の計算結果を示す図である。図２４Ｂにおける結合効率は、ギャップが０μｍのときの値を１として規格化された値である。計算では、$n_{w1}$を３．４８、$n_{w2}$を１．５、$d_1$を０．９μｍ、$d_2$を１．１μｍ、ギャップの屈折率を１、波長λを１．５５μｍとした。図２４Ｂより、規格化された結合効率が５０％以上になるのは、ギャップが０．２４μｍ以下の場合である。ギャップが空気以外の媒質である場合、および波長λが１．５５μｍとは異なる場合を考慮すると、ギャップの光学長（すなわち、ギャップの屈折率とギャップ幅との積）がλ／６．５以下であれば、規格化された結合効率が５０％以上になる。このギャップの光学長は、導波路１、１０のパラメータには依存しない。
【０１７３】
図１４に示す例のように、第１の導波路１に、第３の導波路１’から光が入力される形態でも同様に、第３の導波路１’の端面と第１の導波路１の端面との間にギャップがあってもよい。前述のとおり、ギャップの光学長（ギャップの屈折率とギャップ幅との積）は、例えばλ／６．５以下に設定される。
【０１７４】
次に、本実施形態における第１の導波路１および第２の導波路１０の組み合わせ（本明細書において、「導波路ユニット」と称する。）を複数組用いて、２次元的な光のスキャンを実現する構成を説明する。２次元スキャンを実行可能な光スキャンデバイスは、第１の方向に配列された複数の導波路ユニットと、各導波路ユニットを制御する調整素子（例えばアクチュエータおよび制御回路の組み合わせ）を備える。調整素子は、各導波路ユニットにおける第２の導波路１０における光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させる。これにより、各第２の導波路１０から出射される光の方向を変化させることができる。また、複数の導波路ユニットにおける第２の導波路１０に、適切に位相差が調整された光が入力されることにより、図１を参照して説明したように、光の２次元スキャンが可能となる。以下、２次元スキャンを実現するための実施形態をより詳細に説明する。
【０１７５】

＜２次元スキャンの動作原理＞

複数の導波路素子（すなわち、第２の導波路）１０が一方向に配列された導波路アレイにおいて、それぞれの導波路素子１０から出射される光の干渉により、光の出射方向は変化する。各導波路素子１０に供給する光の位相を調整することにより、光の出射方向を変化させることができる。以下、その原理を説明する。

【０１７６】

図２５Ａは、導波路アレイの出射面に垂直な方向に光を出射する導波路アレイの断面を示す図である。図２５Ａには、各導波路素子１０を伝搬する光の位相シフト量も記載されている。ここで、位相シフト量は、左端の導波路素子１０を伝搬する光の位相を基準にした値である。本実施形態における導波路アレイは、等間隔に配列された複数の導波路素子１０を含んでいる。図２５Ａにおいて、破線の円弧は、各導波路素子１０から出射される光の波面を示している。直線は、光の干渉によって形成される波面を示している。矢印は、導波路アレイから出射される光の方向（なわち、波数ベクトルの方向）を示している。図２５Ａの例では、各導波路素子１０における光導波層２０を伝搬する光の位相はいずれも同じである。この場合、光は導波路素子１０の配列方向（Ｙ方向）および光導波層２０が延びる方向（Ｘ方向）の両方に垂直な方向（Ｚ方向）に出射される。

【０１７７】

図２５Ｂは、導波路アレイの出射面に垂直な方向とは異なる方向に光を出射する導波路アレイの断面を示す図である。図２５Ｂの例では、複数の導波路素子１０における光導波層２０を伝搬する光の位相が、配列方向に一定量（Δφ）ずつ異なっている。この場合、光は、Ｚ方向とは異なる方向に出射される。このΔφを変化させることにより、光の波数ベクトルのＹ方向の成分を変化させることができる。

【０１７８】

導波路アレイから外部（ここでは空気とする。）へ出射される光の方向は、以下のように定量的に議論できる。

【０１７９】

図２６は、３次元空間における導波路アレイを模式的に示す斜視図である。互いに直交するＸ、ＹおよびＺ方向で定義される３次元空間において、光が空気に出射される領域と、導波路アレイとの境界面をＺ＝$z_0$とする。この境界面は、複数の導波路素子１０のそれぞれの出射面を含む。Ｚ＜$z_0$では、Ｙ方向に複数の導波路素子１０が等間隔に配列され、複数の導波路素子１０のそれぞれはＸ方向に延びている。Ｚ＞$z_0$において、空気へ出射される光の電界ベクトルＥ（ｘ、ｙ、ｚ）は、以下の式（１１）で表される。

【数５】

$$\mathbf{E}(x,y,z) = \boldsymbol{E}_0 \exp\left[-j\left(k_x x + k_y y + k_z z\right)\right] \qquad (11)$$

【０１８０】

ただし$E_0$は電界の振幅ベクトルであり、$k_x$、$k_y$および$k_z$はそれぞれＸ、ＹおよびＺ方向における波数（ｗａｖｅ　ｎｕｍｂｅｒ）であり、ｊは虚数単位である。この場合、空気へ出射される光の方向は、図２６において太い矢印で表される波数ベクトル（$k_x$、$k_y$、$k_z$）に平行となる。波数ベクトルの大きさは、以下の式（１２）で表される。

【数６】

$$\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (12)$$

【０１８１】

Ｚ＝ｚ$_{0}$における電界の境界条件から、境界面に平行な波数ベクトル成分ｋ$_{x}$およびｋ$_{y}$は、それぞれ導波路アレイにおける光のＸ方向およびＹ方向における波数に一致する。これは、式（２）のスネルの法則と同様に、境界面において、空気側の光が有する面方向の波長と、導波路アレイ側の光が有する面方向の波長とが一致する条件に相当する。

【０１８２】

ｋ$_{x}$は、Ｘ方向に延びた導波路素子１０の光導波層２０を伝搬する光の波数に等しい。上述した図２に示される導波路素子１０では、ｋ$_{x}$は、式（２）および式（３）を用いて、以下の式（１３）で表される。

【数７】

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_w sin\theta_w = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \qquad (13)$$

【０１８３】

ｋ$_{y}$は、隣接する２つの導波路素子１０の間の光の位相差から導出される。Ｙ方向に等間隔に配列されたＮ本の導波路素子１０のそれぞれのＹ方向の中心をｙ$_{q}$（ｑ＝０、１、２、・・・、Ｎ－１）とし、隣接する２つの導波路素子１０の間の距離（中心間距離）をｐとする。そのとき、空気へ出射される光の電界ベクトル（式（１１））は、境界面内（Ｚ＝ｚ$_{0}$）のｙ$_{q}$およびｙ$_{q+1}$において、以下の式（１４）の関係を満たす。

【数８】

$$\mathbf{E}(x, y_{q+1}, z_0) = \exp[-jk_y(y_{q+1} - y_q)]\,\mathbf{E}(x, y_q, z_0) = \exp[-jk_y p]\,\mathbf{E}(x, y_q, z_0) \qquad (14)$$

【０１８４】

任意の隣接する２つの導波路素子１０の位相差がΔφ＝ｋ$_{y}$ｐ（一定）となるように設定すれば、ｋ$_{y}$は、以下の式（１５）の関係を満たす。

【数９】

$$k_y = \frac{\Delta\phi}{p} \qquad (15)$$

【０１８５】

この場合、ｙ$_{q}$における光の位相はφ$_{q}$＝φ$_{0}$＋ｑΔφとなる（φ$_{q+1}$－φ$_{q}$＝Δφ）。つまり、位相φ$_{q}$は、Ｙ方向に沿って、一定（Δφ＝０）か、比例して増加（Δφ＞０）または減少（Δφ＜０）する。Ｙ方向に配列された導波路素子１０が等間隔でない場合は、例えば、所望のｋ$_{y}$に対して、ｙ$_{q}$およびｙ$_{q+1}$での位相差がΔφ$_{q}$＝φ$_{q+1}$－φ$_{q}$＝ｋ$_{y}$（ｙ$_{q+1}$－ｙ$_{q}$）となるように設定する。この場合、ｙ$_{q}$における光の位相はφ$_{q}$＝φ$_{0}$＋ｋ$_{y}$（ｙ$_{q}$－ｙ$_{0}$）となる。式（１４）および式（１５）からそれぞれ得られるｋ$_{x}$およびｋ$_{y}$を用いれば、式（１２）からｋ$_{z}$が導出される。これにより、光の出射方向（すなわち、波数ベクトルの方向）が得られる。

【０１８６】

例えば、図２６に示すように、出射光の波数ベクトル（ｋ$_{x}$、ｋ$_{y}$、ｋ$_{z}$）と、その波数ベクトルをＹＺ平面に射影したベクトル（０、ｋ$_{y}$、ｋ$_{z}$）とがなす角度をθとする。θは、波数ベクトルとＹＺ平面とがなす角度である。θは、式（１２）および式（１３）を用いて、以下の式（１６）で表される。

【数１０】

$$\sin\theta = \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi}k_x = \sqrt{n_w^2 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2} \quad (16)$$

【０１８７】

式（１６）は、出射光がＸＺ平面に平行な場合に限定したときの式（３）と全く同じである。式（１６）からわかるように、波数ベクトルのＸ成分は、光の波長、光導波層２０の屈折率、および光導波層２０の厚さに依存して変化する。

【０１８８】

同様に、図２６に示すように、出射光（０次光）の波数ベクトル（$k_x$、$k_y$、$k_z$）と、その波数ベクトルをＸＺ平面に射影したベクトル（$k_x$、０、$k_z$）とがなす角度を$\alpha_0$とする。$\alpha_0$は、波数ベクトルとＸＺ平面とがなす角度である。$\alpha_0$は、式（１２）および式（１３）を用いて、以下の式（１７）で表される。

【数１１】

$$\sin\alpha_0 = \frac{k_y}{\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}} = \frac{\lambda}{2\pi}k_y = \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi p} \quad (17)$$

【０１８９】

式（１７）からわかるように、光の波数ベクトルのＹ成分は、光の位相差Δφによって変化する。

【０１９０】

このように、波数ベクトル（$k_x$、$k_y$、$k_z$）の代わりに、式（１６）および式（１７）からそれぞれ得られるθおよび$\alpha_0$を用いて光の出射方向を特定することもできる。その場合、光の出射方向を表す単位ベクトルは、（$\sin\theta$、$\sin\alpha_0$、$(1-\sin^2\alpha_0-\sin^2\theta)^{1/2}$）と表すことができる。光出射においてこれらのベクトル成分はすべて実数でなければならないので、$\sin^2\alpha_0+\sin^2\theta \leqq 1$が満たされる。$\sin^2\alpha_0 \leqq 1-\sin^2\theta=\cos^2\theta$から、出射光は$-\cos\theta \leqq \sin\alpha_0 \leqq \cos\theta$を満たす角度範囲で変化することがわかる。$-1 \leqq \sin\alpha_0 \leqq 1$から、θ＝０°では、出射光は－９０°≦$\alpha_0$≦９０°の角度範囲で変化する。しかし、θが増加すると$\cos\theta$は小さくなるので、$\alpha_0$の角度範囲は狭くなる。θ＝９０°（$\cos\theta=0$）では、$\alpha_0$＝０°のときのみしか光は出射されない。

【０１９１】

本実施形態における光による２次元スキャンは、導波路素子１０が少なくとも２本あれば実現できる。しかし、導波路素子１０の本数が少ない場合、上記の$\alpha_0$の広がり角度Δαが大きくなる。導波路素子１０の本数が増加するとΔαは小さくなる。このことは、以下のようにして説明できる。簡単のために、図２６においてθ＝０°の場合を考える。つまり、光の出射方向がＹＺ平面に平行な場合を考える。

【０１９２】

Ｎ本（Ｎは２以上の整数）の導波路素子１０のそれぞれから、同じ出射強度および上述した位相$\phi_q$を有する光が出射されるとする。そのとき、Ｎ本の導波路素子１０から出射される合計の光（電界）の振幅分布の絶対値は、遠視野において、以下の式（１８）で表されるＦ（ｕ）に比例する。

【数１２】

$$F(u) = \left|\frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}\right| \qquad (18)$$

【０１９３】

ただし、ｕは以下の式（１９）で表される。

【数１３】

$$u = \frac{2\pi p}{\lambda}(\sin\alpha - \sin\alpha_0) \qquad (19)$$

【０１９４】

αは、ＹＺ平面において、観測点および原点を結ぶ直線と、Ｚ軸とがなす角度である。$\alpha_0$は、式（１７）を満たす。式（１８）のＦ（ｕ）は、ｕ＝０（$\alpha=\alpha_0$）でＮ（最大）となり、ｕ＝±２π／Ｎで０となる。ｕ＝－２π／Ｎおよび２π／Ｎを満たす角度をそれぞれ$\alpha_1$および$\alpha_2$とすると（$\alpha_1<\alpha_0<\alpha_2$）、$\alpha_0$の広がり角度は$\Delta\alpha=\alpha_2-\alpha_1$となる。－２π／Ｎ＜ｕ＜２π／Ｎ（$\alpha_1<\alpha<\alpha_2$）の範囲のピークは、一般にメインローブと呼ばれる。メインローブの両側にはサイドローブと呼ばれる複数の小さいピークが存在する。メインローブの幅Δｕ＝４π／Ｎと、式（１９）から得られるΔｕ＝２πｐΔ（ｓｉｎα）／λとを比較すると、Δ（ｓｉｎα）＝２λ／（Ｎｐ）となる。Δαが小さければ、Δ（ｓｉｎα）＝ｓｉｎ$\alpha_2$－ｓｉｎ$\alpha_1$＝［（ｓｉｎ$\alpha_2$－ｓｉｎ$\alpha_1$）／（$\alpha_2-\alpha_1$）］Δα　［ｄ（ｓｉｎα）／ｄα］$\alpha=\alpha_0$Δα＝ｃｏｓ$\alpha_0$Δαとなる。このため、広がり角度は、以下の式（２０）で表される。

【数１４】

$$\Delta\alpha = \frac{2\lambda}{Np\cos\alpha_0} \qquad (20)$$

【０１９５】

したがって、導波路素子１０の本数が多いほど、広がり角度Δαを小さくすることができ、遠方においても高精細な光スキャンが実現できる。同様の議論は、図２６においてθ≠０°の場合にも適用できる。

【０１９６】

＜導波路アレイから出射される回折光＞

導波路アレイからは０次光のほかに高次の回折光も出射され得る。簡単のために、図２６においてθ＝０°の場合を考える。つまり、回折光の出射方向はＹＺ平面に平行である。

【０１９７】

図２７Ａは、ｐがλよりも大きい場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。この場合、位相シフトがなければ（$\alpha_0$＝０°）、図２７Ａに示す実線矢印の方向に０次光および±１次光が出射される（ｐの大きさによっては、さらに高次の回折光も出射され得る）。この状態から位相シフトを与えると（$\alpha_0\neq0°$）、図２７Ａに示す破線矢印のように、０次光および±１次光の出射角度が同じ回転方向に変化する。±１次光のような高次光を用いてビームスキャンを行うことも可能であるが、よりシンプルにデバイスを構成する場合、０次光のみが用いられる。０次光の利得が低減することを回避するために、隣接する２つの導波路素子１０の間の距離ｐをλよりも小さくすることによって高次光の出射を抑制してもよい。ｐ＞λであっても、高次光を物理的に遮断することによって０次光のみを用いることも可能である。

【０１９８】
図２７Ｂは、ｐがλよりも小さい場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。この場合、位相シフトがなければ（$\alpha_0$＝０°）、高次の回折光は、回折角度が９０度を超えるため存在せず、前方には０次光だけが出射する。ただし、ｐがλに近い値の場合、位相シフトを与えると（$\alpha_0$≠０°）、出射角度の変化に伴って±１次光が出射される場合がある。
【０１９９】
図２７Ｃは、ｐ　λ／２の場合において、導波路アレイから回折光が出射される様子を示す模式図である。この場合、位相シフトを与えても（$\alpha_0$≠０°）±１次光は出射しない、あるいは出射したとしてもかなり大きな角度で出射する。ｐ＜λ／２の場合は、位相シフトを与えても高次の光が出射することはない。しかし、ｐをこれ以上小さくすることによるメリットも特にない。よって、ｐは、例えばλ／２以上に設定され得る。
【０２００】
図２７Ａから図２７Ｃにおける空気へ出射される０次光および±１次光の関係は、以下のように定量的に説明できる。式（１８）のＦ（ｕ）は、Ｆ（ｕ）＝Ｆ（ｕ＋２π）であることから、２πの周期関数である。ｕ＝±２ｍπのとき、Ｆ（ｕ）＝Ｎ（最大）となる。そのとき、ｕ＝±２ｍπを満たす出射角度αで±ｍ次光が出射される。ｕ＝±２ｍπ（ｍ≠０）付近のピーク（ピーク幅はΔｕ＝４π／Ｎ）をグレーティングローブと呼ぶ。
【０２０１】
高次光のうち、±１次光のみを考えると（ｕ＝±２π）、±１次光の出射角度α±は、以下の式（２１）を満たす。
【数１５】

$$sin\alpha_{\pm} = sin\alpha_0 \pm \frac{\lambda}{p} \qquad (21)$$

【０２０２】
＋１次光が出射されない条件$\sin\alpha_+ > 1$から、$p < \lambda/(1-\sin\alpha_0)$が得られる。同様に、－１次光が出射されない条件$\sin\alpha_- < -1$から、$p < \lambda/(1+\sin\alpha_0)$が得られる。
【０２０３】
出射角度$\alpha_0$（＞０）の０次光に対して±１次光が出射されるか否かの条件は、以下のように分類される。$p \geqq \lambda/(1-\sin\alpha_0)$の場合、±１次光の両方が出射される。$\lambda/(1+\sin\alpha_0) \leqq p < \lambda/(1-\sin\alpha_0)$の場合、＋１次光は出射されないが－１次光は出射される。$p < \lambda/(1+\sin\alpha_0)$の場合、±１次光はいずれも出射されない。特に、$p < \lambda/(1+\sin\alpha_0)$を満たせば、図２６においてθ≠０°の場合でも±１次光は出射されない。例えば、±１次光が出射されない場合において片側１０度以上のスキャンを達成するために、$\alpha_0$＝１０°とし、ｐは、$p \leqq \lambda/(1+\sin 10°)$　０．８５λの関係を満たす。例えば、この式と、ｐに関する前述の下限についての条件とを組み合わせれば、ｐは、$\lambda/2 \leqq p \leqq \lambda/(1+\sin 10°)$を満たす。
【０２０４】
しかし、±１次光が出射されない条件を満たすためには、ｐを非常に小さくする必要がある。これは、導波路アレイの作製を困難にする。そこで、±１次光の有無に関わらず、０次光を$0° < \alpha_0 < \alpha_{max}$の角度範囲でスキャンすることを考える。ただし、±１次光はこの角度範囲には存在しないとする。この条件を満たすためには、$\alpha_0$＝０°において、＋１次光の出射角度は$\alpha_+ \geqq \alpha_{max}$でなければならず（すなわち、$\sin\alpha_+ = (\lambda/p) \geqq \sin\alpha_{max}$）、$\alpha_0 = \alpha_{max}$において、－１次光の出射角度は$\alpha_- \leqq 0$でなければならない（すなわち、$\sin\alpha_- = \sin\alpha_{max} - (\lambda/p) \leqq 0$）。これらの制限から、$p \leqq \lambda/\sin\alpha_{max}$が得られる。

【０２０５】
上記の議論から、±１次光がスキャンの角度範囲に存在しない場合における０次光の出射角度$\alpha_0$の最大値$\alpha_{max}$は、以下の式（２２）を満たす。
【数１６】

$$\sin\alpha_{max} = \frac{\lambda}{p} \qquad (22)$$

【０２０６】
例えば、±１次光がスキャンの角度範囲に存在しない場合において片側１０度以上のスキャンを達成するために、$\alpha_{max}$＝１０°とし、ｐ≦λ／ｓｉｎ１０°　５．７６λを満たす。例えば、この式と、ｐに関する前述の下限についての条件とを組み合わせれば、ｐは、λ／２≦ｐ≦λ／ｓｉｎ１０°を満たす。このｐの上限（ｐ　５．７６λ）は±１次光が出射されない場合における上限（ｐ　０．８５λ）と比べて十分大きいので、導波路アレイの作製は比較的容易である。ここで、使用される光が単一波長の光ではない場合、使用される光の中心波長をλとする。
【０２０７】
以上のことから、より広い角度範囲をスキャンするためには、導波路間の距離ｐを小さくする必要がある。一方、ｐが小さい場合に式（２０）における出射光の広がり角度Δαを小さくするためには、導波路アレイの本数を増やす必要がある。導波路アレイの本数は、用途および要求される性能に応じて適宜決定される。導波路アレイの本数は、例えば１６本以上、用途によっては１００本以上であり得る。
【０２０８】
＜導波路アレイに導入する光の位相制御＞
それぞれの導波路素子１０から出射される光の位相を制御するために、例えば、導波路素子１０に光を導入する前段に、光の位相を変化させる位相シフタを設ける。本実施形態における光スキャンデバイス１００は、複数の導波路素子１０のそれぞれに接続された複数の位相シフタと、各位相シフタを伝搬する光の位相を調整する第２調整素子とを備える。各位相シフタは、複数の導波路素子１０の対応する１つにおける光導波層２０に直接的にまたは他の導波路を介して繋がる導波路を含む。第２調整素子は、複数の位相シフタから複数の導波路素子１０へ伝搬する光の位相の差をそれぞれ変化させることにより、複数の導波路素子１０から出射される光の方向（すなわち、第３の方向Ｄ３）を変化させる。以下の説明では、導波路アレイと同様に、配列された複数の位相シフタを「位相シフタアレイ」と呼ぶことがある。
【０２０９】
図２８は、位相シフタ８０が導波路素子１０に直接的に接続されている構成の例を示す模式図である。図２８において、破線枠で囲まれた部分が位相シフタ８０に該当する。この位相シフタ８０は、対向する一対のミラー（第５のミラー３０ａおよび第６のミラー４０ａ、以下、単にミラーと呼ぶことがある。）と、ミラー３０ａとミラー４０ａの間に設けられた導波路２０ａとを有する。この例における導波路２０ａは、導波路素子１０における光導波層２０と共通の部材で構成され、光導波層２０に直接的に繋がっている。同様に、ミラー４０ａも、導波路素子１０におけるミラー４０と共通の部材で構成され、ミラー４０に接続されている。ミラー３０ａは、導波路素子１０におけるミラー３０よりも低い透過率（高い反射率）を有する。ミラー３０ａは、ミラー３０に接続されている。位相シフタ８０では、光を放射しないようにするために、ミラー３０ａの透過率はミラー４０、４０ａと同様の低い値に設計されている。すなわち、第５のミラー３０ａと第６のミラー４０ａの光透過率は、第１のミラー３０の光透過率よりも低い。この例では、位相シフタ８０が、本開示における「第１の導波路」に相当する。このように、「第１の導波路」

は、位相シフタとして機能してもよい。

【０２１０】

図２９は、導波路アレイ１０Ａおよび位相シフタアレイ８０Ａを、光出射面の法線方向（Ｚ方向）から見た模式図である。図２９に示される例では、全ての位相シフタ８０が同じ伝搬特性を有し、全ての導波路素子１０が同じ伝搬特性を有する。それぞれの位相シフタ８０およびそれぞれの導波路素子１０は同じ長さであってもよいし、長さが異なっていても良い。それぞれの位相シフタ８０の長さが等しい場合は、例えば、駆動電圧によりそれぞれの位相シフト量を調整する。また、それぞれの位相シフタ８０の長さを等ステップで変化させた構造にすることで、同じ駆動電圧で等ステップの位相シフトを与えることもできる。さらに、この光スキャンデバイス１００は、複数の位相シフタ８０に光を分岐して供給する光分岐器９０と、各導波路素子１０を駆動する第１駆動回路１１０と、各位相シフタ８０を駆動する第２駆動回路２１０とをさらに備えている。図２９における直線の矢印は光の入力を示している。別々に設けられた第１駆動回路１１０と第２駆動回路２１０とをそれぞれ独立に制御することにより、２次元スキャンを実現できる。この例では、第１駆動回路１１０は、第１調整素子の１つの要素として機能し、第２駆動回路２１０は、第２調整素子の１つの要素として機能する。

【０２１１】

第１駆動回路１１０は、後述するように、各導波路素子１０における光導波層２０の屈折率または厚さを変化（変調）させることにより、光導波層２０から出射する光の角度を変化させる。第２駆動回路２１０は、後述するように、各位相シフタ８０における導波路２０ａの屈折率を変化させることにより、導波路２０ａの内部を伝搬する光の位相を変化させる。光分岐器９０は、全反射によって光が伝搬する導波路で構成してもよいし、導波路素子１０と同様の反射型導波路で構成してもよい。

【０２１２】

なお、光分岐器９０で分岐したそれぞれの光に対して位相を制御した後に、それぞれの光を位相シフタ８０に導入してもよい。この位相制御には、例えば、位相シフタ８０に至るまでの導波路の長さを調整することによるパッシブな位相制御構造を用いることができる。あるいは、位相シフタ８０と同様の機能を有する電気信号で制御可能な位相シフタを用いても良い。このような方法により、例えば、全ての位相シフタ８０に等位相の光が供給されるように、位相シフタ８０に導入される前に位相を調整してもよい。そのような調整により、第２駆動回路２１０による各位相シフタ８０の制御をシンプルにすることができる。

【０２１３】

図３０は、位相シフタ８０における導波路が、導波路素子１０における光導波層２０と、他の導波路８５を介して繋がる構成の例を模式的に示す図である。他の導波路８５は、上述した何れかの第１の導波路１であってもよい。また、他の導波路８５は、図１４に示した導波路１および１’であってもよい。各位相シフタ８０は、図２８に示す位相シフタ８０と同じ構成を有していてもよいし、異なる構成を有していてもよい。図３０では、位相シフタ８０を、位相シフト量を表す記号$\phi_0$～$\phi_5$を用いて、簡易的に表現している。以降の図でも同様の表現を用いることがある。位相シフタ８０には、全反射を利用して光を伝搬させる導波路を利用することができる。その場合、図２８に示されているようなミラー３０ａおよび４０ａは不要である。

【０２１４】

図３１は、光分岐器９０にカスケード状に並ぶ複数の位相シフタ８０を挿入した構成例を示す図である。この例では、光分岐器９０の経路の途中に、複数の位相シフタ８０が接続されている。各位相シフタ８０は、伝搬する光に一定の位相シフト量φを与える。それぞれの位相シフタ８０が伝搬光に与える位相シフト量を一定にすることで、隣接する２つの導波路素子１０の間の位相差が等しくなる。したがって、第２調整素子は、全ての位相シフタ８０に共通の位相制御信号を送ることができる。このため、構成が容易になるという利点がある。

【０２１５】
光分岐器９０、位相シフタ８０および導波路素子１０などの間で、光を効率的に伝搬させるために、導波路を利用することができる。導波路には、周囲の材料よりも高い屈折率を有する、光の吸収が少ない光学材料を用いることができる。例えば、Ｓｉ、ＧａＡｓ、ＧａＮ、$SiO_2$、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、ＡｌＮ、ＳｉＮなどの材料が用いられ得る。また、光分岐器９０から導波路素子１０に光を伝搬させるために、上述した何れかの第１の導波路１を用いてもよい。また、光分岐器９０から導波路素子１０に光を伝搬させるために、図１４に示した導波路１および１’を用いてもよい。
【０２１６】
位相シフタ８０では、光に位相差を与えるために光路長を変える機構が必要である。光路長を変えるために、本実施形態では、位相シフタ８０における導波路の屈折率が変調される。これにより、隣接する２つの位相シフタ８０から導波路素子１０に供給される光の位相差を調整することができる。より具体的には、位相シフタ８０が有する導波路内の位相シフト材料の屈折率変調を行うことで、位相シフトを与えることができる。屈折率変調を行う構成の具体例については、後述する。
【０２１７】
＜第１調整素子の例＞
次に、導波路素子１０における光導波層２０の屈折率または厚さを調整する第１調整素子の構成例を説明する。まず、屈折率を調整する場合の構成例を説明する。
【０２１８】
図３２Ａは、第１調整素子６０（以下、単に調整素子と呼ぶことがある）の構成の一例を模式的に示す斜視図である。図３２Ａに示される例では、一対の電極６２を有する調整素子６０が導波路素子１０に組み込まれている。光導波層２０は、一対の電極６２に挟まれている。光導波層２０および一対の電極６２は、第１のミラー３０と第２のミラー４０との間に設けられている。光導波層２０の側面（ＸＺ面に平行な表面）の全体が、電極６２に接触している。光導波層２０は、電圧が印加された場合に、光導波層２０を伝搬する光に対する屈折率が変化する屈折率変調材料を含む。調整素子６０は、一対の電極６２から引き出された配線６４と、配線６４に接続された電源６６とをさらに有している。電源６６をオンにして配線６４を通じて一対の電極６２に電圧を印加することで、光導波層２０の屈折率を変調することができる。このため、調整素子６０を屈折率変調素子と呼ぶこともできる。
【０２１９】
図３２Ｂは、第１調整素子６０の他の構成例を模式的に示す斜視図である。この例では、光導波層２０の側面の一部のみが電極６２に接触している。それ以外の点は、図３２Ａに示す構成と同じである。このように、光導波層２０の屈折率を部分的に変化させる構成であっても、出射光の方向を変化させることができる。
【０２２０】
図３２Ｃは、第１調整素子６０のさらに他の構成例を模式的に示す斜視図である。この例では、一対の電極６２は、ミラー３０および４０の反射面に略平行な層状の形状を有する。一方の電極６２は、第１のミラー３０と光導波層２０との間に挟まれている。他方の電極６２は、第２のミラー４０と光導波層２０との間に挟まれている。このような構成を採用する場合、電極６２には、透明電極が用いられ得る。このような構成によれば、製造が比較的容易であるという利点がある。
【０２２１】
図３２Ａから図３２Ｃに示す例では、各導波路素子１０における光導波層２０は、電圧が印加された場合に、光導波層２０を伝搬する光に対する屈折率が変化する材料を含む。第１調整素子６０は、光導波層２０を挟む一対の電極６２を有し、一対の電極６２に電圧を印加することにより、光導波層２０の屈折率を変化させる。電圧の印加は、前述の第１駆動回路１１０によって行われ得る。
【０２２２】

ここで、各構成要素に用いられ得る材料の例を説明する。

【０２２３】

ミラー３０、４０、３０ａ、および４０ａの材料には、例えば誘電体による多層膜を用いることができる。多層膜を用いたミラーは、例えば、各々が１／４波長の光学厚さを有する、屈折率の異なる複数の膜を周期的に形成することによって作製できる。このような多層膜ミラーによれば、高い反射率を得ることができる。膜の材料として、例えば$SiO_2$、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、Ｓｉ、ＳｉＮなどを用いることができる。各ミラーは、多層膜ミラーに限らず、Ａｇ、Ａｌなどの金属で形成されていてもよい。

【０２２４】

電極６２および配線６４には、導電性を有する様々な材料を利用することができる。例えば、Ａｇ、Ｃｕ、Ａｕ、Ａｌ、Ｐｔ、Ｔａ、Ｗ、Ｔｉ、Ｒｈ、Ｒｕ、Ｎｉ、Ｍｏ、Ｃｒ、Ｐｄなどの金属材料、またはＩＴＯ、酸化錫、酸化亜鉛、ＩＺＯ（登録商標）、ＳＲＯなどの無機化合物、またはＰＥＤＯＴ、ポリアニリンなどの導電性高分子などの導電性材料を用いることができる。

【０２２５】

光導波層２０の材料には、誘電体、半導体、電気光学材料、液晶分子などの様々な透光性の材料を利用することができる。誘電体としては、例えば$SiO_2$、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、ＳｉＮ、ＡｌＮが挙げられる。半導体材料としては、例えば、Ｓｉ系、ＧａＡｓ系、ＧａＮ系の材料が挙げられる。電気光学材料としては、例えば、ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）、チタン酸バリウム（$BaTi_3$）、タンタル酸リチウム（$LiTaO_3$）、酸化亜鉛（ＺｎＯ）、チタン酸ジルコン酸ランタン鉛（ＰＬＺＴ）、タンタル酸ニオブ酸カリウム（ＫＴＮ）などが挙げられる。

【０２２６】

光導波層２０の屈折率を変調する方法には、例えば、キャリア注入効果、電気光学効果、複屈折効果、または熱光学効果を利用した方法がある。以下、各方法の例を説明する。

【０２２７】

キャリア注入効果を利用した方法は、半導体のｐｉｎ接合を利用した構成によって実現され得る。この方法では、ドープ濃度の低い半導体をｐ型半導体およびｎ型半導体で挟み込んだ構造が用いられ、半導体にキャリアを注入することによって屈折率が変調される。この構成では、各導波路素子１０における光導波層２０は、半導体材料を含む。一対の電極６２の一方はｐ型半導体を含み、他方はｎ型半導体を含み得る。第１調整素子６０は、一対の電極６２に電圧を印加することにより、半導体材料にキャリアを注入し、光導波層２０の屈折率を変化させる。光導波層２０をノンドープまたは低ドープ濃度の半導体で作製し、これに接するようにｐ型半導体およびｎ型半導体を設ければ良い。低ドープ濃度の半導体にｐ型半導体およびｎ型半導体が接するように配置し、さらにｐ型半導体およびｎ型半導体に導電性材料が接するような複合的な構成にしてもよい。例えば、Ｓｉに$10^{20}cm^{-3}$程度のキャリアを注入すると、Ｓｉの屈折率が０．１程度変化する（例えば、“Ｆｒｅｅ ｃｈａｒｇｅ ｃａｒｒｉｅｒ ｉｎｄｕｃｅｄ ｒｅｆｒａｃｔｉｖｅ ｉｎｄｅｘ ｍｏｄｕｌａｔｉｏｎ ｏｆ ｃｒｙｓｔａｌｌｉｎｅ Ｓｉｌｉｃｏｎ”７ｔｈ ＩＥＥＥ Ｉｎｔｅｒｎａｔｉｏｎａｌ Ｃｏｎｆｅｒｅｎｃｅ ｏｎ Ｇｒｏｕｐ ＩＶ Ｐｈｏｔｏｎｉｃｓ，Ｐ１０２ - １０４，１－３ Ｓｅｐｔ．２０１０を参照）。この方法を採用する場合、図３２Ａから図３２Ｃにおける一対の電極６２の材料として、ｐ型半導体およびｎ型半導体が用いられ得る。あるいは、一対の電極６２は金属で構成し、電極６２と光導波層２０との間の層、または、光導波層２０自体にｐ型またはｎ型半導体を含ませてもよい。

【０２２８】

電気光学効果を利用した方法は、電気光学材料を含む光導波層２０に電界をかけることで実現され得る。特に、電気光学材料としてＫＴＮを用いれば、大きな電気光学効果を得ることができる。ＫＴＮは正方晶から立方晶への相転移温度よりも少し高い温度で比誘電率が著しく上昇するため、この効果を利用することができる。例えば、“Ｌｏｗ－Ｄｒｉ

ｖｉｎｇ－Ｖｏｌｔａｇｅ Ｅｌｅｃｔｒｏ－Ｏｐｔｉｃ Ｍｏｄｕｌａｔｏｒ Ｗｉｔｈ Ｎｏｖｅｌ ＫＴａ１－ｘＮｂｘＯ３ Ｃｒｙｓｔａｌ Ｗａｖｅｇｕｉｄｅｓ” Ｊｐｎ．Ｊ．Ａｐｐｌ．Ｐｈｙｓ．，Ｖｏｌ．４３，Ｎｏ．８Ｂ（２００４）によれば、波長１．５５μｍの光に対して電気光学定数ｇ＝４．８×１０$^{-15}$ｍ$^{2}$／Ｖ$^{2}$が得られる。よって、例えば２ｋＶ／ｍｍの電界をかけると、屈折率が０．１（＝ｇｎ$^{3}$Ｅ$^{3}$／２）程度変化する。このように、電気光学効果を利用した構成では、各導波路素子１０における光導波層２０は、ＫＴＮなどの電気光学材料を含む。第１調整素子６０は、一対の電極６２に電圧を印加することにより、電気光学材料の屈折率を変化させる。

【０２２９】

液晶による複屈折効果を利用した方法では、液晶材料を含む光導波層２０を電極６２で駆動することで、液晶の屈折率異方性を変化させることができる。これにより、光導波層２０を伝搬する光に対する屈折率を変調することができる。液晶は一般に０．１～０．２程度の複屈折率差を有するので、液晶の配向方向を電界で変えることで複屈折率差と同等の屈折率変化が得られる。このように、液晶の複屈折効果を利用した構成では、各導波路素子１０における光導波層２０は、液晶材料を含む。第１調整素子６０は、一対の電極６２に電圧を印加することにより、液晶材料の屈折率異方性を変化させ、光導波層２０の屈折率を変化させる。

【０２３０】

熱光学効果は、材料の温度変化に伴って屈折率が変化する効果である。熱光学効果による駆動を行うために、熱光学材料を含む光導波層２０を加熱することで屈折率を変調してもよい。

【０２３１】

図３３は、高い電気抵抗を有する材料によって構成されるヒーター６８を含む調整素子６０と導波路素子１０とを組み合わせた構成の例を示す図である。ヒーター６８は、光導波層２０の近傍に配置され得る。電源６６をオンにして導電性材料を含む配線６４を通じてヒーター６８に電圧をかけることにより、加熱することができる。ヒーター６８を光導波層２０に接触させてもよい。本構成例では、各導波路素子１０における光導波層２０は、温度変化に伴って屈折率が変化する熱光学材料を含む。第１調整素子６０は、光導波層２０に接触してまたは光導波層２０の近傍に配置されたヒーター６８を有する。第１調整素子６０は、ヒーター６８によって熱光学材料を加熱することにより、光導波層２０の屈折率を変化させる。

【０２３２】

光導波層２０自体を高電気抵抗材料で作製し、光導波層２０を直接一対の電極６２で挟み電圧を印加することで加熱してもよい。その場合、第１調整素子６０は、光導波層２０を挟む一対の電極６２を有する。第１調整素子６０は、一対の電極６２に電圧を印加して光導波層２０における熱光学材料（例えば、高電気抵抗材料）を加熱することにより、光導波層２０の屈折率を変化させる。

【０２３３】

ヒーター６８または光導波層２０に用いられる高電気抵抗材料として、半導体または抵抗率の大きい金属材料を用いることができる。半導体としては、例えば、Ｓｉ、ＧａＡｓ、またはＧａＮなどを用いることができる。また、抵抗率の高い金属としては、鉄、ニッケル、銅、マンガン、クロム、アルミニウム、銀、金、プラチナ、またはこれら複数の材料を組み合わせた合金などが用いられ得る。例えば、波長１５００ｎｍの光に対するＳｉの屈折率の温度依存性ｄｎ／ｄＴは１．８７×１０$^{-4}$（Ｋ$^{-1}$）である（“Ｔｅｍｐｅｒａｔｕｒｅ－ｄｅｐｅｎｄｅｎｔ ｒｅｆｒａｃｔｉｖｅ ｉｎｄｅｘ ｏｆ ｓｉｌｉｃｏｎ ａｎｄ ｇｅｒｍａｎｉｕｍ”，Ｐｒｏｃ．ＳＰＩＥ ６２７３，Ｏｐｔｏｍｅｃｈａｎｉｃａｌ Ｔｅｃｈｎｏｌｏｇｉｅｓ ｆｏｒ Ａｓｔｒｏｎｏｍｙ，６２７３２Ｊを参照）。したがって、温度を５００℃変えると屈折率を０．１程度変化させることができる。光導波層２０の近傍にヒーター６８を設け局所的に加熱すれば、

５００℃という大きい温度変化でも比較的高速に行うことができる。

【０２３４】

キャリア注入による屈折率変化の応答速度は、キャリアの寿命によって決まる。一般に、キャリア寿命はナノ秒（ｎｓ）のオーダーであるため１００ＭＨｚ～１ＧＨｚ程度の応答速度が得られる。

【０２３５】

電気光学材料を用いた場合、電場をかけて電子の分極を誘起することで屈折率変化が生じる。分極を誘起する速度は一般的に極めて高速で、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$などの材料では応答時間はフェムト秒（ｆｓ）オーダーであるため、１ＧＨｚを越えた高速駆動が可能である。

【０２３６】

熱光学材料を用いた場合、温度昇降の速度で屈折率変化の応答速度が決まる。局所的に導波路近傍のみ加熱することで急激な温度上昇が得られる。また、局所的に温度が上がった状態でヒーターを切ると周辺に放熱することで急激に温度を下げることができる。速いものでは１００ＫＨｚ程度の応答速度が得られる。

【０２３７】

以上の例では、第１調整素子６０は、各光導波層２０の屈折率を同時に一定の値だけ変化させることにより、出射光の波数ベクトルのＸ成分を変化させる。屈折率変調において、その変調量は材料の特性に依存し、大きな変調量を得るためには、高い電界を印加したり、液晶を配向させたりする必要がある。一方、導波路素子１０から出射される光の方向は、ミラー３０とミラー４０の間の距離にも依存する。したがって、ミラー３０とミラー４０の間の距離を変えることによって光導波層２０の厚さを変化させてもよい。以下、光導波層２０の厚さを変化させる構成の例を説明する。

【０２３８】

光導波層２０の厚さを変えるためには、光導波層２０は、例えば気体または液体などの容易に変形する材料で構成され得る。光導波層２０を挟むミラー３０および４０の少なくとも一方を移動させることにより、光導波層２０の厚さを変化させることができる。この際、上下のミラー３０とミラー４０の間の平行度を保つために、ミラー３０または４０の変形を最小限にするような構成が採用され得る。

【０２３９】

図３４は、変形し易い材料で構成された支持部材７０でミラー３０が保持された構成例を示す図である。支持部材７０は、ミラー３０よりも相対的に変形しやすい厚さの薄い部材または細いフレームを含み得る。この例では、第１調整素子は、各導波路素子１０における第１のミラー３０に接続されたアクチュエータを有する。アクチュエータは、第１のミラー３０と第２のミラー４０との距離を変化させることにより、光導波層２０の厚さを変化させる。なお、アクチュエータは、第１のミラー３０および第２のミラー４０の少なくとも一方に接続され得る。ミラー３０を駆動するアクチュエータとして、例えば、静電気力、電磁誘導、圧電材料、形状記憶合金、または熱を利用した種々のアクチュエータを用いることができる。

【０２４０】

静電気力を利用した構成では、第１調整素子におけるアクチュエータは、静電気力によって発生する電極間の引力または斥力を用いてミラー３０および／または４０を移動させる。以下、そのような構成のいくつかの例を説明する。

【０２４１】

図３５は、電極間に発生する静電気力によってミラー３０および／または４０を移動させる構成の一例を示す図である。この例では、ミラー３０と光導波層２０との間、およびミラー４０と光導波層２０との間に、透光性を有する電極６２（例えば透明電極）が設けられている。ミラー３０の両側に配置された支持部材７０の各々は、一端がミラー３０に固定され、他端が不図示の筐体に固定されている。一対の電極６２に正負の電圧を印加することで、引力が生じ、ミラー３０とミラー４０の間の距離が縮小する。電圧の印加を止

めると、ミラーを保持する支持部材７０の復元力が生じ、ミラー３０とミラー４０の間の距離が元の長さに戻る。このような引力を生じさせる電極６２は、ミラー全面に設けられている必要はない。この例におけるアクチュエータは、一対の電極６２を有し、一対の電極６２の一方は第１のミラー３０に固定され、一対の電極６２の他方は第２のミラー４０に固定されている。アクチュエータは、一対の電極６２に電圧を印加することにより、電極間に静電気力を発生させ、第１のミラー３０と第２のミラー４０との距離を変化させる。なお、電極６２への電圧の印加は、前述の第１駆動回路１１０（例えば図２９）によって行われる。

【０２４２】

図３６は、引力を生じさせる電極６２を、光の伝搬を妨げない位置に配置した構成例を示す図である。この例では、電極６２を透明にする必要はない。図示されているように、ミラー３０および４０のそれぞれに固定された電極６２は単一である必要はなく、分割されていてもよい。分割された電極の一部の静電容量を計測することで、ミラー３０とミラー４０の間の距離を計測し、ミラー３０とミラー４０の平行度を調整するなどのフィードバック制御を行うことができる。

【０２４３】

電極間の静電気力を利用する代わりに、コイル内の磁性体に引力または斥力を生じさせる電磁誘導を利用してミラー３０および／または４０を駆動してもよい。

【０２４４】

圧電材料、形状記憶合金、または熱による変形を利用したアクチュエータでは、外部から加えられたエネルギーによって材料が変形する現象が利用される。例えば、代表的な圧電材料であるチタン酸ジルコン酸鉛（ＰＺＴ）は、電界を分極方向に印加することによって伸縮する。この圧電材料によってミラー３０とミラー４０の間の距離を直接変化させることができる。しかし、ＰＺＴの圧電定数は１００ｐｍ／Ｖ程度であるため、例えば１Ｖ／μｍの電界を印加しても変位量は０．０１％程度と微小である。このため、このような圧電材料を用いた場合には、十分なミラーの移動距離を得ることができない。そこで、ユニモルフまたはバイモルフと呼ばれる構成を用いて、変化量を増加させることができる。

【０２４５】

図３７は、圧電材料を含む圧電素子７２の例を示す図である。矢印は、圧電素子７２の変位方向を示し、その矢印の大きさは変位量を示す。図３７に示すように、圧電素子７２の変位量は材料の長さに依存するため、面方向の変位量は厚さ方向の変位量よりも大きい。

【０２４６】

図３８Ａは、図３７に示す圧電素子７２を用いたユニモルフの構造を有する支持部材７４ａの構成例を示す図である。この支持部材７４ａは、１層の圧電素子７２と、１層の非圧電素子７１とが積層された構造を有する。このような支持部材７４ａをミラー３０および４０の少なくとも一方に固定し、変形させることにより、ミラー３０とミラー４０の間の距離を変化させることができる。

【０２４７】

図３８Ｂは、圧電素子７２に電圧を印加することによって支持部材７４ａが変形した状態の例を示す図である。圧電素子７２に電圧が印加されると、圧電素子７２のみが面方向に伸びるため、支持部材７４ａ全体がたわむ。このため、非圧電素子７１が無い場合と比較して、変位量を増加させることができる。

【０２４８】

図３９Ａは、図３７に示す圧電素子７２を用いたバイモルフの構造を有する支持部材７４ｂの構成例を示す図である。この支持部材７４ｂは、２層の圧電素子７２と、その間の１層の非圧電素子７１とが積層された構造を有する。このような支持部材７４ｂをミラー３０および４０の少なくとも一方に固定し、変形させることにより、ミラー３０とミラー４０の間の距離を変化させることができる。

【０２４９】

図３９Ｂは、両側の圧電素子７２に電圧を印加することによって支持部材７４ａが変形した状態の例を示す図である。バイモルフでは、上下の圧電素子７２において変位方向が反対になる。そのため、バイモルフの構成を用いた場合、ユニモルフの構成よりもさらに変位量を増加させることができる。

【０２５０】

図４０は、図３８Ａに示す支持部材７４ａをミラー３０の両側に配置したアクチュエータの例を示す図である。このような圧電アクチュエータによって梁をたわませるように支持部材７４ａを変形させることにより、ミラー３０とミラー４０の間の距離を変化させることができる。図３８Ａに示す支持部材７４ａに代えて、図３９Ａに示す支持部材７４ｂを用いてもよい。

【０２５１】

なお、ユニモルフ型のアクチュエータは、円弧状に変形するため、図４１Ａに示すように、固定されていない側の先端には傾きが生じる。そのため、ミラー３０の剛性が低いと、ミラー３０とミラー４０を平行に保持することが困難である。そこで、図４１Ｂに示すように、伸縮する方向の異なる２つのユニモルフ型の支持部材７４ａを直列に繋ぎ合わせてもよい。図４１Ｂの例では、支持部材７４ａにおいて、伸縮する領域と伸展する領域とで、たわむ方向が反対になる。その結果、固定されていない側の先端に傾きを生じさせないようにすることができる。このような支持部材７４ａを用いることにより、ミラー３０および４０が傾くことを抑制することができる。

【０２５２】

上記と同様に、熱膨張係数の異なる材料を貼り合わせることによっても、たわみ変形する梁構造を実現することができる。さらに、梁構造を形状記憶合金で実現することもできる。いずれも、ミラー３０とミラー４０の距離の調整に利用され得る。

【０２５３】

また、光導波層２０を密閉空間とし、内部の空気または液体を小型ポンプなどで出し入れして光導波層２０の体積を変化させることによってミラー３０とミラー４０の間の距離を変えることも可能である。

【０２５４】

以上のように、第１調整素子におけるアクチュエータは、多様な構造によって光導波層２０の厚さを変化させることができる。このような厚さの変化は、複数の導波路素子１０のそれぞれについて個別に行ってもよいし、全ての導波路素子１０について一律に行ってもよい。特に、複数の導波路素子１０の構造が全て同じである場合、各導波路素子１０におけるミラー３０とミラー４０の間の距離が一定に制御される。このため、１つのアクチュエータが、全ての導波路素子１０を一括して駆動することができる。

【０２５５】

図４２は、複数の第１のミラー３０を保持する支持部材（すなわち、補助基板）５２をアクチュエータで一括して駆動する構成の例を示す図である。図４２では、第２のミラー４０は１つのプレート状のミラーである。ミラー４０は、前述の実施形態のように、複数のミラーに分割されていてもよい。支持部材５２は、透光性を有する材料で構成され、両側にユニモルフ型の圧電アクチュエータが設けられている。

【０２５６】

図４３は、複数の導波路素子１０における第１のミラー３０が１つのプレート状のミラーである構成例を示す図である。この例では、第２のミラー４０は、導波路素子１０ごとに分割されている。図４２および図４３の例のように、各導波路素子１０におけるミラー３０および４０の少なくとも一方が、１つのプレート状のミラーの部分であってもよい。アクチュエータは、当該プレート状のミラーを移動させることにより、ミラー３０とミラー４０の間の距離を変化させてもよい。

【０２５７】

＜位相シフトのための屈折率変調＞

次に、第２調整素子による複数の位相シフタ８０における位相の調整のための構成を説

明する。複数の位相シフタ８０における位相の調整は、位相シフタ８０における導波路２０ａの屈折率を変化させることによって実現され得る。この屈折率の調整は、既に説明した、各導波路素子１０における光導波層２０の屈折率を調整する方法と全く同じ方法によって実現することができる。例えば、図３２Ａから図３３を参照しながら説明した屈折率変調の構成および方法をそのまま適用することができる。図３２Ａから図３３に関する説明において、導波路素子１０を位相シフタ８０と読み替え、第１調整素子６０を第２調整素子と読み替え、光導波層２０を導波路２０ａと読み替え、第１駆動回路１１０を第２駆動回路２１０と読み替える。このため、位相シフタ８０における屈折率変調についての詳細な説明は省略する。

【０２５８】

各位相シフタ８０における導波路２０ａは、電圧の印加または温度変化に応じて屈折率が変化する材料を含む。第２調整素子は、各位相シフタ８０における導波路２０ａに電圧を印加する、または導波路２０ａの温度を変化させることにより、導波路２０ａ内の屈折率を変化させる。これにより、第２調整素子は、複数の位相シフタ８０から複数の導波路素子１０に伝搬する光の位相の差をそれぞれ変化させることができる。

【０２５９】

各位相シフタ８０は、光が通過するまでの間に、少なくとも２πの位相シフトが可能なように構成され得る。位相シフタ８０における導波路２０ａの単位長さあたりの屈折率の変化量が小さい場合には、導波路２０ａの長さを大きくしてもよい。例えば、位相シフタ８０の大きさは、数百マイクロメートル（μｍ）から数ミリメートル（ｍｍ）、場合によってはそれ以上であってもよい。これに対し、各導波路素子１０の長さは、例えば数十μｍから数十ｍｍ程度の値であり得る。

【０２６０】

＜同期駆動のための構成＞

本実施形態では、第１調整素子は、複数の導波路素子１０から出射される光の方向が揃うように、各導波路素子１０を駆動する。複数の導波路素子１０から出射される光の方向を揃えるために、例えば、各導波路素子１０に個別に駆動部を設け、これらの駆動部を同期駆動する。

【０２６１】

図４４は、それぞれの導波路素子１０の電極６２から配線６４を共通に取り出す構成の例を示す図である。図４５は、一部の電極６２および配線６４を共通にした構成の例を示す図である。図４６は、複数の導波路素子１０に対して共通の電極６２を配置した構成の例を示す図である。図４４～図４６において、直線の矢印は光の入力を示している。これらの図に示すような構成にすることで、導波路アレイ１０Ａを駆動するための配線をシンプルにすることができる。

【０２６２】

本実施形態の構成によれば、シンプルなデバイス構成で２次元的に光をスキャンすることが可能である。例えば、Ｎ本の導波路素子１０で構成された導波路アレイを同期駆動する場合、それぞれ独立の駆動回路を設けると、Ｎ個の駆動回路が必要である。しかし、上記のように電極または配線を共通にする工夫を行えば１つの駆動回路で動作させることができる。

【０２６３】

導波路アレイ１０Ａの前段に位相シフタアレイ８０Ａを設けた場合、それぞれの位相シフタ８０を独立に動かすためには、さらにＮ個の駆動回路が必要である。しかし、図３１の例のように位相シフタ８０をカスケード状に配置することにより、１つの駆動回路でも動作させることができる。すなわち、本開示の構成では、２個ないし２Ｎ個の駆動回路で、２次元的に光をスキャンさせる動作を実現できる。また、導波路アレイ１０Ａおよび位相シフタアレイ８０Ａをそれぞれ独立して動作させてもよいため、互いの配線が干渉することなく容易に引き出すことができる。

【０２６４】

＜製造方法＞
導波路アレイ、位相シフタアレイ８０Ａ、およびこれらをつなぐ導波路は、半導体プロセス、３Ｄプリンター、自己組織化、ナノインプリントなど、高精度の微細加工が可能なプロセスによって製造することができる。これらのプロセスにより、小さい領域に必要な要素を集積することが可能である。
【０２６５】
特に、半導体プロセスを利用すれば、加工精度が極めて高く、量産性も高いという利点がある。半導体プロセスを利用する場合、基板上に蒸着、スパッタ、ＣＶＤ、塗布などによって様々な材料を成膜することができる。さらに、フォトリソグラフィーとエッチングプロセスにより、微細加工が可能である。基板の材料として、例えばＳｉ、$SiO_2$、$Al_2O_2$、ＡｌＮ、ＳｉＣ、ＧａＡｓ、ＧａＮなどを用いることができる。
【０２６６】
＜変形例＞
続いて、本実施形態の変形例を説明する。
【０２６７】
図４７は、位相シフタアレイ８０Ａを配置する領域を大きく確保して、導波路アレイを小さく集積した構成の例を模式的に示す図である。このような構成によれば、位相シフタ８０の導波路を構成する材料において小さな屈折率変化しか生じない場合でも、十分な位相シフト量を確保することができる。また、位相シフタ８０を熱で駆動する場合、間隔を広く取れるため、隣の位相シフタ８０に与える影響を小さくすることができる。
【０２６８】
図４８は、２つの位相シフタアレイ８０Ａａおよび８０Ａｂが、導波路アレイ１０Ａの両側にそれぞれ配置された構成例を示す図である。この例では、光スキャンデバイス１００は、２つの光分岐器９０ａおよび９０ｂ、ならびに２つの位相シフタアレイ８０Ａａおよび８０Ａｂを、導波路アレイ１０Ａの両側に有している。図４８において点線で示されている直線の矢印は、光分岐器９０ａおよび９０ｂおよび位相シフタ８０ａおよび８０ｂを伝搬する光を示している。位相シフタアレイ８０Ａａおよび光分岐器９０ａは、導波路アレイ１０Ａの一方の側に接続され、位相シフタアレイ８０Ａｂおよび光分岐器９０ｂは、導波路アレイ１０Ａの他方の側に設けられている。光スキャンデバイス１００は、さらに、光分岐器９０ａへの光の供給と光分岐器９０ｂへの光の供給を切り替える光スイッチ９２を備えている。光スイッチ９２を切り替えることにより、図４８における左側から導波路アレイ１０Ａに光を入力する状態と、図４８における右側から導波路アレイ１０Ａに光を入力する状態とを切り替えることができる。
【０２６９】
本変形例の構成によれば、導波路アレイ１０Ａから出射される光のＸ方向についてのスキャン範囲を拡大できるという利点がある。導波路アレイ１０Ａに片側から光を入力する構成においては、各導波路素子１０の駆動によって、光の方向を、正面方向（すなわち、＋Ｚ方向）から、＋Ｘ方向または－Ｘ方向のいずれかの方向に沿ってスキャンすることができる。これに対して、本変形例では、図４８における左側の光分岐器９０ａから光を入力した場合、正面方向から＋Ｘ方向に沿って光をスキャンすることができる。一方、右側の光分岐器９０ｂから光を入力した場合、正面方向から－Ｘ方向に光をスキャンすることができる。つまり、図４８の構成では、正面から見て図４８における左右両方向に光をスキャンすることができる。このため、片側から光を入力する構成に比べて、スキャンの角度範囲を広くすることができる。光スイッチ９２は、不図示の制御回路（例えば、マイクロコントローラユニット）から電気信号で制御される。本構成例によれば、全ての素子の駆動を電気信号によって制御することができる。
【０２７０】
以上の説明では、導波路素子１０の配列方向および導波路素子１０が延びる方向が直交している導波路アレイのみを扱ってきた。しかし、これらの方向が直交している必要はない。例えば、図４９Ａに示すような構成を用いてもよい。図４９Ａは、導波路素子１０の

配列方向ｄ１および導波路素子１０が延びる方向ｄ２が直交していない導波路アレイの構成例を示している。この例において、各導波路素子１０の光出射面は、同一平面内になくてもよい。このような構成であっても、各導波路素子１０および各位相シフタを適切に制御することにより、光の出射方向ｄ３を２次元的に変化させることができる。

【０２７１】

図４９Ｂは、導波路素子１０の配列間隔が一定でない導波路アレイの構成例を示している。このような構成を採用する場合であっても、各位相シフタによる位相シフト量を適切に設定することにより、２次元スキャンを行うことができる。図４９Ｂの構成においても、導波路アレイの配列方向ｄ１と、各導波路素子１０の延びる方向ｄ２とが直交していなくてもよい。

【０２７２】

＜基板上に第１および第２の導波路が配置された実施形態＞

次に、基板上に第１および第２の導波路が配置された光スキャンデバイスの実施形態を説明する。

【０２７３】

本実施形態における光スキャンデバイスは、第１の導波路と、第１の導波路に繋がる第２の導波路と、第１および第２の導波路を支持する基板とを備える。より具体的には、光スキャンデバイスは、第１の方向に配列された複数の導波路ユニットと、これらの複数の導波路ユニットを支持する基板とを備える。複数の導波路ユニットの各々は、第１の導波路と、第２の導波路とを備える。第２の導波路は、第１の導波路に繋がり、第１の方向に交差する第２の方向に光を伝搬させる。基板は、各導波路ユニットにおける第１の導波路および第２の導波路を支持する。

【０２７４】

第２の導波路は、前述の実施形態における反射型導波路に相当する。すなわち、第２の導波路は、多層反射膜を有する第１のミラーと、第１のミラーの前記多層反射膜に対向する多層反射膜を有する第２のミラーと、第１のミラーおよび第２のミラーの間に位置し、前記第１の導波路に入力され第１の導波路を伝搬した光を伝搬させる光導波層と、を有する。第１のミラーは、第２のミラーよりも高い光透過率を有し、光導波層内を伝搬する光の一部を、光導波層の外部に出射する。光スキャンデバイスは、第２の導波路における光導波層の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、第２の導波路から出射される光の方向を変化させる調整素子をさらに備える。

【０２７５】

本実施形態によれば、１つの基板の上に第１および第２の導波路を配置することにより、第１の導波路１および第２の導波路１０の位置合わせが容易になる。さらに、熱膨張による第１および第２の導波路の位置のずれが抑制される。その結果、第１の導波路から第２の導波路へ効率よく光を導入することができる。

【０２７６】

光導波層は、例えば電圧が印加された場合に、光導波層を伝搬する光に対する屈折率が変化する材料を含み得る。その場合、調整素子は、光導波層に電圧を印加することにより、光導波層の屈折率を変化させる。これにより、調整素子は、第２の導波路から出射される光の方向を変化させる。

【０２７７】

第１の導波路の少なくとも一部は、前述の位相シフタとしての機能を有していてもよい。その場合、第１の導波路には、例えば屈折率を変調させる機構が組み込まれる。光スキャンデバイスは、第１の導波路の少なくとも一部の領域の屈折率を変調させる第２調整素子を備えていてもよい。第２調整素子は、例えば、第１の導波路の近傍に配置されたヒーターであり得る。ヒーターから発する熱によって第１の導波路の少なくとも一部の領域の屈折率を変化させることができる。これにより、第１の導波路から第２の導波路に入力される光の位相が調整される。第１の導波路から第２の導波路に入力される光の位相を調整するための構成は、前述のとおり多様である。それらのいずれの構成を採用してもよい。

【０２７８】
位相シフタは、第１の導波路の外部に設けられていてもよい。その場合、第１の導波路は、外部の位相シフタと、導波路素子（第２の導波路）との間に位置する。位相シフタと、第１の導波路との間には明確な境界がなくてもよい。例えば、位相シフタと、第１の導波路とが、導波路および基板等の構成要素を共用していてもよい。
【０２７９】
第１の導波路は、光の全反射を利用する一般的な導波路であってもよいし、反射型導波路であってもよい。位相が変調された光は、第１の導波路を経て、第２の導波路に導入される。
【０２８０】
以下、基板上に第１および第２の導波路が配置された光スキャンデバイスの実施形態をより詳細に説明する。以下の説明においては、光スキャンデバイスが複数の導波路ユニットを備えているものとする。光スキャンデバイスは、単一の導波路ユニットを備えていてもよい。すなわち、第１の導波路および第２の導波路の組み合わせを１つだけ備える光スキャンデバイスも、本開示の範囲に含まれる。
【０２８１】
図５０Ａは、本実施形態における光スキャンデバイスを模式的に示す図である。この光スキャンデバイスは、Ｙ方向に配列された複数の導波路ユニットと、複数の導波路ユニットを支持する基板５０とを備えている。各導波路ユニットは、第１の導波路１と、第２の導波路１０とを備えている。基板５０は、各導波路ユニットにおける第１の導波路１および第２の導波路１０を支持している。
【０２８２】
基板５０は、ＸＹ平面に沿って拡がっている。基板５０の上面および下面は、ＸＹ平面に略平行に配置されている。基板５０は、例えば、ガラス、Ｓｉ、$SiO_2$、ＧａＡｓ、ＧａＮなどの材料を用いて構成され得る。
【０２８３】
第１の導波路アレイ１Ａは、Ｙ方向に配列された複数の第１の導波路１を含む。第１の導波路１の各々は、Ｘ方向に延びた構造を有する。第２の導波路アレイ１０Ａは、Ｙ方向に配列された複数の第２の導波路１０を含む。第２の導波路１０の各々は、Ｘ方向に延びた構造を有する。
【０２８４】
図５０Ｂは、図５０Ａにおける一方の破線で示されたＸＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。基板５０の上に、第１および第２の導波路１、１０が配置されている。第２のミラー４０は、光導波層２０と基板５０との間、および第１の導波路１と基板５０との間の領域に拡がっている。第１の導波路１は、例えば、光の全反射を利用する一般的な導波路である。当該一般的な導波路は、例えば、ＳｉまたはＧａＡｓなどの半導体の導波路を含む。第２の導波路１０は、光導波層２０と、第１および第２のミラー３０および４０とを有する。光導波層２０は、対向する第１のミラー３０と第２のミラー４０の間に位置する。光導波層２０は、第１の導波路に入力され第１の導波路１を伝搬した光を伝搬させる。
【０２８５】
本実施形態における光導波層２０は、電圧が印加された場合に、光導波層２０を伝搬する光に対する屈折率が変化する材料を含んでいる。調整素子は、一対の電極を有する。一対の電極は、下部電極６２ａと上部電極６２ｂとを含む。下部電極６２ａは、光導波層２０と第２のミラー４０との間に配置されている。上部電極６２ｂは、光導波層２０と第１のミラー３０との間に配置されている。本実施形態における調整素子は、一対の電極６２ａ、６２ｂに電圧を印加することにより、光導波層２０の屈折率を変化させる。これにより、調整素子は、第２の導波路１０から出射される光の方向を変化させる。一対の電極６２ａ、６２ｂの各々は、図示されるように光導波層２０に接触していてもよいし、接触していなくてもよい。

【０２８６】
図５０Ｂの構成例では、積層された基板５０および第２のミラー４０を有する共通の支持体の上に、他の構造物が配置される。すなわち、一体に形成された一つの支持体の上に、第１の導波路１と、第１の電極６２ａ、光導波層２０、第２の電極６２ｂ、および第１のミラー３０の積層体とが作製される。共通の支持体を用いているため、第１の導波路１および光導波層２０の作製時の位置合わせが容易になる。さらに、熱膨張による第１の導波路１および光導波層２０の接続部分の位置のずれが抑制される。支持体は、例えば、支持基板である。
【０２８７】
図５０Ｃは、図５０Ａにおける他方の破線で示されたＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。この例では、第２のミラー４０は、複数の第２の導波路１０によって共用されている。すなわち、複数の第２の導波路１０における第２のミラー４０は互いに分離されていない。同様に、下部電極６２ａも、複数の第２の導波路１０によって共用されている。これにより、製造プロセスが簡素化される。
【０２８８】
一方、複数の第２の導波路１０における光導波層２０、上部電極６２ｂ、および第１のミラー３０は、互いに分離して配置されている。これにより、各光導波層２０は、光をＸ方向に伝搬させることができる。上部電極６２ｂおよび第１のミラー３０は、分離していなくてもよい。
【０２８９】
以下に、本実施形態における光スキャンデバイスの変形例を説明する。以下の変形例において、重複する構成要素の説明は、省略されている。
【０２９０】
図５１Ａは、第２のミラー４０および導波路１の間に誘電体層５１が配置された構成例を示す図である。この例における光スキャンデバイスは、第２のミラー４０と第１の導波路１との間に拡がる誘電体層５１をさらに備えている。この誘電体層５１は、第１の導波路１と光導波層２０との高さのレベルを合わせる調整層として機能する。以下、誘電体層５１を調整層５１と称する。Ｚ方向における調整層５１の厚さを調整することにより、第１の導波路１から光導波層２０への光の結合効率を高めることができる。さらに、調整層５１は、第１の導波路１における導波光が第２のミラー４０によって吸収、散乱または反射されることを防ぐスペーサの役割を果たす。第１の導波路１は、全反射により光を伝搬させる。そのため、調整層５１は、第１の導波路１の屈折率よりも低い屈折率を有する透明材料によって構成される。例えば、調整層５１は、$SiO_2$などの誘電体材料で形成され得る。
【０２９１】
第１の導波路１の上に、他の誘電体層を保護層としてさらに配置してもよい。
【０２９２】
図５１Ｂは、第１の導波路１の上に第２の誘電体層６１がさらに配置された構成例を示す図である。このように、光スキャンデバイスは、第１の導波路１の少なくとも一部を覆う第２の誘電体層６１をさらに備えていてもよい。第２の誘電体層６１は、第１の導波路１に接し、第１の導波路１の屈折率よりも低い屈折率を有する透明材料によって構成されている。第２の誘電体層６１は、第１の導波路１の上にパーティクルまたはごみが付着することを防ぐ保護層として機能する。これにより、第１の導波路１における導波光のロスを抑制することができる。以下、第２の誘電体層６１を保護層６１と称する。
【０２９３】
図５１Ｂに示す第１の導波路１は、位相シフタとして機能する。光スキャンデバイスは、第１の導波路１の屈折率を変調させることによって光導波層２０に導入される光の位相を変化させる第２調整素子をさらに備える。第１の導波路１が熱光学材料を含む場合、第２調整素子は、ヒーター６８を含む。第２調整素子は、ヒーター６８から発する熱によって第１の導波路１の屈折率を変調させる。

【０２９４】
ヒーター６８に含まれる金属などの配線材料は、光を吸収、散乱または反射し得る。保護層６１は、第１の導波路１とヒーター６８とを遠ざけることによって、第１の導波路１における導波光のロスを抑制する。
【０２９５】
保護層６１は、調整層５１と同じ材料（例えば$SiO_2$）で形成されてもよい。保護層６１は、第１の導波路１だけでなく、第２の導波路１０の少なくとも一部を覆っていてもよい。その場合、第１のミラー３０の少なくとも一部が保護層６１で覆われる。保護層６１は、第２の導波路１０のみを覆っていてもよい。保護層６１が透明材料であれば、第２の導波路１０から出射される光は、保護層６１を透過する。このため、光の損失を小さく抑えることができる。
【０２９６】
図５２は、第２のミラー４０が第１の導波路１と基板５０との間の領域に配置されていない構成例を示す図である。この例における調整層５１は、第１の導波路１と基板５０との間に拡がっている。調整層５１は、第１の導波路１および基板５０に接している。第２のミラー４０が第１の導波路１の下にないため、第１の導波路１における導波光は、第２のミラー４０の影響を受けない。
【０２９７】
図５３は、図５１Ｂの構成例と比較して、第２のミラー４０が第１の導波路１と基板５０との間において薄くなっている構成例を示す図である。この例のように、第２のミラー４０は、第１の導波路１と基板５０との間において、第２の導波路１０と基板５０との間における第２のミラー４０の厚さよりも薄い箇所を有していてもよい。第１の導波路１と第２のミラー４０との間には、調整層５１が配置されている。このような構造により、第１の導波路１における導波光は、第２のミラー４０の影響を受けにくくなる。図５３の例では、図５２の例と比較して、第１の導波路１と光導波層２０との接続箇所において第２のミラー４０によって生じる段差が小さい。したがって、加工がより容易である。
【０２９８】
第２のミラー４０の厚さは、導波路１に沿って変化していてもよい。以下、そのような例を説明する。
【０２９９】
図５４Ａは、第２のミラー４０の厚さが段階的に変化する構成例を示す図である。第１の導波路１と基板５０との間において、第２のミラー４０の厚さは、第１の導波路１に沿って変化している。
【０３００】
図５４Ａの例では、第１の導波路１の左の部分の下には、第２のミラー４０が存在しない。第１の導波路１の左の部分は、光導波層２０よりも低い位置にある。一方、第１の導波路１の右の部分、すなわち光導波層２０に接続される部分の下には、第２のミラー４０が存在する。第１の導波路１の右の部分は、光導波層２０と同程度の高さに位置する。保護層６１の厚さを調整することにより、保護層６１の上面を平らにすることができる。
【０３０１】
図５４Ａの構成例では、保護層６１の上に配置されたヒーター６８は、第１の導波路１から十分に離れている。したがって、第１の導波路１における導波光は、ヒーター６８の配線による影響を受けにくい。このため、第１の導波路１における導波光のロスは抑制される。
【０３０２】
図５４Ｂは、上部電極６２ｂ、第１のミラー３０、および第２の基板５０Ｃが、第１の導波路１における保護層６１と、第２の導波路１０における光導波層２０との上に跨って配置されている構成例を示す図である。図５４Ｃは、図５４Ｂの構成例の製造過程の一部を示す図である。
【０３０３】

図５４Ｂの例において、上部電極６２ｂ、第１のミラー３０、および第２の基板５０Ｃを含む構造体（以下、「上部構造体」と称する。）と、上部電極６２ｂよりも下の構造体（以下、「下部構造体」と称する。）とは、別々に製造される。

【０３０４】

下部構造体の製造については、まず、第１の基板５０の上に、傾斜を有する第２のミラー４０が形成される。第２のミラー４０における傾斜を含む部分に、調整層５１、導波路１の層、および保護層６１がこの順に形成される。第２のミラー４０における平らな部分に、下部電極６２ａおよび光導波層２０が形成される。

【０３０５】

上部構造体は、第２の基板５０Ｃの上に、第１のミラー３０および上部電極６２ｂをこの順で積層することによって作製される。上部構造体は、図５４Ｃに示すように、上下を反転させ、下部構造体の上に貼り付けられる。以上の製造方法によれば、第１の導波路１および第２の導波路１０の精密な　位置合わせを不要にできる。

【０３０６】

保護層６１の上面、すなわち、第１の導波路１に接する表面とは反対側の表面は、第２の導波路１０における光導波層２０の上面よりも低い。第１の導波路１におけるヒーター６８の上面は、第２の導波路１０における光導波層２０の上面と、ほぼ同じ高さである。この場合、上部構造体と下部構造体とを、段差なく貼り合わせることができる。上部構造体は、蒸着またはスパッタリングなどの方法によって形成してもよい。

【０３０７】

図５５は、図５４Ｂに示す構造を有する光スキャンデバイスにおける複数の第２の導波路１０のＹＺ面断面を示す図である。この例では、第１のミラー３０、第２のミラー４０、および電極６２ａ、６２ｂは、複数の第２の導波路１０によって共用されている。共通の電極６２ａ、６２ｂの間に、複数の光導波層２０が配置されている。複数の光導波層２０の間の領域は、スペーサ７３である。スペーサ７３は、例えば、空気（または、真空）、$SiO_2$、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、ＳｉＮまたはＡｌＮなどの透明材料である。スペーサ７３が固体材料であれば、上部構造体を蒸着またはスパッタリングなどの方法によって形成することができる。スペーサ７３は、隣接する光導波層２０の両方に直接接触していてもよい。

【０３０８】

第１の導波路１は、光の全反射を利用する一般的な導波路である必要はない。例えば、第１の導波路１は、第２の導波路１０と同様の反射型導波路であってもよい。

【０３０９】

図５６は、第１の導波路１および第２の導波路１０が、反射型導波路である構成例を示す図である。第１の導波路１は、対向する２つの多層反射膜３、４０に挟まれている。第１の導波路１は、第２の導波路１０と同じ原理で、光を伝搬させる。多層反射膜３の厚さが十分に大きければ、第１の導波路１から光は出射しない。

【０３１０】

図５６の構成例では、図２０および図２１などを参照して説明したように、２つの反射型導波路の接続条件を最適化することで、光の結合効率を高くすることができる。そのような最適化により、第１の導波路１から第２の導波路１０へ効率よく光を導入することができる。

【０３１１】

次に、一対の電極６２ａ、６２ｂの配置の変形例を説明する。図５０Ａ～図５６の例では、一対の電極６２ａ、６２ｂは、第２の導波路１０における光導波層２０に接触している。図５０Ｃおよび図５５の例では、電極６２ａ、６２ｂの一方または両方が、複数の第２の導波路１０によって共用されている。電極６２ａ、６２ｂの構成は、このような構成に限定されない。

【０３１２】

図５７は、上部電極６２ｂが第１のミラー３０の上に配置されており、下部電極６２ａ

が第２のミラー４０の下に配置されている構成例を示す図である。第１のミラー３０は、上部電極６２ｂと光導波層２０との間に配置されている。第２のミラー４０は、下部電極６２ａと光導波層２０との間に配置されている。この例のように、一対の電極６２ａ、６２ｂは、光導波層２０を、第１および第２のミラー３０および４０を介して、間接的に挟んでいてもよい。

【０３１３】

図５７の例において、下部電極６２ａは、第１の導波路１の側にまで延びている。下部電極６２ａから配線を取り出すときに、第１の導波路１０の下のスペースを用いることができる。よって配線の設計の自由度が増す。

【０３１４】

この例では、一対の電極６２ａ、６２ｂは、光導波層２０に接触していない。光導波層２０における導波光は、一対の電極６２ａ、６２ｂによる吸収、散乱または反射などの影響を受けにくい。このため、光導波層２０における導波光のロスが抑制される。

【０３１５】

図５８は、さらに他の変形例を示す断面図である。この例では、第１の導波路１は、第１の部分１ａと第２の部分１ｂとに分離されている。第１の部分１ａは、相対的に低い位置にあり、第２の導波路１０から離れている。第２の部分１ｂは、相対的に高い位置にあり、第２の導波路１０の光導波層２０に繋がっている。第１の部分１ａおよび第２の部分１ｂは、＋Ｚ方向から見たときに重なる部分を有する。第１の部分１ａおよび第２の部分１ｂは、Ｘ方向に略平行に延びている。この例では、調整層５１も、２つの部分５１ａ、５１ｂに分離されている。調整層の第１の部分５１ａは、第１の導波路の第１の部分１ａと下部電極６２ａとの間に配置されている。調整層の第２の部分５１ｂは、第１の導波路の第２の部分１ｂと第２のミラー４０との間に配置されている。保護層６１は、第１の導波路の第１の部分１ａおよび第２の部分１ｂの上に配置されている。第１の導波路の第１の部分１ａの一部と、第１の導波路の第２の部分１ｂの一部とが、保護層６１を介して対向している。電極６２ａ、６２ｂの配置は、図５７における配置と同様である。

【０３１６】

図５８に示す構成では、第１の導波路の第１の部分１ａおよび第２の部分１ｂの間隔、すなわちＺ方向における距離は、導波路内での光の波長以下である。この場合、エバネッセント結合により、第１の部分１ａから第２の部分１ｂへ光を伝搬させることができる。この例では、図５４Ａの例とは異なり、第２のミラー４０の厚さを第１の導波路１ａ、１ｂに沿って変化させる必要はない。

【０３１７】

図５９は、電極６２が、隣り合う２つの光導波層２０の間に配置されている構成例を示す図である。この例における調整素子は、複数の電極６２を有し、これらの電極６２に正負（図中では＋および－で表示）の電圧を交互に印加する。これにより、各光導波層２０の内部に、図５９における左右方向の電界を発生させることができる。

【０３１８】

図５９の例では、Ｙ方向において隣り合う２つの電極６２は、その間の光導波層２０の少なくとも一部に接触している。光導波層２０と電極６２との接触領域の面積は小さい。したがって、電極６２が光を吸収、散乱または反射する材料であっても、光導波層２０における導波光のロスを抑制することができる。

【０３１９】

図５０Ａ～図５９の構成例では、スキャンに用いられる光は、第１のミラー３０を通して出射される。スキャンに用いられる光は、第２のミラー４０を通して出射されてもよい。

【０３２０】

図６０は、第１のミラー３０が厚く、第２のミラー４０が薄い構成の例を示す図である。図６０の例では、光は第２のミラー４０を透過して基板５０の側から出射される。この例における基板５０は、透光性を有する材料によって構成される。基板５０から出射され

る光をスキャンに用いることにより、光スキャンデバイスの設計の自由度が増す。

【０３２１】

＜ミラーの幅に関する検討＞

図６１は、本実施形態おける、複数の導波路素子１０をＹ方向に配列した導波路アレイ１０Ａの構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。図６１の構成例では、Ｙ方向において、第１のミラー３０の幅は、光導波層２０の幅よりも長い。第２のミラー４０は、複数の導波路素子１０によって共用されている。言い換えれば、各導波路素子１０における第２のミラー４０は、１つの繋がったミラーの一部である。第１のミラー３０、光導波層２０の端面からＹ方向に突出する部分を有する。Ｙ方向における当該突出する部分の寸法を、$y_1$とする。Ｙ方向における、光導波層２０の端面からの距離を、ｙとする。ｙ＝０は、光導波層２０の端面に相当する。

【０３２２】

導波光が光導波層２０内をＸ方向に伝搬するとき、Ｙ方向において、光導波層２０からエバネッセント光が染み出す。Ｙ方向における当該エバネッセント光の光強度Ｉは、以下の式で表される。

【数１７】

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) \qquad (23)$$

【０３２３】

ただし、光導波層２０からのエバネッセント光の光強度が、光導波層２０の端面における光導波層２０からのエバネッセント光の光強度の１／ｅになる位置の、光導波層２０の端面からのＹ方向における距離を、$y_d$とするとき、$y_d$は以下の式を満たす。

【数１８】

$$y_d = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{n_w^2 \sin^2\theta_{in} - n_{low}^2}} \qquad (24)$$

【０３２４】

$I_0$は、ｙ＝０における、当該エバネッセント光の光強度である。全反射角$\theta_{in}$は、図１１に示されている。ｙ＝$y_d$において、当該エバネッセント光の光強度Ｉは、$I_0$の１／ｅになる。ｅは、自然対数の底である。

【０３２５】

簡単のため、図１１に示すように、光導波層２０内における導波光を、光線として近似する。図６１の構成例に示すように、第１のミラー３０がｙ＞$y_1$において存在しない場合、ｙ＝０における導波光の１回の反射による光の漏れまたは光ロス（$L_{loss}$）は、以下の式で表される。

【数１９】

$$L_{loss} = \frac{\int_{y_1}^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) dy}{\int_0^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{y}{y_d}\right) dy} = \exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right) \qquad (25)$$

【０３２６】

式（４）に示すように、導波路素子１０からの出射光の広がり角$\theta_{div}$を、０．１°以下にするためには、導波路素子１０のＸ方向における伝搬長Ｌは、１ｍｍ以上であることが望ましい。このとき、Ｙ方向における光導波層２０の幅をａとすると、図１１において、±Ｙ方向における全反射の回数は、１０００／（ａ・ｔａｎ$\theta_{in}$）以上である。ａ

＝１μｍおよびθ$_{in}$＝４５°においては、全反射の回数は１０００回以上である。１回の反射における光ロスを表す式（２５）を用いると、β回の反射における光ロスは、以下の式で表される。

【数２０】

$$L_{loss}^{(\beta)} = 1 - \left\{1 - \exp\left(-\frac{y_1}{y_d}\right)\right\}^{\beta} \qquad (26)$$

【０３２７】

図６２は、β＝１０００の場合における、光ロス（$L_{loss}^{(\beta)}$）の割合および$y_1$の関係を示す図である。縦軸は、光ロスの割合であり、横軸は$y_1$である。図６２に示すように、光ロスの割合を５０％以下にするために、例えば、$y_1 \geqq 7y_d$が満たされる。同様に、光ロスの割合を１０％以下にするために、例えば、$y_1 \geqq 9y_d$が満たされる。光ロスの割合を１％以下にするために、例えば、$y_1 \geqq 11y_d$が満たされる。

【０３２８】

式（２５）に示すように、原理的には、$y_1$を大きくすることで、光ロスを低減することができる。しかし、光ロスは、ゼロではない。

【０３２９】

図６３は、本実施形態おける、導波路素子１０をＹ方向に配列した導波路アレイ１０Ａの別の構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。図６３の構成例では、第１および第２のミラー３０および４０は、複数の導波路素子１０によって共用されている。言い換えれば、各導波路素子１０における第１のミラー３０は、１つの繋がったミラーの一部であり、各導波路素子１０における第２のミラー４０は、１つの繋がった他のミラーの一部である。これにより、原理的に光ロスを最小化することができる。各導波路素子１０における第１のミラー３０が、１つの繋がったミラーの一部であれば、原理的に第１のミラー３０からの光ロスを最小化することができる。各導波路素子１０における第２のミラー４０が、１つの繋がったミラーの一部であれば、原理的に第１のミラー４０からの光ロスを最小化することができる。

【０３３０】

次に、図１０および図６３の構成例における光導波層２０からのエバネッセント光の漏れ出しを、数値計算を用いて比較する。

【０３３１】

図６４Ａは、図１０の構成例における、電界強度分布の計算結果を示す図である。図６４Ｂは、図６３の構成例における、電界強度分布の計算結果を示す図である。数値計算には、Ｓｙｎｏｐｓｙｓ社のＦｅｍＳｉｍを用いた。図６４Ａおよび図６４Ｂにおいて、Ｙ方向における光導波層２０の幅は、１．５μｍであり、Ｚ方向における光導波層２０の厚さは、１μｍであり、光の波長は、１．５５μｍであり、$n_w$＝１．６８および$n_{low}$＝１．４４である。$n_w$および$n_{low}$のこの組み合わせは、例えば、光導波層２０に含まれる液晶材料を、$SiO_2$のスペーサ７３によって閉じ込める場合に相当する。

【０３３２】

図６４Ａに示すように、図１０の構成例では、第１のミラー３０が存在しない領域から、エバネッセント光が漏れ出ることがわかる。一方、図６４Ｂに示すように、図６３の構成例では、そのようなエバネッセント光の漏れ出しは無視することができる。図６４Ａおよび図６４Ｂにおいて、導波光がＸ方向に伝搬する際、第１のミラー３０からの光出射およびエバネッセント光の漏れ出しにより、導波光の光強度は減少する。当該導波光の光強度が１／ｅになる、Ｘ方向における光の伝搬長を計算すると、当該光の伝搬長は、図６４Ａおよび図６４Ｂにおいて、それぞれ７．８μｍおよび１３２μｍである。

【０３３３】

本実施形態において、スペーサ７３は、２つ以上の異なる媒質で構成されてもよい。

【０３３４】
図６５は、本実施形態において、スペーサ７３が、異なる屈折率を有するスペーサ７３ａ、７３ｂを含む構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。図６５の構成例において、光導波層２０に隣接するスペーサ７３ａの屈折率$n_{low1}$は、光導波層２０に隣接しないスペーサ７３ｂの屈折率$n_{low2}$よりも高い（$n_{low1}>n_{low2}$）。例えば、光導波層２０が液晶材料を含む場合、液晶材料を閉じ込めるために、スペーサ７３ａとして、ＳｉＯ２を用いてもよい。スペーサ７３ｂは、空気であってもよい。スペーサ７３ｂの屈折率$n_{low2}$が低ければ、光導波層２０からのエバネッセント光の染み出しを抑制することができる。
【０３３５】
図６６は、本実施形態の変形例における、導波路素子１０の構成例を模式的に示す、ＹＺ平面における光スキャンデバイスの断面図である。図６６の構成例では、光導波層２０は、ＹＺ平面において台形の断面を有する。第１のミラー３０は、光導波層２０の、上辺の上だけでなく、左右の辺の上にも配置される。これにより、光導波層２０の左右の辺からの光の漏れを抑制することができる。
【０３３６】
次に、光導波層２０およびスペーサ７３の材料を説明する。
【０３３７】
図６１、図６３および図６５の構成例において、光導波層２０の屈折率$n_w$とスペーサ７３の屈折率$n_{low}$とは、$n_w>n_{low}$の関係を満たす。すなわち、スペーサ７３は、光導波層２０よりも屈折率が低い材料を含む。例えば、光導波層２０が電気光学材料を含む場合、スペーサ７３は、$SiO_2$、$TiO_2$、$Ta_2O_5$、ＳｉＮ、ＡｌＮまたは空気などの透明材料を含んでもよい。光導波層２０が液晶材料を含む場合、スペーサ７３は、$SiO_2$または空気などを含んでもよい。光導波層２０を一対の電極で挟み、電圧を印加することにより、電気光学材料または液晶材料を含む光導波層２０の屈折率を変化させることができる。これにより、第１のミラー３０から出射される光の出射角度を変化させることができる。光導波層２０が液晶材料または電気光学材料を含む場合における、光スキャンデバイスの詳細な駆動方法などは、前述の通りである。
【０３３８】
電気光学材料は、以下の化合物のいずれかであってもよい。
・ＫＤＰ（$KH_2PO_4$）型結晶・・・例えば、ＫＤＰ、ＡＤＰ（$NH_4H_2PO_4$）、ＫＤＡ（$KH_2AsO_4$）、ＲＤＡ（$RbH_2PO_4$）、またはＡＤＡ（$NH_4H_2AsO_4$）・立方晶系材料・・・例えば、ＫＴＮ、$BaTiO_3$、$SrTiO_3$$Pb_3MgNb_2O_9$、ＧａＡｓ、ＣｄＴｅ、またはＩｎＡｓ・正方晶系材料・・・例えば、$LiNbO_3$または$LiTaO_3$
・せん亜鉛鉱型材料・・・例えば、ＺｎＳ、ＺｎＳｅ、ＺｎＴｅ、ＧａＡｓ、またはＣｕＣｌ
・タングステンブロンズ型材料・・・$KLiNbO_3$、$SrBaNb_2O_6$、ＫＳｒＮｂＯ、ＢａＮａＮｂＯ、$Ca_2Nb_2O_7$
【０３３９】
液晶材料は、例えばネマチック液晶であり得る。ネマチック液晶の分子構造は、以下のとおりである。
Ｒ１－Ｐｈ１－Ｒ２－Ｐｈ２－Ｒ３
【０３４０】
ここで、Ｒ１は、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル、シアノ基、アミン基、ニトロ基、ニトリル基、およびアルキル鎖からなる群から選択される何れか１つを表す。Ｒ３は、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル、シアノ基、アミン基、ニトロ基、ニトリル基、およびアルキル鎖からなる群から選択される何れか一つを表す。Ｐｈ１は、フェニル基またはビフェニル基等の芳香族基を表す。Ｐｈ２は、フェニル基またはビフェニル基等の芳香族基を表す。Ｒ２は、ビニル基、カルボニル基、カルボキシル基、ジアゾ基、およ

びアゾキシ基からなる群から選択される何れか一つを表す。

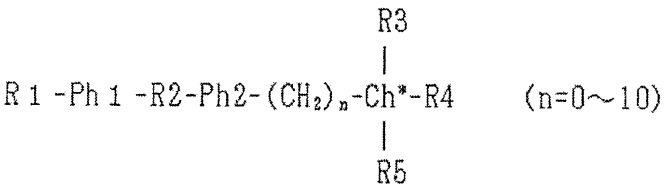
【０３４１】

液晶は、ネマチック液晶に限定されない。例えば、スメクチック液晶を用いてもよい。液晶は、スメクチック液晶の中でも、例えばスメクチックＣ相（ＳｍＣ相）であってもよい。スメクチック液晶は、スメクチックＣ相（ＳｍＣ相）の中でも、例えば液晶分子内にキラル中心（例えば、不斉炭素）を有し強誘電性液晶であるカイラルスメクチック相（ＳｍＣ＊相）あってもよい。

【０３４２】

ＳｍＣ＊相の分子構造は、以下のように表される。

【化１】




【０３４３】

Ｒ１、Ｒ４は、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル基、シアノ基、アミン基、ニトロ基、ニトリル基、およびアルキル鎖からなる群から選択される何れか一つである。Ｐｈ１は、フェニル基またはビフェニル基等の芳香族基である。Ｐｈ２は、フェニル基またはビフェニル基等の芳香族基である。Ｒ２は、ビニル基、カルボニル基、カルボキシル基、ジアゾ基、およびアゾキシ基からなる群から選択される何れか一つである。Ｃｈ＊はキラル中心を表す。キラル中心は典型的には炭素（Ｃ＊）である。Ｒ３は、水素、メチル基、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル基、シアノ基、アミン基、ニトロ基、ニトリル基、およびアルキル鎖からなる群から選択される何れか一つである。Ｒ５は、水素、メチル基、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル基、シアノ基、アミン基、ニトロ基、ニトリル基、およびアルキル鎖からなる群から選択される何れか一つである。Ｒ３、Ｒ４、およびＲ５は、互いに異なる官能基である。

【０３４４】

液晶材料は、組成の異なる複数の液晶分子の混合物であってもよい。例えば、ネマチック液晶分子と、スメクチック液晶分子との混合物を光導波層２０の材料として用いてもよい。

【０３４５】

図６３および図６５の構成例を、第１のミラー３０と、それ以外の構成とを貼り合わせることによって形成してもよい。これにより、製造が容易になる。また、スペーサ７３が固体材料であれば、第１のミラー３０を蒸着またはスパッタリングなどの方法によって形成してもよい。

【０３４６】

図６１、図６３および図６５の構成例において、第２のミラー４０が複数の導波路素子１０によって共用されていることを前提に、第１のミラー３０の構成を説明した。当然、上記の議論は、第２のミラー４０にも適用できる。すなわち、Ｙ方向において、第１および第２のミラー３０および４０の少なくとも一方の幅が、光導波層２０の幅よりも長ければ、光導波層２０からのエバネッセント光の漏れ出しを抑制することができる。その結果、光スキャンに用いられる光量の低下は抑制される。

【０３４７】

＜応用例＞

図６７は、回路基板（たとえば、チップ）上に光分岐器９０、導波路アレイ１０Ａ、位相シフタアレイ８０Ａ、および光源１３０などの素子を集積した光スキャンデバイス１００の構成例を示す図である。光源１３０は、例えば、半導体レーザーなどの発光素子であり得る。この例における光源１３０は、自由空間における波長がλである単一波長の光を

出射する。光分岐器９０は、光源１３０からの光を分岐して複数の位相シフタにおける導波路に導入する。図６７の構成例において、チップ上には電極６２ａと、複数の電極６２ｂとが設けられている。導波路アレイ１０Ａには、電極６２ａから制御信号が供給される。位相シフタアレイ８０Ａにおける複数の位相シフタ８０には、複数の電極６２ｂから制御信号がそれぞれ送られる。電極６２ａ、６２ｂは、上記の制御信号を生成する不図示の制御回路に接続され得る。制御回路は、図６７に示すチップ上に設けられていてもよいし、光スキャンデバイス１００における他のチップに設けられていてもよい。

【０３４８】

図６７に示すように、全てのコンポーネントをチップ上に集積することで、小型のデバイスで広範囲の光スキャンが実現できる。例えば２ｍｍ×１ｍｍ程度のチップに、図６７に示される全てのコンポーネントを集積することができる。

【０３４９】

図６８は、光スキャンデバイス１００から遠方にレーザーなどの光ビームを照射して２次元スキャンを実行している様子を示す模式図である。２次元スキャンは、ビームスポット３１０を水平および垂直方向に移動させることによって実行される。例えば、公知のＴＯＦ（Ｔｉｍｅ　Ｏｆ　Ｆｌｉｇｈｔ）法と組み合わせることで、２次元の測距画像を取得することができる。ＴＯＦ法は、レーザーを照射して対象物からの反射光を観測することで、光の飛行時間を算出し、距離を求める方法である。

【０３５０】

図６９は、そのような測距画像を生成することが可能な光検出システムの一例であるＬｉＤＡＲシステム３００の構成例を示すブロック図である。ＬｉＤＡＲシステム３００は、光スキャンデバイス１００と、光検出器４００と、信号処理回路６００と、制御回路５００とを備えている。光検出器４００は、光スキャンデバイス１００から出射され、対象物から反射された光を検出する。光検出器４００は、例えば光スキャンデバイス１００から出射される光の波長λに感度を有するイメージセンサ、またはフォトダイオードなどの受光素子を含むフォトディテクタであり得る。光検出器４００は、受光した光の量に応じた電気信号を出力する。信号処理回路６００は、光検出器４００から出力された電気信号に基づいて、対象物までの距離を計算し、距離分布データを生成する。距離分布データは、距離の２次元分布を示すデータ（すなわち、測距画像）である。制御回路５００は、光スキャンデバイス１００、光検出器４００、および信号処理回路６００を制御するプロセッサである。制御回路５００は、光スキャンデバイス１００からの光ビームの照射のタイミングおよび光検出器４００の露光および信号読出しのタイミングを制御し、信号処理回路６００に、測距画像の生成を指示する。

【０３５１】

２次元スキャンにおいて、測距画像を取得するフレームレートとして、例えば一般的に動画でよく使われる６０ｆｐｓ、５０ｆｐｓ、３０ｆｐｓ、２５ｆｐｓ、２４ｆｐｓなどから選択することができる。また、車載システムへの応用を考慮すると、フレームレートが大きいほど測距画像を取得する頻度が上がり、精度よく障害物を検知できる。例えば、６０ｋｍ／ｈでの走行時において、６０ｆｐｓのフレームレートでは車が約２８ｃｍ移動するごとに画像を取得することができる。１２０ｆｐｓのフレームレートでは、車が約１４ｃｍ移動するごとに画像を取得することができる。１８０ｆｐｓのフレームレートでは車が、約９．３ｃｍ移動するごとに、画像を取得することができる。

【０３５２】

１つの測距画像を取得するために必要な時間は、ビームスキャンの速度に依存する。例えば、解像点数が１００×１００のイメージを６０ｆｐｓで取得するためには１点につき１．６７μｓ以下でビームスキャンをする必要がある。この場合、制御回路５００は、６００ｋＨｚの動作速度で、光スキャンデバイス１００による光ビームの出射、および光検出器４００による信号蓄積・読出しを制御する。

【０３５３】

＜光受信デバイスへの応用例＞

本開示における光スキャンデバイスは、ほぼ同一の構成で、光受信デバイスとしても用いることができる。光受信デバイスは、光スキャンデバイスと同一の導波路アレイ１０Ａと、受信可能な光の方向を調整する第１調整素子６０とを備える。導波路アレイ１０Ａは、第３の方向から入射した光を複数の導波路素子１０によって受ける。より具体的には、導波路アレイ１０Ａの各第１のミラー３０は、第３の方向から第１の反射面の反対側に入射する光を導波路アレイ１０Ａの各光導波層２０に透過させる。導波路アレイ１０Ａの各光導波層２０は、受けた光、すなわち第２の方向に第１のミラー３０を透過した光を伝搬させる。第１調整素子６０が各導波路素子１０における前記光導波層２０の屈折率および厚さの少なくとも一方を変化させることにより、受信可能な光の方向である第３の方向を変化させることができる。さらに、光受信デバイスが、光スキャンデバイスと同一の複数の位相シフタ８０、または８０ａおよび８０ｂと、複数の導波路素子１０から複数の位相シフタ８０、または８０ａおよび８０ｂを通過して出力される光の位相の差をそれぞれ変化させる第２調整素子を備えている場合には、受信可能な光の方向を２次元的に変化させることができる。

【０３５４】

例えば図６７に示す光スキャンデバイス１００における光源１３０を受信回路に置換した光受信デバイスを構成することができる。導波路アレイ１０Ａに波長λの光が入射すると、その光は位相シフタアレイ８０Ａを通じて光分岐器９０へ送られ、最終的に一箇所に集められ、受信回路に送られる。その一箇所に集められた光の強度は、光受信デバイスの感度を表すといえる。光受信デバイスの感度は、導波路アレイおよび位相シフタアレイ８０Ａに別々に組み込まれた調整素子によって調整することができる。光受信デバイスでは、例えば図２６において、波数ベクトル（図中の太い矢印）の方向が反対になる。入射光は、導波路素子１０が延びる方向（図中のＸ方向）の光成分と、導波路素子１０の配列方向（図中のＹ方向）の光成分とを有している。Ｘ方向の光成分の感度は、導波路アレイ１０Ａに組み込まれた調整素子によって調整できる。一方、導波路素子１０の配列方向の光成分の感度は、位相シフタアレイ８０Ａに組み込まれた調整素子によって調整できる。光受信デバイスの感度が最大になるときの光の位相差Δφ、光導波層２０の屈折率$n_w$および厚さｄから、θおよび$\alpha_0$（式（１６）および式（１７））がわかる。このため、光の入射方向を特定することができる。

【０３５５】

上述した実施形態および変形例は、適宜、組み合わせることができる。例えば、図６１に示した第１のミラー３０を他の実施例または変形例の第１のミラー３０の代わりに用いてもよい。また、図６５に示した導波路素子１０を他の実施例または変形例の導波路素子１０の代わりに用いてもよい。

【０３５６】

（光スキャンシステムの実施形態）

次に、上記のような光スキャンデバイスと、受光デバイスとを備えた光スキャンシステムの実施形態を説明する。

【０３５７】

本実施形態における光スキャンシステムは、光スキャンデバイスと、受光デバイスとを備える。光スキャンデバイスは、出射光の方向を変化させることが可能な発光デバイスである。

【０３５８】

光スキャンデバイスは、第１の導波路アレイと、第１の調整素子とを備える。第１の導波路アレイは、光を伝搬させながら伝搬方向に交差する方向に光を出射する複数の第１の導波路を含む。第１の調整素子は、複数の第１の導波路の各々を伝搬する光の位相を調整することにより、発光方向を変化させる。

【０３５９】

受光デバイスは、第２の導波路アレイと、第２の調整素子とを備える。第２の導波路アレイは、光スキャンデバイスから出射され対象物によって反射された光が入射する位置に

配置され、受けた光を伝搬させて出力する複数の第２の導波路を含む。第２の調整素子は、複数の第２の導波路の各々を伝搬する光に位相シフトを与えることにより、受光方向を変化させる。

【０３６０】

光スキャンデバイスにおける複数の第１の導波路の配列間隔は、受光デバイスにおける複数の第２の導波路の配列間隔とは異なっている。

【０３６１】

本実施形態によれば、比較的簡単な構成で、光による１次元スキャンまたは２次元スキャンを行いながら、対象領域の情報を取得することができる。例えば、対象領域の距離画像データを取得することができる。

【０３６２】

図７４は、本実施形態における光スキャンシステム３００の構成例を模式的に示す図である。光スキャンシステム３００は、光スキャンデバイス１００と、受光デバイス２００と、フィルタ２５０と、制御回路５００とを備える。光スキャンシステム３００は、例えば図６９に示す信号処理回路６００などの構成要素も備え得るが、図７４では省略されている。

【０３６３】

光スキャンデバイス１００は、出射光の方向を変化させることが可能な導波路アレイ１０Ａと、不図示の調整素子を備える。光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａは、入力された光を伝搬させて出射する複数の導波路を含む。光スキャンデバイス１００の表面のうち、導波路アレイ１０Ａが配置された部分を、「発光面」と称する。

【０３６４】

受光デバイス２００は、受光を行う導波路アレイ２０Ａと、不図示の調整素子とを備える。受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａは、光スキャンデバイスから出射され対象物１５０によって反射された光が入射する位置に配置される。受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａは、受けた光を伝搬させて出力する複数の導波路を含む。受光デバイス２００の表面のうち、導波路アレイ２０Ａが配置された部分を「受光面」と称する。

【０３６５】

導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの各々は、前述のいずれかの例における導波路素子アレイと同様の構成を備えていてもよいし、異なる構成を備えていてもよい。例えば、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの各々は、後述するように、表面にグレーティングを有する誘電体導波路のアレイであってもよい。

【０３６６】

フィルタ２５０は、光スキャンデバイス１００から出射され受光デバイス２００によって受光される光の経路上に配置される。フィルタ２５０は、例えば、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの両方を覆う位置に配置され得る。フィルタ２５０は、受光側の導波路アレイ２０Ａのみを覆っていてもよい。フィルタ２５０は、光スキャンデバイス１００から出射される光の波長域に含まれる特定の波長域の光を選択的に透過させる。これにより、外乱光の影響を低減することができる。図７４において、外乱光は点線で示されている。上記特定の波長域に含まれない波長の外乱光は、フィルタ２５０によって反射される。

【０３６７】

制御回路５００は、光スキャンデバイス１００および受光デバイス２００に接続されている。制御回路５００は、光スキャンデバイス１００および受光デバイス２００を同期して制御する。光スキャンデバイス１００からの光の出射と、受光デバイス２００における対象物からの反射光の受光を同期させることにより、どの方向に出射された光が、反射光として戻ってきたかを把握することができる。また、出射方向の変化に伴い、受光感度が最大になるように受光方向を変化させることができる。具体的には、制御回路５００は、光スキャンデバイス１００における調整素子を介して、導波路アレイ１０Ａにおける各導波路の光学特性を変化させる。これにより、制御回路５００は、光スキャンデバイス１０

０からの光の出射方向を変化させる。一方、制御回路５００は、受光デバイス２００における調整素子を介して、導波路アレイ２０Ａにおける各導波路の光学特性を変化させる。これにより、制御回路５００は、受光デバイス２００によって受光可能な光の方向（以下、「受光方向」と称する。）を変化させる。「受光方向」は、導波路アレイ２０Ａにおける複数の導波路から出力される光を合成した場合に、その合成光が強め合うときの光の入射方向を意味する。

【０３６８】

図７４に示す例では、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａと、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａとは、近接して配置されている。例えば、光スキャンデバイス１００における発光面の中心と、受光デバイス２００における受光面の中心との距離は、２０ｍｍ以下である。このように両者が近接している場合、制御回路５００は、光スキャンデバイス１００から出射される光の出射角度と、受光デバイス２００によって受光される光の入射角度とを実質的に一致させることが容易になる。光スキャンデバイスからの出射光の出射角度が、受光デバイスにおける反射光の入射角度と実質的に一致すれば、光スキャンデバイスから対象物まで方向を、容易に知ることができる。光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａと、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａとの位置が離れている場合、制御回路５００は、光スキャンデバイス１００から出射される光の出射角度と、受光デバイス２００によって受光される光の入射角度とを異なる値に設定する必要がある。

【０３６９】

例えば、光スキャンデバイス１００の導波路アレイ１０Ａにおける複数の導波路の各々の光出射面（出射光が出射される側の面）は、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあってもよい。すなわち、第１の平面内に、導波路アレイ１０Ａの複数の導波路が有する複数の光出射面が含まれる。また、受光デバイス２００の導波路アレイ２０Ａにおける複数の導波路の各々の光入射面（反射光が入射する側の面）は、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にあってもよい。すなわち、第２の平面内に、導波路アレイ２０Ａの複数の導波路が有する複数の光入射面が含まれる。この場合、第１の平面内で導波路アレイ１０Ａの複数の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心と第２の仮想平面内で導波路アレイ２０Ａの複数の導波路を囲む最小の仮想的な四角形の中心の間の距離は２０ｍｍ以下であってもよい。

【０３７０】

図７５を参照しながら、光スキャンデバイス１００から出射される光の出射角度と、受光デバイスによって受光される光の入射角度とが「実質的に一致する」といえるための条件を説明する。

【０３７１】

図７５は、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａ、および受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａの配置例を示す図である。図７５において、フィルタ２５０および制御回路５００の図示は省略されている。

【０３７２】

光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａの中心から、導波路アレイ１０Ａの発光面に垂直な方向に離れて対象物１５０が位置しているとする。導波路アレイ１０Ａと対象物１５０との距離を$R_1$とし、導波路アレイ１０Ａの中心と、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａの中心との距離をＸとする。導波路アレイ１０Ａの中心は、発光面の中心に一致する。導波路アレイ２０Ａの中心は、受光面の中心に一致する。このとき、受光デバイス２００によって受光される光の入射角度$\theta_2$は、$\tan\theta_2 = X / R_1$を満たす。入射角度$\theta_2$が、受光デバイス２００の受光の広がり角度$\Delta\alpha_2$の半分よりも小さければ、受光デバイス２００は、対象物１５０によって反射された光を受光することができる。受光の広がり角度$\Delta\alpha_2$は、式（２０）と同様の式で表される。例えば、広がり角度$\Delta\alpha_2$が２°のとき、Ｘは、$R_1 \times \tan(\Delta\alpha_2 / 2)$　０．０２$R_1$以下に設定する。例えば、$R_1$が１ｍの場合、Ｘを２０ｍｍ以下に設定する。Ｘが２０ｍｍ以

下であれば、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａは、発光デバイス１００における導波路アレイ１０Ａから１ｍ以上離れた対象物１５０からの反射光を問題なく受光することができる。

【０３７３】

このように、本明細書において、光スキャンデバイス１００から出射される光の出射角度と、受光デバイスによって受光される光の入射角度とが「実質的に一致する」とは、光スキャンデバイス１００から出射される光の出射角度と、受光デバイスによって受光される光の入射角度との差が、受光デバイス２００が受光可能な光の広がり角度$\Delta\alpha_2$の半分よりも小さいことを意味する。

【０３７４】

光スキャンデバイス１００から出射される光には、例えば測距用の変調信号が重畳される。制御回路５００は、光スキャンデバイス１００と受光デバイス２００とを同期して制御する。制御回路５００は、光スキャンデバイス１００からの光の出射方向を変化させ、その変化に同期して受光デバイス２００の受光方向を制御する。制御回路５００または信号処理回路６００（図６９参照）は、反射光に重畳された変調信号から距離情報を得ることにより、測距イメージを得ることができる。

【０３７５】

次に、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａにおける高次回折光の影響を説明する。

【０３７６】

図７６は、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａ、および受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａから出射し得る回折光の例を示す図である。導波路アレイ１０Ａからは０次光だけでなく、±１次回折光などの高次の回折光も出射する。導波路アレイ２０Ａは受信用であるが、導波路アレイ２０における各導波路に光を伝搬させたと仮定すると、図７６において破線矢印で示されるように、０次光および±１次回折光などの高次回折光が出射する。導波路アレイ２０は、図７６において破線矢印で示されている方位から到来する光のみを十分な感度で受光することができる。

【０３７７】

導波路アレイ１０Ａにおける複数の導波路の配列間隔を$p_1$とし、波路アレイ２０Ａにおける複数の導波路の配列間隔を$p_2$とする。$p_1 = p_2$の場合、受光用の導波路アレイ２０Ａは、発光用の導波路アレイ１０Ａから出射される０次回折光だけでなく、高次回折光も同時に受光してしまう。$p_1$と$p_2$とを異なる値にすることにより、高次回折光の受光を低減することができる。すなわち、光スキャンデバイス１００における複数の導波路の配列間隔と、受光デバイス２００における複数の導波路の配列間隔とが異なるようにしてもよい。

【０３７８】

ｍ次回折光（ｍは整数）の出射角度は、式（２１）と同様に、下記の式で表される。

【数２１】

$$\sin\alpha_m = \sin\alpha_0 + m\frac{\lambda}{p} \qquad (27)$$

【０３７９】

$p_1$および$p_2$が異なる場合、光スキャンデバイス１００から出射される高次回折光の出射角度と、受光デバイス２００によって受光される高次回折光の入射角度とは一致しない。このため、光スキャンデバイス１００から出射される０次回折光が受光デバイス２００によって受光されるとき、高次回折光の受光による混信を抑制することができる。

【０３８０】

次に、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの発光面および受光面の大きさが異なる例を説明する。

【０３８１】
図７７は、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａの発光面、および受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａの受光面の大きさの例を説明するための図である。図７７に示す例では、受光デバイス２００の受光面は、光スキャンデバイス１００の発光面よりも大きい。つまり、導波路アレイ２０Ａが配置された領域の面積は、導波路アレイ１０Ａが配置された領域の面積よりも大きい。この場合、受光デバイス２００は、より多くの反射光を受光することができるため、受光デバイス２００の受光感度が高くなる。
【０３８２】
例えば、光スキャンデバイス１００の導波路アレイ１０Ａにおける複数の導波路の各々の光出射面（出射光が出射される側の面）は、実質的に、同一の仮想的な第１の平面内にあってもよい。すなわち、第１の平面内に、導波路アレイ１０Ａの複数の導波路が有する複数の光出射面が含まれる。また、受光デバイス２００の導波路アレイ２０Ａにおける複数の導波路の各々の光入射面（反射光が入射する側の面）は、実質的に、同一の仮想的な第２の平面内にあってもよい。すなわち、第２の平面内に、導波路アレイ２０Ａの複数の導波路が有する複数の光入射面が含まれる。この場合、第２の平面内で導波路アレイ２０Ａの複数の導波路を囲む最小の四角形の面積は、第１の平面内で導波路アレイ１０Ａの複数の導波路を囲む最小の四角形の面積よりも大きい。
【０３８３】
次に、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａのより詳細な構成を説明する。導波路アレイ１０Ａ、２０Ａにおける各導波路は、図２などに示す反射型導波路の構造を有していてもよいが、以下の構造を有していてもよい。例えば、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの少なくとも一方は、以下に説明するフェーズドアレイの構成を有していてもよい。
【０３８４】
図７８は、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの少なくとも一方に用いられ得る１次元フェーズドアレイの構成例を示す図である。一例として、導波路アレイ１０Ａが１次元フェーズドアレイの構成を有している場合について説明する。
【０３８５】
この例における光スキャンデバイス１００は、複数の導波路を含む導波路アレイ１０Ａと、各導波路を伝搬する光の位相を調整する調整素子とを有する。複数の導波路は、Ｙ方向に配列され、各導波路は光をＸ方向に伝搬させる。この例における各導波路は、グレーティングを有する誘電体導波路である。導波路アレイ１０Ａは、ＸＹ平面に交差する方向に光を出射する。調整素子は、複数の導波路を伝搬する光に適切な位相シフトを与えることにより、導波路アレイ１０Ａから出射される光の方向を変化させる。
【０３８６】
一様媒質で構成される誘電体導波路において、光は、全反射により、外部に漏れることなく伝搬する。一方、グレーティングを有する誘電体導波路では、グレーティングに起因する回折により、誘電体導波路内を伝搬する光の少なくとも一部は、外部に出射される。これにより、導波路アレイ１０Ａから出射される光の波数ベクトルの、Ｘ方向の成分が決定される。
【０３８７】
図７８の構成例では、調整素子は、導波路アレイ１０における各導波路を伝搬する光の位相を調整することにより、導波路アレイ１０Ａから出射される光の波数ベクトルの、Ｙ方向の成分を変化させる（図中の方向１０２）。これにより、光スキャンデバイス１００による１次元スキャンが可能となる。さらに、導波路アレイ１０における各導波路の屈折率を変調する場合には、導波路アレイ１０Ａから出射される光の波数ベクトルの、Ｘ方向の成分を変化させることもできる（図中の方向１０１）。これにより、光スキャンデバイス１００による２次元スキャンが可能となる。各導波路の屈折率変調および位相シフトの具体的な方法は、前述したとおりである。
【０３８８】

図７９は、導波路アレイ１０Ａ、２０Ａの少なくとも一方に用いられ得る２次元フェーズドアレイの構成例を示す図である。一例として、光スキャンデバイス１００が２次元フェーズドアレイの構成を有する場合について説明する。

【０３８９】

この例における光スキャンデバイス１００は、２次元的に配列された複数の導波路を含む導波路アレイ１０Ａと、各導波路を伝搬する光の位相を調整する調整素子とを有する。導波路アレイ１０Ａは、Ｘ方向およびＹ方向に２次元的に配列されている。各導波路は、光をＸ方向に伝搬させる。導波路アレイ１０Ａは、ＸＹ平面に交差する方向に光を出射する。調整素子は、導波路アレイ１０Ａから出射される光の方向を変化させる。この例においても、各導波路は、グレーティングを有する誘電体導波路である。

【０３９０】

図７８における１次元フェーズドアレイと比較して、図７９における２次元フェーズドアレイでは、各導波路のＸ方向の長さが短い。グレーティングを有する複数の誘電体導波路が、２次元に配列されている。調整素子は、導波路アレイ１０Ａにおける各導波路を伝搬する光の位相を調整、すなわち位相シフトすることにより、導波路アレイ１０Ａから出射される光の波数ベクトルの、Ｘ方向の成分およびＹ方向の成分の両方を変化させることができる（図中の方向１０１、１０２）。これにより、光スキャンデバイス１００による２次元スキャンが可能となる。

【０３９１】

受光デバイス２００に図７８に示す１次元フェーズドアレイの構成を適用することもできる。その場合、受光デバイス２００における複数の誘電体導波路は、Ｙ方向に配列され、受けた光を＋Ｘ方向または－Ｘ方向に伝搬させる。

【０３９２】

受光デバイス２００に図７９に示す２次元フェーズドアレイの構成を適用することもできる。その場合、受光デバイス２００における複数の誘電体導波路は、Ｘ方向およびＹ方向に２次元的に配列され、受けた光を＋Ｘ方向または－Ｘ方向に伝搬させる。

【０３９３】

受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａの配列間隔は、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａの前記配列間隔よりも大きくてもよい。これにより、微細加工の条件が緩和され、導波路アレイ２０Ａの作製が比較的容易になる。

【０３９４】

また、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａが含む各導波路の配列方向における幅は、光スキャンデバイス１００における導波路アレイ１０Ａが含む各導波路の配列方向における幅と同じである必要はなく、異なっていてもよい。

【０３９５】

例えば、受光デバイス２００における導波路アレイ２０Ａの配列間隔を大きくした場合、導波路アレイ２０Ａが含む各導波路の幅を大きくしてもよい。これにより、微細加工の条件が緩和され、各導波層の作製が比較的容易になる。ただし、隣接する導波路の間の距離が小さすぎると、それぞれの導波路内を伝搬する光が互いに干渉して、伝搬する光の位相が乱れる可能性がある。そのため、隣接する導波路の間の距離が近づきすぎないように、各導波路の幅を調整してもよい。

【０３９６】

次に、受光デバイス２００の導波路アレイ２０Ａから出力された光の検出方法の例を説明する。

【０３９７】

図８０は、回路基板上に光を合成する合波器１９０、導波路アレイ２０Ａ、位相シフタアレイ８０Ａ、および光検出器２３０などの素子を集積した受光デバイス２００の構成例を示す図である。図８０における受光デバイス２００と、図６７における光スキャンデバイス１００とでは、多くの構成が共通している。この例における受光デバイス２００は、光検出器２３０を備える。光検出器２３０は、導波路アレイ２０Ａにおける複数の導波路

に合波器１９０を介して接続されている。光検出器２３０は、当該複数の導波路から出力された光が合成された光を検出する。図８０の構成例では、イメージセンサのように複数の光検出器を有するセンサを用いることもできるが、単一の光検出器２３０を用いることができる。複数の導波路からの合成光を、例えば光ファイバーなどの他の導波路を介して、光検出器２３０に誘導してもよい。

【０３９８】

光スキャンデバイス１００からの出射光の波長が４００ｎｍから１０００ｎｍの範囲にある場合、例えばシリコン（Ｓｉ）を含むフォトダイオードなどの光検出器２３０を用いることができる。出射光の波長が９００ｎｍから１７００ｎｍの範囲にある場合は、例えばガリウムヒ素（ＧａＡｓ）を含むフォトダイオードなどの光検出器２３０を用いることができる。

【０３９９】

本実施形態では、光スキャンデバイス１００は、前述の反射型導波路、または図７８もしくは図７９に例示するような誘電体導波路の構造を備えている。しかし、光スキャンデバイス１００はそのような構成に限定されない。例えば、図８１に示す構成であってもよい。

【０４００】

図８１は、光スキャンデバイス１００の他の構成例を模式的に示す図である。図８１における光スキャンデバイス１００は、レーザーなどの光源１３０および少なくとも１つの可動ミラーを有する。可動ミラーは、例えばＭＥＭＳミラーである。光源１３０から出射された光は、可動ミラーによって反射され、対象領域内の所定の領域に向かう。制御回路５００は、可動ミラーを駆動することにより、光スキャンデバイス１００からの出射光の方向を変化させる。これにより、対象領域を光でスキャンすることができる。

【産業上の利用可能性】

【０４０１】

本開示の実施形態における光スキャンデバイスおよび光受信デバイスは、例えば自動車、ＵＡＶ、ＡＧＶなどの車両に搭載されるＬｉＤＡＲシステムなどの用途に利用できる。

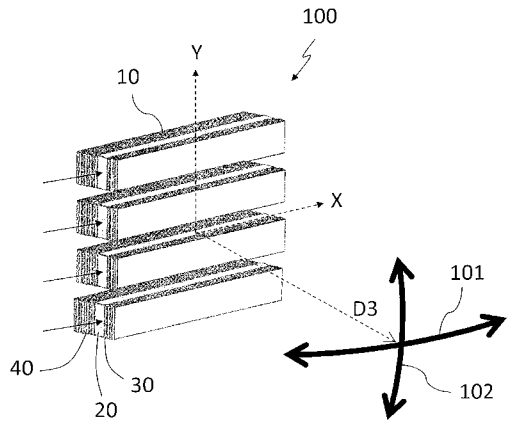
【符号の説明】

【０４０２】

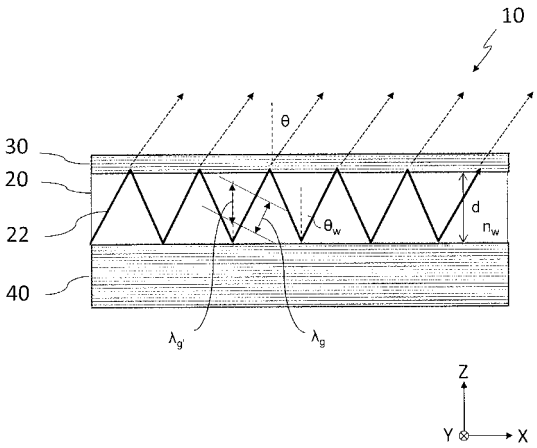
１　第１の導波路
２　光導波層、導波路
３　多層反射膜
４　多層反射膜
５　グレーティング
６　レーザー光源
７　光ファイバー
１０　導波路素子（第２の導波路）
２０　光導波層
３０　第１のミラー
４０　第２のミラー
４２　低屈折率層
４４　高屈折率層
５０、５０Ａ、５０Ｂ、５０Ｃ　基板
５１　第１の誘電体層（調整層）
５２　支持部材（補助基板）
６０　調整素子
６１　第２の誘電体層（保護層）
６２　電極
６４　配線
６６　電源

６８　　ヒーター
７０　　支持部材
７１　　非圧電素子
７２　　圧電素子
７３、７３ａ、７３ｂ　　スペーサ
７４ａ、７４ｂ　　支持部材
８０、８０ａ、８０ｂ　　位相シフタ
９０、９０ａ、９０ｂ　　光分岐器
９２　　光スイッチ
１００　　光スキャンデバイス
１１０　　導波路アレイの駆動回路
１３０　　光源
１５０　　対象物
１９０　　合波器
２００　　受光デバイス
２１０　　位相シフタアレイの駆動回路
２５０　　フィルタ
３１０　　ビームスポット
４００、２３０　　光検出器
５００　　制御回路
６００　　信号処理回路

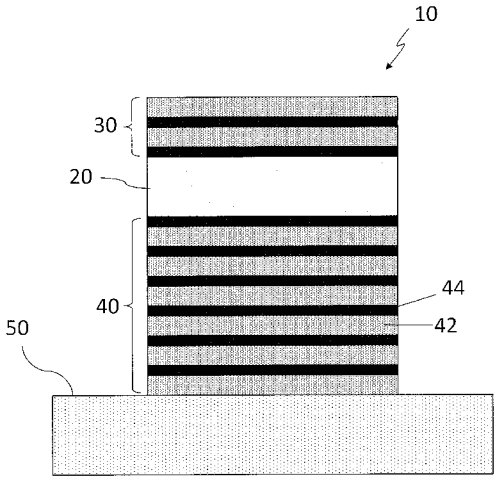
【図１】



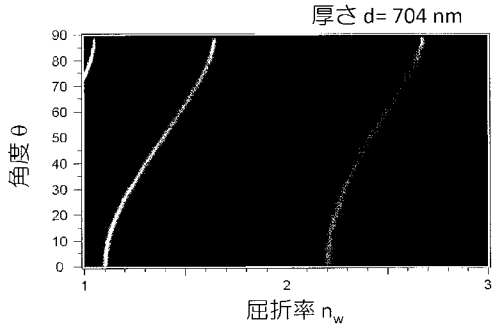

【図２】



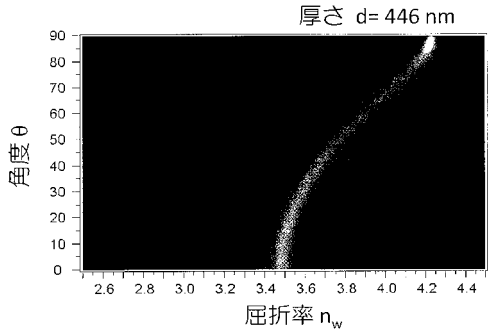
【図３】



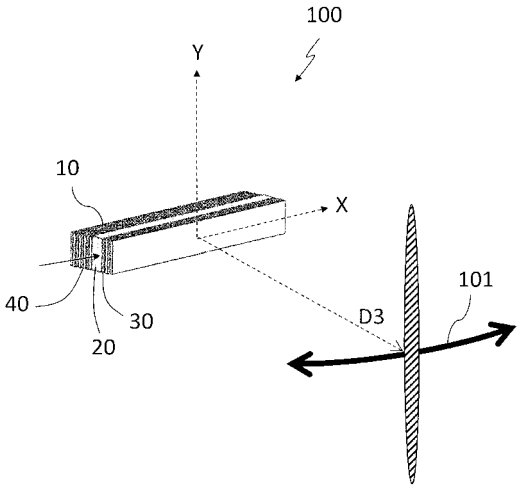

【図４Ａ】



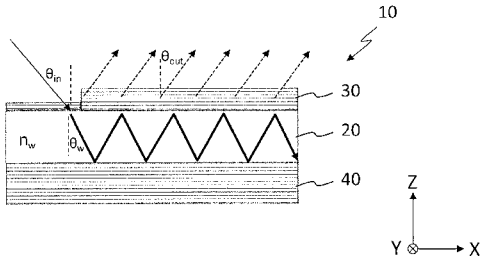

【図４Ｂ】



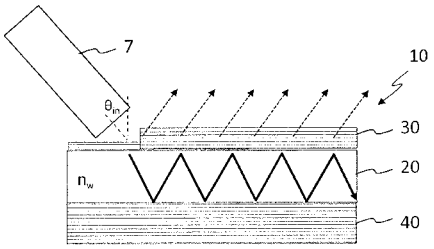

【図５】



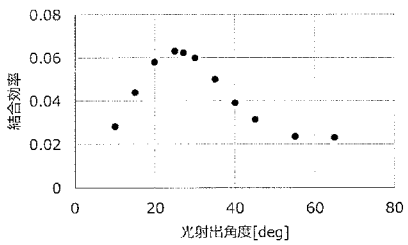

【図６Ａ】



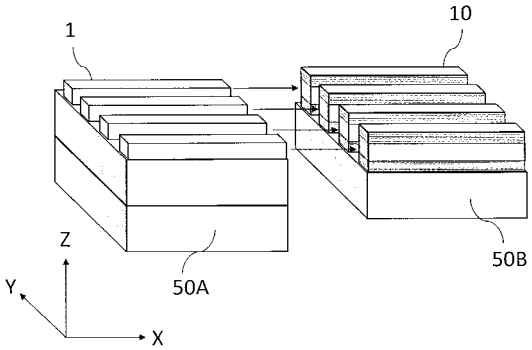

【図６Ｂ】



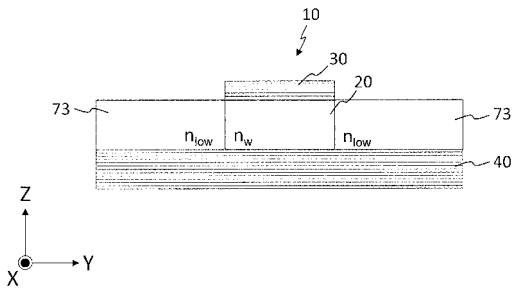

【図７】



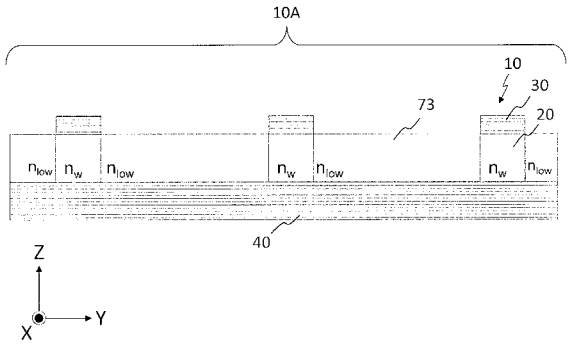

【図８】



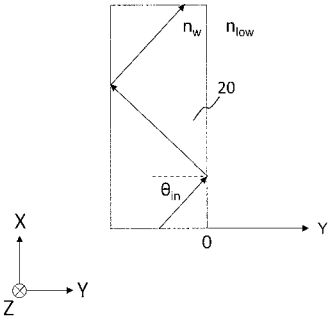

【図９】



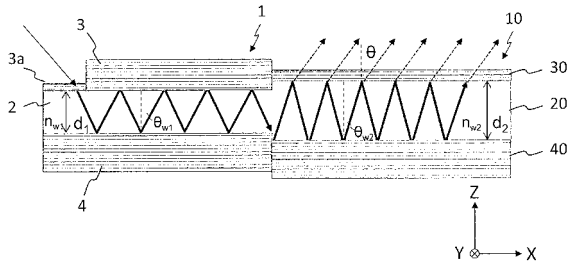
【図１０】



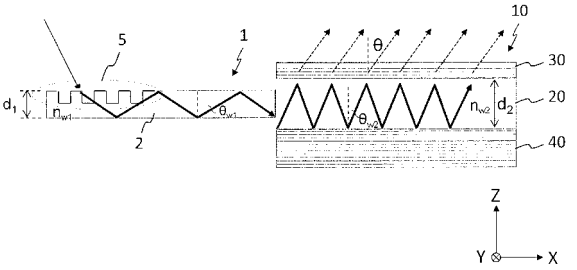

【図１１】



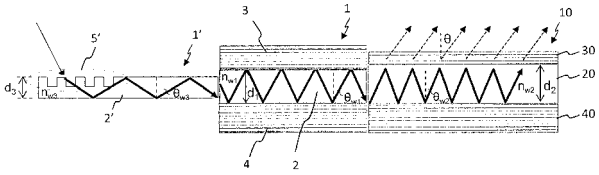

【図１２】



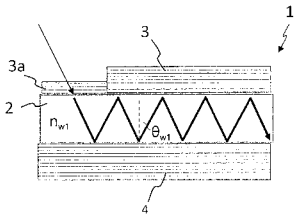

【図１３】



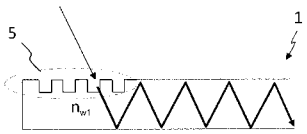

【図１４】



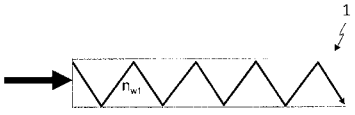

【図１５】



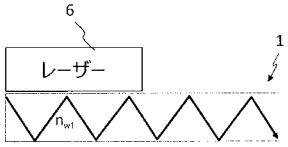

【図１６Ａ】



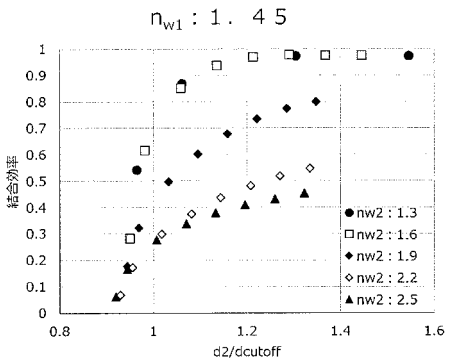

【図１６Ｂ】



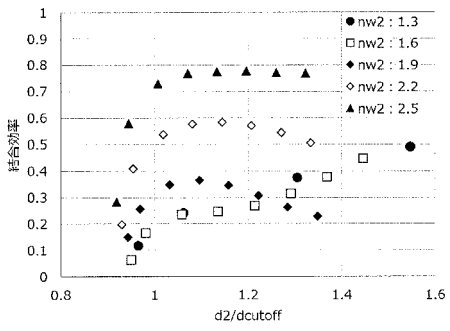

【図１６Ｃ】



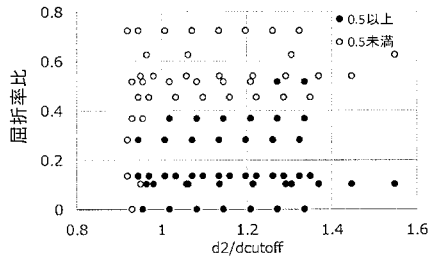

【図１７】



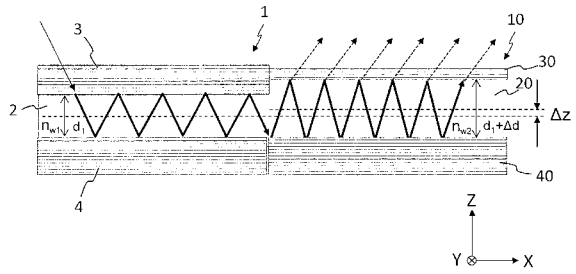

【図１８】



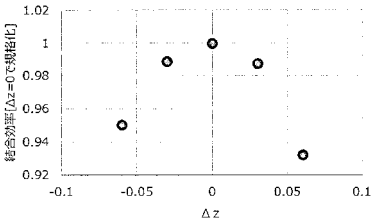
【図１９】



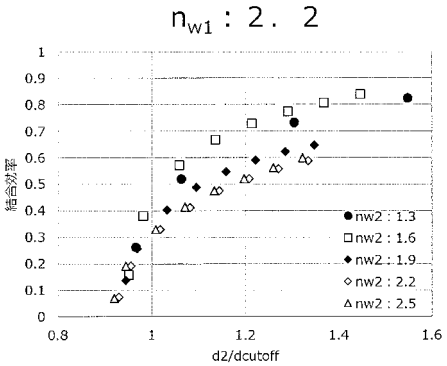

【図２０】



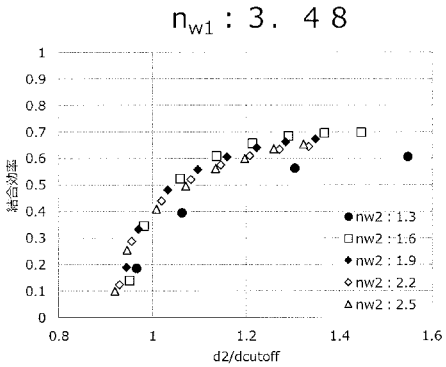

【図２１】



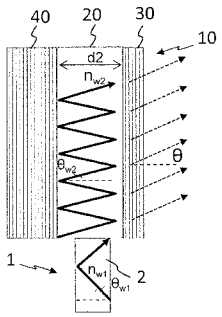

【図２２Ａ】



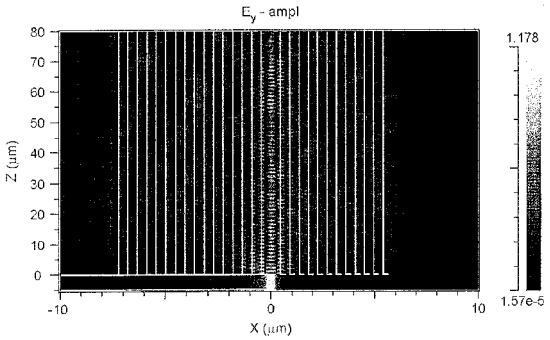

【図２２Ｂ】



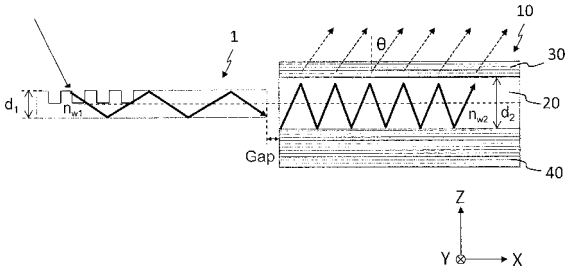

【図２３Ａ】



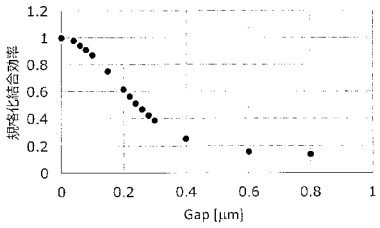

【図２３Ｂ】



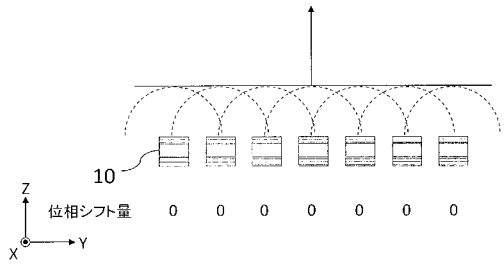

【図２４Ａ】



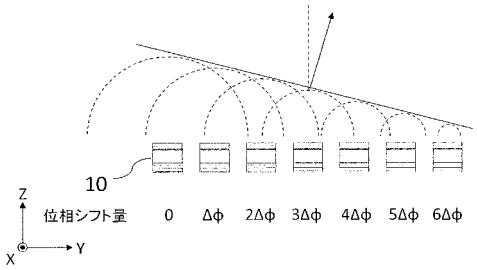
【図２４Ｂ】



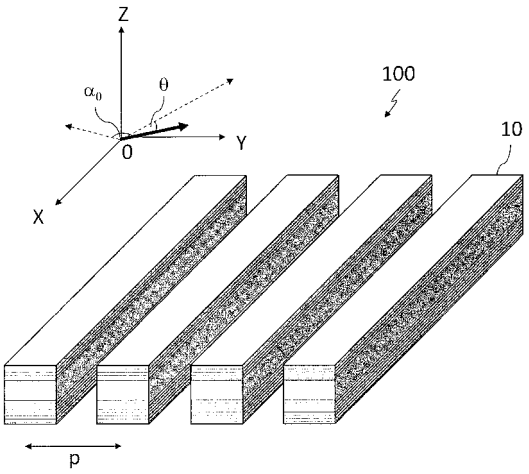

【図２５Ａ】



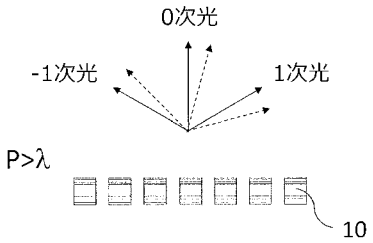

【図２５Ｂ】



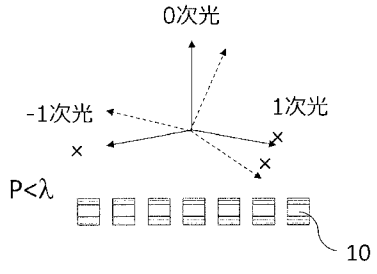

【図２６】



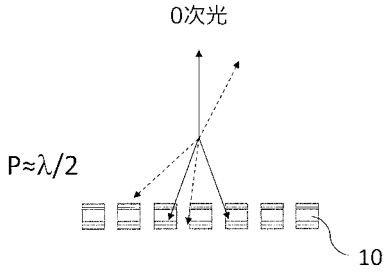

【図２７Ａ】



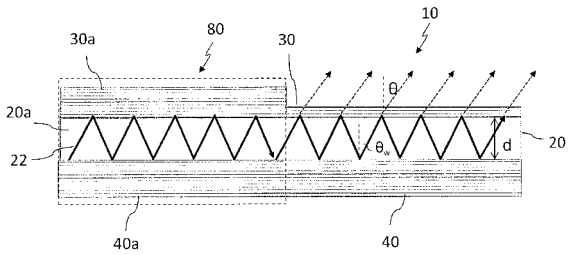

【図２７Ｂ】



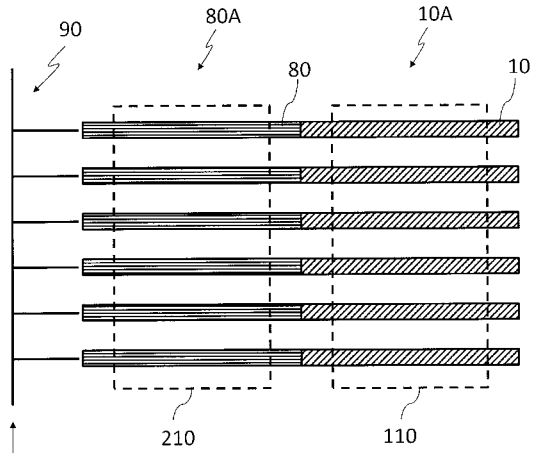

【図２７Ｃ】



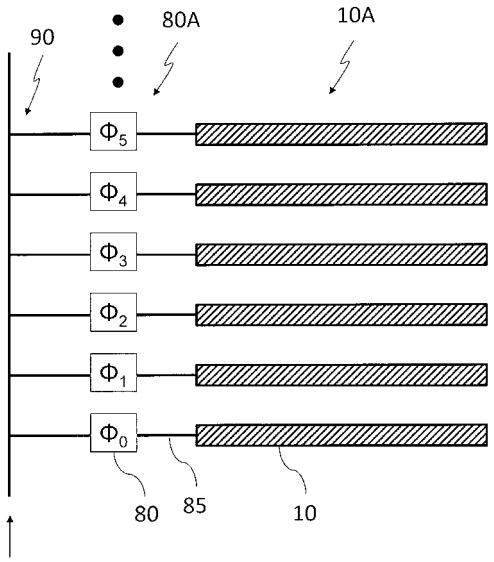

【図２８】



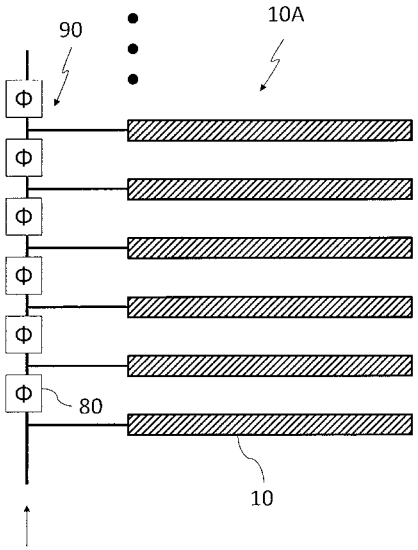
【図２９】



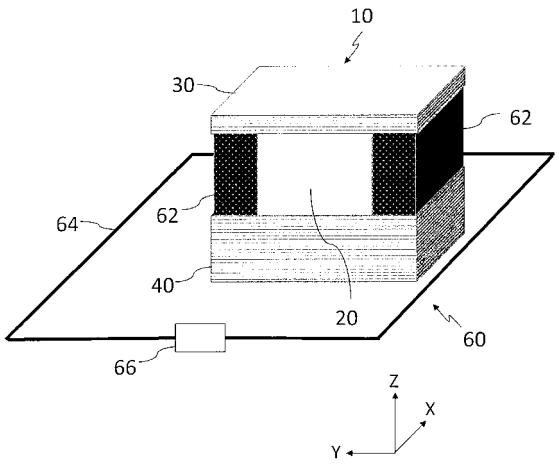

【図３０】



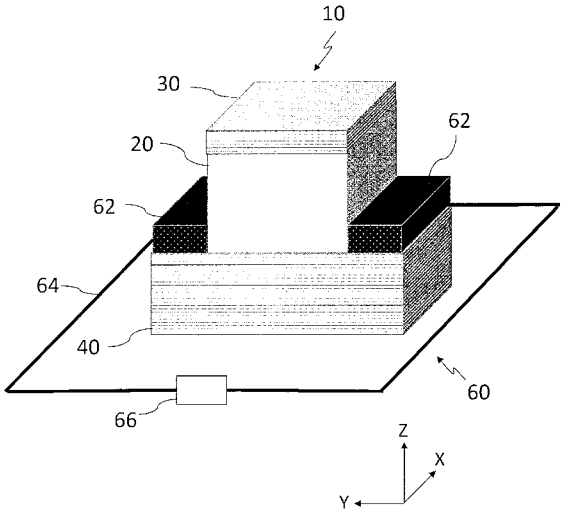

【図３１】



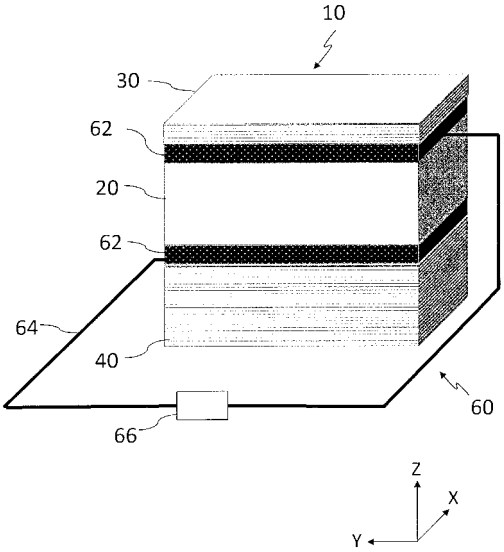

【図３２Ａ】



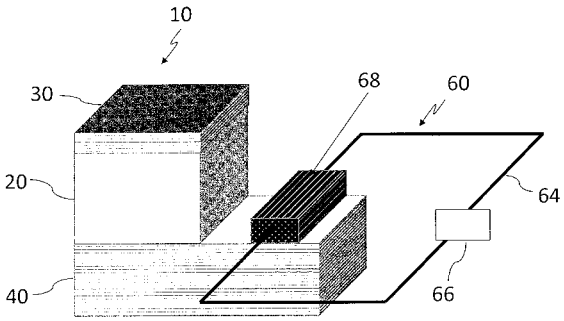
【図３２Ｂ】



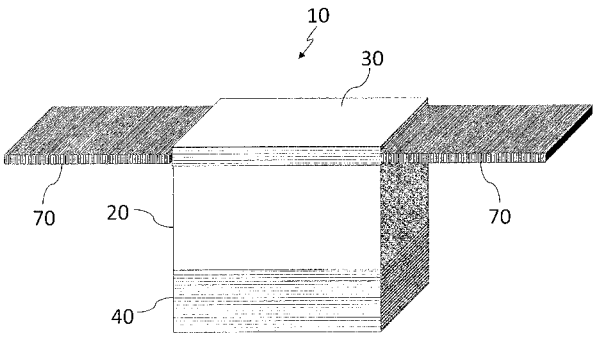

【図３２Ｃ】



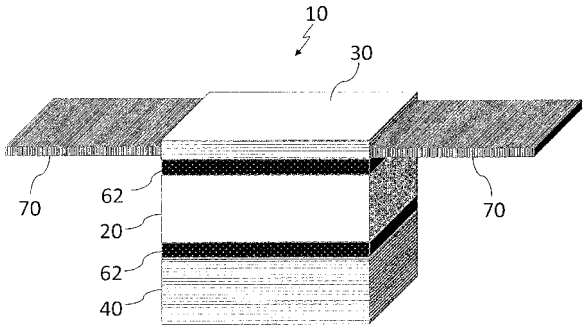

【図３３】



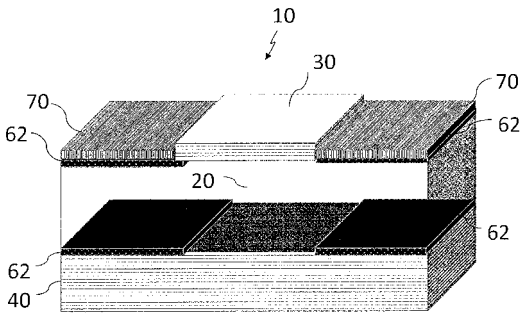

【図３４】



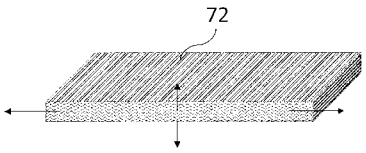

【図３５】



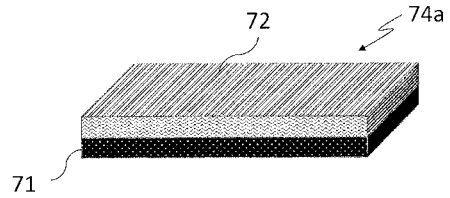

【図３６】



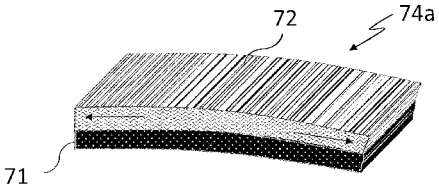
【図３７】



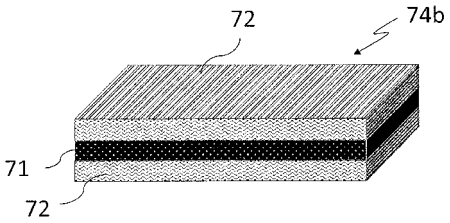

【図３８Ａ】



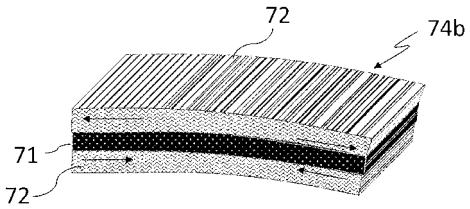

【図３８Ｂ】



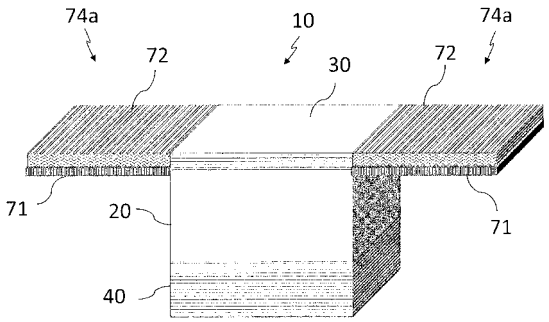

【図３９Ａ】



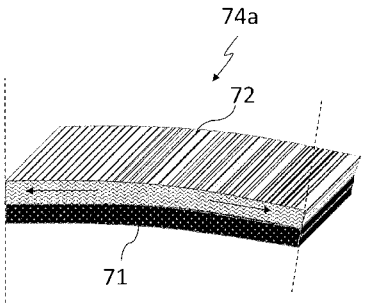

【図３９Ｂ】



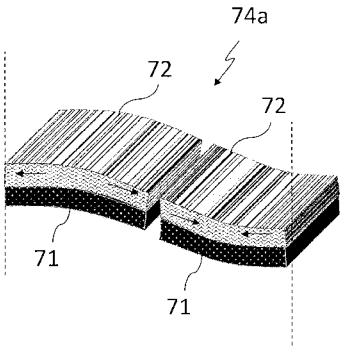

【図４０】



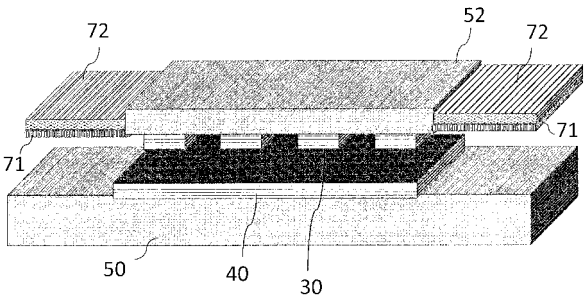

【図４１Ａ】



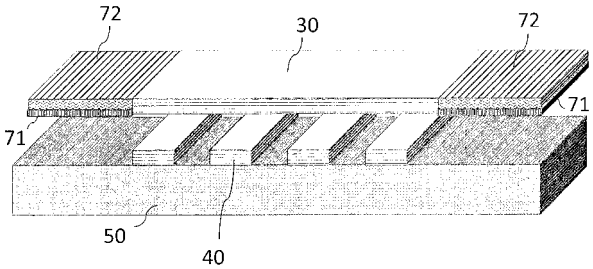

【図４１Ｂ】



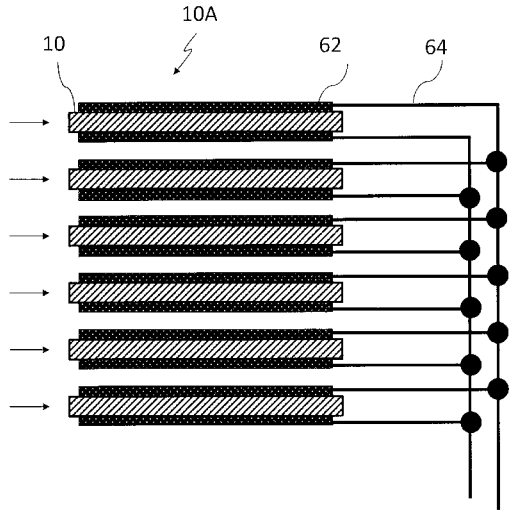

【図４２】



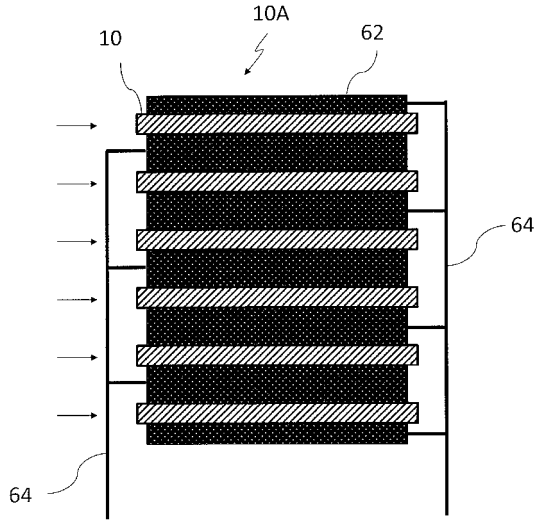

【図４３】



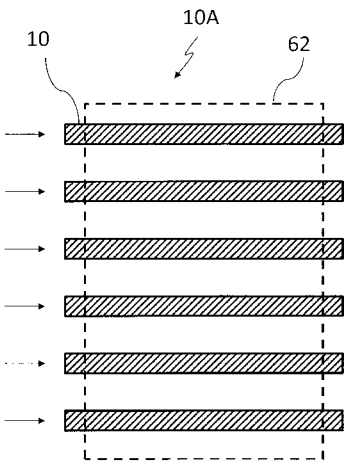
【図４４】



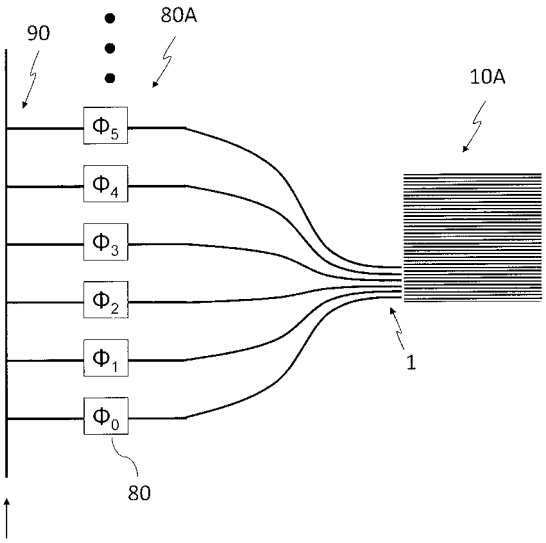

【図４５】



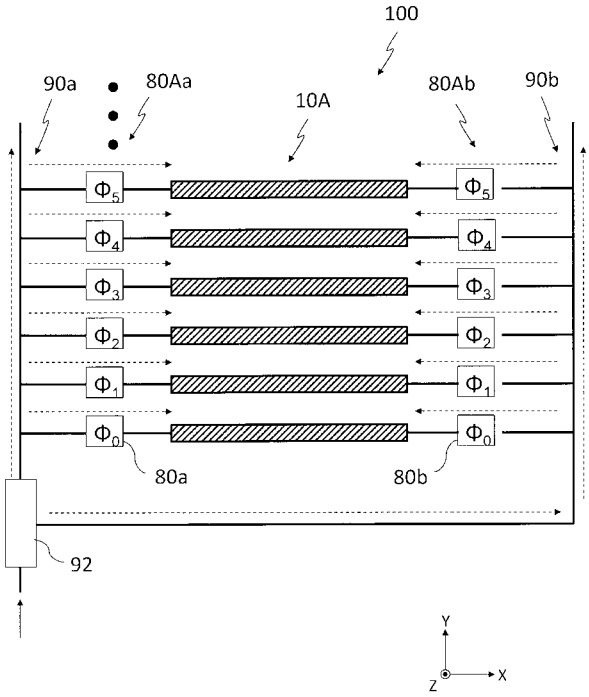

【図４６】



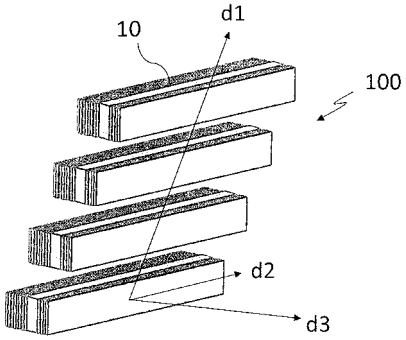

【図４７】



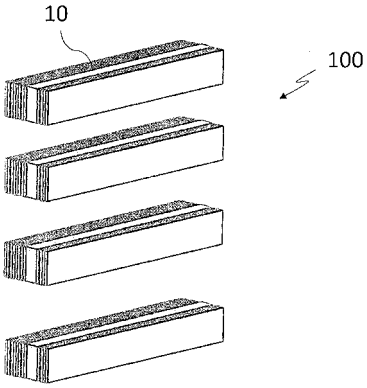
【図４８】



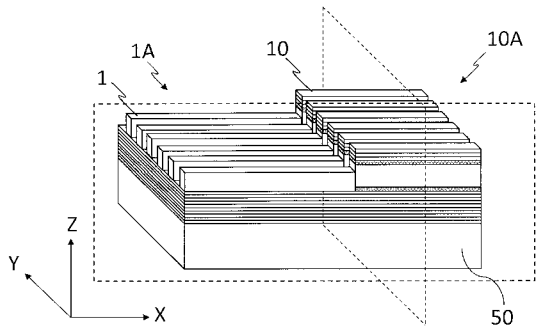

【図４９Ａ】



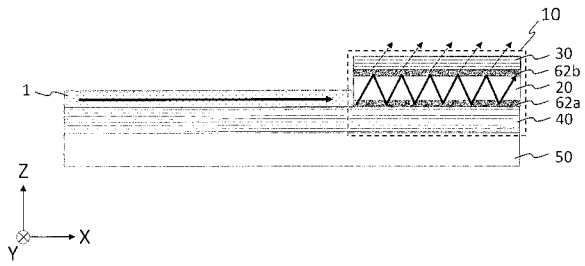

【図４９Ｂ】



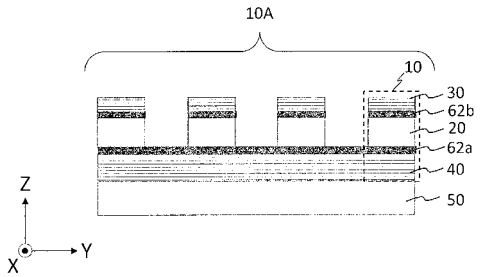

【図５０Ａ】



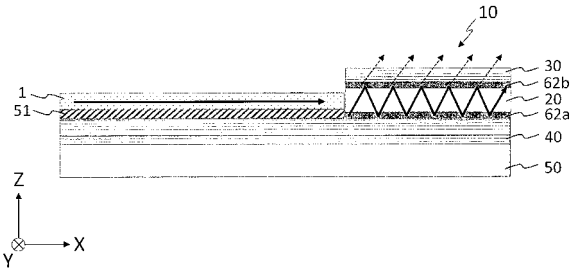

【図５０Ｂ】



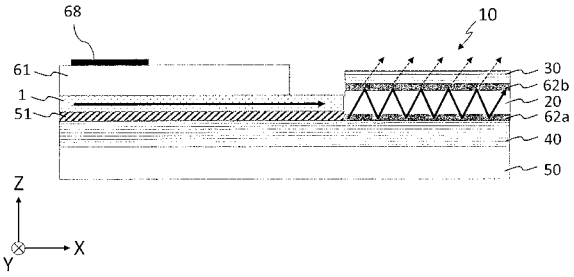

【図５０Ｃ】



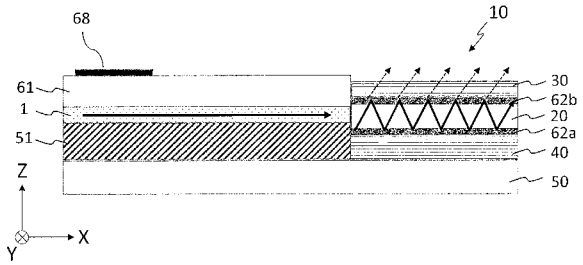

【図５１Ａ】



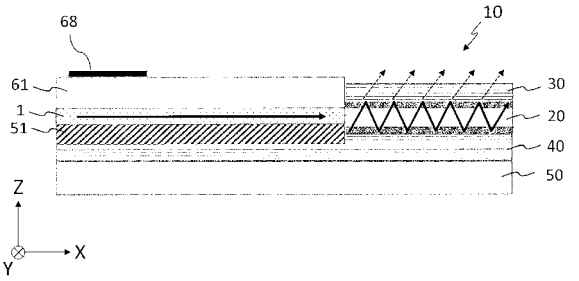
【図５１Ｂ】



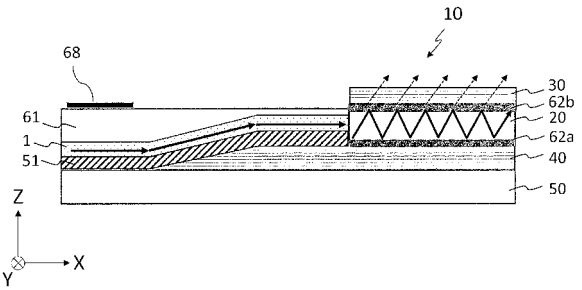

【図５２】



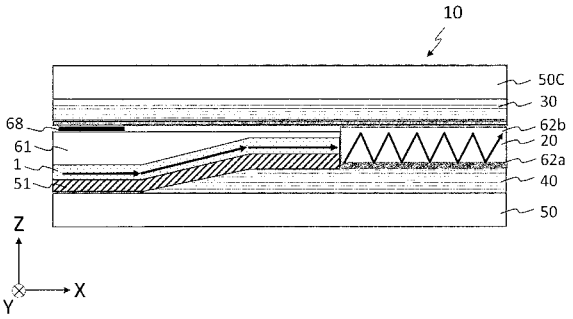

【図５３】



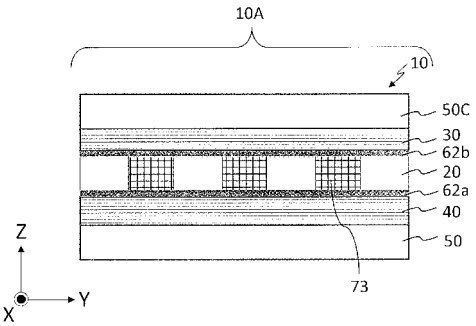

【図５４Ａ】



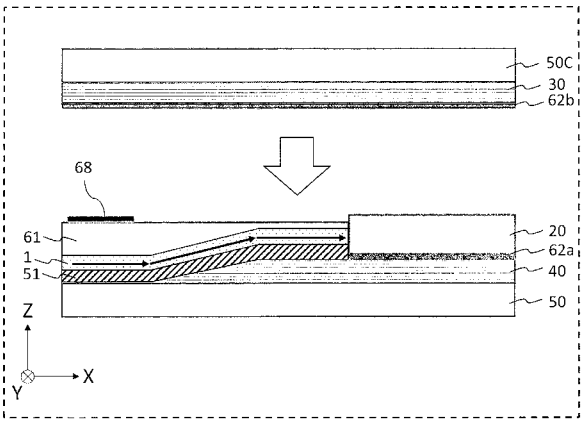

【図５４Ｂ】



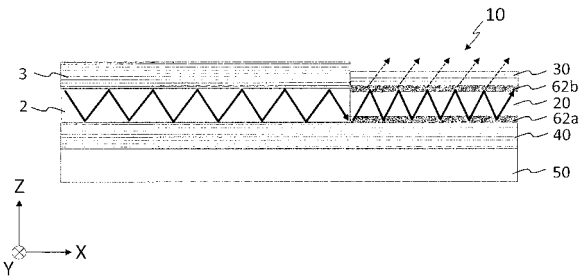

【図５５】



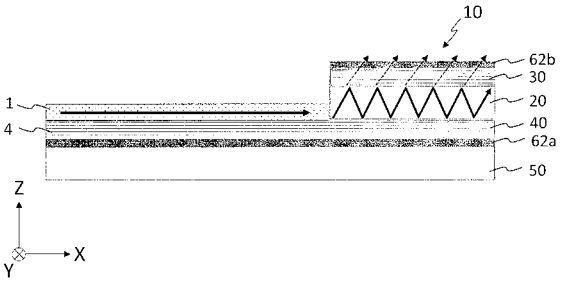

【図５４Ｃ】



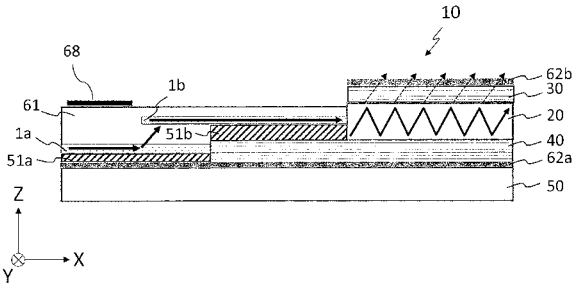

【図５６】



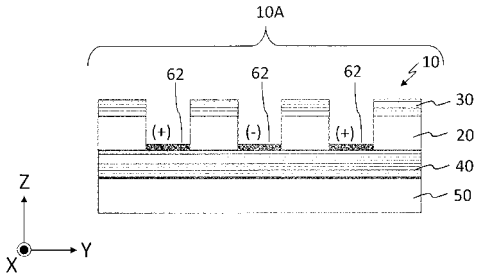
【図５７】



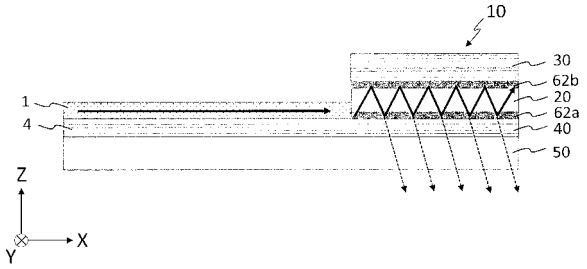

【図５８】



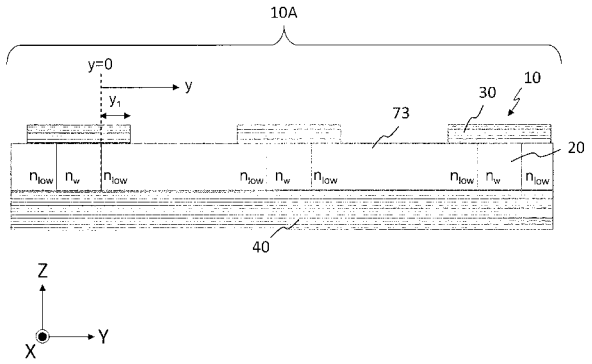

【図５９】



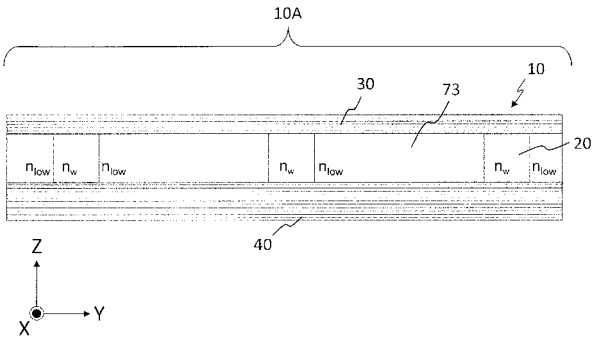

【図６０】



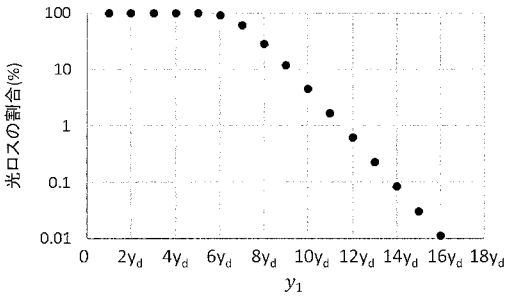

【図６１】



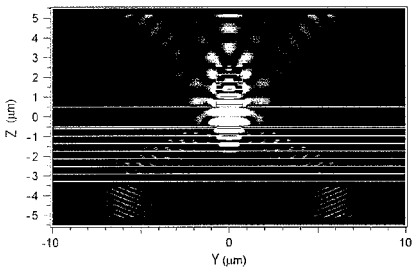

【図６３】



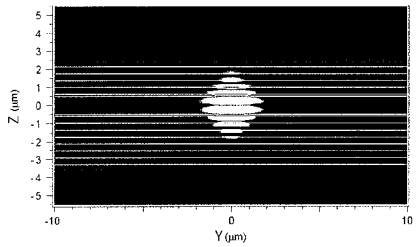

【図６２】



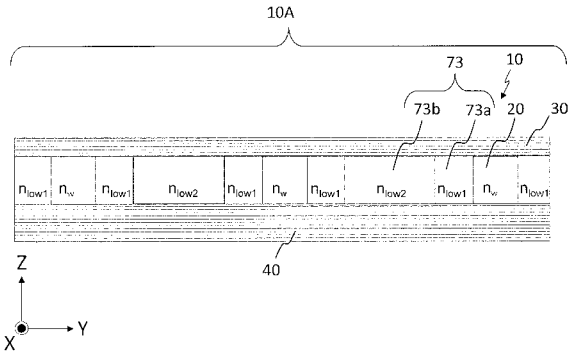

【図６４Ａ】



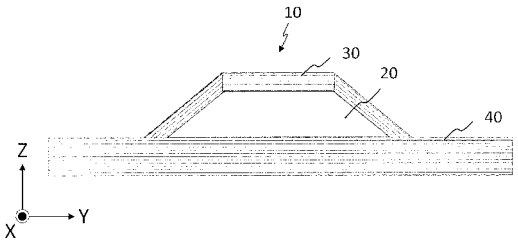
【図６４Ｂ】



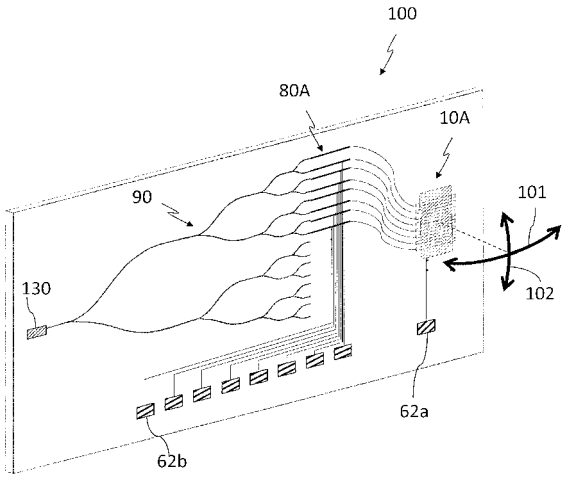

【図６５】



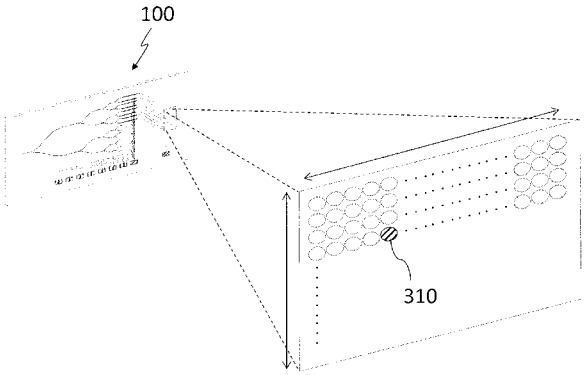

【図６６】



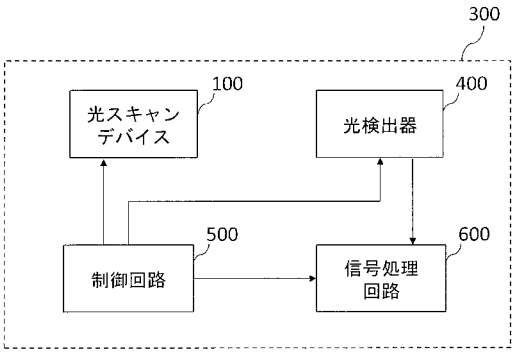

【図６７】



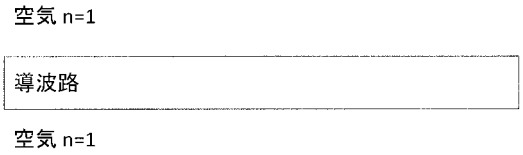

【図６８】



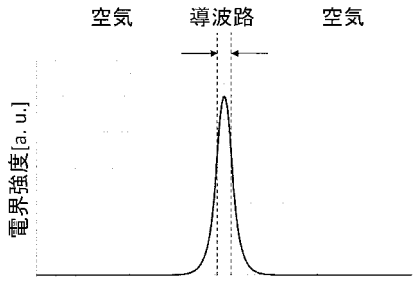

【図６９】



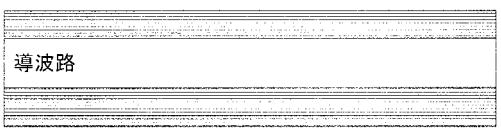

【図７０】



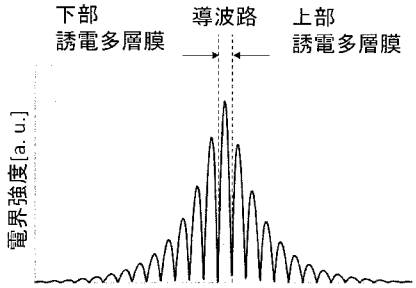

【図７１】



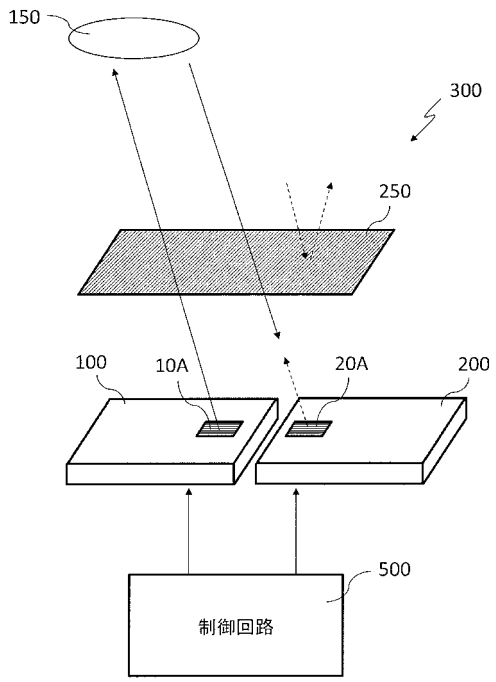

【図７２】



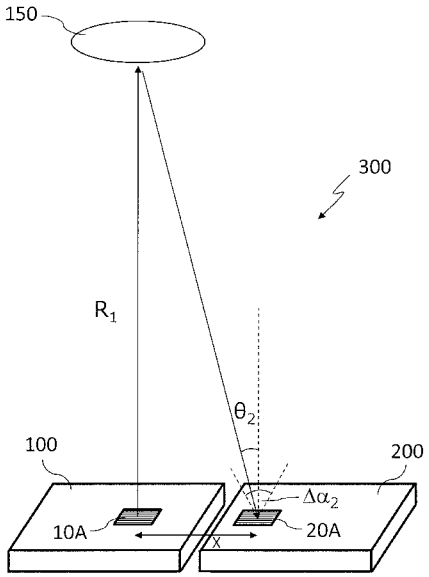
【図７３】



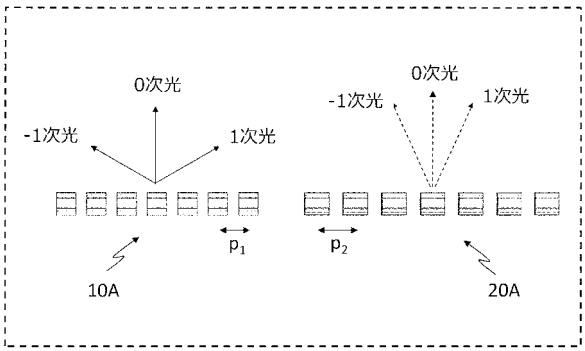

【図７４】



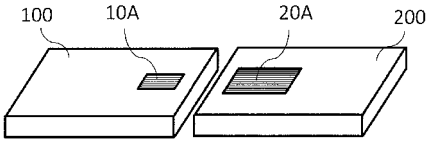

【図７５】



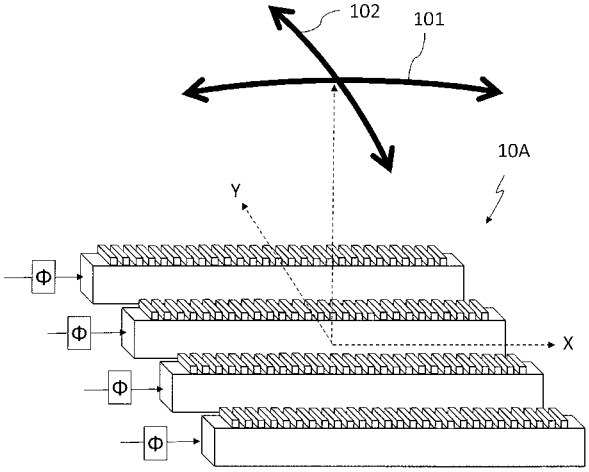

【図７６】



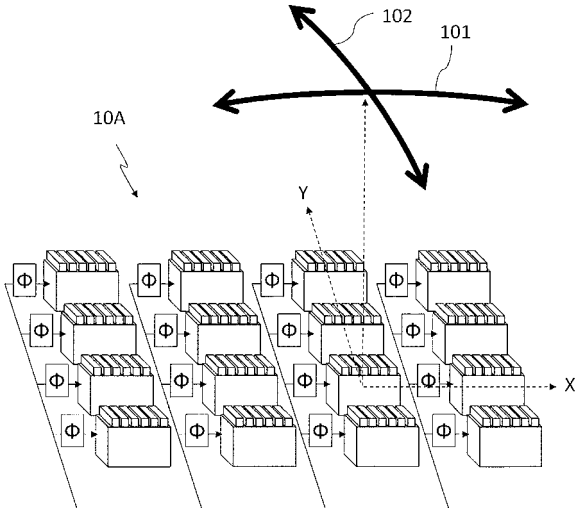

【図７７】



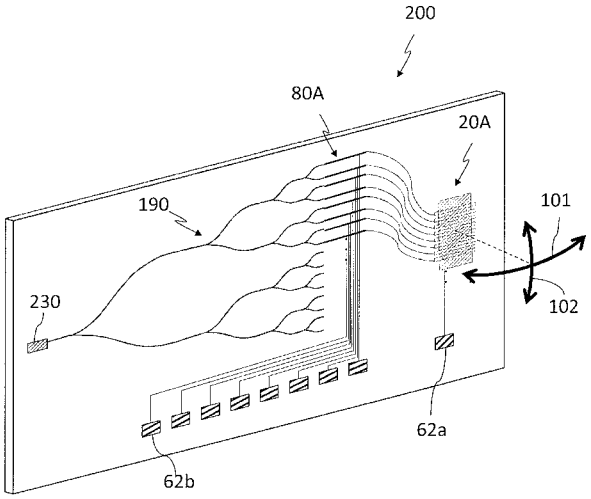
【図７８】



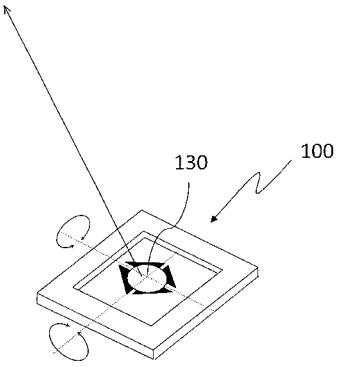

【図７９】




【図８０】




【図８１】



【手続補正書】
【提出日】平成29年12月25日(2017.12.25)
【手続補正１】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】０００６
【補正方法】変更
【補正の内容】
【０００６】
【特許文献１】国際公開第２０１３／１６８２６６号
【特許文献２】特表２０１６－５０８２３５号公報
【特許文献３】特開２０１３－１６５９１号公報

フロントページの続き

(74)代理人 100184985
弁理士 田中 悠
(74)代理人 100202197
弁理士 村瀬 成康
(72)発明者 稲田 安寿
大阪府門真市大字門真１００６番地 パナソニック株式会社内
(72)発明者 平澤 拓
大阪府門真市大字門真１００６番地 パナソニック株式会社内
(72)発明者 橋谷 享
大阪府門真市大字門真１００６番地 パナソニック株式会社内

Ｆターム(参考) 2H141 MA27 MB23 MC04 MC06 MC09 MD04 MG06 MZ13
2K102 AA17 AA21 AA28 BA07 BA09 BB04 BC04 BC05 BC10 BD09
CA20 DA04 DB09 DC08 DD02 DD03 DD04 DD05 EA02 EA05
EB02 EB08 EB22
5J084 AA05 AC02 AC04 BA03 BA48 BB17 BB21 BB34 DA01 DA08
DA09 EA31