

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4538718号
(P4538718)

(45) 発行日 平成22年9月8日(2010.9.8)

(24) 登録日 平成22年7月2日(2010.7.2)

(51) Int. Cl.	F I
G02B 6/12 (2006.01)	G02B 6/12 Z
G02B 1/02 (2006.01)	G02B 6/12 N
	G02B 1/02

請求項の数 8 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2004-58981 (P2004-58981)	(73) 特許権者	000010098
(22) 出願日	平成16年3月3日(2004.3.3)		アルプス電気株式会社
(65) 公開番号	特開2005-99672 (P2005-99672A)		東京都大田区雪谷大塚町1番7号
(43) 公開日	平成17年4月14日(2005.4.14)	(73) 特許権者	504132272
審査請求日	平成19年2月9日(2007.2.9)		国立大学法人京都大学
(31) 優先権主張番号	特願2003-305329 (P2003-305329)		京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(32) 優先日	平成15年8月28日(2003.8.28)	(74) 代理人	100106909
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		弁理士 棚井 澄雄
		(74) 代理人	100064908
			弁理士 志賀 正武
		(74) 代理人	100108578
			弁理士 高橋 詔男
		(74) 代理人	100094400
			弁理士 鈴木 三義

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元フォトリック結晶スラブ及び2次元フォトリック結晶導波路

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

高屈折率材料からなるスラブ材に、このスラブ材よりも低屈折率材料からなる領域が周期的に配列されて屈折率分布が形成され、前記スラブ内を通過する光に対してTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有する2次元フォトリック結晶スラブであって、前記低屈折率材料領域は、その形状が3回の回転対称とミラー面を3つ有するC_{3v}対称性を有し、中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された3つの円柱状領域を一単位としてこの一単位を前記スラブ材に三角格子状に配列されているとともに、

前記スラブ材は、 $0.15 < t / \lambda_0 < 0.19$ (式中、tは前記スラブ材の厚み、 λ_0 はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のバンドギャップの中心波長)なる関係を満たし、かつ、 $\frac{(n_H^2 - n_L^2)}{2n_H^2}$ (式中、n_Hは前記高屈折率材料の屈折率、n_Lは前記低屈折率材料の屈折率を示す。)で定義される比屈折率差が0.35より大きくなる関係を満たし、かつ、 $0.65 < t / a < 1.50$ (式中、aは前記低屈折率材料領域の周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たし、

前記低屈折率材料領域が占める割合は、2次元フォトリック結晶スラブの体積100%に対して25%より多くされたことを特徴とする2次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項2】

高屈折率材料からなるスラブ材に、このスラブ材よりも低屈折率材料からなる領域が周

期的に配列されて屈折率分布が形成され、前記スラブ内を通過する光に対してTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有する2次元フォトニック結晶スラブであって、前記低屈折率材料領域は、その形状が3回の回転対称とミラー面を3つ有する C_{3v} 対称性を有するY字状のプロペラ形状をなし、前記スラブ材に三角格子状に配列されているとともに、

前記スラブ材は、 $0.15 \leq t / \lambda_0 \leq 0.19$ (式中、 t は前記スラブ材の厚み、 λ_0 はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のバンドギャップの中心波長)なる関係を満たし、かつ、 $\frac{n_H^2 - n_L^2}{2n_H^2} \geq 0.35$ (式中、 n_H は前記高屈折率材料の屈折率、 n_L は前記低屈折率材料の屈折率を示す。)で定義される比屈折率差が0.35より大きくなる関係を満たし、かつ、 $0.65 \leq t / a \leq 1.50$ (式中、 a は前記低屈折率材料領域の周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たし、

前記低屈折率材料領域が占める割合は、2次元フォトニック結晶スラブの体積100%に対して25%より多くされたことを特徴とする2次元フォトニック結晶スラブ。

【請求項3】

前記スラブ材の少なくとも一方の面に前記低屈折率材料領域が形成されていない補強層が設けられたことを特徴とする請求項1または請求項2に記載の2次元フォトニック結晶スラブ。

【請求項4】

請求項1乃至3のいずれか一項に記載の2次元フォトニック結晶スラブに、前記フォトニック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥がJ方向に形成され、該線状欠陥はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光を通過可能な導波路とされたことを特徴とする2次元フォトニック結晶導波路。

【請求項5】

前記低屈折率材料領域は前記導波路を中心とした左右非対称になるように配置されていることを特徴とする請求項4に記載の2次元フォトニック結晶導波路。

【請求項6】

前記低屈折率材料からなる領域は導波路を中心とした左右対称になるように配置されていることを特徴とする請求項4に記載の2次元フォトニック結晶導波路。

【請求項7】

$(3) \times a \times (2/16) \leq W \leq (3) \times a \times (18/16)$ (式中、 W は導波路幅、 a は前記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たすことを特徴とする請求項4乃至6のいずれか一項に記載の2次元フォトニック結晶導波路。

【請求項8】

請求項4乃至7のいずれか一項に記載の2次元フォトニック結晶導波路が備えられたことを特徴とする光デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、微小光回路素子等に用いられる2次元フォトニック結晶スラブ及び該2次元フォトニック結晶スラブに線状欠陥を形成した2次元フォトニック結晶導波路とこれを備えた光デバイスに関する。

【背景技術】

【0002】

光の波長程度の屈折率変化周期構造を持つ物質はフォトニック結晶として知られており、その中ではその周期に対応する波長の光の存在が禁止される光に対する禁止帯、いわゆるフォトニックバンドギャップが現れ、特定の波長域の光の存在と伝搬が不可能となる。このことからフォトニック結晶は光を自由自在に制御できる可能性があるとして、次世代のエレクトロニクス、オプトエレクトロニクス材料として注目されている。

【0003】

10

20

30

40

50

従来の２次元フォトリック結晶導波路の一種としては、図４４に示すようなものが知られている（例えば、特許文献１参照）。

この２次元フォトリック結晶導波路は、空気より屈折率が高い材料からなるスラブ材料８１に円柱孔８６を三角格子状に配列された２次元フォトリック結晶を有し、図４４に示すように三角格子状に配列した円柱孔８６を一部線状に抜き取ることによりフォトリック結晶に線状欠陥９２が導入され、この線状欠陥９２が導波路とされたものである。

【０００４】

この２次元フォトリック結晶導波路では、外部から２次元フォトリック結晶にフォトリックバンドギャップ周波数内に相当する波長の光１０３を入射させると、線状欠陥９２が形成されていないところでは、面内方向にはフォトリックバンドギャップがあるので、光は伝搬を禁じられ、また、面直方向には屈折率差閉じ込めによる全反射により閉じ込められるが、線状欠陥９２のところは導波路とみなされるので光は伝搬するようになっている。

【特許文献１】特開２００１－２７２５５５号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００５】

しかしながら従来の２次元フォトリック結晶導波路においては、２次元フォトリック結晶は光の偏波モードのＴＥ-likeモード又はＴＭ-likeモードの一方に対してのみフォトリックバンドギャップをもっている構造であるため、ＴＥ-likeモード又はＴＭ-likeモードの光がフォトリック結晶の面内方向に漏れてしまうことになり、取り出し効率が悪くなってしまふ。例えば、上記三角格子状に配列された円柱孔ではＴＥ-likeモードに対してのみフォトリックバンドギャップを有するため、ＴＭ-likeモードの光はフォトリック結晶の面内方向に漏れてしまふ。

【０００６】

ＴＥ-likeモードとＴＭ-likeモードの両方モードに対して共通のフォトリックバンドギャップを有する構造の２次元フォトリック結晶スラブが要望されるが、そのような２次元フォトリック結晶はこれまでなかった。

【０００７】

本発明は上記事情に鑑みてなされたもので、ＴＥ-likeモードとＴＭ-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有し、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止できる２次元フォトリック結晶スラブの提供を目的の一つとする。

また、本発明は、ＴＥ-likeモードとＴＭ-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有する２次元フォトリック結晶スラブを備え、低損失の２次元フォトリック結晶導波路を提供することを目的の一つとする。

また、本発明は、上記の２次元フォトリック結晶導波路が備えられた光デバイスを提供することを目的の一つとする。

【課題を解決するための手段】

【０００８】

第１の発明の２次元フォトリック結晶スラブは、高屈折率材料からなるスラブ材に、このスラブ材よりも低屈折率材料からなる領域が周期的に配列されて屈折率分布が形成され、前記スラブ内を通過する光に対してＴＥ-likeモードとＴＭ-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有する２次元フォトリック結晶スラブであって、前記低屈折率材料領域は、その形状が３回の回転対称とミラー面を３つ有する C_{3v} 対称性を有し、中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された３つの円柱状領域を一単位としてこの一単位を前記スラブ材に三角格子状に配列されているとともに、

前記スラブ材は、 $0.15 < t / \lambda_0 < 0.19$ （式中、 t は前記スラブ材の厚み、 λ_0 はＴＥ-likeモードとＴＭ-likeモードの両モードの光に対して共通のバンドギャップの中心波長）なる関係を満たし、かつ、 $\lambda_0 = (n_H^2 - n_L^2) / 2 n_H^2$ （式中、 n

10

20

30

40

50

n_H は前記高屈折率材料の屈折率、 n_L は前記低屈折率材料の屈折率を示す。) で定義される比屈折率差 $\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}$ が 0.35 より大きくなる関係を満たし、かつ、 $0.65 \leq t/a \leq 1.50$ (式中、 a は前記低屈折率材料領域の周期構造部における最小中心距離又は格子定数) なる関係を満たし、

前記低屈折率材料領域が占める割合は、2次元フォトリック結晶スラブの体積 100% に対して 25% より多くされたことを特徴とする。

本発明において C_{3v} 対称の形状とは、3回の回転対称形状で、ミラー面を3有するものをいう。

上記構成の2次元フォトリック結晶スラブによれば、TE-like モードとTM-like モードの両モードのギャップ周波数帯を一致させることができるので、上記両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有することができ、しかも高次スラブモードが立たないため、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止でき、低損失とすることができる。

前記において、 t/a が 0.19 を超えると、高次スラブモードが発生して光損失が増大し、 0.1 未満であると、完全バンドギャップが得られない。

前記において、比屈折率差 $\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}$ が 0.35 以下であると、TE-like モード、TM-like モードの両方のフォトリックバンドギャップが開かなくなってしまう。

前記において、低屈折率材料領域が占める割合(体積%)が 25% 以下であると、 t/a が前記の範囲内であってもTE-like モードとTM-like モードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有することができない。

本発明において完全バンドギャップとは、TE-like モードとTM-like モードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有することをいう。

【0010】

第2の発明の2次元フォトリック結晶スラブは、高屈折率材料からなるスラブ材に、このスラブ材よりも低屈折率材料からなる領域が周期的に配列されて屈折率分布が形成され、前記スラブ内を通過する光に対してTE-like モードとTM-like モードの両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有する2次元フォトリック結晶スラブであって、前記低屈折率材料領域は、その形状が3回の回転対称とミラー面を3つ有する C_{3v} 対称性を有するY字状のプロペラ形状をなし、前記スラブ材に三角格子状に配列されているとともに、前記スラブ材は、 $0.15 \leq t/a \leq 0.19$ (式中、 t は前記スラブ材の厚み、 a はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のバンドギャップの中心波長) なる関係を満たし、かつ、 $\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} = (n_H^2 - n_L^2) / 2n_H^2$ (式中、 n_H は前記高屈折率材料の屈折率、 n_L は前記低屈折率材料の屈折率を示す。) で定義される比屈折率差 $\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}$ が 0.35 より大きくなる関係を満たし、かつ、 $0.65 \leq t/a \leq 1.50$ (式中、 a は前記低屈折率材料領域の周期構造部における最小中心距離又は格子定数) なる関係を満たし、前記低屈折率材料領域が占める割合は、2次元フォトリック結晶スラブの体積 100% に対して 25% より多くされたことを特徴とする。

【0015】

第3の発明の2次元フォトリック結晶スラブは、前記スラブ材の少なくとも一方の面に前記低屈折率材料領域が形成されていない補強層が設けられたことを特徴とする。

【0016】

第4の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、先のいずれか一項に記載の2次元フォトリック結晶スラブに、前記フォトリック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥がJ方向に形成され、該線状欠陥はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光を通過可能な導波路とされたことを特徴とする2次元フォトリック結晶導波路。

【0017】

第5の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、前記低屈折率材料領域は前記導波路を中心とした左右非対称になるように配置されていることを特徴とする。導波路を中心とした左右非対称にされていると、導波路幅を変更してもモードが交差しない。

【0018】

10

20

30

40

50

第6の発明の2次元フォトニック結晶導波路は、前記低屈折率材料からなる領域は導波路を中心とした左右対称になるように配置されていることを特徴とする。導波路を中心とした左右対称にされていると、導波路幅を変更することによりモードを交差させることが可能である。また、導波路中心に対し波形が左右対称な光を上記導波路内に入れ易く、伝搬させ易い。

【0020】

第7の発明の2次元フォトニック結晶導波路は、 $(3)a \times (2/16)W$ $(3)a \times (18/16)$ (式中、Wは導波路幅、aは前記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たすことを特徴とする。

この関係を満たすことが導波路モードのシングルモード光の伝搬帯域を確保できる点で好ましい。なお、本発明において導波路幅とは、線状欠陥を中心とした左右の低屈折率材周期構造部中心間の距離のことをいう。

【0021】

第8の発明の光デバイスは、第4乃至第7のいずれかに記載の2次元フォトニック結晶導波路が備えられたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0030】

本発明の2次元フォトニック結晶スラブによれば、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有し、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止でき、低損失の2次元フォトニック結晶スラブを提供できる。

また、本発明の2次元フォトニック結晶導波路によれば、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有する2次元フォトニック結晶スラブを備え、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止でき、低損失の2次元フォトニック結晶導波路を提供できる。

本発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、 t/λ_0 が0.19を超えると、高次スラブモードが発生して光損失が増大し、0.1未満であると、完全バンドギャップが得られない。よって、 $0.15 < t/\lambda_0 < 0.19$ (式中、tは前記スラブ材の厚み、 λ_0 はTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のバンドギャップの中心波長)なる関係を満たすことを要する。

本発明において、比屈折率差が0.35以下であると、TE-likeモード、TM-likeモードの両方のフォトニックバンドギャップが開かなくなってしまう。よって、 $n = (n_H^2 - n_L^2) / 2n_H^2$ (式中、 n_H は前記高屈折率材料の屈折率、 n_L は前記低屈折率材料の屈折率を示す。)で定義される比屈折率差が0.35より大きくなる関係を満たすことを要する。

本発明において、低屈折率材料領域が占める割合(体積%)が25%以下であると、 t/λ_0 が前記の範囲内であってもTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することができない。よって、低屈折率材料領域が占める割合は、2次元フォトニック結晶スラブの体積100%に対して25%より多くなることを要する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0031】

次に図面を用いて本発明の実施の形態を詳細に説明する。

以下に述べる実施の形態では本発明の光デバイスを波長分波器に適用した場合について説明する。なお、本発明は以下に説明する実施の形態に限定されるものではないことは勿論であるとともに、以下の図面においては各構成部分の縮尺について図面に表記することが容易となるように構成部分毎に縮尺を変えて記載している。

(第1の実施形態)

図1は、第1の実施形態の波長分波器の概略構成を示す斜視図であり、図2は図1の波長分波器に備えられた2次元フォトニック結晶導波路を示す概略平面図であり、図3は図2の2次元フォトニック結晶導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブに形成さ

10

20

30

40

50

れた複数の低屈折率材料領域を示す拡大平面図である。

本実施形態の波長分波器は、本発明の実施形態の2次元フォトニック結晶導波路10が主体として備えられたものである。

この2次元フォトニック結晶導波路10は、本発明の実施形態の2次元フォトニック結晶スラブ10aに、このフォトニック結晶の周期的配列を乱す線状の欠陥（線状欠陥）22が J方向（言い換えれば - K方向）に形成され、この線状欠陥22が光を通過させる導波路とされたものである。ここでの J方向とは、本実施形態のように平面視三角状の低屈折率材料領域15が三角格子状に配列されている場合、この低屈折率材料領域15のいずれか一辺と平行な方向であり、図2に示す矢印A₁、A₂、A₃で示される方向はいずれも - J方向である。上記導波路22は矢印A₁で示される方向に形成されているが、矢印A₂や矢印A₃で示される方向に形成されていてもよい。なお、図2中、矢印Bで示される方向は、 X方向（言い換えれば - M方向）である。

【0032】

2次元フォトニック結晶スラブ10aは、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有するものである。

この2次元フォトニック結晶スラブ10aの具体的な構造としては、高屈折率材料からなるスラブ材11に、このスラブ材11よりも低屈折率材料からなる領域（低屈折率材料領域）15が三角格子状に配列されることにより、スラブ材11に低屈折率材料領域15が周期的に配列されて屈折率分布が形成されたものである。

【0033】

スラブ材11として用いる材料としては、高屈折率材料が用いられ、例えば、InGaAsP、GaAs、In、Ga、Al、Sb、As、Ge、Si、P、N、Oのうちから選択される1種または2種以上を含む材料、Si等の無機材料、無機半導体材料、有機材料のうちから適宜選択して用いられる。

低屈折率材料領域15に用いる材料は、スラブ材11を構成する高屈折率材料よりも屈折率が低い低屈折率材料が用いられ、本実施形態では空気が用いられている。

【0034】

本実施形態ではスラブ材11に複数の三角孔14が形成されている。この三角孔14は三角格子の格子点に相当する位置に形成されたものである。そして、複数の三角孔14のそれぞれに低屈折率材料としての空気が充填されて三角柱状の低屈折率材料領域15が複数形成されることにより、フォトニック結晶の周期的配列が形成されている。このように低屈折率材料領域の形状が三角柱状である場合は、C_{3v}対称の1種である。

低屈折率材料領域15の一辺の長さLは、中心波長1.55μmとした場合、0.3μm~0.4μm程度とされる。隣合う低屈折率材料領域15と15のピッチaは0.35μm~0.55μm程度とされる。

本実施形態では低屈折率材料領域15は正三角柱状であるので、隣合う低屈折率材料領域15と15のピッチaは、低屈折率材料領域15が周期的に配置された低屈折率材料領域15における最小中心距離aと同じ大きさとなっている。

【0035】

この2次元フォトニック結晶スラブ10aでは、 $\Delta n = (n_H^2 - n_L^2) / 2n_H^2$ （式中、n_Hは上記高屈折率材料の屈折率、n_Lは上記低屈折率材料の屈折率を示す。）で定義される比屈折率差が0.35より大きくなるようにスラブ材11に用いる材料と低屈折率材料領域15に用いる材料を選択することが好ましく、より好ましくはが0.45以上になるような材料を用いるのがよい。比屈折率差が0.35以下であると、TE-likeモード、TM-likeモードの両方のフォトニックバンドギャップが開かなくなってしまうため好ましくない。

【0036】

また、本実施形態の2次元フォトニック結晶スラブは、先に述べた理由により、 $0.15 \leq t/\lambda_0 \leq 0.20$ （式中、tはスラブ材11の厚み、λ₀はバンドギャップの中心波長）なる関係を満たすように構成されている。

10

20

30

40

50

さらに、 $0.7 < L/a < 1.0$ (式中、 L は低屈折率材料領域15の一辺の長さ、 a は上記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たすように構成されていることが先に述べた理由により好ましい。

なお、図45に示すようにスラブ材11の少なくとも一方の面(図面では下面側)に補強層11aが設けられたものを使用すれば、隣接する低屈折率材料領域15、15の一部が重なった構造や隣接する低屈折率材料領域15、15が接触した構造もとることができるので、 $0.7 < L/a < 1.0$ であってもよい。上記補強層11aには、上記低屈折率材料領域は形成しない。

スラブ材11の上面上にも、図45の二点鎖線で示したように補強層11aが形成されていてもよい。このようなスラブ材11の両面に補強層11aが設けられた材料としては、例えば、シリコン基板のようにSi層の両面にそれぞれSiO₂層を有するものを挙げる
10
ことができる。

【0037】

また、低屈折率材料領域が占める割合(低屈折率材料領域が空気からなるときは開口率)は、2次元フォトニック結晶スラブの体積100%(ここでは線状欠陥22が形成されている部分は除く)に対して25%より多くされていることが好ましく、35%より多くされているのがさらに好ましい。低屈折率材料領域が占める割合(体積%)が25%以下であると、 t/λ_0 が上記の範囲内であってもTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することができない。

【0038】

また、複数の低屈折率材料領域15は、図3に示すように一群の平行線Mの方向に対して $\pm 30^\circ$ の奇数倍を除いた範囲の一定の傾斜角度で配置されていることが好ましい。複数の低屈折率材料領域15は一群の平行線の方向に対して $\pm 30^\circ$ の奇数倍であると、フォトニックバンドギャップが現れない。
20

なお、図3は、複数の正三角柱状低屈折率材料領域15が一群の平行線Mの方向に対して0度の傾斜角度で配置されている場合である。

【0039】

また、上記複数の低屈折率材料領域15は図2に示すように導波路22を中心とした左右非対称になるように配置されている。

また、実施形態の2次元フォトニック結晶導波路10では、導波路幅Wを調整することにより、ドナー型導波路とされている。本発明において導波路幅とは、線状欠陥22を中心とした左右(両側)の低屈折率材周期構造部中心間の距離のことをいい、本実施形態では各低屈折率材料領域15は正三角柱状であるので線状欠陥22を中心とした左右の低屈折率材料領域15、15の中心間の距離ということもできる。
30

【0040】

上記構成の2次元フォトニック結晶スラブ10aは、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードのギャップ周波数帯を一致させることができるので、上記両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することができ、しかも高次スラブモードが立たないため、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止できる。

この上記の2次元フォトニック結晶スラブ10aに外部からTE-likeモード又はTM-likeモードの光R₁を入射させると、フォトニック結晶内では、面内方向にはフォトニックバンドギャップにより伝搬を禁じられ、面直方向には上下の低屈折率材料による全反射により閉じこめられる。
40

【0041】

また、本実施形態では、2次元フォトニック結晶スラブ10aに三角格子状に配列された複数の低屈折率材料領域15の一部が線状に抜き取られることにより、フォトニック結晶スラブに線状欠陥22が導入され、この線状欠陥22中には導波モードが存在し、導波路22とされている。この導波路22は、2次元フォトニック結晶スラブ10aに入射させた光R₁がTE-likeモードとTM-likeモードのいずれであっても伝搬できる。なお、導波路22は光を低損失で伝搬できる波長域は比較的大きく、従って、導波路22は
50

数チャンネルの波長を含む波長帯域の光を伝搬させることができる。

【0042】

本実施形態の2次元フォトニック結晶導波路10では、導波路22がドナー型である場合について説明したが、導波路幅Wを変更することによりアクセプタ型であってもよい。また、導波路幅Wを変更することにより、モードの分散関係とモードの周波数の領域のうち少なくとも一方を制御することができる。このようにすることにより、ドナー型導波路からアクセプタ型導波路にわたり所望のモードの分散関係とモードの周波数の領域を有した2次元フォトニック結晶導波路を実現できる。

また、シングルモードの光の伝搬帯域を確保できる点では、 $(\frac{3}{2})a \times (\frac{2}{16})W$ ($\frac{3}{18})a \times (\frac{18}{16})$ (式中、Wは導波路幅、aは上記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たすことが好ましい。Wが $(\frac{3}{2})a \times (\frac{2}{16})$ 未満であると、導波路モードが消失し、 $(\frac{3}{18})a \times (\frac{18}{16})$ を超えると、シングルモードを確保できなくなる。

【0043】

本実施形態の2次元フォトニック結晶導波路によれば、線状欠陥22がJ方向に形成されたことにより、偏波無依存で、かつ、スラブ材料の面内方向への光損失を防止でき、線状の欠陥がX(あるいはM)方向に形成されている場合と比べて導波路に入射させた光がTE-likeモードとTM-likeモードのいずれであっても低損失で伝搬させることができる。

なお、スラブ材11に低屈折率材料領域15が三角格子状に配列された場合は、60度曲げ導波路を容易に形成することも可能である。

【0044】

また、上記実施形態においては、複数の低屈折率材料領域15が導波路22を中心とした左右非対称になるように配置されている場合について説明したが、図4に示すように複数の低屈折率材料領域15が導波路22を中心とした左右対称になるように配置された2次元フォトニック結晶導波路10Aであってもよい。このような2次元フォトニック結晶導波路10Aでは、導波路幅Wを変更するとモードが交差する。また、導波路中心に対し波形が左右対称な光を上記導波路内に入れ易く、伝搬させ易い。なお、図4中、符号10bは2次元フォトニック結晶スラブである。

【0045】

また、上記実施形態においては、 C_{3v} 対称の1種である正三角柱状の低屈折率材料領域15がスラブ材11に三角格子状に配列されて屈折率分布が形成された場合について説明したが、図46に示すように三角柱の各側面に凸部を設けた形状(横断面三角形の各角部が凹状にカットされた形状、或いは三角柱の各角部が凹状にカットにされた形状)の低屈折率材料領域25がスラブ材11に三角格子状に配列されて屈折率分布が形成されたものであってもよく、或いは図47に示すように横断面の形状がY字状(プロペラ状)の低屈折率材料領域35(三角柱の各角部に凸部を設けた形状の低屈折率材料領域)がスラブ材11に三角格子状に配列されて屈折率分布が形成されたものであってもよく、あるいは図48に示すように中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された3つの円柱状領域45a、45a、45aを一単位とした形状の低屈折率材料領域45が配列されて屈折率分布が形成されたものであってもよい。

【0046】

図46~図48に示した低屈折率材料領域の形状は、いずれも C_{3v} 対称のものである。図46中、Lは凸部の長さ、Mは凸部の高さ、aは低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数である。図47中、Lは凸部の長さ、Mは凸部の高さ、aは低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数である。図48中、Lは円柱状領域の中心間距離、rは円柱状領域45aの半径、aは低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数である。

【0047】

(第2の実施形態)

10

20

30

40

50

図5は、第2の実施形態の波長分波器の概略構成を示す斜視図である。

第2の実施形態の波長分波器が第1の実施形態の波長分波器と異なるところは、2次元フォトリック結晶導波路50が備えられている点であり、詳しくは、この2次元フォトリック結晶導波路50に備えられる2次元フォトリック結晶スラブ50aを構成するスラブ材11に形成された低屈折率材料領域65の形状と配列状態が異なることと、線状欠陥(導波路)22の形成方向が異なる点である。

【0048】

この2次元フォトリック結晶スラブ50aの具体的な構造としては、スラブ材11に低屈折率材料領域65が正方格子状に配列されることにより屈折率分布が形成されたものである。

本実施形態ではスラブ材11に複数の円形孔64が形成されている。この円形孔64は正方格子の格子点に相当する位置に形成されたものである。そして、複数の円形孔64のそれぞれに低屈折率材料としての空気が充填されて円柱状の低屈折率材料領域65が複数形成されることにより、フォトリック結晶の周期的配列が形成されている。

また、本実施形態では、先に述べた理由により、 $0.1 < t / \lambda_0 < 0.3$ (式中、 t は上記スラブ材11の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長)なる条件を満たしている。

また、 $0.4 < r / a < 0.50$ (式中、 r は上記低屈折率材料領域65の半径の長さ、 a は上記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)なる関係を満たすことが先に述べた理由により好ましい。

また、低屈折率材料領域65が占める割合は、2次元フォトリック結晶スラブの体積100% (ここでは線状欠陥22が形成されている部分は除く) に対して25%より多くされている。

【0049】

この2次元フォトリック結晶スラブ50aにおいても、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードのギャップ周波数帯を一致させることができるので、上記両モードの光に対して共通のフォトリックバンドギャップを有することができ、しかも高次スラブモードが立たないため、スラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止でき、低損失とすることができる。

【0050】

この2次元フォトリック結晶スラブ50aに、上記フォトリック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥22がX方向に形成され、この線状欠陥22が光を通過させる導波路とされたものである。ここでのX方向とは、本実施形態のように平面視円形状の低屈折率材料領域65が正方格子状に配列されている場合、図5に示す矢印 B_1 、 B_2 で示される方向はいずれも-Y方向である。上記導波路22は矢印 B_1 で示される方向に形成されているが、矢印 B_2 で示される方向に形成されていてもよい。なお、図5中、矢印Cで示される方向は、-M方向である。

また、本実施形態では上記の複数の低屈折率材料領域65は図5に示すように導波路22の中心に対して左右対称になるように配置されている。

【0051】

本実施形態の2次元フォトリック結晶導波路50は、2次元フォトリック結晶スラブ50aに、フォトリック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥22がX方向に形成されたことにより、偏波無依存で、かつ、スラブ材料の面内方向への光損失を防止でき、導波路に入射させた光がTE-likeモードとTM-likeモードのいずれであっても低損失で伝搬させることができる。

また、スラブ材11に低屈折率材料領域65が正方格子状に配置された場合は、直角曲げ導波路を容易に形成することも可能である。

なお、本実施形態では低屈折率材料領域65が円柱状である場合について説明したが、三角柱状、四角柱状、五角柱状、六角柱状等の多角柱状、楕円柱状のいずれかの形状であってもよい。

10

20

30

40

50

また、上記の第1～第2の実施形態においては、線状欠陥が一つ形成された2次元フォトニック結晶導波路について説明したが、線状欠陥は1以上設けられていてもよい。

【0052】

(実験例1)

スラブ材11に形成する複数の三角柱状低屈折率材料領域15の一群の平行線Mに対する傾斜角度を $-30^\circ \sim +30^\circ$ の範囲で変更した以外は図1乃至図3に示したものと同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。なお、ここで作製した2次元フォトニック結晶スラブは、 $\alpha = 0.46$ 、 $L/a = 0.85$ 、 $t/a = 0.80$ なる条件とした。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部から $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ の光を入射し、バンドギャップの低屈折率材料領域傾斜角依存性について調べた。その結果を図6に示す。なお、図7は傾斜角度が 30° の場合の三角柱状低屈折率材料領域の配列状態を示しており、図8は傾斜角度が 15° の場合の三角柱状低屈折率材料領域の配列状態を示しており、図9は傾斜角度が 0° の場合の三角柱状低屈折率材料領域の配列状態を示している。

【0053】

図6のグラフにおいて、横軸は傾斜角度 θ 、縦軸はバンドギャップ周波数の中心値 g に対するバンドギャップ周波数幅 Δg の割合である。

図6に示す結果から複数の三角柱状低屈折率材料領域は一群の平行線Mに対する傾斜角度が -30° と $+30^\circ$ のときは $\Delta g/g$ が0であり、フォトニックバンドギャップが現れていない。 $-30^\circ < \theta < +30^\circ$ の範囲のときに、フォトニックバンドギャップが存在し、特に、傾斜角度が 0° のときは、 $\Delta g/g$ が最大値を示しており、フォトニックバンドギャップを示す周波数幅が非常に広いことがわかる。

【0054】

(実験例2)

スラブ材11の厚み t と、三角柱状低屈折率材料領域15の割合(開口率)を変更した以外は図1乃至図3に示したものと同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。なお、ここで作製した2次元フォトニック結晶スラブは、 $\alpha = 0.46$ なる条件とした。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部からTE-likeモードとTM-likeモードの光をそれぞれ入射したときの2次元完全フォトニックバンドギャップ(2次元完全PBG)のスラブ材厚さ依存性について調べた。その結果を図10乃至図15に示す。なお、図10乃至図15に作製した2次元フォトニック結晶スラブの t/a の値と t/a_0 の値も合わせて示した。

【0055】

図10～図15のグラフにおいて、横軸は空気からなる三角柱状低屈折率材料領域の開口率、縦軸は規格化周波数である。図10～図15のグラフ中、点線に囲まれた領域はTM-like modeのときの開口率とバンドギャップの関係を示しており、実線に囲まれた領域はTE-like modeのときの開口率とバンドギャップの関係を示している。また、図10～図15のグラフにおいて、点線に囲まれた領域と実線に囲まれた領域が重なっている部分(斜線で示される領域)が、TM-like modeとTE-like modeの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを示している。

【0056】

図10に示す $t/a = 0.60$ の場合と図15の $t/a = 1.50$ の場合は、低屈折率材料領域の開口率がいずれであってもTE-like modeとTM-like modeの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有していないことがわかる。

これに対して図11～図14の $t/a = 0.65 \sim 1.50$ の場合は、TM-like modeとTE-like modeの両モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することができ、2次元完全フォトニックバンドギャップが存在していることがわかる。2次元完全フォトニックバンドギャップとはTE-like modeとTM-like modeの両モード

10

20

30

40

50

の光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することをいう。

図12の $t/a = 0.80$ の場合は2次元完全フォトニックバンドギャップを示す周波数幅が広いことがわかる。

【0057】

(実験例3)

スラブ材11の厚み t と、 L/a を変更した以外は図1乃至図3に示したものと同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。ここでは $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 付近がバンドギャップの中心波長になるように a の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ の光を入射し、スラブ材11の厚み t と完全バンドギャップの有無との関係を調べた。また、高次スラブモードの発生の有無も調べた。これらの結果を図16と図17に示す。なお、図16と図17のグラフにおいて、横軸はスラブ材の厚み t (μm)、縦軸はTE、TM-like mode共通フォトニックバンドギャップの波長帯幅 (nm) である。

【0058】

図16～図17に示す結果からスラブ材の厚さが $0.295 \mu\text{m}$ を超える (t/λ_0 が約 0.19 を超える) と、高次スラブモードが発生し、 $0.255 \mu\text{m}$ 未満 (t/λ_0 が約 0.15 未満) であると、完全バンドギャップが得られない。また、 L/a が 0.70 未満であると、完全バンドギャップが得られないことがわかる。

図16～図17の結果から $0.70 < L/a < 1.0$ なる条件と、 $0.1 < t/\lambda_0 < 0.3$ なる条件を満たすことにより、TE-like モードとTM-like モードの光に対して共通のフォトニックバンドギャップを有することができ、高次スラブモードの発生を防止できることがわかる。

【0059】

(実験例4)

スラブ材11の導波路幅 W を変更した以外は図1乃至図3に示したものと同様の各種の2次元フォトニック結晶導波路を作製した。なお、ここで作製した2次元フォトニック結晶スラブ導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブの $t/a = 0.80$ 、 $L/a = 0.85$ と一定とした。また、導波路幅 W は、 $W_0 = (3)a$ を基準とし、 $W_{-16} = (3)a \times (0/16) \sim W_{+4} = (3)a \times (20/16)$ の範囲で変更した。

作製した各種の2次元フォトニック結晶導波路に外部からTE-like modeの光を入射したときのモードの分散関係とモードの周波数の領域について調べた。その結果を図18(a)～図33(a)に示し、また、図18(b)～図33(b)に各導波路幅のときの2次元フォトニック結晶導波路に形成される導波路の一部分を示した。なお、図29(b)は、 $W_{-16} = 0$ の場合であるので導波路は消失している。

【0060】

図18(a)～図33(a)のグラフにおいて、横軸の $ka/2$ は規格化波数、縦軸の $a/2c$ は規格化周波数である。また、図18(a)～図33(a)のグラフ中、太線はライトラインである。

【0061】

また、三角柱状の低屈折率材領域を三角格子状に配列した2次元フォトニック結晶の場合は、導波路幅 W を変更してもTE-like mode同士は交差しないことがわかる。

また、導波路幅 W が W_{-16} では、導波路が消失し、また、 W_{+2} を超えた場合では導波路モードのシングルモード条件が成り立たなくなってしまう。

従って、 $W_{-14} = (3)a \times (2/16)$ 以上で、 $W_{+2} = (3)a \times (18/16)$ (式中、 W は導波路幅、 a は上記低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数) 以下の範囲とすれば、シングルモードの光の伝搬帯域を確保できることがわかる。

10

20

30

40

50

図18～図33の結果から、導波路幅 W を変更することにより、ドナー型からアクセプタ型に亘ってTE-like modeの分散状態と周波数の領域を制御でき、TE-like modeをバンドギャップの下限から上限まで動かすことができることがわかった。

なお、作製した各種の2次元フォトニック結晶導波路に外部からTM-like modeの光を入射した場合も、導波路幅 W を変更することにより、ドナー型からアクセプタ型に亘ってTM-like modeの分散状態と周波数の領域を制御でき、TM-like modeをバンドギャップの下限から上限まで動かすことができることを確認した。

以上の導波路幅 W を変更することにより、ドナー型からアクセプタ型に亘ってTE-like modeやTM-like modeの分散状態と周波数の領域を制御でき、所望のモードの分散関係とモードの周波数の領域を有した2次元フォトニック結晶導波路を得ることが可能であることがわかる。

【0062】

(実験例5)

スラブ材11の導波路幅 W を変更し、スラブ材11に形成する孔を円形孔にし、該円形孔内に空気からなる円柱状の低屈折率材料領域を形成した以外は実験例4と同様の各種の2次元フォトニック結晶導波路を作製した。本実験例で作製した2次元フォトニック結晶導波路は、円柱状の低屈折率材料領域が三角格子状に配置され、これら低屈折率材料領域が導波路の中心に対して左右対称に配置された構成としたものである。

なお、ここで作製した2次元フォトニック結晶スラブ導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブの $t/a = 0.60$ 、 $r/a = 0.29$ (式中、 r は低屈折率材料領域の半径、 a は低屈折率材周期構造部における最小中心距離又は格子定数)と一定とした。また、導波路幅 W は、 $W_0 = (3)a$ を基準とし、 $W_0 = (3)a \sim W_{16} = (3)a \times (0/16)$ の範囲で変更した。

【0063】

作製した各種の2次元フォトニック結晶導波路に外部からTE-like modeモードの光を入射したときの分散関係とモードの周波数の領域について調べた。その結果を図34(a)～図43(a)に示し、また、図34(b)～図43(b)に各導波路幅のときの2次元フォトニック結晶導波路に形成される導波路の一部分を示した。なお、図43(b)は、 $W_{16} = 0$ の場合であるので導波路は消失している。

【0064】

図34(a)～図43(a)のグラフにおいて、横軸の $ka/2$ は規格波数、縦軸の $a/2c$ は規格化周波数である。また、図34(a)～図43(a)のグラフ中、太線はライトラインである。

【0065】

図34～図43に示した結果から円柱状の低屈折率材料領域が三角格子状に配置され、しかもこれら低屈折率材料領域が導波路の中心に対して左右対称に配置された2次元フォトニック結晶スラブが備えられた2次元フォトニック結晶導波路においては、 W_0 、 W_2 でTE-like modeどうしは交差することがわかる。

なお、三角柱状の低屈折率材料領域が三角格子状に配置され、しかもこれら低屈折率材料領域が導波路の中心に対して左右対称に配置された場合においても導波路幅を変更することによりTE-like modeどうしは交差することを確認した。

【0066】

(実験例6)

L/a を変更した以外は図1乃至図3に示したものと同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。ここでは $\lambda_0 = 1550$ nm付近がバンドギャップの中心波長になるように a の値、 L の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

図49は、 $L/a = 0.85$ 、 $\lambda_0 = 0.15a$ 、 $f = 0.36$ (f は2次元フォトニック結晶スラブ全体に対する低屈折率材料領域が占める割合、即ち、本実験例では開口割合である)とした場合の三角柱状低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図50は、 $L/a = 1$ 、 $\lambda_0 = 0a$ 、 $f = 0.5$ とした場合の三角柱状低屈折率材料領域

10

20

30

40

50

の配列状態を示している。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ の光を照射し、二次元完全バンドギャップ幅を調べた。結果を図45～図50に合わせて示す。

図49～図50中、 λ_{TM} は、TM-like modeのフォトニックバンドギャップの波長帯幅(単位はnm)であり、 λ_{TE} は、TE-like modeのフォトニックバンドギャップの波長帯幅(単位はnm)である。

図49～図50に示した結果から、 $L/a = 0.85$ の場合のTE、TM-like mode共通フォトニックバンドギャップの波長帯幅は 59 nm であったが、 $L/a = 1$ の場合は 176 nm であり、 $L/a = 1$ の場合の方が二次元完全バンドギャップ幅が広いことがわかる。

【0067】

(実験例7)

低屈折率材料領域の形状を三角柱の各側面に凸部を設けた形状(三角柱の各角部が凹状にカットにされた形状)になるようにしたこと、 L/a を変更した以外は実験例6と同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。ここでは $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 付近がバンドギャップの中心波長になるように a の値、 L の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

図51は、 $L/a = 0.6$ 、 $M = 0.1a$ (L は凸部の長さ、 M は凸部の高さ、 a は低屈折率材周期構造部における最小中心距離である。)、 $f = 0.39$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図52は、 $L/a = 0.7$ 、 $M = 0.1a$ 、 $f = 0.49$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図53は、 $L/a = 0.8$ 、 $M = 0.1a$ 、 $f = 0.6$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ の光を照射し、二次元完全バンドギャップ幅を調べた。結果を図51～図53に合わせて示す。

【0068】

図51～図53に示した結果から、低屈折率材料領域の形状を三角柱の各角部が凹状にカットにされた形状になるように形成した場合においては、 $L/a = 0.6$ の場合のTE、TM-like mode共通フォトニックバンドギャップの波長帯幅は 53 nm 、 $L/a = 0.7$ の場合は 116 nm であったが、 $L/a = 0.8$ の場合は 225 nm であり、 $L/a = 0.8$ とした場合が二次元完全バンドギャップ幅が広いことがわかる。

【0069】

(実験例8)

低屈折率材料領域の形状を、横断面の形状がY字状(プロペラ状)になるようにした(三角柱の各角部に凸部を設けるようにした)こと、 L/a を変更した以外は実験例6と同様の各種の2次元フォトニック結晶スラブ作製した。ここでは $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 付近がバンドギャップの中心波長になるように a の値、 L の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

図54は、 $L/a = 0.3$ 、 $M = 0.3a$ 、 $\lambda = 0.156a$ 、 $f = 0.39$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図55は、 $L/a = 0.34$ 、 $M = 0.34a$ 、 $\lambda = 0.006a$ 、 $f = 0.46$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図56は、 $L/a = 0.366$ 、 $M = 0.366a$ 、 $\lambda = 0a$ 、 $f = 0.53$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

作製した各種の2次元フォトニック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ の光を照射し、二次元完全バンドギャップ幅を調べた。結果を図54～図56に合わせて示す。

【0070】

図54～図56に示した結果から、低屈折率材料領域の形状を横断面の形状がY字状に

10

20

30

40

50

なるように形成した場合においては、 $L/a = 0.3$ の場合のTE、TM-like mode共通フォトリックバンドギャップの波長帯幅は50nm、 $L/a = 0.366$ の場合のは89nmであったが、 $L/a = 0.34$ の場合のは136nmであり、 $L/a = 0.34$ とした場合が二次元完全バンドギャップ幅が広いことがわかる。

【0071】

(実験例9)

中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された3つの円柱状領域を一単位とした形状の低屈折率材料領域を三角格子状に配列して屈折率分布を形成したことで、 L/a を変更した以外は実験例6と同様の各種の二次元フォトリック結晶スラブ作製した。ここでは $\lambda_0 = 1550$ nm付近がバンドギャップの中心波長になるように a の値、 L の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

10

図57は、 $L/a = 0.425$ 、 $r = L/2$ (L は円柱状領域の中心間距離、 r は円柱状領域の半径である。)、 $\theta = 0.15a$ 、 $f = 0.49$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図58は、 $L/a = 0.45$ 、 $r = L/2$ 、 $\theta = 0.1a$ 、 $f = 0.55$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

図59は、 $L/a = 0.5$ 、 $r = L/2$ 、 $\theta = 0a$ 、 $f = 0.68$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態を示している。

作製した各種の二次元フォトリック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550$ nmの光を入射し、二次元完全バンドギャップ幅を調べた。結果を図57～図58に合わせて示す。

20

【0072】

図57～図58に示した結果から中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された3つの円柱状領域を一単位とした形状の低屈折率材料領域を配列して屈折率分布を形成した場合においては、 $L/a = 0.5$ の場合のTE、TM-like mode共通フォトリックバンドギャップの波長帯幅は無し、 $L/a = 0.425$ の場合のは140nmであったが、 $L/a = 0.45$ の場合のは202nmであり、 $L/a = 0.45$ とした場合が二次元完全バンドギャップ幅が広いことがわかる。

【産業上の利用可能性】

【0073】

本発明の二次元フォトリック結晶導波路が備えられた光デバイスは光アドドロップフォトリックデバイス(光アドドロップ多重装置)等のアドドロップ素子に好適に用いることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0074】

【図1】第1の実施形態の波長分波器の概略構成を示す斜視図。

【図2】図1の波長分波器に備えられた二次元フォトリック結晶導波路を示す概略平面図。

【図3】図2の二次元フォトリック結晶導波路に備えられた二次元フォトリック結晶スラブに形成された複数の低屈折率材料領域を示す拡大平面図。

【図4】本発明に係わる二次元フォトリック結晶導波路の他の実施形態を示す概略平面図。

40

【図5】第2の実施形態の波長分波器の概略構成を示す斜視図。

【図6】バンドギャップの低屈折率材料領域傾斜角依存性を示す図。

【図7】 $\theta = 30$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

【図8】 $\theta = 15$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

【図9】 $\theta = 0$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

【図10】 $t/a = 0.60$ の場合の二次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図11】 $t/a = 0.65$ の場合の二次元完全PBG幅と開口率との関係を示す図。

【図12】 $t/a = 0.80$ の場合の二次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図13】 $t/a = 0.90$ の場合の二次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

50

【図14】 $t/a = 1.50$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図15】 $t/a =$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率との関係を示す図。

【図16】 スラブ材の厚み t と完全バンドギャップ の関係を示す図。

【図17】 スラブ材の厚み t と完全バンドギャップ の関係を示す図。

【図18】 $W_0 = (3)a$ の場合の (a) TE-like mode の分散関係を示すグラフ、
(b) 導波路を示す部分平面図。

【図19】 $W_{-2} = (3)a \times (14/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図20】 $W_{-4} = (3)a \times (12/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。 10

【図21】 $W_{-5} = (3)a \times (11/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図22】 $W_{-6} = (3)a \times (10/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図23】 $W_{-7} = (3)a \times (9/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図24】 $W_{-8} = (3)a \times (8/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図25】 $W_{-9} = (3)a \times (7/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。 20

【図26】 $W_{-10} = (3)a \times (6/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図27】 $W_{-11} = (3)a \times (5/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図28】 $W_{-14} = (3)a \times (2/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図29】 $W_{-16} = (3)a \times (0/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図30】 $W_{+1} = (3)a \times (17/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。 30

【図31】 $W_{+2} = (3)a \times (18/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図32】 $W_{+3} = (3)a \times (19/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図33】 $W_{+4} = (3)a \times (20/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図34】 $W_0 = (3)a$ の場合の (a) TE-like mode の分散関係を示すグラフ、
(b) 導波路を示す部分平面図。

【図35】 $W_{-2} = (3)a \times (14/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。 40

【図36】 $W_{-4} = (3)a \times (12/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図37】 $W_{-6} = (3)a \times (10/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図38】 $W_{-8} = (3)a \times (8/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図39】 $W_{-9} = (3)a \times (7/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図40】 $W_{-10} = (3)a \times (6/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散
関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。 50

【図41】 $W_{11} = (3)a \times (5/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図42】 $W_{12} = (3)a \times (4/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図43】 $W_{16} = (3)a \times (0/16)$ の場合の (a) TE-like mode の分散関係を示すグラフ、(b) 導波路を示す部分平面図。

【図44】従来の2次元フォトニック結晶導波路を示す概略斜視図。

【図45】本発明で使用可能な補強層付きスラブ材を示す断面図。

【図46】図2の2次元フォトニック結晶導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブに形成された C_{3v} 対称の低屈折率材料領域のその他の例を示す拡大平面図。 10

【図47】図2の2次元フォトニック結晶導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブに形成された C_{3v} 対称の低屈折率材料領域のその他の例を示す拡大平面図。

【図48】図2の2次元フォトニック結晶導波路に備えられた2次元フォトニック結晶スラブに形成された C_{3v} 対称の低屈折率材料領域のその他の例を示す拡大平面図。

【図49】 $L/a = 0.85$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図50】 $L/a = 1$ とした場合の三角柱状の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図51】 $L/a = 0.6$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。 20

【図52】 $L/a = 0.7$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図53】 $L/a = 0.8$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図54】 $L/a = 0.3$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図55】 $L/a = 0.34$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図56】 $L/a = 0.366$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。 30

【図57】 $L/a = 0.425$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【図58】 $L/a = 0.45$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

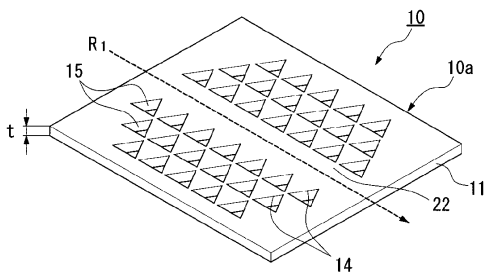
【図59】 $L/a = 0.5$ とした場合の低屈折率材料領域の配列状態と、 T_M 、 T_E を調べた結果を示す図。

【符号の説明】

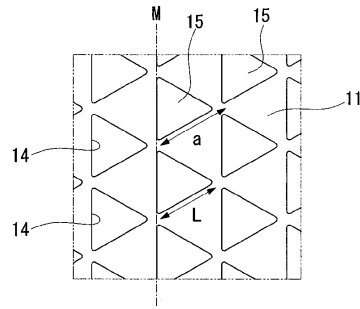
【0075】

10, 10A, 50, ... フォトニック結晶導波路、10a, 10b, 50a ...
2次元フォトニック結晶スラブ、11 ... スラブ材、11a ... 補強層、14 ...
三角孔、15, 25, 35, 45, 65 ... 空気 (低屈折率材料領域)、22 ... 線
状欠陥 (導波路)、64 ... 円形孔、a ... ピッチ、L ... 長さ、M ... 平行線、r ...
低屈折率材料領域の半径、t ... スラブ材の厚さ。 40

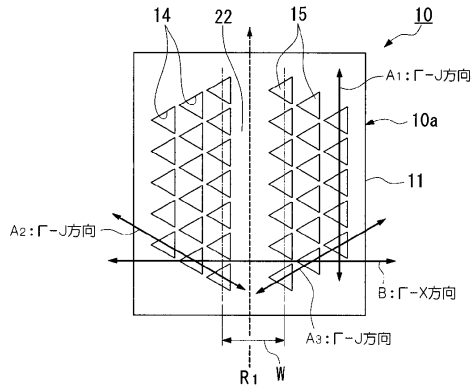
【 図 1 】



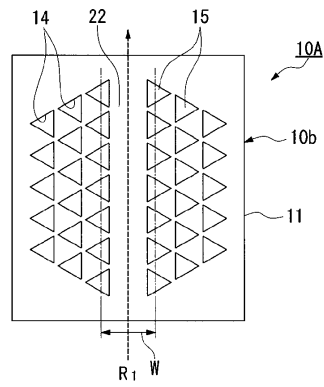
【 図 3 】



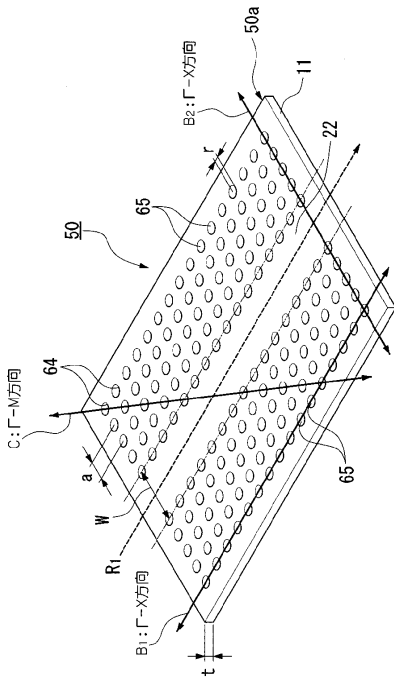
【 図 2 】



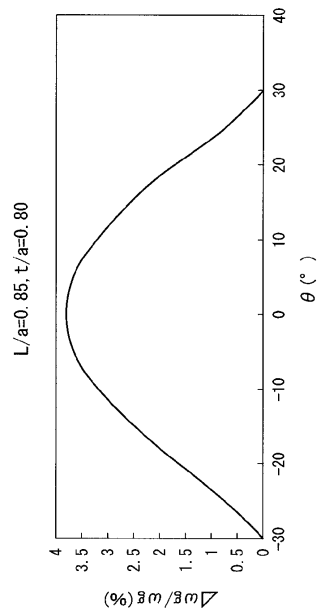
【 図 4 】



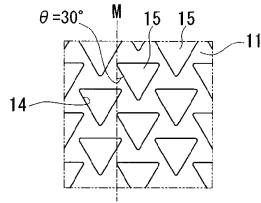
【 図 5 】



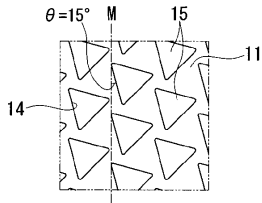
【 図 6 】



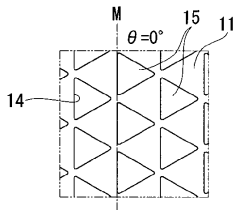
【図7】



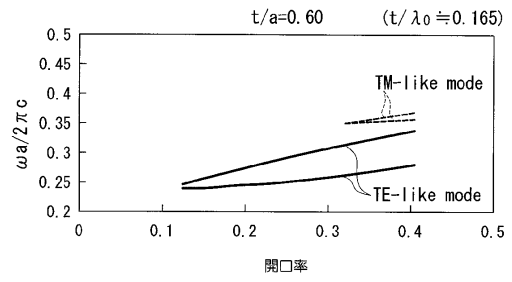
【図8】



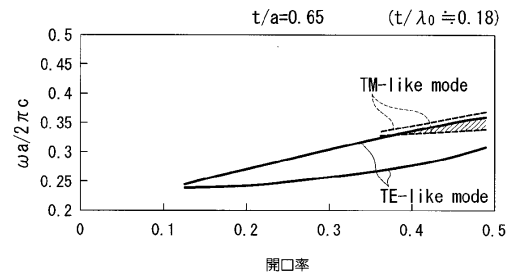
【図9】



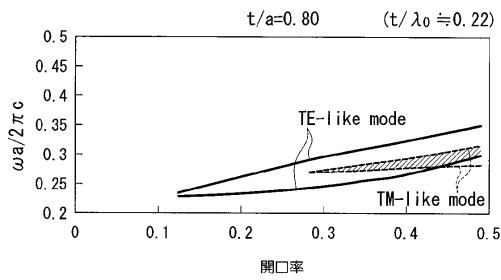
【図10】



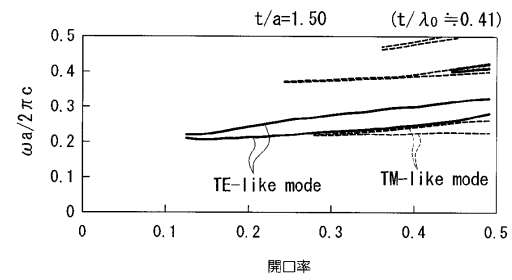
【図11】



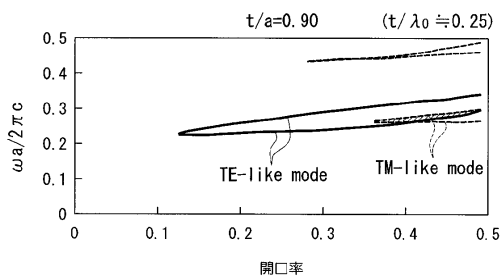
【図12】



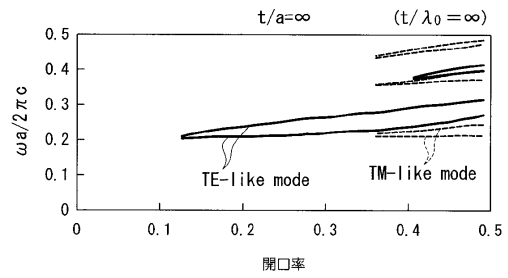
【図14】



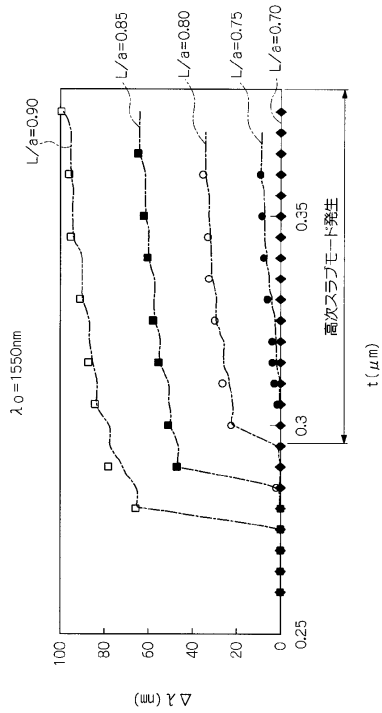
【図13】



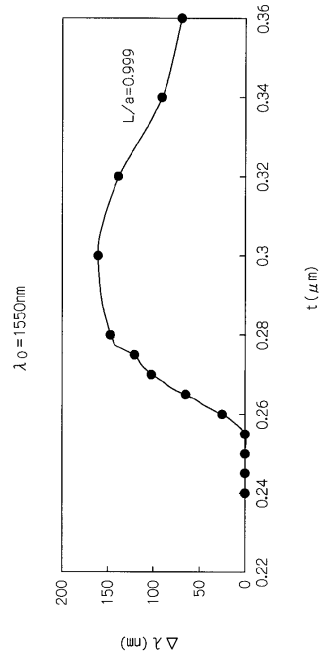
【図15】



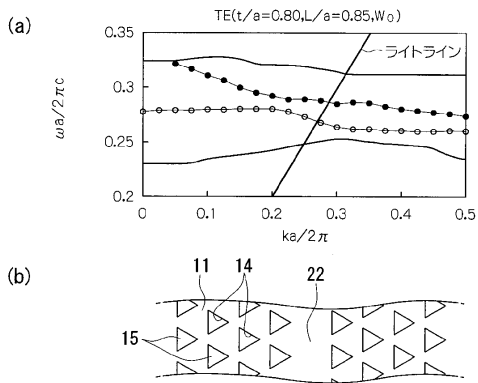
【図16】



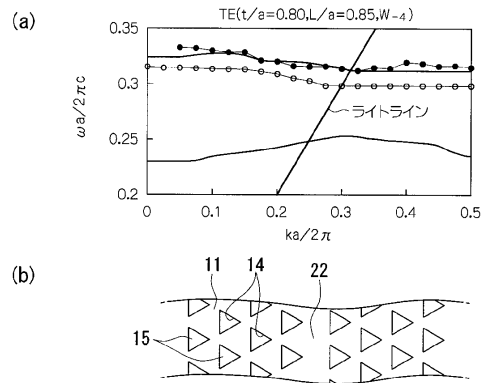
【図17】



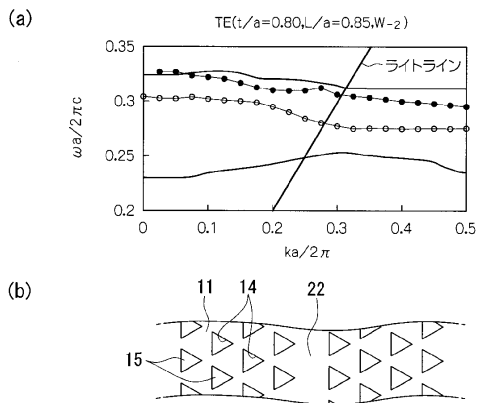
【図18】



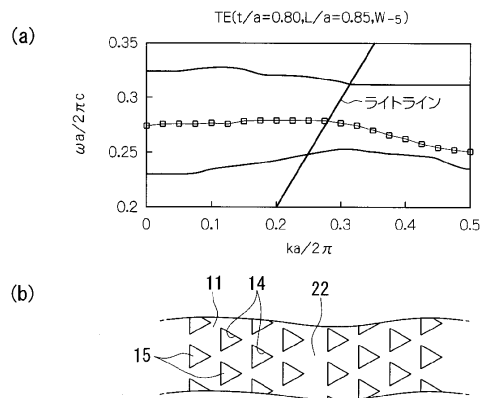
【図20】



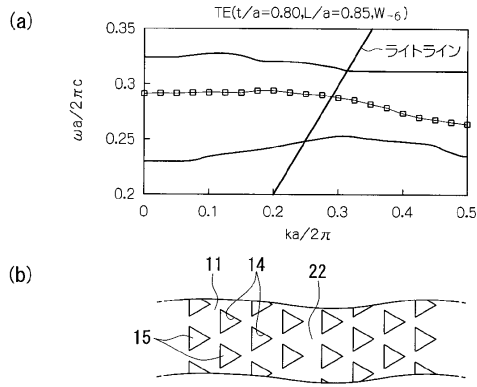
【図19】



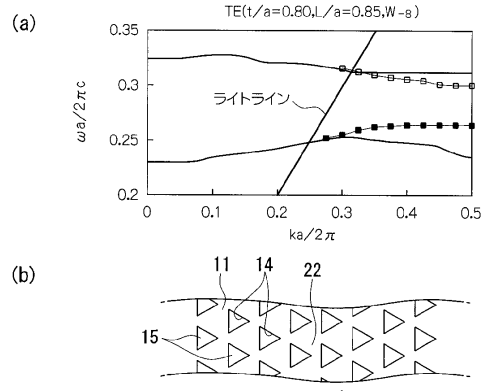
【図21】



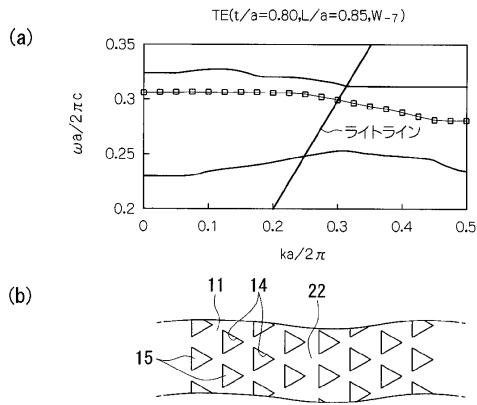
【 図 2 2 】



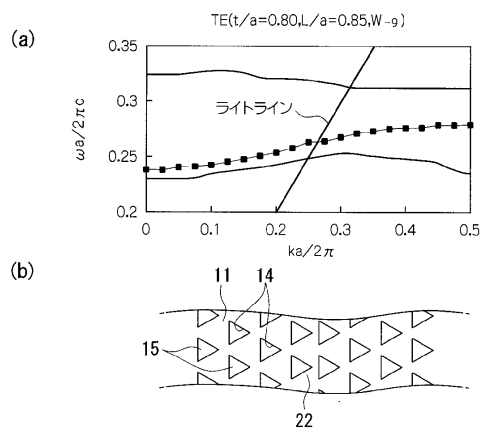
【 図 2 4 】



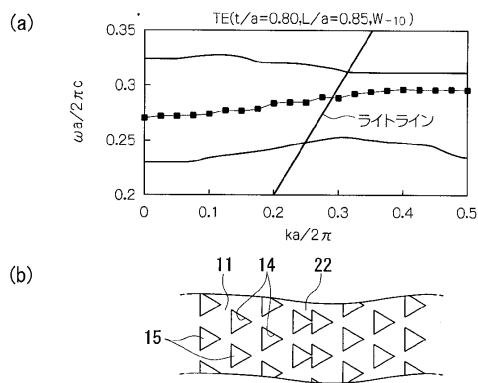
【 図 2 3 】



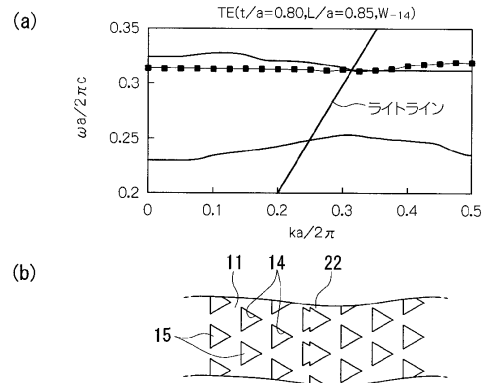
【 図 2 5 】



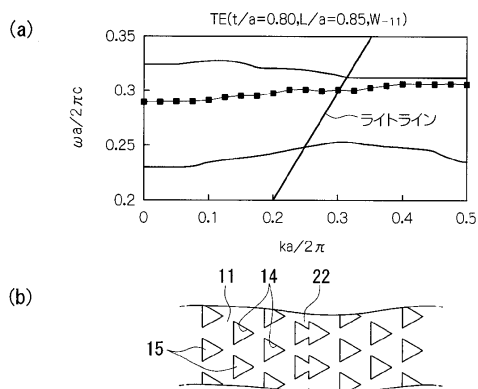
【 図 2 6 】



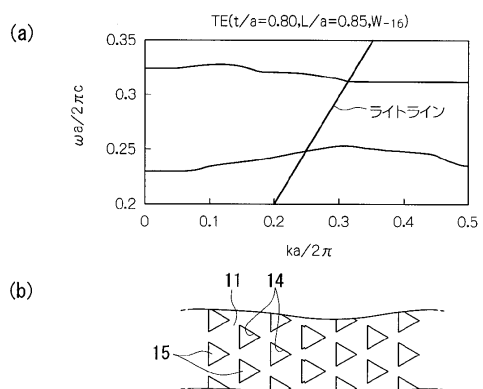
【 図 2 8 】



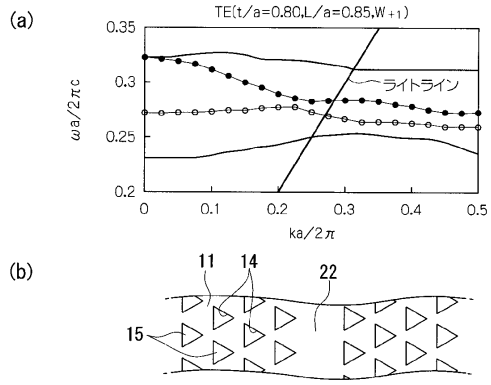
【 図 2 7 】



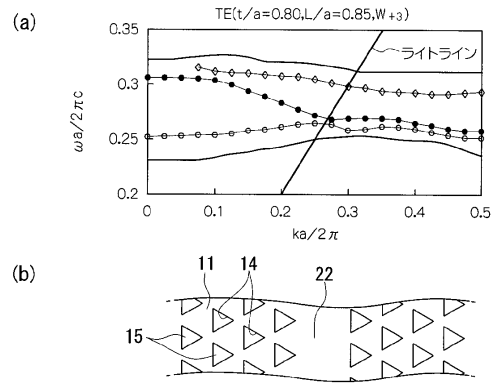
【 図 2 9 】



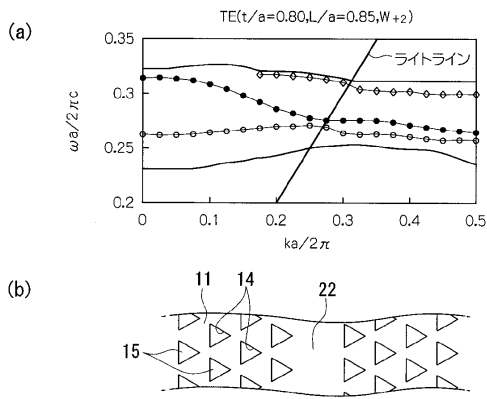
【 図 3 0 】



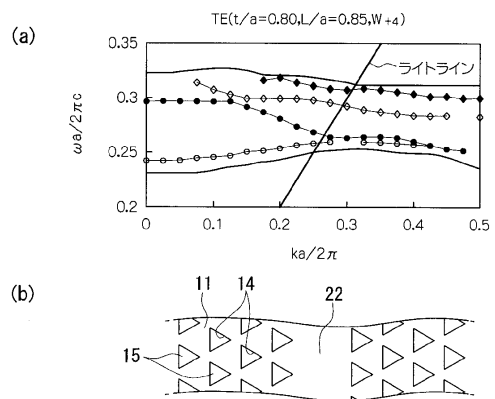
【 図 3 2 】



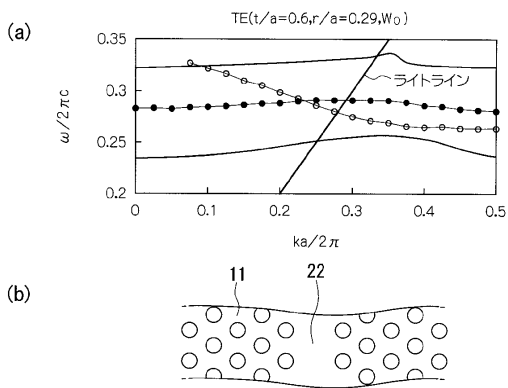
【 図 3 1 】



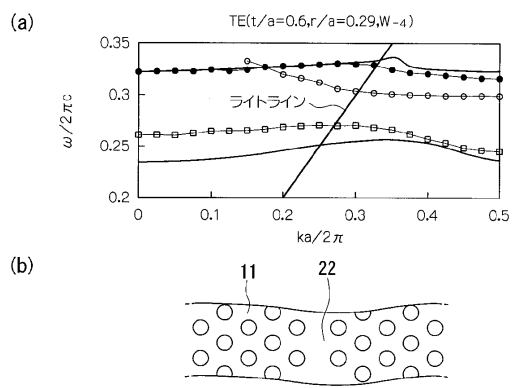
【 図 3 3 】



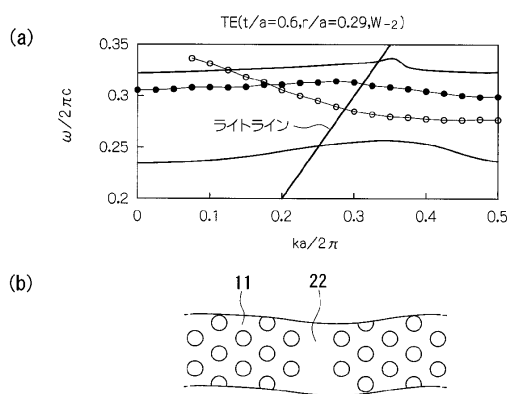
【 図 3 4 】



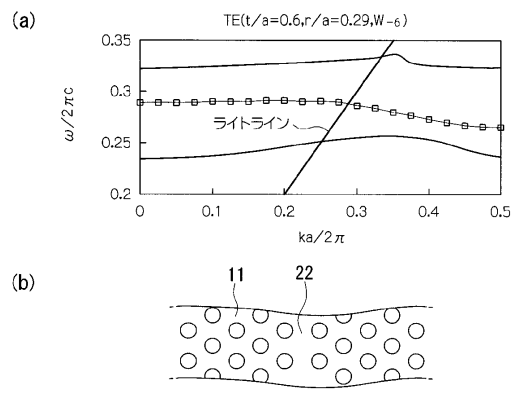
【 図 3 6 】



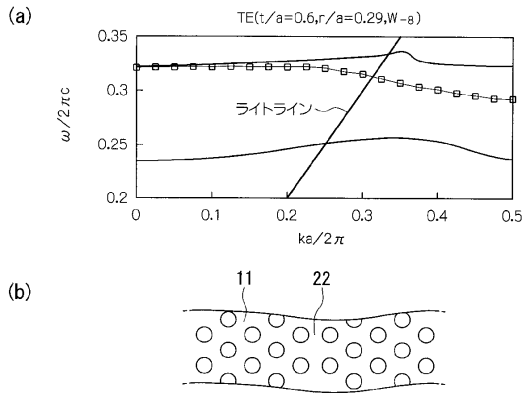
【 図 3 5 】



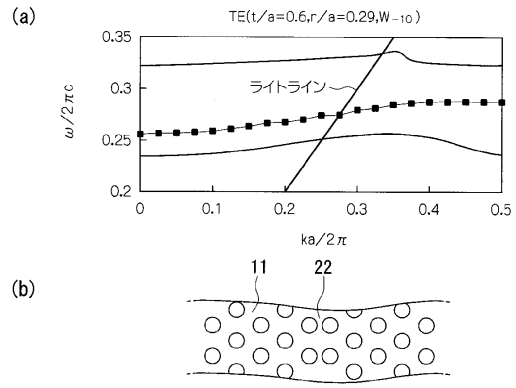
【 図 3 7 】



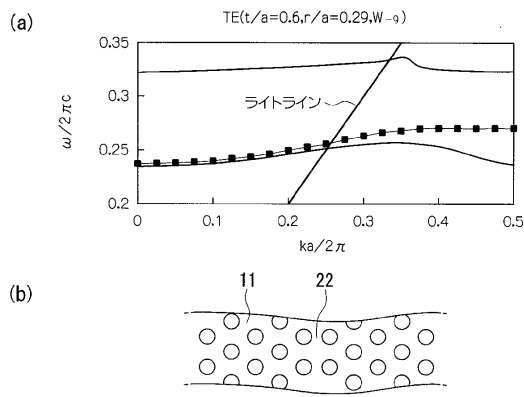
【図38】



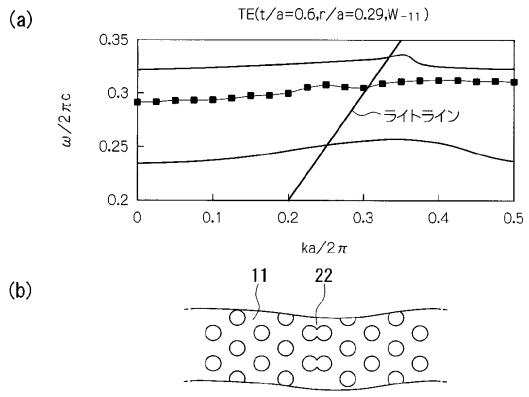
【図40】



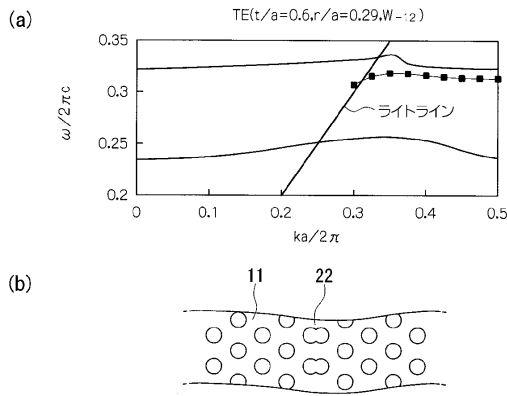
【図39】



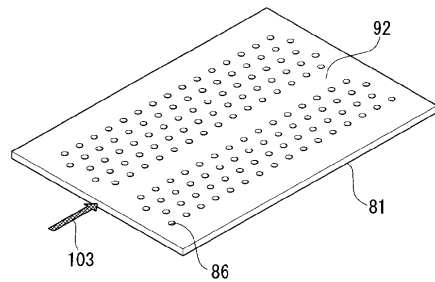
【図41】



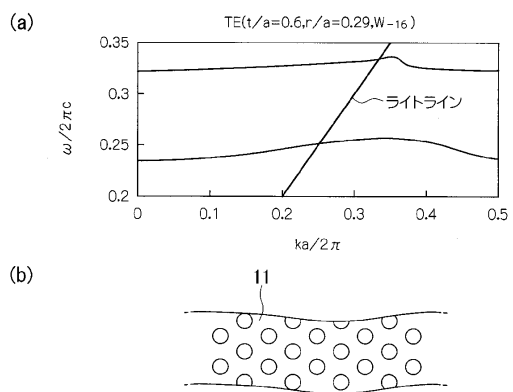
【図42】



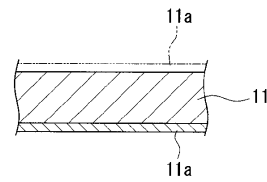
【図44】



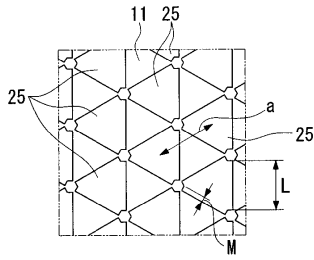
【図43】



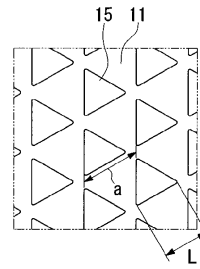
【図45】



【 46 】

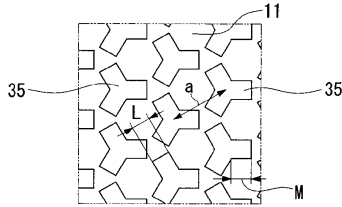


【 49 】

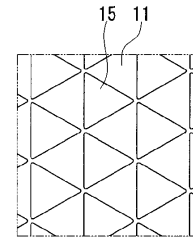


$L = 0.85a, \Delta = 0.15a, f = 0.36$
 $\Delta\lambda_{TM} = 59\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 310\text{nm}$

【 47 】

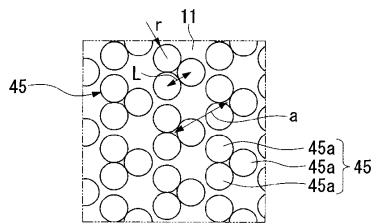


【 50 】

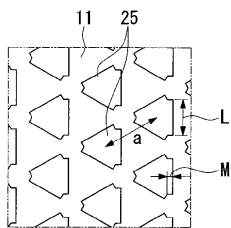


$L = 1a, \Delta = 0a, f = 0.5$
 $\Delta\lambda_{TM} = 176\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 257\text{nm}$

【 48 】

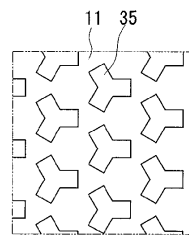


【 51 】



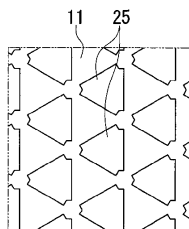
$L = 0.6a, M = 0.1a, f = 0.39$
 $\Delta\lambda_{TM} = 53\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 412\text{nm}$

【 54 】



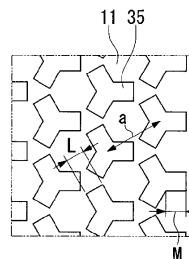
$L = 0.3a, M = 0.3a, \Delta = 0.156a, f = 0.36$
 $\Delta\lambda_{TM} = 50\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 290\text{nm}$

【 52 】



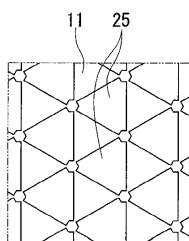
$L = 0.7a, M = 0.1a, f = 0.49$
 $\Delta\lambda_{TM} = 116\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 438\text{nm}$

【 55 】



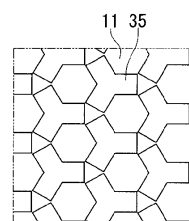
$L = 0.34a, M = 0.34a, \Delta = 0.06a, f = 0.46$
 $\Delta\lambda_{TM} = 136\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 238\text{nm}$

【 53 】



$L = 0.8a, M = 0.1a, f = 0.60$
 $\Delta\lambda_{TM} = 225\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 356\text{nm}$

【 56 】



$L = 0.366a, M = 0.366a, \Delta = 0a, f = 0.53$
 $\Delta\lambda_{TM} = 220\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 89\text{nm}$

フロントページの続き

- (74)代理人 100108453
弁理士 村山 靖彦
- (74)代理人 100086379
弁理士 高柴 忠夫
- (72)発明者 北川 均
東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプス電気株式会社内
- (72)発明者 野田 進
京都府京都市左京区吉田本町 京都大学 大学院工学研究科内
- (72)発明者 浅野 卓
京都府京都市左京区吉田本町 京都大学 大学院工学研究科内

審査官 高 芳徳

- (56)参考文献 特開2002-082239(JP,A)
特開2002-350657(JP,A)
特許第3999152(JP,B2)
欧州特許出願公開第1512994(EPA1)
特開2000-352631(JP,A)
特開2003-156642(JP,A)
北川均 他, 2003年(平成15年)春季第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 第3分冊,
2003年 3月27日, p.1129(講演番号28a-YN-10)
J.Takeda et al., Applied Surface Science, 2002年 5月 8日, Vol.190, Nos.1-4, p.
236-241
C.Jamois et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002年 7月, Vol.38, No.7,
p.805-810
D.Guney et al., The 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society, 2
001 IEEE/LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2001年11月, Vol.1, p.212-21
3
Rongzhou Wang et al., Journal of Applied Physics, 2001年11月 1日, Vol.90, No.9
, p.4307-4313
Steven G.Johnson et al., Physical Review B, 2000年 9月15日, Vol.62, No.12, p.8
212-8222
Steven G.Johnson et al., Physical Review B, 1999年 8月15日, Vol.60, No.8, p.57
51-5758
S.Kuchinsky et al., Optics Communications, 2000年 2月15日, Vol.175, Nos.1,2,3
, p.147-152
Shanhui Fan et al., Physical Review B, 2002年 6月 7日, Vol.65, p.235112-1~235
112-8
北川均 他, 2004(平成16年)春季第51回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 2004年 3
月28日, 第3分冊, p.1169(講演番号31a-M-3)
北川均 他, 2003年(平成15年)秋季第64回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 2003年 8
月30日, 第3分冊, p.939(講演番号1a-ZM-2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 1/00 - 6/43
JSTPlus(JDreamII)
JST7580(JDreamII)