

(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2005-99672

(P2005-99672A)

(43) 公開日 平成17年4月14日(2005.4.14)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/12	GO2B 6/12	Z 2H047
GO2B 5/18	GO2B 5/18	2H049
	GO2B 6/12	N

審査請求 未請求 請求項の数 16 O L (全 31 頁)

(21) 出願番号	特願2004-58981 (P2004-58981)	(71) 出願人	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
(31) 優先権主張番号	特願2003-305329 (P2003-305329)		東京都大田区雪谷大塚町1番7号
(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
		(74) 代理人	100108453
			弁理士 村山 靖彦
		(74) 代理人	100086379
			弁理士 高柴 忠夫

最終頁に続く

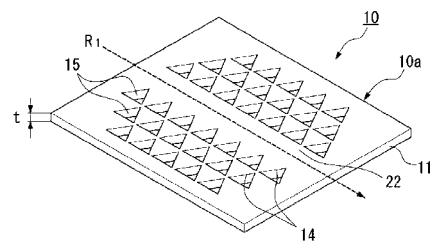
(54) 【発明の名称】 2次元フォトリック結晶スラブ及び2次元フォトリック結晶導波路

(57) 【要約】

【課題】 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を備えた低損失の2次元フォトリック結晶導波路の提供。

【解決手段】 高屈折率材料からなるスラブ材11に、三角柱状の低屈折率材料領域15が三角格子状に配列され、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10aに、フォトリック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥22がJ方向に形成され、線状欠陥22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22とされた2次元フォトリック結晶導波路10。

【選択図】 図1



【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 C_{3v} 対称であり、前記スラブ材に三角格子状に配列されていることを特徴とする 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 2】

前記スラブ材は、 $0.1 < t / \lambda_0 < 0.3$ (式中、 t は前記スラブ材の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長) なる関係を満たすことを特徴とする請求項 1 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

10

【請求項 3】

前記低屈折率材料領域は、正三角柱状、正三角柱の各角部が平坦に切断された六角柱状 (ただし正六角柱状は除く)、正三角柱の各角部に凸部を設けた形状、中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された 3 つの円柱を一単位とした形状、のうちの一つであることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 4】

前記低屈折率材料領域は正三角柱状であり、 $0.7 < L / a < 1.0$ (式中、 L は前記低屈折率材料領域の一辺の長さ、 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 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

20

【請求項 5】

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、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円柱状又は多角柱状又は楕円柱状であり、該低屈折率材料領域は前記スラブ材に正方格子状に配列され、 $0.1 < t / \lambda_0 < 0.3$ (式中、 t は前記スラブ材の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長) なる関係を満たすことを特徴とする 2 次元フォトリック結晶スラブ。

30

【請求項 6】

前記低屈折率材料領域は円柱状であり、 $0.4 < r / a < 0.5$ (式中、 r は前記低屈折率材料領域の半径の長さ、 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 5 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 7】

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特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 8】

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特徴とする請求項 5 又は 6 に記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

40

【請求項 9】

請求項 1、2、3、4、7 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。

【請求項 10】

請求項 5、6、8 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 X 方向に形成され、該線状欠陥は TE-

50

like モードと T M - 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 1 1】

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 9 に記載の 2 次元フォトニック結晶導波路。

【請求項 1 2】

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 9 に記載の 2 次元フォトニック結晶導波路。

【請求項 1 3】

前記導波路幅が変更されることにより、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が制御されたことを特徴とする請求項 9 乃至 1 1 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。

10

【請求項 1 4】

前記導波路幅が変更されることにより前記導波路がアクセプタ型とされたことを特徴とする請求項 9 乃至 1 2 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 1 5】

(3) a × (2 / 1 6) W (3) a × (1 8 / 1 6) (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 9、1 1、1 2 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。

20

【請求項 1 6】

請求項 9 乃至 1 5 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】

【0 0 0 1】

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】

30

【0 0 0 2】

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。

【0 0 0 3】

従来 2 次元フォトニック結晶導波路の一種としては、図 4 4 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 次元フォトニック結晶導波路は、空気より屈折率が高い材料からなるスラブ材料 8 1 に円柱孔 8 6 を三角格子状に配列された 2 次元フォトニック結晶を有し、図 4 4 に示すように三角格子状に配列した円柱孔 8 6 を一部線状に抜き取ることによりフォトニック結晶に線状欠陥 9 2 が導入され、この線状欠陥 9 2 が導波路とされたものである。

40

【0 0 0 4】

この 2 次元フォトニック結晶導波路では、外部から 2 次元フォトニック結晶にフォトニックバンドギャップ周波数内に相当する波長の光 1 0 3 を入射させると、線状欠陥 9 2 が形成されていないところでは、面内方向にはフォトニ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 9 2 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。

50

【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次元フォトニック結晶導波路においては、2次元フォトニ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ニ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ニ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ニ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ニック結晶の面内方向に漏れてしまふ。

10

【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ニックバンドギャップを有する構造の2次元フォトニック結晶スラブが要望されるが、そのような2次元フォトニ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る2次元フォトニ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、低損失の2次元フォトニック結晶導波路を提供することを目的の一つとする。

20

また、本発明は、上記の2次元フォトニ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次元フォトニック結晶スラブは、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、

30

前記低屈折率材料領域は、その形状が C_{3v} 対称であり、前記スラブ材に三角格子状に配列されていることを特徴とする。

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有するもののことをいう。

第1の発明の2次元フォトニック結晶スラブによれば、異なるモード(複数のモード)のギャップ周波数帯を一致させることができるので、上記異なるモード(複数のモード)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る。

【0009】

また、第2の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、上記第1の発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記スラブ材は、 $0.1 \leq t/\lambda_0 \leq 0.3$ (式中、 t は前記スラブ材の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長)なる関係を満たすことが好ましい。

40

第2の発明の2次元フォトニック結晶スラブによれば、上記異なる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、低損失とすることができる。

【0010】

また、第3の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、上記第1又は第2の発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記低屈折率材料領域は、正三角柱状、正三角柱の各角部が平坦に切断されたような六角柱状(ただし正六角柱状は除く)、正三角柱の各角部に凸部を設けた形状、中心を結ぶ線が正三角形になるように配置された3つの円柱を一

50

単位とした形状、三角柱の各側面に凸部を設けた形状のもの、横断面の形状がY字状（プロペラ状）のもの、三角柱の各角部が凹状にカットにされた形状のうちの一つである。

上記異なるモード（複数のモード）は、TE-likeモードとTM-likeモードの両モードであってもよく、その場合、第1～第3のいずれかの発明の2次元フォトニック結晶スラブは、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ものである。

【0011】

また、本発明の2次元フォトニック結晶スラブは、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、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、

上記低屈折率材料領域は正三角柱状であり、該低屈折率材料領域は上記スラブ材に三角格子状に配列され、 $0.1 < t / \lambda_0 < 0.3$ （式中、 t は上記スラブ材の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長）なる関係を満たすことを特徴とする。

本発明において正三角柱状とは、正三角柱（但し、正六角柱状を除く）の角部が丸まった略正三角柱状である場合も含む。

【0012】

上記構成の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、低損失とすることができる。

それは、 t / λ_0 が0.30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。

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ニックバンドギャップを有することをいう。

【0013】

また、第1～第3の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、上記フォトニック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥を形成すれば、該線状欠陥をTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光を低損失で通過可能な導波路とすることができる。

また、低屈折率材料領域の形状が C_{3v} 対称構造の場合は、形状や後述の L/a を変更するなどにより、フォトニックバンドギャップの幅を広い範囲で変更でき、製造が容易な形状のものを選択すれば、製造効率がよいものを提供できる。

【0014】

また、第4の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、第1乃至第3のいずれかの発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記低屈折率材料領域は正三角柱状であり、 $0.7 < L/a < 1.0$ （式中、 L は上記低屈折率材料領域の一辺の長さ、 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）なる関係を満たすことを特徴とする。

かかる構成の2次元フォトニック結晶スラブによれば、フォトニックバンドギャップの幅を広くできる点で好ましい。

なお、上記 L/a が0.70以下であると、完全バンドギャップが得られない。また、上記 L/a が1以上である場合は、スラブ構造が形成できないが、スラブ構造の少なくとも一方の面に低屈折率材料領域が形成されていない補強層を設けることで、 L/a が1であってもスラブ構造を形成することが可能である。

【0015】

また、第5の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、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、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、

上記低屈折率材料領域は円柱状又は多角柱状又は楕円柱状であり、該低屈折率材料領域は上記スラブ材に正方格子状に配列され、 $0.1 < t / \lambda_0 < 0.3$ (式中、 t は上記スラブ材の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長)なる関係を満たすことを特徴とする。ここで多角柱状とは、多角柱の角部が丸まった略多角柱状である場合も含む。

【0016】

かかる構成の第5の発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいても、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、低損失とすることができる。

10

【0017】

また、第6の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、第5の発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記低屈折率材料領域は円柱状であり、 $0.4 < r / a < 0.5$ (式中、 r は上記低屈折率材料領域の半径の長さ、 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を特徴とする。

かかる構成の次元フォトニック結晶スラブによれば、フォトニックバンドギャップの幅を広くできる点で好ましい。

なお、上記 r / a が0.4未満であると、完全バンドギャップが得られない。また、上記 r / a が0.5以上であると、スラブ構造が形成できない。

【0018】

また、第7の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、第1乃至第4のいずれかの発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記スラブ材の少なくとも一方の面に上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ものであってもよい。

20

また、第8の発明の2次元フォトニック結晶スラブは、第5又は第6の発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいて、上記スラブ材の少なくとも一方の面に上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ものであってもよい。

第7又は第8の発明の2次元フォトニック結晶スラブによれば、隣接する低屈折率材料領域の一部が重なった構造や隣接する低屈折率材料領域が接触した構造もとることができ、フォトニックバンドギャップの幅を広い範囲で変更できる。

【0019】

また、第9の発明の2次元フォトニック結晶導波路は、上記第1、第2、第3、第4、第7のいずれかの発明の2次元フォトニック結晶スラブに、上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(言い換えれば-K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。

30

【0020】

第9の発明の2次元フォトニック結晶導波路によれば、上記2次元フォトニック結晶スラブに外部から入射させる光がTE-likeモード、TM-likeモードのいずれであってもフォトニック結晶の周期的配列が存在する部分ではフォトニックバンドギャップにより伝搬を禁じられ、しかもスラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止できる。また、線状欠陥が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、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。

40

【0021】

第10の発明の2次元フォトニック結晶導波路においては、上記第5、第6、第8のいずれかの発明の2次元フォトニック結晶スラブに、上記フォトニック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥がX方向(言い換えれば-M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。

【0022】

50

第10の発明の2次元フォトリック結晶導波路によれば、上記2次元フォトリック結晶スラブに外部から入射させる光がTE-likeモード、TM-likeモードのいずれであってもフォトリック結晶の周期的配列が存在する部分ではフォトリックバンドギャップにより伝搬を禁じられ、しかもスラブ材料面内方向に光が漏れるのを防止できる。また、線状欠陥が 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。

【0023】

また、第11の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、第9の発明の2次元フォトリック結晶導波路において、上記低屈折率材料領域が上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。

10

【0024】

かかる構成の2次元フォトリック結晶導波路であれば、上記低屈折率材料領域が三角格子状に配置され、かつ該低屈折率材料領域の形状が C_{3v} 対称（正六角柱状の場合を除く）である場合（特に正三角柱状である場合）に、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。

【0025】

また、第12の発明の2次元フォトリック結晶導波路においては、第9の発明の2次元フォトリック結晶導波路において、上記低屈折率材料領域が上記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ものであってもよい。

20

かかる構成の2次元フォトリック結晶導波路であれば、上記低屈折率材料領域が三角格子状に配置され、かつ該低屈折率材料領域の形状が C_{3v} 対称（正六角柱状の場合を除く）である場合（特に正三角柱状である場合）に、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。

【0026】

また、第13の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、上記第9乃至第12の発明の2次元フォトリック結晶導波路において、上記導波路幅が変更されることにより、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が制御されたことを特徴とする。

30

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次元フォトリック結晶導波路を提供できる。

【0027】

また、第14の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、上記第9乃至第12の発明の2次元フォトリック結晶導波路において、上記導波路幅が変更されることにより上記導波路がアクセプタ型とされたことを特徴とする。

かかる構成の2次元フォトリック結晶導波路によれば、低屈折率材料領域が重なった部分がフォトリック結晶の周期的配列が乱れた部分であるので、この部分をTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光が通過可能な導波路とすることができる。

40

【0028】

また、第15の発明の2次元フォトリック結晶導波路は、上記第9、第11、第12のいずれかの発明の2次元フォトリック結晶導波路において、 $(3)ax(2/16)$ $W(3)ax(18/16)$ （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。

【0029】

また、第16の発明の光デバイスは、第9乃至第15の発明のいずれかの2次元フォ

50

ニック結晶導波路が備えられたことを特徴とする。

かかる構成の光デバイスは、光アドドロップフォトニックデバイス（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。

【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。

10

【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）

20

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。

30

【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。

40

【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】

50

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 $1.55 \mu\text{m}$ とした場合、 $0.3 \mu\text{m} \sim 0.4 \mu\text{m}$ 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 $0.35 \mu\text{m} \sim 0.55 \mu\text{m}$ 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周期構造部における最小中心距離 a と同じ大きさとなっている。

10

【0035】

この 2 次元フォトニック結晶スラブ 10 a 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 Δn 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 Δn 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 Δn 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、 $0.15 < t / \lambda_0 < 0.20$ (式中、 t はスラブ材 11 の厚み、 λ_0 はバンドギャップの中心波長) なる関係を満たすように構成されている。

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 11 a 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 11 a には、上記低屈折率材料領域は形成しない。

20

30

スラブ材 11 の上面にも、図 45 の二点鎖線で示したように補強層 11 a 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 11 a 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 SiO_2 層を有するものを挙げることができる。

【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。

40

【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 M 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。

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° の傾斜角度で配置されている場合である。

【0039】

50

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。

【0040】

上記構成の 2 次元フォトニック結晶スラブ 10 a 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 10 a に外部から TE-like モード又は TM-like モードの光 R_1 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。

【0041】

また、本実施形態では、2 次元フォトニック結晶スラブ 10 a 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 10 a に入射させた光 R_1 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、 $(3)a \times (2/16)W$ ($(3)a \times (18/16)$) (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) なる関係を満たすことが好ましい。 W が $(3)a \times (2/16)$ 未満であると、導波路モードが消失し、 $(3)a \times (18/16)$ 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 10 A 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 10 A 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次元フォトリ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。

10

【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。

20

【0047】

（第2の実施形態）

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。

30

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。

40

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

50

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次元フォトニック結晶スラブ50aに、上記フォトニ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-X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。

10

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次元フォトニック結晶導波路50は、2次元フォトニック結晶スラブ50aに、フォトニ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。

20

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。

また、上記の第1～第2の実施形態においては、線状欠陥が一つずつ形成された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、 $\theta = 0.46$ 、 $L/a = 0.85$ 、 $t/a = 0.80$ なる条件とした。

30

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、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。

40

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

50

。なお、ここで作製した2次元フォトリック結晶スラブは、 $\lambda_0 = 0.46$ なる条件とした。

作製した各種の2次元フォトリ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次元完全フォトリ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次元フォトリック結晶スラブの t/a の値と t/λ_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リックバンドギャップを示している。

10

【0056】

図10に示す $t/a = 0.60$ の場合と図15の $t/a =$ 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リ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リックバンドギャップを有することができ、2次元完全フォトリックバンドギャップが存在していることがわかる。2次元完全フォトリックバンドギャップとはTE-like modeとTM-like mode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。

20

図12の $t/a = 0.80$ の場合は2次元完全フォトリ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 の値を変更することにより、 L/a の値を変更した。

30

作製した各種の2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、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共通フォトリ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2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リ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。

40

【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次元フォトリック結晶導波路を作製した。なお、ここで作製した2次元フォトリック結晶スラブ導波路に備えられた2次元フォトリック結晶スラブの $t/a = 0.80$ 、 L/a

50

= 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。

10

【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。

20

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。

30

【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。

40

【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】

50

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次元フォトリック結晶スラブが備えられた2次元フォトリ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。

10

【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。

図49は、 $L/a = 0.85$ 、 $\lambda_0 = 0.15a$ 、 $f = 0.36$ (f は2次元フォトリ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、 $L/a = 1$ 、 $\lambda_0 = 0.1a$ 、 $f = 0.5$ 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。

20

作製した各種の2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のフォトリ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のフォトリ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共通フォトリックバンドギャップの波長帯幅は59nmであったが、 $L/a = 1$ の場合の λ_{TM} は176nm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。

30

【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。

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。

40

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次元フォトリック結晶スラブに外部から $\lambda_0 = 1550$ 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共通フォトリックバンドギャップの波長帯幅 λ_{TM} は53nm、 L/a

50

$= 0.7$ の場合の λ_{BG} は 116 nm であったが、 $L/a = 0.8$ の場合の λ_{BG} 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)ことと、 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ソ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、 $L/a = 0.3$ 、 $M = 0.3a$ 、 $\lambda_{\text{BG}} = 0.156a$ 、 $f = 0.39$ 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、 $L/a = 0.34$ 、 $M = 0.34a$ 、 $\lambda_{\text{BG}} = 0.006a$ 、 $f = 0.46$ 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、 $L/a = 0.366$ 、 $M = 0.366a$ 、 $\lambda_{\text{BG}} = 0a$ 、 $f = 0.53$ 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。

作製した各種の二次元フォトリソ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共通フォトリソニックバンドギャップの波長帯幅 $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は 50 nm 、 $L/a = 0.366$ の場合の $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は 89 nm であったが、 $L/a = 0.34$ の場合の $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は 136 nm 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と、 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ソ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。)、 $\lambda_{\text{BG}} = 0.15a$ 、 $f = 0.49$ 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、 $L/a = 0.45$ 、 $r = L/2$ 、 $\lambda_{\text{BG}} = 0.1a$ 、 $f = 0.55$ 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、 $L/a = 0.5$ 、 $r = L/2$ 、 $\lambda_{\text{BG}} = 0a$ 、 $f = 0.68$ 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ソ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57～図58に合わせて示す。

【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共通フォトリソニックバンドギャップの波長帯幅 $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は無し、 $L/a = 0.425$ の場合の $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は 140 nm であったが、 $L/a = 0.45$ の場合の $\Delta\lambda_{\text{BG}}$ は 202 nm 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ソニ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

10

20

30

40

50

トニックデバイス（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。

【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2次元フォトニック結晶導波路を示す概略平面図

。【図3】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2次元フォトニック結晶導波路の他の実施形態を示す概略平面図 10

。【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2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2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2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2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。 20

【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。 30

【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。 40

【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。 50

【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。

10

【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。

20

【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次元フォトリ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次元フォトリック結晶導波路に備えられた2次元フォトリ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。

30

【図47】図2の2次元フォトリック結晶導波路に備えられた2次元フォトリ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次元フォトリック結晶導波路に備えられた2次元フォトリ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。

40

【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。

50

【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。

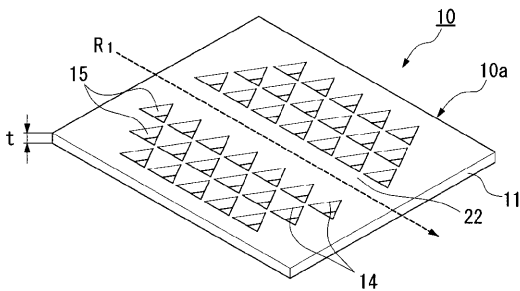
【符号の説明】

【0075】

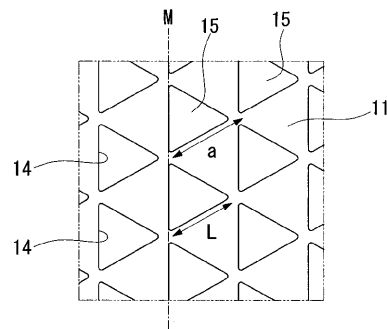
10, 10A, 50, ... フォトニック結晶導波路、10a, 10b, 50a ... 2次元フォトニック結晶スラブ、11 ... スラブ材、11a ... 補強層、14 ... 三角孔、15, 25, 35, 45, 65 ... 空気(低屈折率材料領域)、22 ... 線状欠陥(導波路)、64 ... 円形孔、a ... ピッチ、L ... 長さ、M ... 平行線、r ... 低屈折率材料領域の半径、t ... スラブ材の厚さ。

10

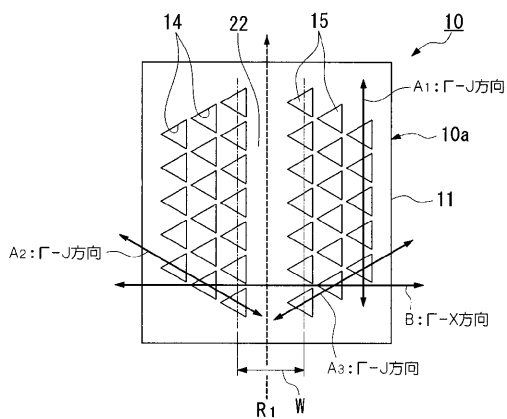
【図1】



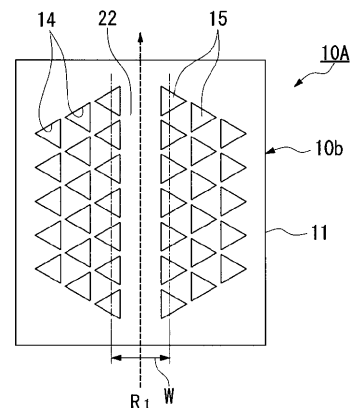
【図3】



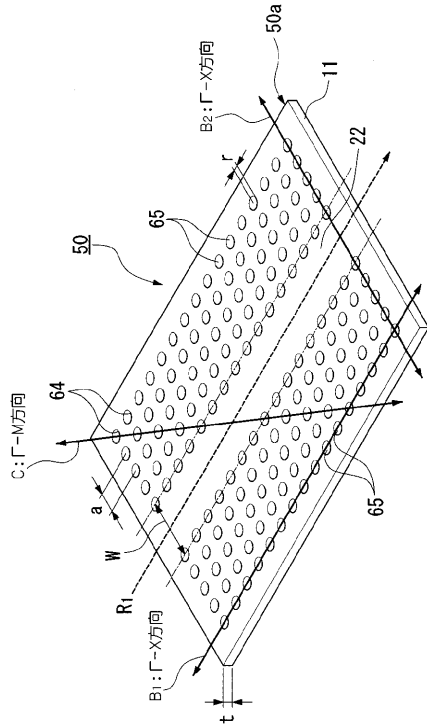
【図2】



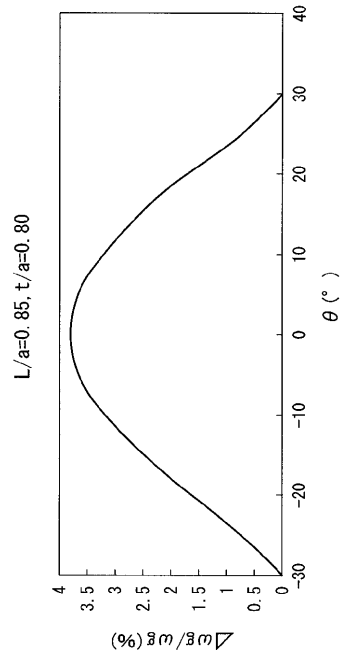
【図4】



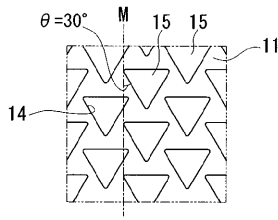
【 図 5 】



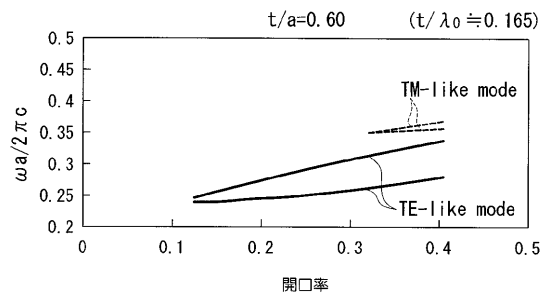
【 図 6 】



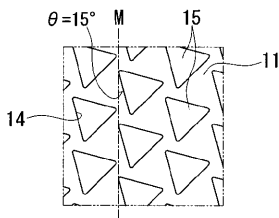
【 図 7 】



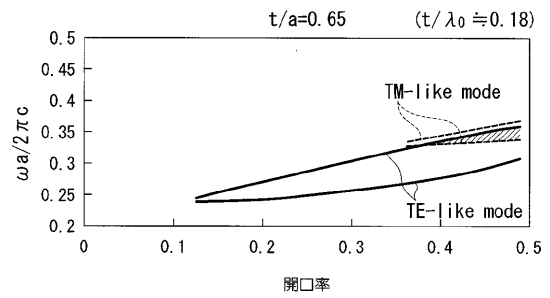
【 図 10 】



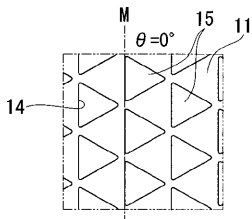
【 図 8 】



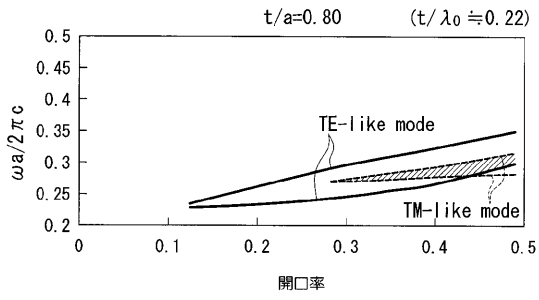
【 図 11 】



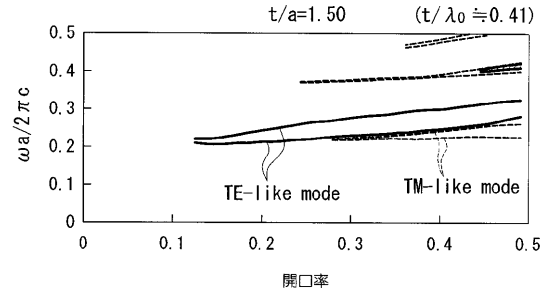
【 図 9 】



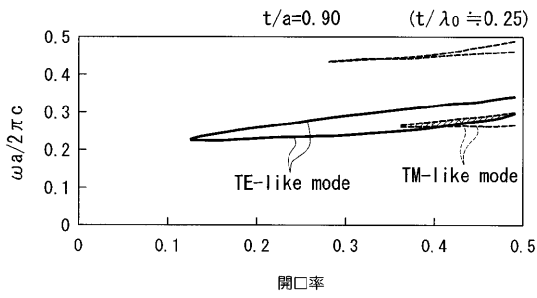
【 図 1 2 】



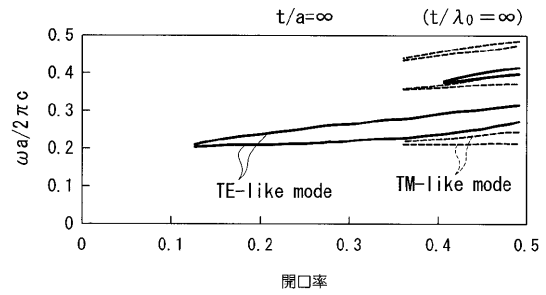
【 図 1 4 】



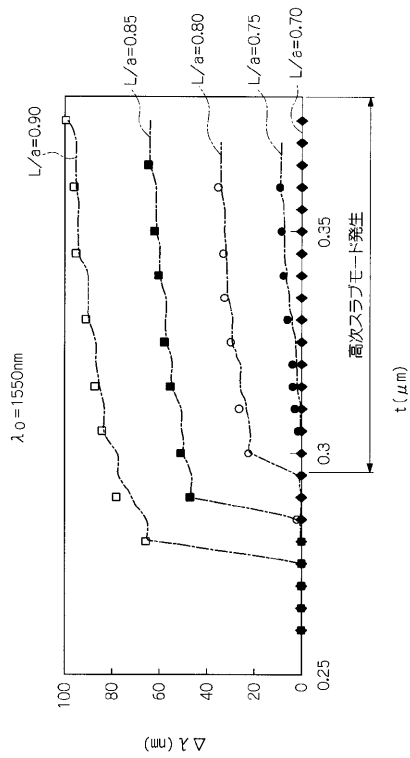
【 図 1 3 】



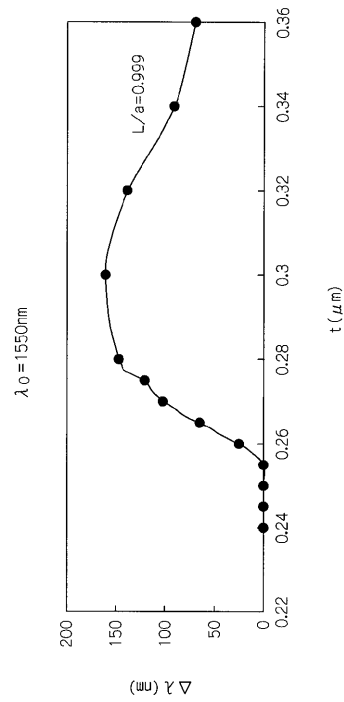
【 図 1 5 】



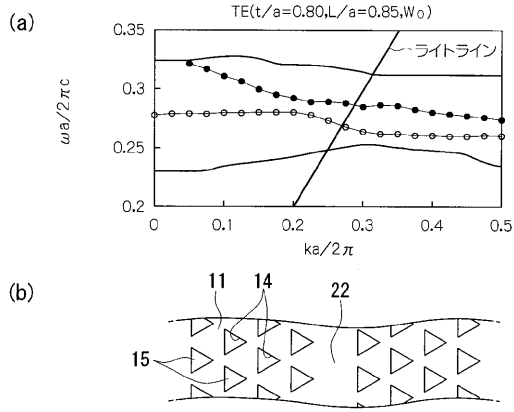
【 図 1 6 】



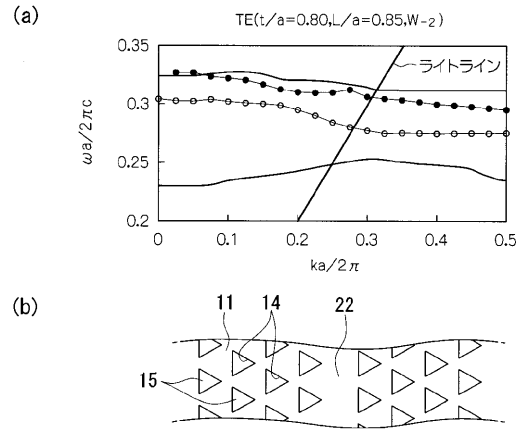
【 図 1 7 】



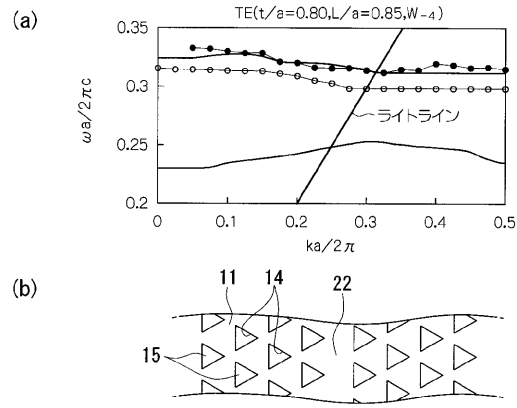
【 図 18 】



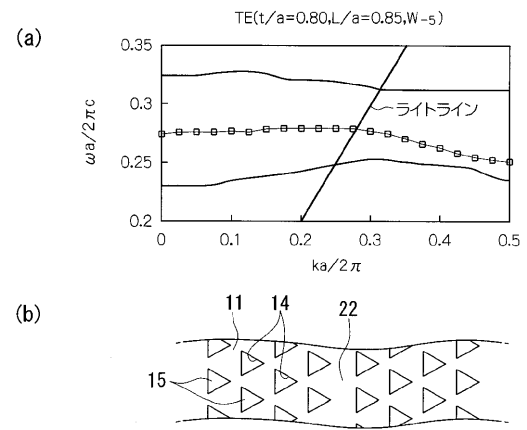
【 図 19 】



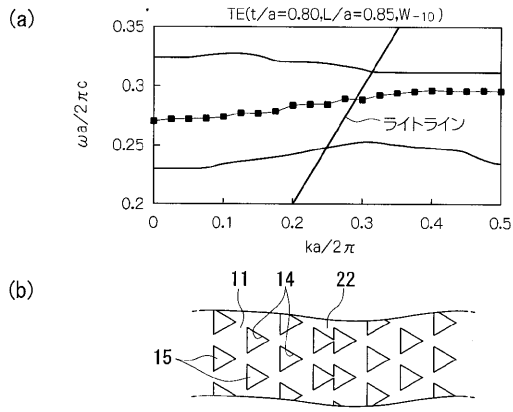
【 図 20 】



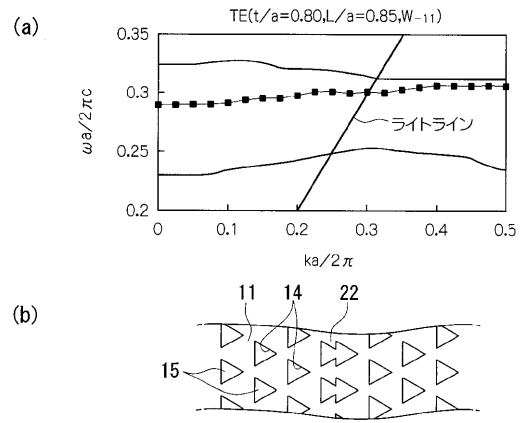
【 図 21 】



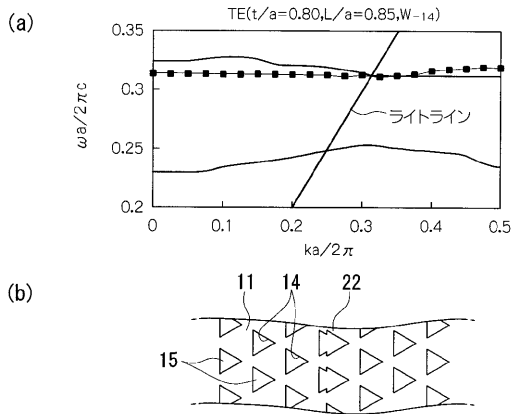
【 図 2 6 】



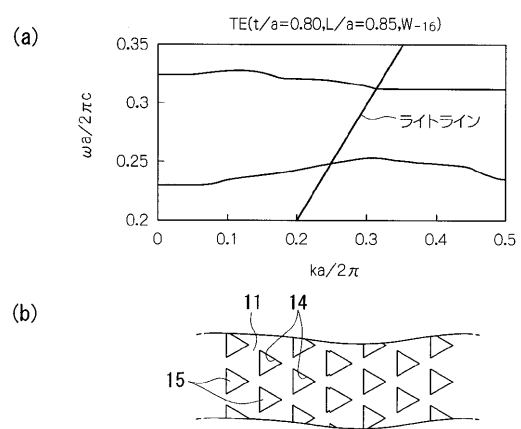
【 図 2 7 】



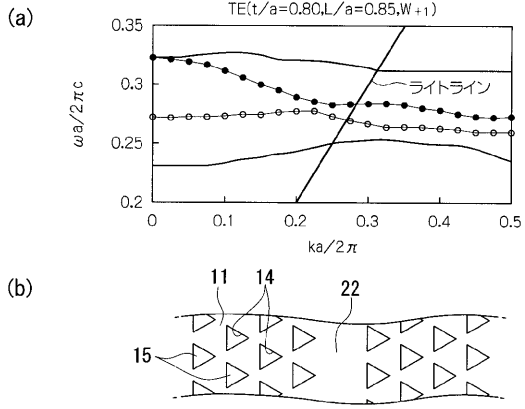
【 図 2 8 】



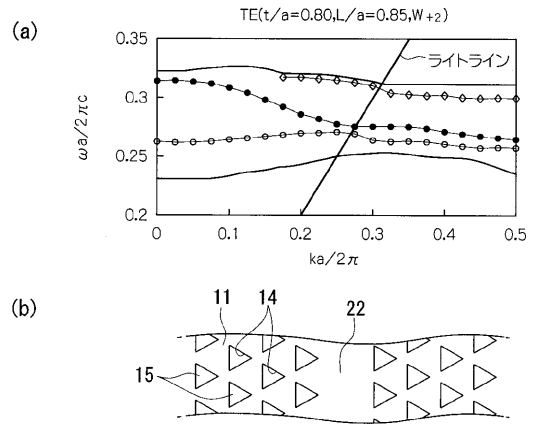
【 図 2 9 】



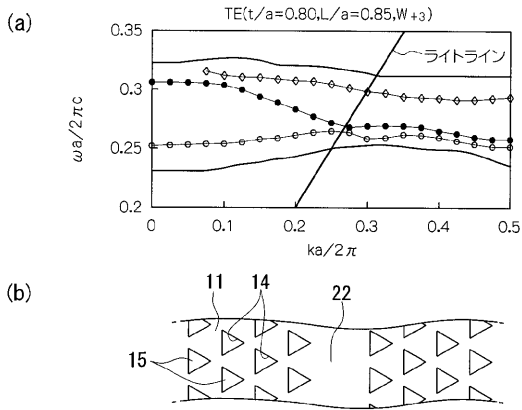
【 図 3 0 】



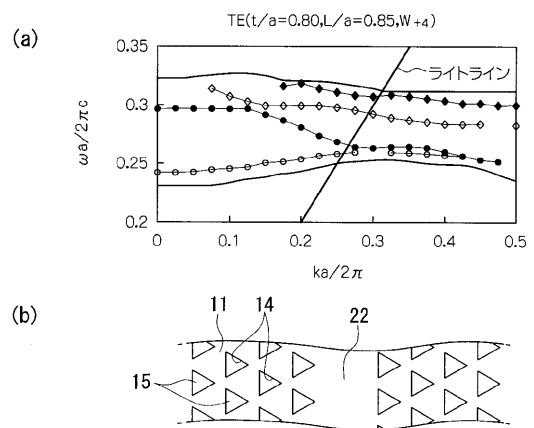
【 図 3 1 】



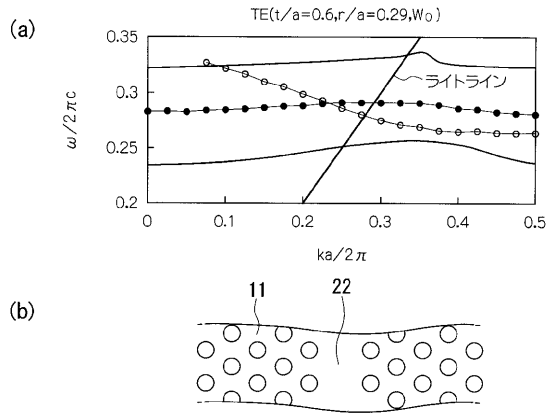
【 図 3 2 】



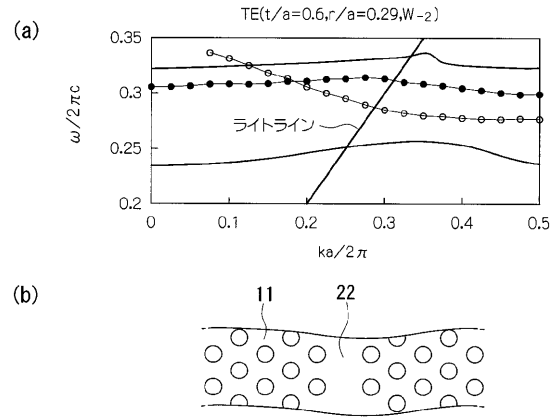
【 図 3 3 】



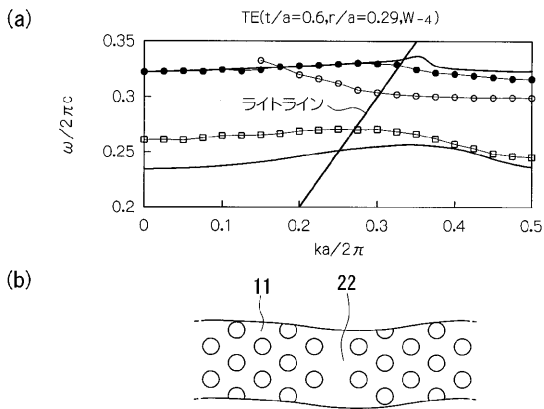
【 図 3 4 】



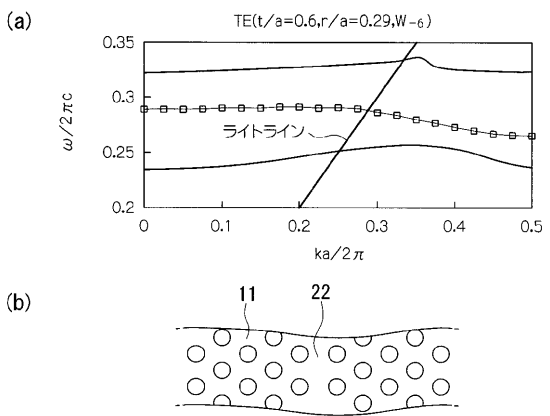
【 図 3 5 】



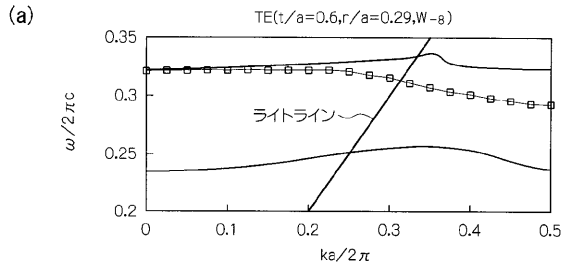
【 図 3 6 】



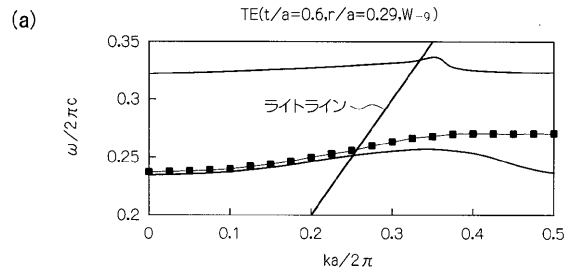
【 図 3 7 】



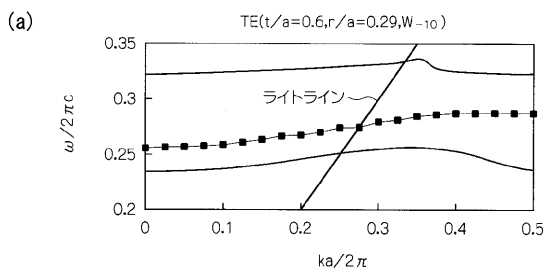
【 図 3 8 】



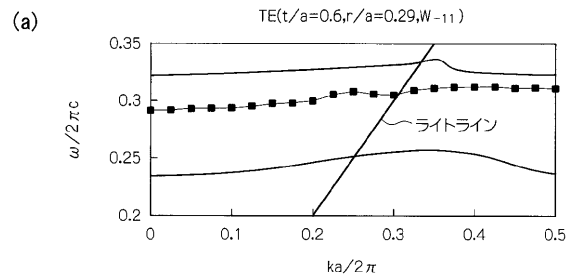
【 図 3 9 】



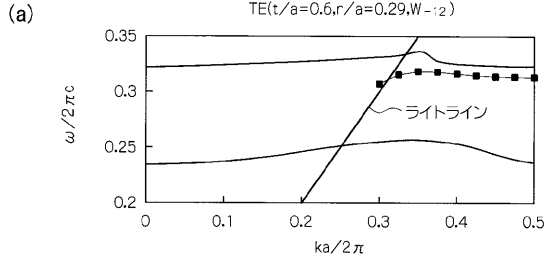
【 図 4 0 】



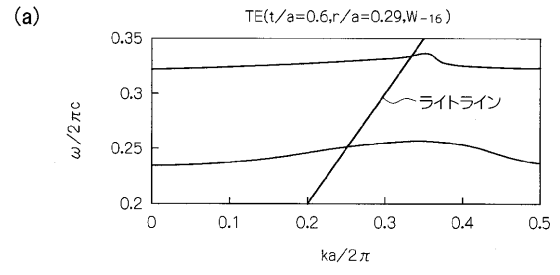
【 図 4 1 】



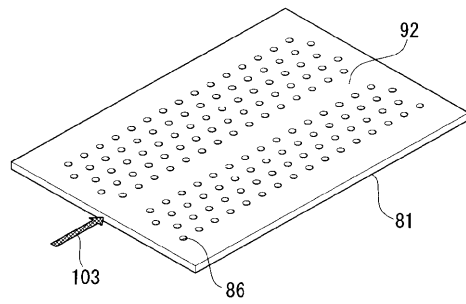
【 図 4 2 】



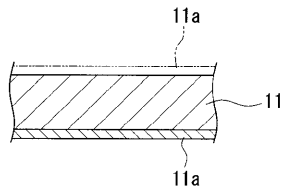
【 図 4 3 】



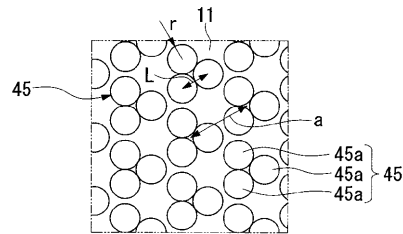
【 図 4 4 】



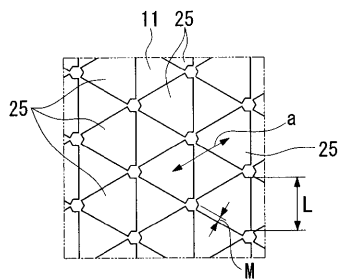
【 図 4 5 】



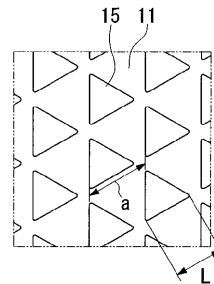
【 図 4 8 】



【 図 4 6 】

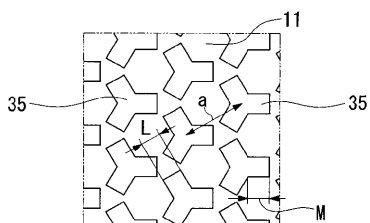


【 図 4 9 】

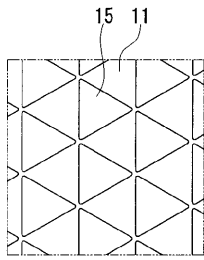


$L = 0.85a, \Delta = 0.15a, f = 0.36$
 $\Delta\lambda_{TM} = 59\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 310\text{nm}$

【 図 4 7 】



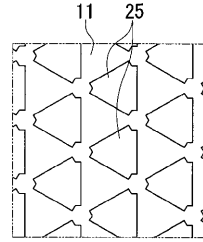
【 図 5 0 】



$$L = 1a, \Delta = 0a, f = 0.5$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 176\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 257\text{nm}$$

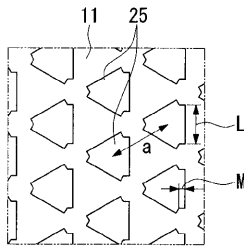
【 図 5 2 】



$$L = 0.7a, M = 0.1a, f = 0.49$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 116\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 438\text{nm}$$

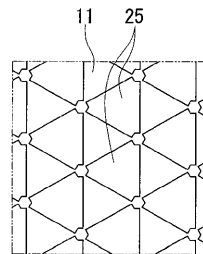
【 図 5 1 】



$$L = 0.6a, M = 0.1a, f = 0.39$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 53\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 412\text{nm}$$

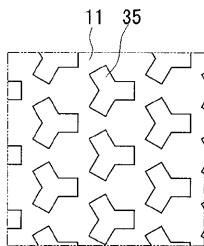
【 図 5 3 】



$$L = 0.8a, M = 0.1a, f = 0.60$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 225\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 356\text{nm}$$

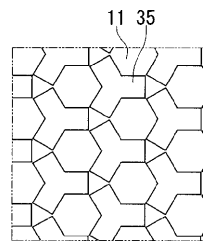
【 図 5 4 】



$$L = 0.3a, M = 0.3a, \Delta = 0.156a, f = 0.36$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 50\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 290\text{nm}$$

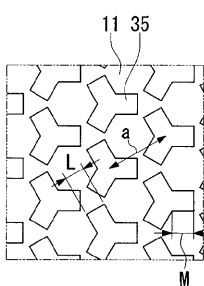
【 図 5 6 】



$$L = 0.366a, M = 0.366a, \Delta = 0a, f = 0.53$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 220\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 89\text{nm}$$

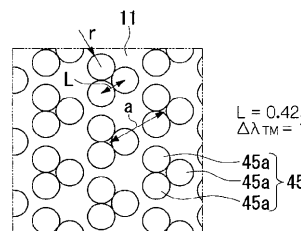
【 図 5 5 】



$$L = 0.34a, M = 0.34a, \Delta = 0.06a, f = 0.46$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 136\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 238\text{nm}$$

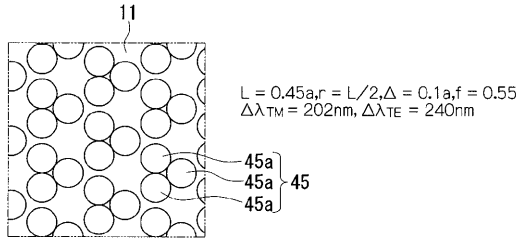
【 図 5 7 】



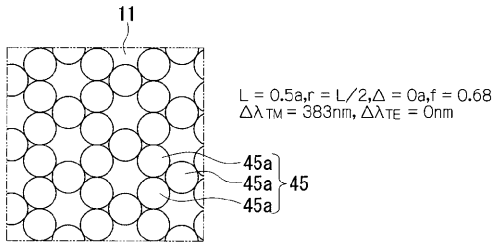
$$L = 0.425a, r = L/2, \Delta = 0.15a, f = 0.49$$

$$\Delta\lambda_{TM} = 140\text{nm}, \Delta\lambda_{TE} = 306\text{nm}$$

【 58 】



【 59 】



フロントページの続き

(71)出願人 504132272

国立大学法人京都大学

京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1

(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

Fターム(参考) 2H047 QA01

2H049 AA13 AA59 AA61 AA62 AA64