

(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2004-294517

(P2004-294517A)

(43) 公開日 平成16年10月21日(2004.10.21)

(51) Int. Cl.⁷

G02B 6/12

F I

G02B 6/12

Z

テーマコード (参考)

2H047

G02B 6/12

N

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2003-83235 (P2003-83235)

(22) 出願日 平成15年3月25日 (2003.3.25)

(71) 出願人 000010098

アルプス電気株式会社

東京都大田区雪谷大塚町1番7号

(71) 出願人 503360115

独立行政法人 科学技術振興機構

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(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 100089037

弁理士 渡邊 隆

(74) 代理人 100101465

弁理士 青山 正和

最終頁に続く

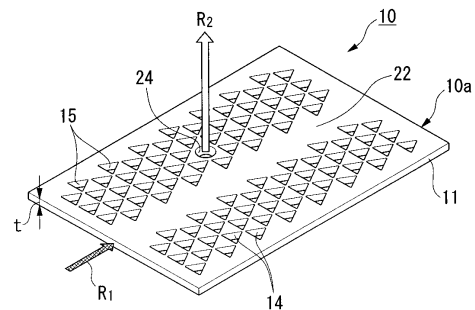
(54) 【発明の名称】 2次元フォトニック結晶スラブ及びこれを用いた光デバイス

(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の提供。このような2次元フォトニック結晶スラブを備え、特定波長の光の取り出し効率を向上できる2次元フォトニック結晶導波路の提供。

【解決手段】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10aに、フォトニック結晶の周期的配列を乱す線状欠陥22が形成され、線状欠陥22が光を通過させる導波路22とされ、導波路22の近傍にフォトニック結晶の周期的配列を乱す点状欠陥24が少なくとも一つ形成された2次元フォトニック結晶導波路10。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

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 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てなり、

$$= (n_H^2 - n_L^2) / 2n_H^2$$

(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、且つ、

$$0.35 < (t/a) < 2.0$$

(式中、 t は前記スラブ材の厚み、 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)

なる関係を満たし、前記 2 次元フォトリック結晶の前記低屈折率材料からなる領域は 25% より多く形成されている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】

前記スラブ材に前記低屈折率材料からなる領域が三角格子状に配置されていることを特徴とする請求項 2 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、三角柱状、四角柱状、五角柱状、楕円柱状のうちいずれかの形状であることを特徴とする請求項 3 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

20

【請求項 5】

前記低屈折率材料領域是一群の平行線の方角に対して $\pm 30^\circ$ 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を特徴とする請求項 3 又は 4 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 6】

前記スラブ材に、前記低屈折率材料からなる領域が八ニカム格子状に配置され、さらに前記低屈折率材料からなる領域は前記の各八ニカム格子の内部にも配置され、該八ニカム格子の内部に配置された低屈折率材料領域と前記八ニカム格子状に配置された低屈折率材料領域は大きさ又は形状が異なるものであることを特徴とする請求項 2 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

30

【請求項 7】

前記スラブ材に、前記低屈折率材料からなる領域が正方格子状に配置されていること特徴とする請求項 2 記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 8】

前記低屈折率材料からなる領域は、円柱状、楕円柱状、三角柱状、四角柱状、五角柱状、六角柱状のうちいずれかの形状であることを特徴とする請求項 6 又は 7 に記載の 2 次元フォトリック結晶スラブ。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 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の欠陥が形成され、この線状の欠陥が光を通過させる導波路とされ、該導波路の近傍に前記フォトリック結晶の周期的配列を乱す点状の欠陥が少なくとも一つ形成され、前記点状の欠陥は前記導波路中を伝搬する TE-like モードと TM-like モードの両モードの光を捕獲して放射でき、あるいは外部からの TE-like モードと TM-like モードの両モードの光を捕獲して前記導波路内に導入できる光取り出し/導入口として機能する構成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。

40

【請求項 10】

前記点状の欠陥は、スラブ面に対して上下非対称の形状を有することを特徴とする請求項

50

9記載の2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項11】

請求項9または10に記載の2次元フォトリ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】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、微小光回路素子等に用いられる2次元フォトリック結晶スラブに係わり、線状欠陥及び点欠陥の導入により形成した光取り出し/導入口を有する2次元フォトリック結晶導波路及びこれを備えた光デバイスに関する。

10

【0002】

【従来の技術】

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リ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、いわゆるフォトリ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リ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】

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25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)。

20

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25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、さらにこの線状欠陥92の近傍に上記円柱孔86の周期的配列を乱す点状欠陥94が形成され、この点状欠陥94が光の取り出し/導入口として機能する構成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、点状欠陥94や線状欠陥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し、点状欠陥94の近くまで伝搬したときに、点状欠陥94に共鳴する波長の光が点状欠陥94に捕獲され、欠陥内部で共振している間に、上下方向へ出射されるようになっている。

30

上記点状欠陥94は貫通孔であるので、この点状欠陥に捕獲された光は上下方向から出射されるが、利用できる光は点状欠陥94の上下のどちらか一方から出射されたものしか利用できないため、効率を良くするために孔の径に傾斜をつけることにより上下非対称構造とし、一方の方向から多く光103aが出るようにしている。

【0005】

【特許文献1】

特開2001-272555号公報

40

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

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(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もっている構造であるため、上下非対称構造の点状欠陥94に、例えばTE-likeモードの光103を入れて、一方の方向から出射させようとする、TE-likeモードがTM-likeモードにモード変換してしまう。この従来のフォトリック結晶は、TM-likeモードに対してはフォトリックバ

50

ンドギャップをもっていない構造であるので、T M - l i k e 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うことになり、取り出し効率が悪くなってしまう。

T E - l i k e モードとT M - l i k e 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、T E - l i k e モードとT M - l i k e 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の提供を目的の一つとする。

また、本発明は、上記2次元フォトニック結晶スラブを備えた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。 10

また、本発明は、上記2次元フォトニック結晶スラブを備え、特定波長の光の取り出し効率を向上できる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。

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。

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明の2次元フォトニック結晶スラブは、T E - l i k e モードとT M - l i k e 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特徴とする。 20

この2次元フォトニック結晶スラブでは、この結晶スラブに外部から入射させる光がT E - l i k e モード、T M - l i k e モードのいずれであってもフォトニックバンドギャップにより伝搬を禁じることが可能である。

【0009】

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てなるものであり、

$$= (n_H^2 - n_L^2) / 2n_H^2$$

(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、且つ、 30

$$0.35 < (t/a) < 2.0$$

(式中、 t は上記スラブ材の厚み、 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)

なる関係を満たし、上記2次元フォトニック結晶の上記低屈折率材料からなる領域(低屈折率材料領域ということもある)は25%より多く形成されているものであることが好ましい。ここでの低屈折率材料領域の割合は、低屈折率材料領域の体積%である。

【0010】

比屈折率差 が0.35以下であると、T E - l i k e モード、T M - l i k e 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。

また、上記 t/a が上記の範囲外であると、低屈折率材料領域が占める割合がいずれであってもT E - l i k e モードとT M - l i k e 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

また、低屈折率材料領域が占める割合が、25%以下であると、 t/a が上記の範囲内であってもT E - l i k e モードとT M - l i k e 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。

【0011】

また、本発明の2次元フォトニック結晶スラブにおいては、上記スラブ材に上記低屈折率材料領域が三角格子状に配置されたものであってもよい。

かかる2次元フォトニック結晶スラブによれば、60度曲げ導波路を容易に形成できる。

また、上記低屈折率材料領域は、三角柱状、四角柱状、五角柱状、楕円柱状のうちいずれ 50

かの形状であってもよい。

【0012】

また、上記低屈折率材料領域の形状が正三角柱状の場合の2次元フォトリック結晶スラブは、スラブ材に複数の低屈折率材料領域が配置されているが、これら複数の低屈折率材料領域は一群の平行線の方向に対して $\pm 30^\circ$ 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、フォトリックバンドギャップが現れない。

【0013】

また、本発明の2次元フォトリック結晶スラブは、上記スラブ材に、上記低屈折率材料からなる領域が八ニカム格子状に配置され、さらに上記低屈折率材料からなる領域は上記の各八ニカム格子の内部にも配置され、該八ニカム格子の内部に配置された低屈折率材料領域と上記八ニカム格子状に配置された低屈折率材料領域は大きさ又は形状が異なるものであってもよい。

10

かかる2次元フォトリック結晶スラブによれば、非常に広い結晶構造（すなわち後述の第2の低屈折率材料領域の半径Rの異なる）から、任意の構造を選択できる。

なお、上記の本発明の2次元フォトリック結晶スラブにおいて、各八ニカム格子の内部に上記低屈折率材料からなる領域が配置されていない場合、なわち低屈折率材料からなる領域（後述の第2の低屈折率材料領域が）の大きさが0である場合も本発明の範囲内とする。

20

【0014】

また、本発明の2次元フォトリック結晶スラブは、上記スラブ材に、上記低屈折率材料からなる領域が正方格子状に配置されているものであってもよい。

かかる2次元フォトリック結晶スラブによれば、直角曲げ導波路を容易に形成できる。

【0015】

また、上記低屈折率材料領域が上記八ニカム格子状や正方格子状に配置された2次元フォトリ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、楕円柱状、三角柱状、四角柱状、五角柱状、六角柱状のうちいずれかの形状であってもよい。

【0016】

また、本発明の2次元フォトリック結晶導波路は、上記のいずれかの構成の本発明の2次元フォトリック結晶スラブに、上記フォトリック結晶の周期的配列を乱す線状の欠陥が形成され、この線状の欠陥が光を通過させる導波路とされ、該導波路の近傍に上記フォトリック結晶の周期的配列を乱す点状の欠陥が少なくとも一つ形成され、上記点状の欠陥は上記導波路中を伝搬するTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光を捕獲して放射でき、あるいは外部からのTE-likeモードとTM-likeモードの両モードの光を捕獲して上記導波路内に導入できる光取り出し/導入口として機能する構成とされたことを特徴とする。

30

【0017】

かかる構成の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るが、この入射させた光は導波路（線状の欠陥）内を伝搬することができる。また、導波路内を伝搬中の光がTE-likeモード、TM-likeモードのいずれであっても、伝搬中の光の少なくとも一部は上記点状の欠陥に捕獲されて外部に出射できる。

40

また、点状の欠陥を、波長帯域中の特定チャンネルの波長のみ捕獲するよう設計することによって、特定波長の光や電磁波を取り出す分波器、合波器あるいは濾波器として機能させることができる。

【0018】

また、本発明の2次元フォトリック結晶導波路においては、上記点状の欠陥は、スラブ面

50

に対して上下非対称の形状を有するものであってもよい。

かかる構成の２次元フォトニック結晶導波路では、導波路内を伝搬中の光は上記点状の欠陥に捕獲され、この点状の欠陥の上下の一方の方向から多くの光が出射される。また、導波路内を伝搬中の光がTE-likeモード、TM-likeモードのいずれであっても上記点状の欠陥から出射される光はモード変換されたものが出射されるが、上記２次元フォトニック結晶スラブは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ので、モード変換された光が２次元フォトニック結晶スラブ内に漏れるのを防止できるので、特定波長の光の取り出し効率を向上できる。

【0019】

本発明の光デバイスは、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。本発明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。

【0020】

【発明の実施の形態】

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、該導波路２２の近傍に上記フォトニック結晶の周期的配列を乱す点状の欠陥（点状欠陥）２４が形成されたものである。

【0021】

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。

【0022】

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。

【0023】

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

10

20

30

40

50

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。

低屈折率材料領域 15 の一辺の長さ L は、中心波長 1.55 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。

【0024】

この 2 次元フォトニック結晶スラブ 10 a では、 $n_H^2 - n_L^2$ (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先に述べた理由により好ましく、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。

10

【0025】

また、スラブ材 11 の厚み t としては、 $0.35 < (t/a) < 2.0$ なる関係を満たすようにすることが先に述べた理由により好ましく、 $0.80 < (t/a) < 0.90$ なる関係を満たすことがさらに好ましい。

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 と点状欠陥 24 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、先に述べた理由により好ましく、 35% より多くされているのがさらに好ましい。

20

【0026】

また、複数の低屈折率材料領域 15 は、図 2 ~ 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先に述べた理由により好ましい。なお、図 2 と図 3 は、複数の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。

【0027】

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。

30

【0028】

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。

【0029】

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 に形成された導波路 22 の近傍の低屈折率材料領域 15 の一部が点状に抜き取られることにより、点状欠陥 24 が形成されている。この点状欠陥 24 は導波路 22 中を伝搬する光 R が TE-like モードと TM-like モードのいずれであっても光 R_1 の少なくとも一部を捕獲して放射でき、あるいは外部から導入する光が TE-like モードと TM-like モードのいずれであっても捕獲して導波路 22 内に導入できる光取り出し / 導入口として機能する構成とされている。

40

【0030】

上記点状欠陥 24 は図 4 に示すように円錐状にすることにより、その内径がスラブ材 11 の上下で変えられており、このようにすることで点状欠陥 24 がスラブ面に対して上下非

50

対称の形状を有するようにされている。

点状欠陥 24 に捕獲された光 R_1 は、この点状欠陥 24 内部で共振している間に、スラブ形状であることに起因する Q 因子の小さな上下方向へ放射され、点状欠陥 24 の径が大きい方向から多くの光が射出される。

【0031】

また、点状欠陥 24 から外部に放射される光は、導波路 22 内を伝搬中の光が TE-like モード、TM-like モードのいずれであってもモード変換された光 R_2 が射出されるが、先に述べたように 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ので、モード変換された光 R_2 が 2次元フォトニック結晶スラブ内に漏れるのを防止できるので、TE-like モードや TM-like モードなどの特定波長の光の取り出し効率を向上できる。

10

また、導波路 22 と点状欠陥 24 の間隔を適宜設定することにより、捕獲、放射する特定波長の光の割合を制御することができる。このため所定の割合で特定波長の光を取り出すことができる。

【0032】

なお、上記の実施形態においては、低屈折率材料領域 15 の形状が三角柱状である場合について説明したが、低屈折率材料領域 15 は、三角柱状、四角柱状、五角柱状、楕円柱状のうちいずれかの形状であってもよい。

また、点状欠陥 24 に上下非対称性を導入する方法として点状欠陥 24 の形状を円錐状にした場合について説明したが、図 5 に示すように点状欠陥 24 の径を段階的に変更することにより上下非対称性を導入してもよい。

20

また、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について説明したが、低屈折率材料領域の配列状態は正方格子状であってもよく、その場合の低屈折率材料領域は、円柱状、楕円柱状、三角柱状、四角柱状、五角柱状、六角柱状のうちいずれかの形状であってもよい。

【0033】

(第 2 の実施形態)

図 6 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り、図 7 は図 6 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 8 は図 6 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。

30

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、図 6 に示すような 2次元フォトニック結晶導波路 50 が備えられている点であり、詳しくは、この 2次元フォトニック結晶導波路 50 に備えられる 2次元フォトニック結晶スラブ 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 の配列状態が異なる点である。

【0034】

2次元フォトニック結晶スラブ 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 が八ニカム格子状に配置され、さらにまた低屈折率材料領域 65 は上記の各八ニカム格子の中央にも配置されている。

40

低屈折率材料領域 65 に用いる材料としては、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。

上記八ニカム格子状に配置された低屈折率材料領域 65 (第 1 の低屈折率材料領域 65a ということもある。)と、八ニカム格子の中央に配置された低屈折率材料領域 65 (第 2 の低屈折率材料領域 65b ということもある。)は大きさが異なるものである。

【0035】

本実施形態ではスラブ材 11 に複数の円形孔 64a、64b が形成されている。この円形孔 (第 1 の円形孔ということもある。) 64a は八ニカム格子の格子点に相当する位置に形成されており、円形孔 (第 2 の円形孔ということもある。) 64b は各八ニカム格子の中央に相当する位置に形成されているものである。これら複数の第 1 の円形孔 64a のそ

50

れぞれに低屈折率材料としての空気が充填されることで円柱状の第1の低屈折率材料領域65aが複数形成され、複数の第2の円形孔64bのそれぞれに低屈折率材料としての空気が充填されることで円柱状の第2の低屈折率材料領域65b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。

【0036】

隣合う第1の低屈折率材料領域65aと65aのピッチaは $0.35\mu\text{m} \sim 0.55\mu\text{m}$ 程度とされる。上記ピッチaは、低屈折率材周期構造部における最小中心距離aということもできる。

第1の低屈折率材料領域65aの半径rは、上記ピッチaの 0.30 倍 ~ 0.45 倍程度とされる。

10

第2の低屈折率材料領域65bの半径Rは、上記第1の低屈折率材料領域65aの半径rの 0 倍 ~ 1.5 倍程度とされる。

本実施形態の2次元フォトニック結晶スラブ50aにおいても、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に用いる材料が選択して用いられている。

また、スラブ材11の厚みtと、低屈折率材周期構造部における最小中心距離aとの関係が、 $0.35 < (t/a) < 2.0$ なる条件を満たすようにされている。

【0037】

また、低屈折率材料領域65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% （ここでは線状欠陥22と点状欠陥24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。

20

さらに、本実施形態では、第2の低屈折率材料領域65bの半径Rと、隣合う第1の低屈折率材料領域65aの半径rとの関係は、 $0 < R/r < 1.25$ （但し $R/r = 1$ の場合は除く）なる条件を満たすことが好ましく、さらに好ましくは $0 < R/r < 0.75$ 、 $1 < R/r < 1.25$ である。

【0038】

なお、上記の実施形態においては、第2の低屈折率材料領域65bが各八ニカム格子の中央に配置されている場合について説明したが、第2の低屈折率材料領域65bは必ずしも各八ニカム格子の中央に配置されていなくてもよく、各八ニカム格子の内部（内側）に配置されていれればよい。

30

また、第2の低屈折率材料領域65bの半径Rが0である場合、すなわち、第2の低屈折率材料領域65bが設けられていない場合も本発明の範囲内とする。また、上記の実施形態においては低屈折率材料領域65の形状が三角柱状である場合について説明したが、低屈折率材料領域65は、円柱状、楕円柱状、三角柱状、四角柱状、五角柱状、六角柱状のうち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、線状欠陥と点状欠陥がそれぞれ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、線状欠陥と点状欠陥はそれぞれ1以上設けられていてもよい。

【0039】

【実施例】

40

（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 度 $\sim +30$ 度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、 $n = 0.46$ 、 $L/a = 0.85$ 、 $t/a = 0.80$ 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9に示す。なお、図10は傾斜角度が 30 度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11は傾斜角度が 15 度の場合の三角柱状低屈折率材料領域の配列状態

50

を示しており、図12は傾斜角度が0度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。

【0040】

図9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 g の割合である。

図9に示す結果から複数の三角柱状低屈折率材料領域是一群の平行線 M に対する傾斜角度が -30 度と $+30$ 度のときは 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 度 $< < +30$ 度の範囲のときに、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度のときは、 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。

10

【0041】

(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、 $= 0.46$ 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13乃至図18に示す。

【0042】

図13~図18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13~図18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13~図18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。

20

【0043】

図13に示す $t/a = 0.60$ の場合と図18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14~図17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。

30

図15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。

40

【0044】

(実験例3)

スラブ材11の厚み t と、 R/a (R は第2の低屈折率材料領域の半径、 a 隣合う第1の低屈折率材料領域のピッチ)を変更した以外は図6乃至図8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、 $= 0.46$ 、 $r = 0.4a$ 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 mode と TM -like mode モードの光をそれぞれ入射したときの2次元完全バンドギャップのスラブ材厚さ依存性について調べた。その結果を図19乃至図24に示す。

【0045】

50

図19～図24のグラフにおいて、横軸は R/a 、縦軸は規格化周波数である。図19～図24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19～図24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。

【0046】

図19に示す $t/a = 0.50$ の場合と図24の $t/a =$ の場合は、 R/a がいずれであっても2次元完全バンドギャップを殆ど有していないか、あるいは全く有していない。これに対して図20～図23の $t/a = 0.60 \sim 1.50$ の場合は、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。

10

図21の $t/a = 0.80$ の場合と図22の $t/a = 0.90$ 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く、また、 R/a 依存性も小さいことがわかる。

【0047】

【発明の効果】

以上説明したように本発明の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する2次元フォトニック結晶スラブを実現できる。

20

また、本発明の2次元フォトニック結晶導波路によれば、特定波長の光の取り出し効率を向上できる。

【図面の簡単な説明】

【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】図2の2次元フォトニック結晶導波路に形成された点状欠陥を示す拡大断面図。

【図5】図2の2次元フォトニック結晶導波路に形成された点状欠陥の他の形態を示す拡大断面図。

30

【図6】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7】図6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8】図7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9】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10】 $\theta = 30$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

【図11】 $\theta = 15$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

【図12】 $\theta = 0$ 度の場合の低屈折率材料領域の配列状態を示す図。

40

【図13】 $t/a = 0.60$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図14】 $t/a = 0.65$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率との関係を示す図。

【図15】 $t/a = 0.80$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図16】 $t/a = 0.90$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図17】 $t/a = 1.50$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率の関係を示す図。

【図18】 $t/a =$ の場合の2次元完全PBG幅と開口率との関係を示す図。

【図19】 $t/a = 0.50$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

【図20】 $t/a = 0.60$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

【図21】 $t/a = 0.80$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

【図22】 $t/a = 0.90$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

50

【図23】 $t/a = 0.15$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

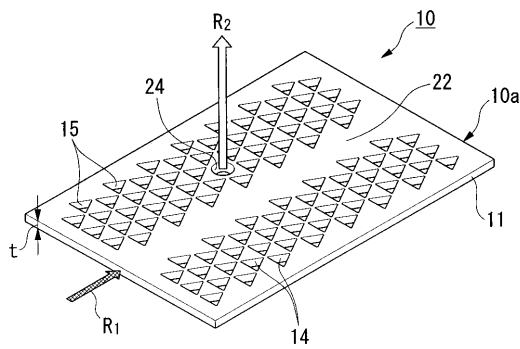
【図24】 $t/a =$ の場合の2次元完全PBG幅と R/a の関係を示す図。

【図25】 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。

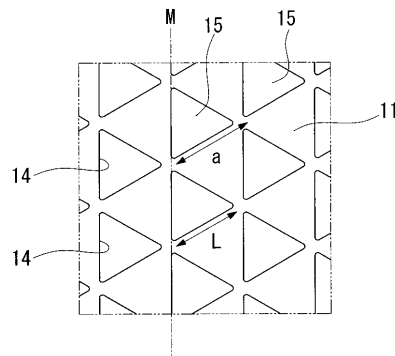
【符号の説明】

10, 50・・・フォトニック結晶導波路、10a, 50a・・・2次元フォトニック結晶スラブ、11・・・スラブ材、14・・・三角孔、15, 65・・・空気(低屈折率材料領域)、22・・・線状欠陥(導波路)、24・・・点状欠陥、64a...第1の円形孔、64b・・・第2の円形孔、65a...第1の低屈折率材料領域、65b・・・第2の低屈折率材料領域、a...ピッチ、L・・・長さ、M・・・平行線、r・・・第1の低屈折率材料領域の半径、R・・・第2の低屈折率材料領域の半径、t・・・スラブ材の厚さ。

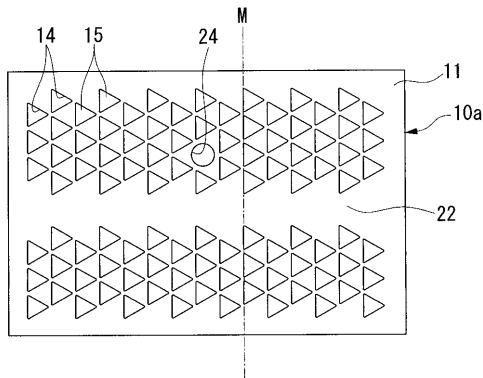
【図1】



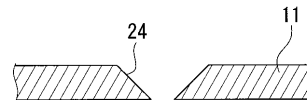
【図3】



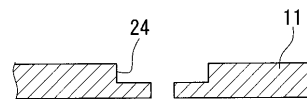
【図2】



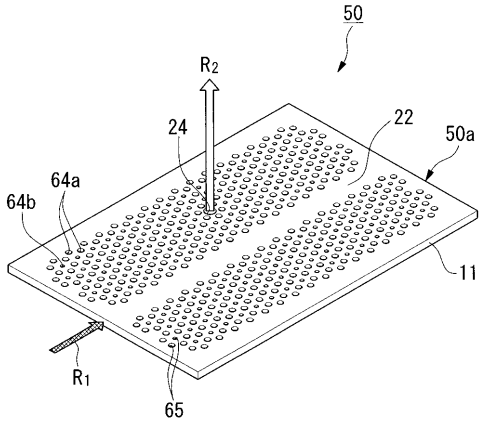
【図4】



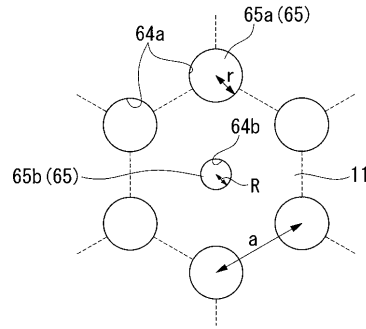
【図5】



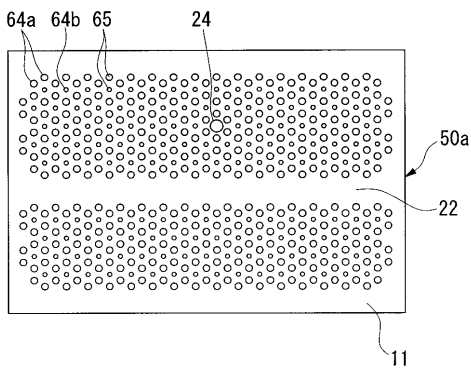
【 図 6 】



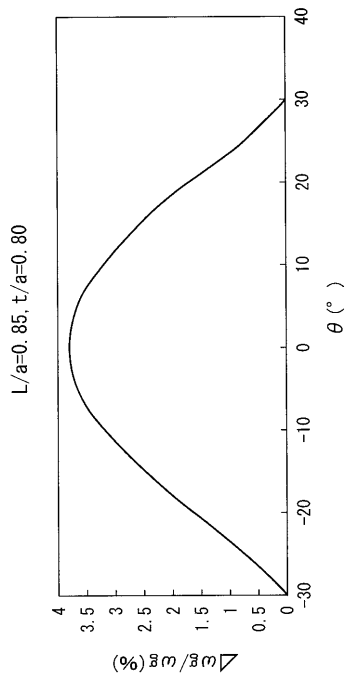
【 図 8 】



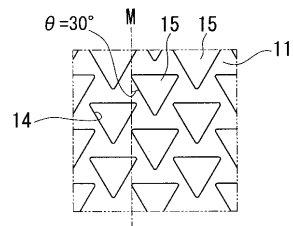
【 図 7 】



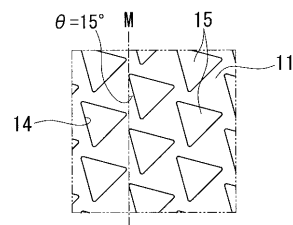
【 図 9 】



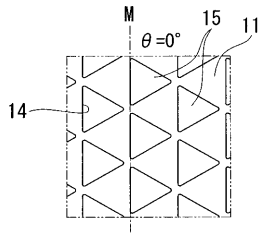
【 図 10 】



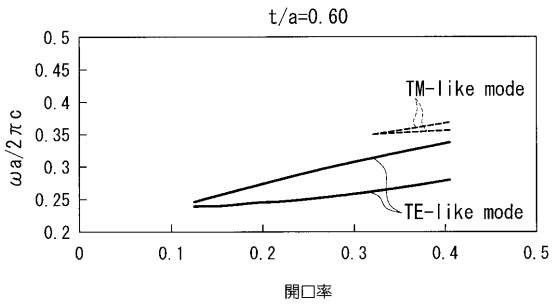
【 図 11 】



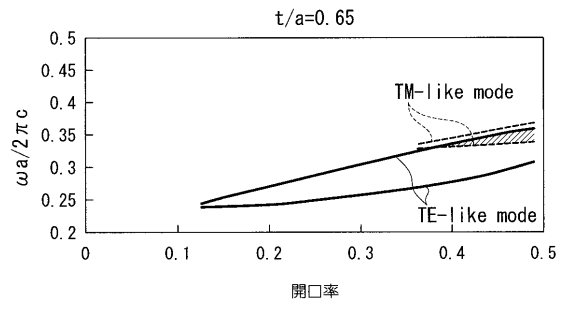
【 図 1 2 】



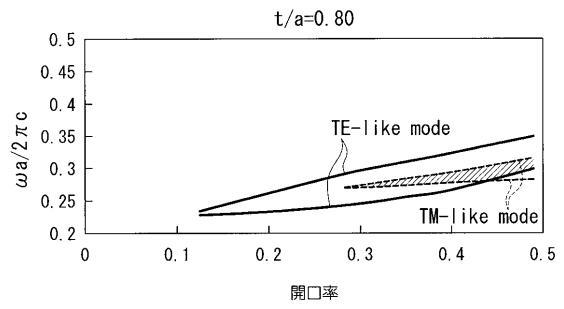
【 図 1 3 】



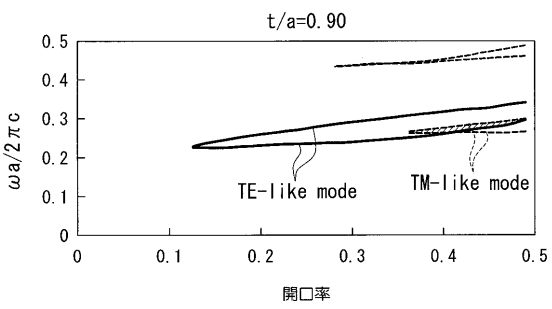
【 図 1 4 】



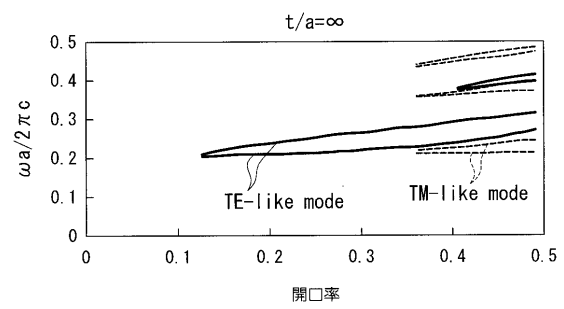
【 図 1 5 】



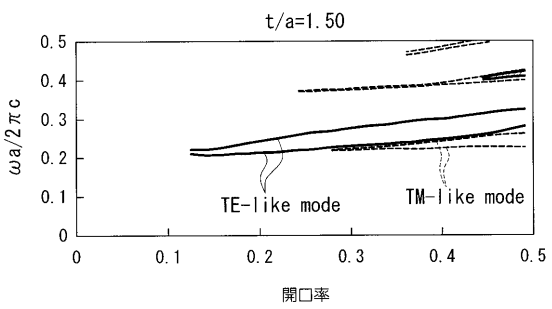
【 図 1 6 】



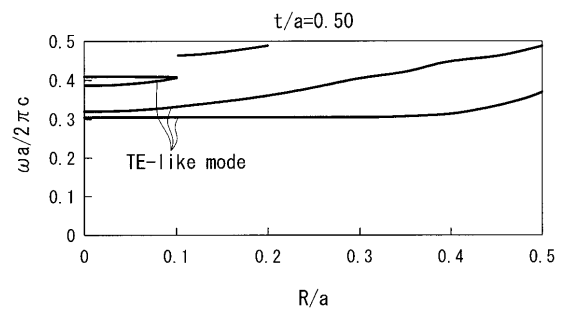
【 図 1 8 】



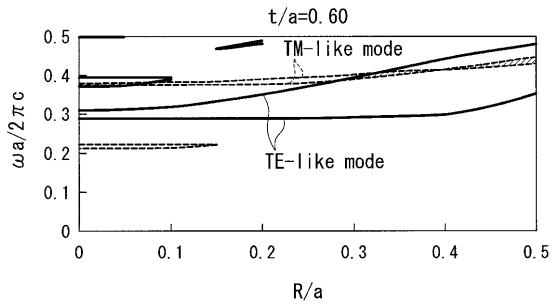
【 図 1 7 】



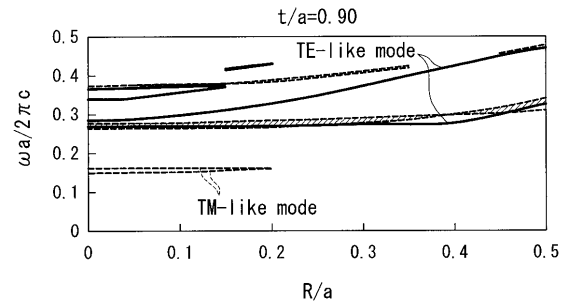
【 図 1 9 】



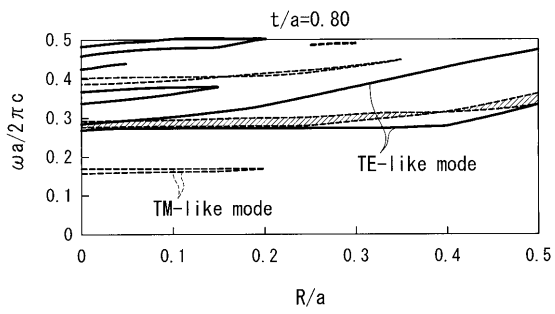
【 図 2 0 】



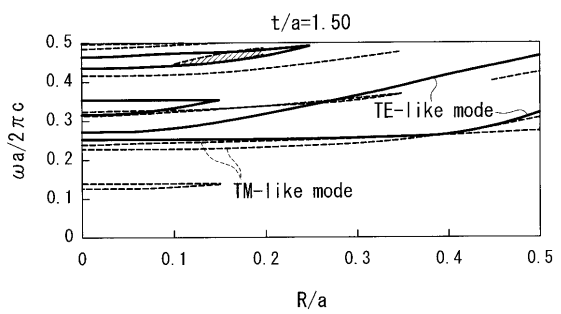
【 図 2 2 】



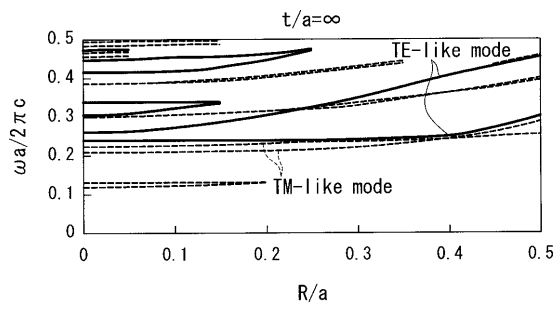
【 図 2 1 】



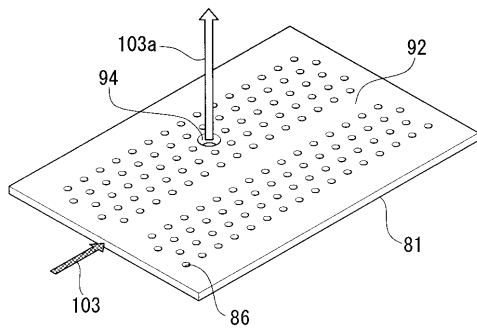
【 図 2 3 】



【 図 2 4 】



【 図 2 5 】



フロントページの続き

- (74)代理人 100094400
弁理士 鈴木 三義
- (74)代理人 100107836
弁理士 西 和哉
- (74)代理人 100108453
弁理士 村山 靖彦
- (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 KA02 TA01 TA05 TA22