

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載

【部門区分】第6部門第2区分

【発行日】平成25年2月14日(2013.2.14)

【公開番号】特開2011-133725(P2011-133725A)

【公開日】平成23年7月7日(2011.7.7)

【年通号数】公開・登録公報2011-027

【出願番号】特願2009-294143(P2009-294143)

【国際特許分類】

G 02 B 6/12 (2006.01)

G 02 B 6/122 (2006.01)

【F I】

G 02 B 6/12 Z

G 02 B 6/12 B

【手続補正書】

【提出日】平成24年12月21日(2012.12.21)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【発明の名称】3次元フォトニック結晶およびフォトニック結晶発光素子

【技術分野】

【0001】

本発明は、発光素子等の機能素子に用いられる3フォトニック結晶に関し、特に結晶中に導波路領域およびモード変換領域を設けた3次元フォトニック結晶に関する。

【背景技術】

【0002】

波長以下の大きさの構造体を周期的に配列することによって電磁波の透過・反射等の特性を制御する概念が、Yablonovitchによって提唱されている(非特許文献1)。このような構造はフォトニック結晶として知られており、ある波長域において、光の損失がない100%の反射率を有する光学素子を実現できる。このように、ある波長域で反射率を100%にする作用は、従来の半導体が持つエネルギーギャップとの比較から、フォトニックバンドギャップ(作用)と言われている。

【0003】

フォトニックバンドギャップを有するフォトニック結晶を利用することにより、新しい機能を持つ光学素子の実現が可能となる。例えば、フォトニック結晶内に点状または線状の欠陥部を設けることにより、共振器や導波路として動作させることができる。

【0004】

フォトニック結晶内に、導波路として動作する線状欠陥部を設けると、光は導波路の構造に応じた固有の電磁エネルギー分布を有する状態で伝播する。また、フォトニック結晶の外部領域においても、光は構造に応じた固有の電磁エネルギー分布を有する状態で伝播する。以下、この固有の電磁エネルギー分布を有して伝播する光の状態を「導波モード」という。また、導波モードの固有の電磁エネルギー分布を「導波モードパターン」といい、固有の電磁エネルギー分布で伝播する光の周波数を「導波モード周波数」という。さらに、フォトニック結晶よりも外側の領域を、「外部領域」という。

【0005】

導波路を伝搬する光は、外部領域に近接したとき、導波路を伝搬する光の導波モードが

外部領域の光の導波モードと結合し、外部領域を伝搬する光に変換されて射出される。以下、導波路を伝播する光の導波モードを「導波モード1」とし、外部領域を伝播する光のモードを「導波モード2」とする。

#### 【0006】

フォトニック結晶から外部領域へと光を射出する際に、光が伝搬する方向に直交する面における光の電磁エネルギー分布について考える。外部領域が一様な媒質であるとき、レンズ等の光学素子で集光あるいは平行光化された光を使用する場合、その光の電磁エネルギー分布は、複数の軸に関して鏡映対称となるような高い対称性を持つ方が好ましい。このため、フォトニック結晶から外部領域へと射出する直前の光の導波モードパターンの形状を、光が伝搬する方向に直交する面において、できるだけ高い対称性を有する形状にすることが必要である。

#### 【0007】

また、フォトニック結晶内に設けられた導波路（フォトニック結晶導波路）と細線により形成された導波路（細線導波路）とを結合する場合、細線導波路を伝搬する導波モードパターンは、複数の軸に関して鏡映対称である。よって、結合する直前のフォトニック結晶導波路を伝搬する導波モードパターンが高い対称性を有した形状であれば、細線導波路に効率良く結合させることができる。

#### 【0008】

フォトニック結晶導波路の導波モード1から外部領域の導波モード2に変換する手段として、モード変換構造を使用することが知られている。例えば、非特許文献2および特許文献1では、フォトニック結晶内におけるフォトニック結晶導波路と外部領域との間にモード変換構造としてテーパー状の欠陥部を設けた構造が提案されている。テーパー状の欠陥部とは、線状欠陥部における光伝搬方向に対して直交する方向の幅を、光伝搬方向に向かって徐々に拡大した構造である。モード変換構造を伝播する光の導波モードを、「導波モード3」とする。

#### 【0009】

モード変換構造をフォトニック結晶導波路と外部領域との間に配置することで、フォトニック結晶導波路を伝播する導波モード1の光を導波モード2と近い導波モードパターンを有する導波モード3の光に変換した後、導波モード2の光に変換することができる。このようにモード変換構造を用いることで、フォトニック結晶導波路を導波モード1で伝播する光を外部領域を伝播する導波モード2の光へ効率良く変換できる。

#### 【0010】

3次元フォトニック結晶は、3次元的に光を閉じ込めることができるために、2次元フォトニック結晶に比べて損失を低減することが可能である。全ての方向の光に対して、モードが存在できない完全フォトニックバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶として、ダイヤモンド構造が知られている。

#### 【0011】

以下、フォトニック結晶の1周期分の単位構造を、「フォトニック結晶単位構造」という。図28(a)には、ダイヤモンド構造のフォトニック結晶単位構造を示す。図28(b)は、図28(a)の(110)面の射影図を表している。フォトニック結晶単位構造の(1-10)の方向をx'軸方向、(001)の方向をy'軸方向、(110)の方向をz'軸方向とする。図28(b)には、y'軸に平行な少なくとも1つの直線に関して鏡映対称であり、x'軸に平行な任意の直線に関して鏡映対称ではない構造を示している。

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0012】

【特許文献1】特開2003-315572号公報

#### 【非特許文献】

#### 【0013】

【非特許文献 1】Physical Review Letters, Vol. 58, pp. 2059, 1987年

【非特許文献 2】Optics Communications, Vol. 223, pp. 339, 2003年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0014】

導波路とモード変換構造は、フォトニック結晶単位構造を全て同じ向きに配列することで形成されたフォトニック結晶基本構造の内部に、線状の欠陥部を設けることで構成される。ここで、線状欠陥部が延びる方向をz軸方向とし、z軸に直交する面において互いに直交する2つの直線をx軸およびy軸とする。また、フォトニック結晶基本構造のx軸方向、y軸方向およびz軸方向はそれぞれ、フォトニック結晶単位構造のx'軸方向、y'軸方向およびz'軸方向と一致しているとする。

【0015】

このとき、導波路とモード変換構造のxy断面は、図29に示すような構造となる。図29に示すxy断面において、x軸とy軸が欠陥部の中心を通るとしたとき、y軸に関して鏡映対称を有し、x軸に関して鏡映対称を有さない構造となる。

【0016】

導波路とモード変換構造を伝搬する光は、欠陥部とその近傍の構造に集中するため、導波モードパターンは、欠陥部やその周囲の構造の影響を受ける。xy断面において、欠陥部の周囲の構造が、図29に示すようにx軸に関して鏡映対称を有さない構造であれば、導波モードパターンもx軸に関して鏡映対称を有さない形状となる。外部領域に射出される光の導波モードパターンは、射出される直前の導波モードパターンの影響を受ける。外部領域が一様な屈折率媒質の領域である場合に、鏡映対称を持たないような低い対称性を有するモード変換構造から外部領域へ光が射出されると、射出される光の電磁エネルギー分布も低い対称性を有する形状となってしまう。

【0017】

また、フォトニック結晶導波路と細線導波路とを結合する場合において、モード変換構造を伝搬する光の導波モードパターンが、xy断面において鏡映対称を持たない低い対称性を有する形状であれば、効率良く光を結合させることができない。

【0018】

本発明は、複数の軸に関して鏡映対称を有さないフォトニック結晶導波路から外部領域に射出される光に、複数の軸に関して鏡映対称である高い対称性を有した電磁エネルギー分布を持たせることができる3次元フォトニック結晶を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0019】

本発明の一側面としての3次元フォトニック結晶は、導波路領域とモード変換領域を有する。導波路領域は、第1のフォトニック結晶基本構造と、該第1のフォトニック結晶基本構造の内部に設けられた第1の欠陥部とを有し、モード変換領域は、第2のフォトニック結晶基本構造と、第3のフォトニック結晶基本構造と、第2の欠陥部とを有する。導波路領域とモード変換領域は、第1の界面において互いのモードで伝搬する光が結合するよう接続されている。第1のフォトニック結晶基本構造、第2のフォトニック結晶基本構造および第3のフォトニック結晶基本構造はそれぞれ、複数のフォトニック結晶単位構造が配列されて構成されている。該フォトニック結晶単位構造は、互いに直交する3軸を第1の軸、第2の軸および第3の軸としたときの第2および第3の軸に平行な断面において、第2の軸に平行な直線に関して鏡映対称ではなく、第3の軸に平行な直線に関して鏡映対称な構造を有する。光が導波路領域およびモード変換領域を伝搬する方向を第1の方向とし、該第1の方向に直交し、かつ互いに直交する2つの方向を第2の方向および第3の方向とするとき、第1のフォトニック結晶基本構造および第2のフォトニック結晶基本構造は、第1の方向、第2の方向および第3の方向がそれぞれフォトニック結晶単位構造の第1の軸、第2の軸および第3の軸が延びる方向と一致するようにフォトニック結晶単位構造が配列されることで構成される。第2および第3の方向に平行な第1の断面におい

て、第2のフォトニック結晶基本構造は、第2の方向に延びて第2の欠陥部の中心を通る中心軸よりも第3の方向における片側に配置されている。

#### 【0020】

第1の断面において、第3のフォトニック結晶基本構造は、上記中心軸に関して第2のフォトニック結晶基本構造と鏡映対称な構造を有するようにフォトニック結晶単位構造が配列されることで構成されている。第2のフォトニック結晶基本構造と第3のフォトニック結晶基本構造は、第1および第2の方向に平行で第2の欠陥部の中心を通る接続面で接続されている。モード変換領域は、第1の断面において、第2の欠陥部の中心を通り第2の方向および第3の方向にそれぞれ延びる直線に関して鏡映対称の構造を有することを特徴とする。

#### 【0021】

なお、上記3次元フォトニック結晶を用いたフォトニック結晶発光素子も本発明の他の一側面を構成する。

#### 【発明の効果】

#### 【0022】

本発明によれば、複数の軸に関して鏡映対称を有さないフォトニック結晶導波路から外部領域に射出する光に高い対称性を有した電磁エネルギー分布を持たることができ、フォトニック結晶導波路から外部領域に高い効率で光を結合（伝播）させることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0023】

【図1】本発明の実施例の3次元フォトニック結晶の概念を示す断面図。

【図2】図1のフォトニック結晶における導波路領域およびモード変換領域の断面図。

【図3】本発明の実施例1である3次元フォトニック結晶の断面図。

【図4】実施例1の3次元フォトニック結晶におけるフォトニック結晶単位構造を示す斜視図および断面図。

【図5】実施例1におけるフォトニック結晶基本構造を示す斜視図。

【図6】実施例1におけるフォトニック結晶基本構造の各層の構造を示す図。

【図7】実施例1におけるフォトニック結晶基本構造のフォトニックバンドギャップの計算結果を示すグラフ。

【図8】実施例1における導波路領域の断面図。

【図9】実施例1における導波路領域の導波モードの計算結果を示すグラフ。

【図10】実施例1におけるモード変換領域の断面図。

【図11】実施例1における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図12】実施例1の比較例の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図13】図12の比較例における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図14】実施例1の変形例である3次元フォトニック結晶の構造を示す断面図。

【図15】実施例1の他の変形例としてのウッドパイル構造を有するフォトニック結晶単位構造の斜視図。

【図16】図15のフォトニック結晶単位構造の各層の断面図。

【図17】本発明の実施例2である3次元フォトニック結晶の構造を示す断面図。

【図18】実施例2の3次元フォトニック結晶のモード変換領域の構造を示す断面図。

【図19】実施例2における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図20】実施例2の比較例である3次元フォトニック結晶の断面図。

【図21】実施例2の比較例における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図22】本発明の実施例3である3次元フォトニック結晶の構造を示す断面図。

【図23】実施例3の3次元フォトニック結晶の導波路領域の構造を示す断面図。

【図24】実施例3における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図25】実施例3の比較例である3次元フォトニック結晶の断面図。

【図26】実施例3の比較例における射出光の電場強度分布の計算結果を示すグラフ。

【図27】本発明の実施例4であるフォトニック結晶発光素子の構造を示す断面図。

【図28】従来のフォトニック結晶の構造を示す模式図。

【図29】図28のフォトニック結晶における導波路とモード変換構造のx y断面図。

【発明を実施するための形態】

【0024】

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。

【実施例1】

【0025】

図1を用いて、本発明の実施例である、モード変換構造を含む3次元フォトニック結晶の概念について説明する。図1に示す3次元フォトニック結晶Aは、導波路領域5とモード変換領域6とを含む。

【0026】

導波路領域5は、フォトニック結晶基本構造(第1のフォトニック結晶基本構造)1と、該フォトニック結晶基本構造1の内部に設けられた線状欠陥部(第1の欠陥部)3とで構成される。

【0027】

モード変換領域6は、フォトニック結晶基本構造(第2のフォトニック結晶基本構造)2と、フォトニック結晶基本構造(第3のフォトニック結晶基本構造)2' と、線状欠陥部(第2の欠陥部)4とで構成される。

【0028】

導波路領域5とモード変換領域6は、界面(第1の界面)7において、導波路領域5を伝搬する光とモード変換領域6を伝播する光とが結合するように接続されている。

【0029】

また、実施例では、フォトニック結晶の外側の領域を外部領域9とし、図1に示すようにモード変換領域6の端部と外部領域9との界面を、界面(第2の界面)8とする。

【0030】

導波路領域5の線状欠陥部3およびモード変換領域6および線状欠陥部4が延びる方向、すなわち光が伝播する方向を、z軸の方向(第1の方向:以下、z軸方向という)とする。また、z軸方向に直交する面において、線状欠陥部3の中心を通り、互いに直交する2つの直線をx軸とy軸とする。x軸の方向(第2の方向)およびy軸の方向(第3の方向)を、以下それぞれ、x軸方向およびy軸方向という。

【0031】

x y断面(第1の断面)において、導波路領域5の線状欠陥部3の中心とモード変換領域6の線状欠陥部4の中心とは互いに一致している。

【0032】

フォトニック結晶基本構造1、フォトニック結晶基本構造2およびフォトニック結晶基本構造2' はそれぞれ、複数のフォトニック結晶単位構造を全て同じ向きに向け、各面が接するように配列することで形成される。フォトニック結晶単位構造は、3次元フォトニック結晶の1周期分の単位構造であり、図28(a), (b)にも示したダイヤmond構造である。前述したように、図28(b)は、図28(a)の(110)面の射影図を表している。フォトニック結晶単位構造の(101)の方向をx'軸(第2の軸)の方向(以下、x'軸方向という)とし、(001)の方向をy'軸(第3の軸)の方向(以下、y'軸方向という)とする。(110)の方向をz'軸(第1の軸)の方向(以下、z'軸方向という)とする。

【0033】

フォトニック結晶基本構造1, 2, 2' はいずれも、完全フォトニックバンドギャップを有する。フォトニック結晶基本構造の内部に線状欠陥部を設けると、完全フォトニックバンドギャップ内に含まれる周波数のうちの一部の帯域の光が、線状欠陥部に存在できる状態を作ることができる。

【0034】

図2(a)に、導波路領域5のx y断面を示す。フォトニック結晶基本構造1は、x軸

方向、 $y$  軸方向および $z$  軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 の $x'$  軸方向、 $y'$  軸方向、 $z'$  軸方向と一致するようにフォトニック結晶単位構造 を配列することで形成されている。このとき、導波路領域 5 は、 $x$  $y$  断面において、 $y$  軸に関して鏡映対称であり、 $x$  軸に関して鏡映対称ではない構造を有する。

## 【0035】

図 2 ( b ) に、モード変換領域 6 の $x$  $y$  断面を示す。フォトニック結晶基本構造 2 およびフォトニック結晶基本構造 2' はそれぞれ、線状欠陥部 4 の中心を通る $x$  $z$  断面 ( 中心軸 ) より、 $y$  軸方向のうち $+y$  方向および $-y$  方向、すなわち片側に配置されている。

## 【0036】

フォトニック結晶基本構造 2 は、フォトニック結晶基本構造 1 と同様に、 $x$ 、 $y$  および $z$  軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 の $x'$ 、 $y'$  および $z'$  軸方向と一致するように複数のフォトニック結晶単位構造 を配列することで形成されている。

## 【0037】

フォトニック結晶基本構造 2' は、線状欠陥部 4 の中心を通る $x$  $z$  断面 ( 中心軸 ) に関して、フォトニック結晶基本構造 2 と鏡映対称な構造を有するようにフォトニック結晶単位構造 を配列することで形成されている。

## 【0038】

フォトニック結晶基本構造 2 とフォトニック結晶基本構造 2' は、線状欠陥部 4 の中心を通る $x$  $z$  断面 ( 接続面 ) で接続されている。このとき、モード変換領域 6 は、 $x$  $y$  断面 ( 第 1 の断面 ) において、 $x$  軸と $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有する。

## 【0039】

従来のモード変換構造は、 $x$  $y$  断面において、導波路領域 5 と同じように $x$  軸に関して鏡映対称ではない構造を有していた。本実施例におけるモード変換領域 6 は、 $x$  $y$  断面において、 $x$  軸と $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造であるので、従来のモード変換構造に比べて対称性が高い構造である。

## 【0040】

導波路領域 5 を伝搬する光の導波モードを導波モード 1 とし、外部領域 9 を伝播する光の導波モードを導波モード 2 とする。また、モード変換領域 6 を伝搬する光の導波モードを導波モード 3 とする。

## 【0041】

図 1 に示す 3 次元フォトニック結晶 A において、導波路領域 5 を伝搬した光は、界面 7 でモード変換領域 6 を伝搬する光に変換され、モード変換領域 6 を伝播した光は、界面 8 において外部領域 9 を伝搬する光に変換されて外部領域 9 に射出される。従来のモード変換構造に比べて対称性が向上したモード変換領域 6 を用いることで、外部領域 9 に射出される光の導波モードパターンの対称性を向上させることができる。

## 【0042】

ここで、モード変換領域 6 を用いることで、外部領域 9 に射出される光の導波モードパターンの対称性を向上させることができることについて説明する。

## 【0043】

モード変換構造を伝搬する光は、モード変換構造の内部の線状欠陥部とその近傍の構造に集中するため、光が伝搬する線状欠陥部やその周囲の構造の影響を受ける。モード変換構造の線状欠陥部の周囲の構造が、従来のモード変換構造のように、 $x$  $y$  断面において 1 つの軸に関してのみ鏡映対称な構造であれば、導波モードパターンも 1 つ軸に関してのみ鏡映対称な形状となる。モード変換構造の線状欠陥部の周囲の構造を、本実施例のモード変換領域 6 のように互いに直交する 2 つの軸に関して鏡映対称な構造とすると、導波モードパターンも互いに直交する 2 つの軸に関して対称な形状となり、対称性を高くすることができます。

## 【0044】

外部領域 9 に射出される光の導波モードパターンは、射出される直前のモード変換構造の導波モードパターンの影響を受けるため、モード変換構造の対称性を高くすることで、

外部領域 9 に射出される光の導波モードパターンの対称性を向上することができる。したがって、本実施例におけるモード変換領域 6 を用いることで、導波モードパターンの対称性が向上した光を外部領域 9 に射出することができる。

図 1 に示す 3 次元フォトニック結晶 A の導波路領域 5 とモード変換領域 6 の界面 7 において、フォトニック結晶 A の周期的な構造が乱れた面が生じるため、接合の仕方によって、界面 7 の  $x$   $y$  断面の面内方向を伝搬するモードが存在する。ここで、界面 7 の  $x$   $y$  断面の面内を伝搬する導波モードを導波モード 4 とする。

#### 【0045】

導波モード 1 の光が、導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域とは異なる周波数で伝搬すれば、導波モード 1 の光は導波モード 4 の光に変換されずに、モード変換領域 6 の導波モード 3 の光に変換される。導波モード 1 の光の周波数が導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域に含まれていても、導波モード 4 と同じ周波数で同じ偏光成分の導波モードが存在しないように導波路領域 5 とモード変換領域 6 を接続すればよい。これにより、導波モード 1 の光は、導波モード 4 の光に変換されない。同じ偏光成分がない（つまり偏光方向が直交する）モード同士は結合しないため、導波モード 1 の光が界面 7 に達したときに、該導波モード 1 の光は界面 7 の導波モード 4 の光へは変換されずに、モード変換領域 6 の導波モード 3 の光に損失なく高効率に変換される。

#### 【0046】

以上より、フォトニック結晶 A がモード変換構造 6 を含むことにより、導波路領域 5 を伝搬する光を外部領域 9 に射出するときに、高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。

#### 【0047】

次に、上記概念に従った、モード変換構造 6 を含む具体的な構造例である 3 次元フォトニック結晶 B について、図 3 を用いて説明する。3 次元フォトニック結晶 B は、導波路領域 103 とモード変換領域 104 とを含む。

#### 【0048】

導波路領域 103 は、フォトニック結晶基本構造（第 1 のフォトニック結晶基本構造）101 と、該フォトニック結晶基本構造 101 の内部に設けられた線状欠陥部 10, 11 とで構成されている。

#### 【0049】

モード変換領域 104 は、フォトニック結晶基本構造（第 2 のフォトニック結晶基本構造）102 と、該フォトニック結晶基本構造（第 3 のフォトニック結晶基本構造）102' と、線状欠陥部 12 とで構成されている。

#### 【0050】

導波路領域 103 とモード変換領域 104 は、界面（第 1 の界面）105 において互いの導波モードで伝搬する光が結合するように接続されている。また、3 次元フォトニック結晶 B の外側の領域を外部領域 106 とし、モード変換領域 104 の端部と外部領域 106 との界面を界面（第 2 の界面）107 とする。

#### 【0051】

導波路領域 103 の線状欠陥部 10 が延びる方向を  $z$  軸方向とし、 $x$   $y$  断面において線状欠陥部 10 の中心を通り、互いに直交する 2 つの直線を  $x$  軸と  $y$  軸とする。

#### 【0052】

また、 $x$   $y$  断面において、導波路領域 103 の線状欠陥部 10 の中心とモード変換領域 104 の線状欠陥部 12 の中心の位置は互いに一致している。

#### 【0053】

フォトニック結晶基本構造 101, 102, 102' はそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 100 を全て同じ向きに向け、各面が接するように配列することで形成されている。フォトニック結晶単位構造 100 は、周期的な屈折率分布を有する 3 次元フォトニック結晶の 1 周期分の単位構造であり、図 4 (a) に該フォトニック結晶単位構造 100 を示している。

## 【0054】

フォトニック結晶単位構造100において、互いに直交する柱状構造が延びる方向を $x'$ 軸方向および $z'$ 軸方向とし、これら柱状構造の積層方向を $y'$ 軸方向とする。図4(b)は、図4(a)の $x'y'$ 断面を表している。図4(b)に示すフォトニック結晶単位構造100の $x'y'$ 断面は、 $y'$ 軸に平行な少なくとも1つの直線に関して鏡映対称であり、 $x'$ 軸に平行な任意の直線に関しては鏡映対称ではない構造である。

## 【0055】

複数のフォトニック結晶単位構造100を、それらの各面が互いに接するように $x'$ 軸方向、 $y'$ 軸方向および $z'$ 軸方向に配列したフォトニック結晶基本構造を図5に示す。該基本構造は、12の層1000～1011が積層されて構成される。図6には、各層の $x'z'$ 面の構造を示している。図6において、破線の四角で囲んだ外部領域012が基本構造の大きさを表している。

## 【0056】

第1層1000および第7層1006ではそれぞれ、 $x'$ 軸方向に延びる複数の柱状構造(第1の柱状構造)1000aおよび1006aが等間隔Pで $z'$ 軸方向に並んで配置されている。柱状構造1000a, 1006aは互いに $z'$ 軸方向にP/2(半周期)ずれた位置に配置されている。

## 【0057】

また、第4層1003および第10層1009ではそれぞれ、 $z'$ 軸方向に延びる複数の柱状構造(第2の柱状構造)1003a, 1009aが等間隔Pで $x'$ 軸方向に並んで配置されている。柱状構造1003a, 1009aは互いに $x'$ 軸方向にP/2(半周期)ずれた位置に配置されている。

## 【0058】

このように、フォトニック結晶単位構造100は、 $x'$ 軸方向に延びる複数の柱状構造を有する柱状構造層(第1層、第7層)と、 $z'$ 軸方向に延びる複数の柱状構造を有する柱状構造層(第4層、第10層)とが交互に積層された基本構造を有する。柱状構造層は、第1の層、第2の層、第3の層および第4の層にそれぞれ相当する第1層1000、第4層1003、第7層1006および第10層1009がこの順で積層されている。

## 【0059】

第1層1000と第4層1003との間には、第2層1001および第3層1002が配置されている。第2層1001および第3層1002における第1層10の柱状構造1000aと第4層1003の柱状構造1003aとの $y'$ 軸方向視での交点(立体的な交差位置)に相当する位置には、離散構造1001a, 1002aが配置されている。離散構造1001a, 1002aは、 $x'z'$ 面内において互いに接しないように離散的に配置されている。

## 【0060】

第2層1001および第3層1002は、上記柱状構造層に対する付加層である。離散構造1001a, 1002aは、 $x'z'$ 断面内における90度の回転により相互に重なる対称性を有する。

## 【0061】

第4層と第7層の間、第7層と第10層の間および第10層と次の基本構造周期における第1層の間にも、付加層としての第5層1004と第6層1005、第8層1007と第9層1008および第11層1010と第12層1011がそれぞれ配置されている。これら第5層1004と第6層1005、第8層1007と第9層1008および第11層1010と第12層1011も、第2層1001および第3層1002と同様に構成されている。すなわち、互いに直交する方向に延びる柱状構造を含む柱状構造層間の $y'$ 軸方向視での柱状構造の交点に相当する位置に、離散構造1004a, 1005a, 1007a, 1008a, 1010a, 1011aが配置されている。

## 【0062】

柱状構造層とこれに隣り合う付加層において、柱状構造と離散構造とは互いに接してい

る。柱状構造および離散構造の材料の屈折率、形状、間隔および各層の厚さ等の構造パラメータを適切に設定することで、特定の広い周波数帯域（波長帯域）において完全フォトニックバンドギャップを得ることができる。広い完全フォトニックバンドギャップを有するフォトニック結晶を用いることで、損失を抑えることができ、動作する周波数の帯域を広げることが可能となる。

#### 【0063】

フォトニック結晶単位構造100の構造パラメータを表1に示す。表1において、面内格子周期とは、図6に示した柱状構造の間隔Pに相当する。面外格子周期とは、フォトニック結晶単位構造100の層1000～1011の12層の積層方向での長さ（厚み）をいう。また、表1中の屈折率は、フォトニック結晶単位構造100の柱状構造および離散構造を構成する媒質（第1の媒質）の屈折率を表している。フォトニック結晶単位構造100の柱状構造および離散構造以外の部分の媒質（第2の媒質）は空気であり、その屈折率は1.0である。

#### 【0064】

柱状構造幅とは、柱状構造が延びる方向に直交する方向での柱状構造の寸法であり、柱状構造高さとは、積層方向（y'軸方向）における柱状構造の寸法をいう。また、離散構造幅Dw1, Dw2はそれぞれ、図6に示すように、各付加層での1つの離散構造の長辺方向および短辺方向での寸法を表す。さらに、離散構造高さDhは、図5に示すように、離散構造の積層方向（y'軸方向）での寸法である。

#### 【0065】

#### 【表1】

フォトニック結晶単位構造100	
フォトニック結晶構造	
屈折率	2.4
面内格子周期	P
面外格子周期	1.4P
柱状構造幅	0.30P
柱状構造高さ	0.25P
離散構造幅Dw1	0.60P
離散構造幅Dw2	0.40P
離散構造高さDh	0.05P

#### 【0066】

図7は、複数のフォトニック結晶単位構造100を同じ向きに向け、各面が接するよう配列して構成されたフォトニック結晶基本構造のフォトニックバンドギャップを、平面波展開（PWE）法にて計算した結果を示すグラフである。グラフの横軸は、波数ベクトル、すなわちフォトニック結晶基本構造に入射する電磁波の入射方向を表す。

#### 【0067】

例えば、K点は、x'軸（もしくはz'軸）に平行な波数ベクトルであり、X点はx', z'面内においてx'軸（もしくはz'軸）に対して45°の傾きを持った波数ベクトルを表している。グラフの縦軸は、格子周期で規格化した周波数（規格化周波数）を示している。図6において網掛けで示された周波数帯域においては、光の入射方向によらずモードが存在できない完全フォトニックバンドギャップが形成されている。

#### 【0068】

このようなフォトニック結晶基本構造の内部に周期を乱す欠陥部を設けると、完全フォトニックバンドギャップ内の周波数を有するモードを生成する。このモードは、欠陥部の形状や媒質によって、周波数（波長）、波数ベクトルが決まるモードである。このとき、線状欠陥部を設けると、該線状欠陥部が延びる方向には波数ベクトルの大きさが制限されないため、欠陥モードは線状欠陥部が延びる方向に導波する導波モードとなる。

#### 【0069】

導波路領域103は、フォトニック結晶基本構造101と、フォトニック結晶基本構造101の内部に設けられたz軸方向に延びる第1の線状欠陥部10と、該第1の線状欠陥部10を含む層とは異なる層に設けられた第2の線状欠陥部11とで構成される。第1の線状欠陥部11は、z軸方向に延びる柱状構造の一部を変形する又は除くことで形成される。

#### 【0070】

図8(a)は、第1および第2の線状欠陥部10, 11がz軸方向に延びている場合の導波路領域103のxy断面を示している。図8(b), (c)はそれぞれ、図8(a)に示す断面iおよび断面iiのxz断面図である。

#### 【0071】

フォトニック結晶基本構造101は、x軸方向、y軸方向およびz軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造100のx'軸方向、y'軸方向、z'軸方向と一致するよう複数のフォトニック結晶単位構造100を配列することで形成されている。

#### 【0072】

導波路領域103は、図8(a)に示すように、xy断面において、y軸に関して鏡映対称で、x軸に関しては鏡映対称ではない構造を有する。

#### 【0073】

第1の線状欠陥部10は、0.60Pの幅を有し、フォトニック結晶単位構造100の柱状構造を形成する媒質と同じ屈折率を有する媒質で形成されている。第2の線状欠陥部11は、0.00Pの幅を有する。導波路領域103の構造パラメータを表2に示す。

#### 【0074】

欠陥部幅10w, 11wは、図8(b), (c)に示すように各欠陥部の層内におけるx軸方向での寸法である。また、欠陥部高さ10hは、図8(a)に示すように各欠陥部の積層方向(y軸方向)での寸法である。また、欠陥部屈折率10nは、各欠陥部を構成する媒質の屈折率である。なお、座標の原点は、図8(a)のxy断面における第1の線状欠陥部10の中心とする。

#### 【0075】

【表2】

導波路領域 103	
フォトニック結晶基本構造 101	
屈折率	2.4
面内格子周期	P
面外格子周期	1.4P
柱状構造幅	0.30P
柱状構造高さ	0.25P
離散構造幅 Dw1	0.60P
離散構造幅 Dw2	0.40P
離散構造高さ Dh	0.05P
第1の線状欠陥部 10	
中心座標(x,y)	(0.00P,0.00P)
欠陥部屈折率 10n	2.4
欠陥部幅 10w	0.60P
欠陥部高さ 10h	0.25P
第2の線状欠陥部 11	
中心座標(x,y)	(0.00P,-0.35P)
欠陥部幅 11w	0.00P
欠陥部高さ 11h	0.25P

## 【0076】

図9は、導波路領域103について転送行列法(TMМ)を用いて、導波モードを計算した結果を示すグラフである。グラフの横軸は、格子周期Pで規格化した波数ベクトルの導波方向(z軸方向)成分の大きさを示し、縦軸は格子周期Pで規格化した周波数(規格化周波数)を示している。また、領域で示した周波数帯域は、完全フォトニックバンドギャップ以外の周波数帯域を示している。領域で示した周波数帯域は、完全フォトニックバンドギャップ内において、欠陥部に起因した単一の導波モードが存在する周波数帯域を示している。

## 【0077】

図9に示すように、導波路領域103は、周波数帯域において、単一の導波モードが存在する導波路である。導波路領域103に含まれるような導波路とすることで、導波路領域103内の第1の線状欠陥部10に、光が強く集中する導波モードで光を伝播させることができ、第1の線状欠陥部10の表面の荒れなどによる散乱損失を軽減することができる。

## 【0078】

モード変換領域104は、フォトニック結晶基本構造102と、フォトニック結晶基本構造102'、と、線状欠陥部12とで構成されている。図10(a)は線状欠陥部12がz軸方向に伸びている場合のモード変換領域104のx-y断面を示している。図10(b)は、図10(a)に示す断面iにおける、モード変換領域104のx-z断面を示している。

## 【0079】

フォトニック結晶基本構造 102 およびフォトニック結晶基本構造 102' はそれぞれ、線状欠陥部 12 の中心を通る xz 断面より +y 方向および -y 方向（つまりは片側）に配置されている。

#### 【0080】

フォトニック結晶基本構造 102 は、x, y および z 軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 100 の x', y' および z' 軸方向と一致するように複数のフォトニック結晶単位構造 100 を配列することで形成されている。

#### 【0081】

フォトニック結晶基本構造 102' は、線状欠陥部 13 の中心を通る xz 断面に関してフォトニック結晶基本構造 102 と鏡映対称な構造となるようにフォトニック結晶単位構造 100 を配列することで形成されている。フォトニック結晶 102 とフォトニック結晶 102' は、線状欠陥部 13 の中心を通る xz 断面において接続されている。フォトニック結晶 102 とフォトニック結晶 2' は、線状欠陥部 4 の中心を通る xz 断面で接続されている。このとき、モード変換領域 6 は、図 10 (a) に示すように、xy 断面において、x 軸と y 軸の 2 軸に関して鏡映対称を有する構造となる。

#### 【0082】

また、図 3 に示すようにモード変換領域 104 の端部 107 は、外部領域 106 と接している。

#### 【0083】

本実施例では、1.00P の幅および 1.00P の高さを有する線状欠陥部 12 を含む構造について示している。モード変換領域 104 の構造パラメータを表 3 に示す。欠陥部幅 12w は、図 10 (b) に示す各欠陥部の層内における x 軸方向での寸法である。また、欠陥部高さ 12h は、図 10 (a) に示す各欠陥部の積層方向 (y 軸方向) での寸法である。また、欠陥部屈折率 12n は、各欠陥部を構成する媒質の屈折率である。欠陥部長さ 12D は、図 10 (b) に示す欠陥部の層内における z 軸方向での寸法である。

#### 【0084】

本実施例において、外部領域 106 は一様な屈折率分布を有する領域とし、外部領域 106 の屈折率を 106n としている。

#### 【0085】

欠陥部屈折率 12n は、フォトニック結晶単位構造 100 を形成する媒質の屈折率以上の屈折率である。これにより、線状欠陥部 12 に、光が強く集中する導波モードで光を伝播させることができ、線状欠陥部 12 の表面の荒れなどによる散乱損失を軽減することができる。

#### 【0086】

【表3】

モード変換領域 104	
フォトニック結晶基本構造 102	
屈折率	2.4
面内格子周期	P
面外格子周期	1.4P
柱状構造幅	0.30P
柱状構造高さ	0.25P
離散構造幅 Dw1	0.60P
離散構造幅 Dw2	0.40P
離散構造高さ Dh	0.05P
線状欠陥部 12	
中心座標(x,y)	(0.00P,0.00P)
欠陥部屈折率 12n	2.4
欠陥部幅 12w	1.00P
欠陥部高さ 12h	1.00P
欠陥部長さ 12D	7.00P
外部領域 106	
屈折率 106n	1.0

## 【0087】

導波路領域 103 を伝搬する光の導波モードを「導波モード1」とし、外部領域 106 を伝播する光の導波モードを「導波モード2」とする。また、モード変換領域 104 を伝搬する光の導波モードを「導波モード3」とする。

## 【0088】

図3に示す3次元フォトニック結晶Bにおいて、導波路領域 103 を伝搬した光は界面 105 にてモード変換領域 104 を伝搬する光に変換される。モード変換領域 104 を伝搬した光は、界面 107 において外部領域 106 を伝搬する光に変換されて外部領域 106 に射出される。

## 【0089】

外部領域 106 を伝搬する光の波長を  $\lambda$  とするとき、モード変換領域 104 と外部領域 106との界面 107 から +z 方向に 3  $\lambda$  だけ離れた位置における x-y 断面を x-y 断面A とする。図11(a)に、モード変換領域 104 を含む3次元フォトニック結晶Bから外部領域 106 に射出された光の x-y 断面 A での電場強度分布を計算した結果を示す。図11(b)は、図11(a)の x = 0 における y 軸方向での電場強度分布を示しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸は y 軸の座標をそれぞれ表している。

## 【0090】

図11(a)および図11(b)より、モード変換領域 104 を含む3次元フォトニック結晶Bから外部領域 106 に射出された光の導波モードパターンは、x 軸と y 軸の 2 軸に関して鏡映対称となるような高い対称性を有する形状となっていることがわかる。

## 【0091】

ここで比較のため、モード変換領域の構造が導波路領域 103 のように x 軸に関して鏡映対称ではない場合の電場強度分布の計算結果を示す。図 12 (a) は、y 軸に関して鏡映対称であり、x 軸に関して鏡映対称ではないモード変換領域 109 を含む 3 次元フォトニック結晶の yz 断面を示している。また、図 12 (b) は、モード変換領域 109 の xy 断面を示す。

#### 【0092】

モード変換領域 109 の欠陥部 12 の周囲のフォトニック結晶 101 は、導波路領域 103 と同じ構造を有し、フォトニック結晶単位構造 100 を同じ向きに向け、各面が接するように配列した構造である。線状欠陥部 12 は、図 10 と表 3 に示したモード変換領域 104 に含まれる線状欠陥部と同じ構造を有する。図 13 (a) に、図 12 (a) に示すモード変換領域 109 を含む 3 次元フォトニック結晶から外部領域 106 に射出された光の xy 断面 A での電場強度分布を計算した結果を示す。図 13 (b) は、図 13 (a) の x = 0 における y 軸方向の電場強度分布を表しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸は y 軸の座標をそれぞれ表している。

#### 【0093】

図 11 (a), (b) と図 13 (a), (b) を比較すると、x 軸と y 軸の 2 軸に関して鏡映対称であるモード変換領域 104 から射出された光の電場強度分布 (図 11 (a), (b)) の方が対称性が高い形状になっていることがわかる。

#### 【0094】

x 軸と y 軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域を用いることで、射出された光の導波モードパターンの対称性が向上する理由は、上記概念の説明の部分で示した理由と同じである。

#### 【0095】

このように本実施例では、互いに直交する 2 軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域 104 を含む 3 次元フォトニック結晶 B を用いている。これにより、互いに直交する 2 軸に関して鏡映対称となるような高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。

#### 【0096】

図 2 に示す 3 次元フォトニック結晶 B の導波路領域 103 とモード変換領域 104 の界面 105 では、フォトニック結晶の周期的な構造が乱れた面が生じ、接合の仕方によっては界面 105 の xy 断面の面内方向を伝搬するモードが存在する。ここで、界面 105 の xy 断面の面内を伝搬する導波モードを、「導波モード 4」とする。

#### 【0097】

導波モード 1 の光が導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域とは異なる周波数で伝搬すれば、導波モード 1 の光は、導波モード 4 へは変換されずにモード変換領域 113 の導波モード 3 の光に変換される。導波モード 1 の光の周波数が導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域に含まれていても、導波モード 4 と同じ周波数で同じ偏光成分を持つ導波モードが存在しないように導波路領域 103 とモード変換領域 113 を接続すればよい。これにより、導波モード 1 の光は導波モード 4 の光に変換されない。同じ偏光成分がないモード同士は結合しないため、導波路領域 5 を伝播した導波モード 1 の光が界面 105 に達したとき、該光は、界面 105 で導波モード 4 の光へは変換されず、モード変換領域 113 の導波モード 3 の光に、損失なく高効率に変換される。

#### 【0098】

導波路領域 103 の xy 断面、界面 105 の xy 断面およびモード変換領域 104 の各 xy 断面における伝搬する光のエネルギーの量から、界面 105 の xy 断面を伝搬する導波モード 4 に変換される割合を計算した。この結果、界面 105 を伝搬する xy 断面の光に変換された割合は、モード変換領域 104 の光に変換された量に対して 1 % 程度の値となった。したがって、導波路領域 103 を伝搬した光は、界面 105 において、界面 105 の xy 断面を伝搬する光へは殆ど変換されず、モード変換領域 104 を伝搬する光に変換されたと考えられる。

**【 0 0 9 9 】**

次に、本実施例において、導波路も  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造とした場合について説明する。図 14 ( a ) は、導波路とモード変換構造のどちらも  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有する場合の 3 次元フォトニック結晶を示している。図 14 ( b ) は、 $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称を有する導波路領域 110 の  $x$   $y$  断面を示している。ここで、モード変換構造は、図 9 と表 3 で示した  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有するモード変換領域 104 と同じ構造とする。

**【 0 1 0 0 】**

導波路領域 110 はフォトニック結晶単位構造 100 を配列した構造の内部に第 1 の線状欠陥部 10 を設けることで構成され、 $x$   $y$  断面において  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有する。導波路領域 110 の第 1 の線状欠陥部 10 は、図 7 および表 2 に示す導波路領域 103 の第 1 の線状欠陥部 10 と同じ構造を有する。このとき、導波路領域 110 とモード変換領域 104 は、界面 111 に関して鏡映対称な構造を有する。

**【 0 1 0 1 】**

導波路領域 110 の界面 111 では、第 1 の線状欠陥部 10 の周囲にあるフォトニック結晶の周期が乱れている。このため、界面 111 の  $x$   $z$  断面を伝搬するモードが存在し、導波路を伝搬する導波モード 1 は界面 111 の  $x$   $z$  断面を伝搬する導波モードと結合して損失となってしまう。特に、光を導波路領域 110 を長距離にわたって伝搬させると、損失が大きくなる。

**【 0 1 0 2 】**

また、導波路領域 110 の第 1 の線状欠陥部 10 の構造が変わることで、複数の導波モードが存在してしまい、所望の单一モードの光で伝播することが困難となる。したがって、 $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な領域は、導波路には設けず、外部領域 106 に射出する直前のモード変換構造の領域にのみ設けることが必要である。

**【 0 1 0 3 】**

このように本実施例では、互いに直交する 2 軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域 109 を含む 3 次元フォトニック結晶 B を用いている。これにより、高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。

**【 0 1 0 4 】**

なお、フォトニック結晶単位構造は、図 15 ( a ) に示すような単純なウッドパイル構造のフォトニック結晶単位構造 112 としてもよい。この場合、上述した 3 次元フォトニック結晶単位構造 100 を用いた場合に比べて完全フォトニックバンドギャップを有する周波数帯域は狭くなるが、積層数が少なくなるため、製造工程数を少なくすることができる。

**【 0 1 0 5 】**

図 15 ( b ) には、図 15 ( a ) に示したフォトニック結晶単位構造 112 を、その  $x'$   $y'$  面、 $y'$   $z'$  面および  $x'$   $z'$  面が互いに接するように、 $x'$ 、 $y'$  および  $z'$  軸方向に複数配列して構成されたフォトニック結晶基本構造を示している。

**【 0 1 0 6 】**

フォトニック結晶単位構造 112 は、 $x$   $z$  面を含む層 1013 ~ 1015 の 4 層を基本周期として構成されている。図 16 は、各層 1013 ~ 1015 の  $x$   $z$  断面を示しており、四角で囲った破線部 1016 の領域は基本構造の大きさを表している。

**【 0 1 0 7 】**

第 1 層 1013 および第 3 層 1015 では、 $x$  軸方向に延びる複数の柱状構造 1013 a, 1015 a が等間隔 P で  $z$  軸方向に並べられて配置されている。柱状構造 1013 a, 1015 a は、互いに  $z$  軸方向に P / 2 (半周期) ずれた位置に配置されている。また、第 2 層 1014 および第 4 层 1015 では、 $z$  軸方向に延びる複数の柱状構造 1014 a, 1015 a が等間隔 P で  $x$  軸方向に並べられて配置されている。柱状構造 1014 a, 1015 a は、互いに  $x$  軸方向に P / 2 (半周期) ずれた位置に配置されている。

**【 0 1 0 8 】**

柱状構造の材料の屈折率、柱状構造の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数帯域（波長帯域）に完全フォトニックバンドギャップを得ることができる。なお、フォトニック結晶基本構造は、上述した3次元フォトニック結晶構造以外の構造を有していてもよい。

【実施例2】

【0109】

図17には、本発明の実施例2である、モード変換構造を含む3次元フォトニック結晶の構成を示している。図17に示した3次元フォトニック結晶Cは、導波路領域103とモード変換領域113を含む。

【0110】

導波路領域103は、フォトニック結晶基本構造101と、フォトニック結晶基本構造101の内部に設けた第1および第2の線状欠陥部10, 11とにより構成されており、実施例1の図8(a)～(c)および表2に示した構造と同じ構造を有する。

【0111】

モード変換領域113は、フォトニック結晶102と、フォトニック結晶102' と、テーパー状の欠陥部13とにより構成されている。導波路領域103とモード変換領域113は、界面105において互いのモードで伝搬する光が結合するように接続されている。モード変換領域113の端部と外部領域106との界面を、界面107とする。

【0112】

図17に示すように、導波路領域103の第1の線状欠陥部10が延びる方向をz軸方向とし、xy断面において第1の線状欠陥部10の中心を通り、互いに直交する2つの直線をx軸およびy軸とする。また、xy断面において、第1の線状欠陥部10の中心と線状欠陥部13の中心の位置は互いに一致している。

【0113】

フォトニック結晶基本構造101, 102, 102' はそれぞれ、フォトニック結晶単位構造100を全て同じ向きに向け、各面が接するように配列することで形成され、完全フォトニックバンドギャップを有する。フォトニック結晶単位構造100は、実施例1の図4(a), (b)および表1で示した構造と同じ構造を有する。柱状構造が延びる方向をx'軸方向およびz'軸方向とし、積層方向をy'軸方向とする。x', y', 断面は、y'軸に平行な少なくとも1つの直線に関して鏡映対称であり、x'軸に平行な任意の直線に関して鏡映対称ではない構造を有する。

【0114】

導波路領域103に含まれるフォトニック結晶基本構造101は、x, yおよびz軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造100のx', y'およびz'軸方向と一致するようにフォトニック結晶単位構造100を配列することで形成されている。導波路領域103は、実施例1の図8(a)に示すように、xy断面においてy軸に関して鏡映対称であり、x軸に関して鏡映対称ではない構造を有する。

【0115】

図18(a), (b), (c)に、モード変換領域113の構成を示す。図18(a)は、図17の界面105におけるxy断面を示す。また、図18(b)は、図17の界面107におけるxy断面を、図18(c)は欠陥部13の中心を通るxz断面をそれぞれ示している。

【0116】

フォトニック結晶基本構造102およびフォトニック結晶基本構造102' はそれぞれ、線状欠陥部13の中心を通るxz断面よりも+y方向および-y方向に配置されている。フォトニック結晶基本構造102は、フォトニック結晶基本構造101と同様に、x, yおよびz軸方向がそれぞれフォトニック結晶単位構造100のx', y'およびz'軸方向と一致するように、フォトニック結晶単位構造100を配列することで形成されている。フォトニック結晶基本構造102' は、線状欠陥部13の中心を通るxz断面に関してフォトニック結晶基本構造102と鏡映対称な構造となるようにフォトニック結晶単位

構造 100 を配列することで形成されている。

#### 【0117】

フォトニック結晶基本構造 102 とフォトニック結晶基本構造 102' は、線状欠陥部 13 の中心を通る xz 断面において接続されている。このとき、モード変換領域 113 は、図 18 (a) に示すように、xy 断面において x 軸と y 軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造となる。また、図 17 に示すように、モード変換領域 113 の端部 107 は、外部領域 106 と接している。

図 18 (a) に示す界面 107 における線状欠陥部 13 の幅は 0.6 P であり、厚さは 0.25 P である。また、図 18 (b) に示す界面 107 における欠陥部 13 の幅は 2.10 P であり、厚さは 2.55 P である。図 18 (c) に示す界面 105, 107 の間の長さは 7.00 P である。線状欠陥部 13 は、図 17 および図 20 において、界面 105 で示した位置から界面 107 で示した位置との間で xy 断面内での幅と厚さが徐々に変化するテーパー状の形状を有する。線状欠陥部 13 は、3 次元フォトニック結晶単位構造 100 に含まれる柱状構造を形成する媒質と同じ屈折率を有する媒質で形成された領域である。線状欠陥部 13 の xy 断面の中心座標は、x 座標が 0.00 P であり、y 座標が 3.50 P である。

#### 【0118】

モード変換領域 113 の構造パラメータを表 4 に示す。欠陥部幅 13w1, 13w2 はそれぞれ、図 18 (c) に示す層内での x 軸方向での寸法である。また、欠陥部高さ 13h1, 13h2 は、図 18 (a)、(b) に示す欠陥部の積層方向 (y 軸方向) の寸法である。欠陥部長さ 13D は、図 18 (c) に示す欠陥部の層内における z 軸方向での寸法である。また、欠陥部屈折率 13n は、欠陥部を構成する媒質の屈折率である。

#### 【0119】

本実施例において、外部領域 106 は、実施例 1 と同様に、屈折率 1.0 で形成された一様な媒質を有する領域である。

#### 【0120】

【表4】

モード変換領域 113	
フォトニック結晶基本構造 102	
屈折率	2.4
面内格子周期	P
面外格子周期	1.4P
柱状構造幅	0.30P
柱状構造高さ	0.25P
離散構造幅 Dw1	0.60P
離散構造幅 Dw2	0.40P
離散構造高さ Dh	0.05P
線状欠陥部 13	
中心座標(x,y)	(0.00P,0.00P)
欠陥部屈折率 13n	2.4
欠陥部幅 13w1	0.60P
欠陥部高さ 13h1	0.25P
欠陥部幅 13w2	2.10P
欠陥部高さ 13h2	2.55P
欠陥部長さ 13D	9.00P

## 【0121】

図17に示す3次元フォトニック結晶Cに含まれる導波路領域103と外部領域106を伝搬する光の導波モードを、実施例1と同様にそれぞれ、「導波モード1」と「導波モード2」とする。また、モード変換領域113を伝搬する光の導波モードを、「導波モード5」とする。

## 【0122】

図17に示す3次元フォトニック結晶Cにおいて、導波路領域103を伝搬した光は、界面105でモード変換領域113を伝搬する光に変換される。モード変換領域113を伝播した光は、界面107において外部領域106を伝搬する光に変換されて外部領域106に射出される。

## 【0123】

外部領域106を伝搬する光の波長をとしたとき、モード変換領域113と外部領域106との界面107から、+z方向に3だけ離れた位置におけるxy断面を、xy断面Aとする。

## 【0124】

図19(a)に、モード変換領域113を含む3次元フォトニック結晶Bから外部領域106に射出された光のxy断面Aでの電場強度分布を計算した結果を示す。図19(b)は、図19(a)のx=0におけるy軸方向の電場強度分布を示しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸はy軸の座標をそれぞれ表している。電場強度分布は、有限差分時間領域(FDTD)法を用いて計算した。

## 【0125】

図19(a), (b)より、モード変換領域104を含む3次元フォトニック結晶Bから外部領域106に射出された光の導波モードパターンは、 $x$ 軸と $y$ 軸の2軸に関して鏡映対称となるような高い対称性を有する形状となっていることがわかる。

#### 【0126】

ここで比較のため、モード変換領域の構造が、導波路領域103のように $x$ 軸に関して鏡映対称ではない場合の電場強度分布の計算結果を以下に示す。図20(a)は、 $y$ 軸に関して鏡映対称であり、 $x$ 軸に関して鏡映対称ではない構造のモード変換領域114を含む3次元フォトニック結晶の $y$  $z$ 断面を示している。また、図20(b)は、モード変換領域114の $x$  $y$ 断面を示す。モード変換領域114は、導波路領域103と同様に、 $x$ 軸に関しては鏡映対称ではない構造を有するフォトニック結晶基本構造101と、該フォトニック結晶基本構造101の内部に設けられた線状欠陥部13とで形成される。ここで、線状欠陥部13は、図18および表4に示した、モード変換領域113に含まれる線状欠陥部と同じ線状欠陥部である。

#### 【0127】

図21(a)には、モード変換領域113を含む3次元フォトニック結晶Bから外部領域106に射出された光の $x$  $y$ 断面Aの電場強度分布を計算した結果を示す。図21(b)は、図21(a)の $x=0$ における $y$ 軸方向の電場強度分布を示しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸は $y$ 軸の座標をそれぞれ表している。

#### 【0128】

図19(a), (b)と図21(a), (b)を比較したとき、 $x$ 軸と $y$ 軸の2軸に関して鏡映対称な構造を有するモード変換領域113から射出された光の電場強度分布(図19(a), (b))の方が、対称性が高い形状になっていることがわかる。

#### 【0129】

ここで、 $x$ 軸と $y$ 軸の2軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域を用いることで、射出された光の導波モードパターンの対称性が向上する理由は、実施例1で示した理由と同じである。

#### 【0130】

なお、実施例1と同様に、導波路領域103とモード変換領域113との界面105において界面105の $x$  $y$ 断面を伝搬する導波モード4が存在するが、本実施例では、導波モード4に変換されないように導波路領域103とモード変換領域113を接続している。導波モード1の光が、導波モード4の光が伝搬する周波数帯域とは異なる周波数で伝搬していれば、導波モード1の光は導波モード4へは変換されずに、モード変換領域113の導波モード3の光に変換される。

#### 【0131】

導波モード1の光の周波数が導波モード4の光が伝搬する周波数帯域に含まれていても、導波モード4と同じ周波数で同じ偏光成分を持つ導波モードが存在しないように導波路領域103とモード変換領域113を接続すればよい。これにより、導波モード1の光は、導波モード4の光に変換されない。同じ偏光成分がないモード同士は結合しないため、導波モード1の光が界面105に達したとき、該光は界面105の導波モード4の光へは変換されずに、モード変換領域113の導波モード5の光へと、損失なく高い効率で変換される。

#### 【0132】

このように、本実施例によれば、互いに直交する2軸に関して鏡映対称のモード変換領域109を含む3次元フォトニック結晶Bを用いることにより、高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。

#### 【0133】

また、モード変換領域113に含まれるモード変換構造を用いることにより、導波路領域103を伝搬する導波モード1の光を、徐々に外部領域106の導波モード2の光に変換することができる。これにより、効率良く外部領域106へ光を射出することができる。

**【実施例 3】****【0 1 3 4】**

図 2 2 には、本発明の実施例 3 である、モード変換構造を含む 3 次元フォトニック結晶 D の構造を示す。3 次元フォトニック結晶 D は、導波路領域 1 1 5 とモード変換領域 1 1 3 とを含む。

**【0 1 3 5】**

導波路領域 1 1 5 は、フォトニック結晶基本構造 1 0 1 の内部に、線状欠陥部 1 4 、 1 5 、 1 6 、 1 7 、 1 8 を設けることによって構成されている。

**【0 1 3 6】**

モード変換領域 1 1 3 は、フォトニック結晶基本構造 1 0 2 、フォトニック結晶基本構造 1 0 2' およびテーパー状の線状欠陥部 1 3 とで構成されており、実施例 2 の図 1 8 ( a ) ~ ( c ) および表 4 に示した構造と同じ構造を有する。導波路領域 1 1 5 とモード変換領域 1 1 3 は、界面 1 0 5 において互いのモードで伝搬する光が結合するように接続されている。また、モード変換領域 1 1 3 の端部と外部領域 1 0 6 の界面を、界面 1 0 7 とする。

**【0 1 3 7】**

図 2 2 に示すように、導波路領域 1 1 5 の第 1 の線状欠陥部 1 4 が延びる方向を z 軸方向とし、x y 断面において、第 1 の線状欠陥部 1 4 の中心を通り、互いに直交する 2 つの直線を x 軸と y 軸とする。また、x y 断面において、導波路領域 1 1 5 の第 1 の線状欠陥部 1 4 の中心とモード変換領域 1 1 3 のテーパー状の線状欠陥部 1 3 の中心の位置は互いに一致している。

**【0 1 3 8】**

フォトニック結晶基本構造 1 0 1 、 1 0 2 、 1 0 2' はそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 1 0 0 を全て同じ向きに向け、各面が接するように配列することで形成され、完全フォトニックバンドギャップを有する。フォトニック結晶単位構造 1 0 0 は、実施例 1 の図 4 ( a ) , ( b ) および表 1 に示した構造と同じ構造を有する。柱状構造が延びる方向を x' 軸方向および z' 軸方向とし、積層方向を y' 軸方向とする。x' y' 断面は、y' 軸に平行な少なくとも 1 つの直線に関して鏡映対称で、x' 軸に平行な任意の直線に関して鏡映対称ではない構造を有する。

**【0 1 3 9】**

導波路領域 1 1 5 に含まれるフォトニック結晶基本構造 1 0 1 は、x 、 y および z 軸方向がそれぞれ、フォトニック結晶単位構造 1 0 0 の x' 、 y' および z' 軸方向と一致するようにフォトニック結晶単位構造 1 0 0 を配列することで形成されている。

**【0 1 4 0】**

導波路領域 1 1 5 は、フォトニック結晶構造 1 0 1 の内部に、z 軸方向に延びる第 1 の線状欠陥部 1 4 と、該第 1 の線状欠陥部 1 4 とは異なる層に位置し、z 軸方向に延びる柱状構造の一部を変形させることによって形成した第 2 の線状欠陥部 1 5 ~ 1 8 を含む。フォトニック結晶基本構造 1 0 1 は、フォトニック結晶単位構造 1 0 0 を x 、 y および z 方向に同じ向きに向け、各面が接するように配列した構造を有し、完全フォトニックバンドギャップを有する。

**【0 1 4 1】**

導波路領域 1 1 5 を図 2 3 ( a ) ~ ( d ) に示す。本実施例では、z 軸方向に延びる柱状構造の幅を 0 . 2 0 P とした第 2 の線状欠陥部 1 5 ~ 1 8 を含む構造について示している。導波路領域 1 1 5 の詳細な構造パラメータを表 5 に示す。欠陥部幅とは、それぞれの線状欠陥部 1 4 ~ 1 5 の各層内での x 軸方向での寸法を示し、表 5 および図 2 3 ( a ) では 1 4 w ~ 1 8 w と記している。また、欠陥部高さとは、線状欠陥部 1 4 ~ 1 5 の積層方向での寸法を示し、表 5 および図 2 3 ( a ) には 1 4 h ~ 1 8 h と記している。

**【0 1 4 2】**

【表5】

導波路領域115	
フォトニック結晶基本構造101	
屈折率	2.4
面内格子周期	P
面外格子周期	1.4P
柱状構造幅	0.30P
柱状構造高さ	0.25P
離散構造幅 Dw1	0.60P
離散構造幅 Dw2	0.40P
離散構造高さ Dh	0.05P
第1の線状欠陥部14	
中心座標 (x, z)	(0.00P, 0.00P)
屈折率	1.0
欠陥部幅 14w	0.60P
欠陥部高さ 14h	0.45P
第2の線状欠陥部15	
中心座標 (x, z)	(-0.50P, 0.70P)
欠陥部幅 15w	0.10P
欠陥部高さ 15h	0.25P
第2の線状欠陥部16	
中心座標 (x, z)	(0.50P, 0.70P)
欠陥部幅 16w	0.10P
欠陥部高さ 16h	0.25P
第2の線状欠陥部17	
中心座標 (x, z)	(-0.50P, -0.70P)
欠陥部幅 17w	0.10P
欠陥部高さ 17h	0.25P
第2の線状欠陥部18	
中心座標 (x, z)	(0.50P, -0.70P)
欠陥部幅 18w	0.10P
欠陥部高さ 18h	0.25P

## 【0143】

本実施例において、外部領域106は、実施例1，2と同様に、一様な屈折率1.0を有する。

## 【0144】

導波路領域115は、xy断面において、y軸に関して鏡映対称で、z軸に関して鏡映対称ではない構造を有する。モード変換領域113は、xy断面において、x軸とy軸の2軸に関して鏡映対称な構造を有する。

## 【0145】

導波路領域115を伝搬する光の導波モードを、「導波モード6」とする。また、外部領域106を伝搬する光の導波モードを、実施例1，2と同様に、「導波モード2」とし、モード変換領域113を伝搬する光の導波モードを、実施例2と同様に、「導波モード5」とする。

## 【0146】

図22に示す3次元フォトニック結晶Dにおいて、導波路領域115を伝搬した光は、界面105でモード変換領域113を伝搬する光に変換される。モード変換領域113を

伝播した光は、界面 107において外部領域 106を伝搬する光に変換されて外部領域 106に射出される。

#### 【0147】

外部領域 106を伝搬する光の波長を  $\lambda$  とするとき、モード変換領域 113と外部領域 106の界面 107から  $+z$  方向に  $3\lambda$  だけ離れた位置における  $x-y$  断面を、 $x-y$  断面 Aとする。

#### 【0148】

図 24(a) は、導波路領域 115とモード変換領域 113を含む 3 次元フォトニック結晶 D から外部領域 106 に射出された光の  $x-y$  断面 A での電場強度分布を計算した結果を示す。図 24(b) は、図 24(a) の  $x=0$  における  $y$  軸方向の電場強度分布を示しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸は  $y$  軸の座標をそれぞれ表している。電場強度分布は有限差分時間領域 (FDTD) 法を用いて計算した。

#### 【0149】

図 24(a), (b) より、導波路領域 115とモード変換領域 113を含む 3 次元フォトニック結晶 D から外部領域 106 に射出された光の導波モードパターンは、 $x$  軸と  $y$  軸の 2 つの軸に関して鏡映対称となるような高い対称性を有していることがわかる。

#### 【0150】

ここで比較のため、モード変換領域の構造が  $x$  軸に関して鏡映対称ではない場合の電場強度分布の計算結果を以下に示す。図 25(a) に、導波路領域 115と  $y$  軸に関して鏡映対称であり、 $x$  軸に関して鏡映対称ではないモード変換領域 114を含む 3 次元フォトニック結晶の  $y-z$  断面を示す。モード変換領域 114は、実施例 2 の図 22 で示した構造と同じ構造を有する。

#### 【0151】

図 26(a) には、導波路領域 115とモード変換領域 114を含む 3 次元フォトニック結晶 D から射出された光の  $x-y$  断面 A における電場強度分布を示す。図 26(b) は図 26(a) の  $x=0$  における  $y$  軸方向の電場強度分布を示しており、縦軸は最大値で規格化した電場強度を、横軸は  $y$  軸の座標をそれぞれ表している。

#### 【0152】

図 24(a), (b) と図 26(a), (b) を比較すると、 $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有するモード変換領域 113から射出された光の電場強度分布(図 24(a), (b))の方が対称性が高い形状になっていることがわかる。

$x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域を用いることで、射出された光の導波モードパターンの対称性が向上する理由は、実施例 1 で示した理由と同じである。

#### 【0153】

導波路領域 115とモード変換領域 113との界面 105において界面 105の  $x-y$  断面を伝搬する導波モード 4 が存在するが、本実施例では、導波モード 6 が導波モード 4 に変換されないように導波路領域 115とモード変換領域 113を接続している。

#### 【0154】

導波モード 6 の光が、導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域とは異なる周波数で伝搬していれば、導波モード 6 の光は導波モード 4 に変換されずに、モード変換領域 113の導波モード 5 の光に変換される。

#### 【0155】

導波モード 6 の光の周波数が導波モード 4 の光が伝搬する周波数帯域に含まれていても、導波モード 4 と同じ周波数で同じ偏光成分を持つ導波モードが存在しないように導波路領域 115とモード変換領域 113を接続すればよい。これにより、導波モード 6 の光は、導波モード 4 の光に変換されない。同じ偏光成分がないモード同士は結合しないため、導波モード 6 の光が界面 105に達したとき、該光は界面 105の導波モード 4 の光に変換されずに、モード変換領域 113の導波モード 5 の光に、損失なく高効率に変換される。

**【 0 1 5 6 】**

このように、本実施例では、互いに直交する2軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域113を含む3次元フォトニック結晶Bを用いることにより、高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。また、本実施例では、上述した構造の導波路領域を用いることにより、単一の導波モードの光を伝搬させることができる。

**【 0 1 5 7 】**

なお、導波路を構成する線状欠陥部15～18は、柱状構造の一部を変位させることによって形成してもよい。

**【 実施例 4 】****【 0 1 5 8 】**

以下、上記実施例1～3にて説明した3次元フォトニック結晶を用いた、本発明の実施例4であるフォトニック結晶発光素子について説明する。本実施例のフォトニック結晶発光素子は、実施例1～3で説明した3次元フォトニック結晶基本構造の内部に、点状欠陥部を形成することで設けられた共振器と、線状欠陥部で構成された導波路およびモード変換構造とが設けられた構造を有する。

**【 0 1 5 9 】**

点状欠陥部は、形状、媒質を最適化することによって、完全フォトニックバンドギャップ内の所望の周波数において共振モードを有する共振器として機能させることができる。発光スペクトルに共振波長が含まれる発光媒質（利得媒質）を上記共振器の内部に配置し、この発光媒質に対して外部から電磁波や電流等でエネルギーを供給することによってこれを励起して光を発生させる。発光媒質から発生した光は、共振器内で増幅される。

**【 0 1 6 0 】**

このような点欠陥共振器の近傍に、共振器の共振モードが有する周波数において導波モードを有する導波路を配置すると、共振器の内部で発生し、増幅された光は、導波路が有する導波モードで伝播する光と結合し、共振器の外に抽出される。抽出された光は、導波路およびモード変換構造が有する導波モードでこれらを伝播する。これにより、効率の高いレーザやLED等の発光素子を実現することができる。

**【 0 1 6 1 】**

図27には、本実施例のフォトニック結晶発光素子の構造を示している。図27には、実施例1～3にて説明した3次元フォトニック結晶のうち代表として実施例2（図17）に示した3次元フォトニック結晶に、共振器、電極およびキャリア伝導路を設けた構造を有する。

**【 0 1 6 2 】**

導波路領域103の線状欠陥部10が延びる方向をz軸方向とし、xy断面において線状欠陥部10の中心を通り、互いに直交する2つの直線をx軸およびy軸とする。

**【 0 1 6 3 】**

フォトニック結晶単位構造100は、実施例1において図4に示した構造を有し、該フォトニック結晶単位構造100と同じ向きに向けて、各面が接するようx, yおよびz軸方向に配列した構造は、完全フォトニックバンドギャップを有する。

**【 0 1 6 4 】**

図27に示す発光素子は、3次元フォトニック結晶基本構造101中に点欠陥部19を設けることにより形成された共振器116と、p型電極117と、p型キャリア伝導路118と、n型電極119と、n型キャリア伝導路120とを有する。

**【 0 1 6 5 】**

共振器116の内部には、キャリア注入により発光作用を呈する活性部が形成されている。p型電極117およびp型キャリア伝導路118を介して共振器116に正孔が供給され、n型電極119およびn型キャリア伝導路120を介して共振器116に電子が供給される。供給された正孔と電子は共振器116の内部で結合して発光し、レーザ発振する。

**【 0 1 6 6 】**

導波路領域 103 は、実施例 1 の図 8 (a) ~ (c) で示した構造と同じ構造を有し、 $x-y$  断面において  $y$  軸に関して鏡映対称で、 $x$  軸に関して鏡映対称ではない構造を有する。また、導波路領域 103 は、共振器 116 の共振モードが有する周波数において導波モードを有している。導波路領域 103 を共振器 116 に対して適切な位置に配置することにより、共振器 116 の共振モードで存在する光を、導波路が有する導波モードで伝播する光に効率良く変換することができる。

#### 【0167】

導波路領域 103 とモード変換領域 113 は、界面 105 で接続されている。モード変換領域 113 は、実施例 2 の図 18 (a) ~ (c) で示した構造と同じ構造を有し、 $x-y$  断面において  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造を有する。

#### 【0168】

また、モード変換領域 113 の端部は、界面 107 にて外部領域 106 と接している。

#### 【0169】

実施例 2 と同様に、導波路領域 103 を伝搬する光の導波モードを「導波モード 1」とし、外部領域 106 を伝搬する光の導波モードを「導波モード 2」とする。モード変換領域 113 を伝搬する光の導波モードを「導波モード 5」とする。

#### 【0170】

導波路領域 103 とモード変換領域 113 の界面 105 において、界面 105 の  $x-y$  断面を伝搬する導波モード 4 が存在する。しかし、本実施例においても、導波モード 4 のうち導波モード 1 と同周波数で同じ偏光成分を持つような導波モードが存在しないように導波路領域 103 とモード変換領域 113 を接続している。

#### 【0171】

このようなフォトニック結晶発光素子において、共振器 116 で発生し、增幅された光は、導波路領域 103 が有する導波モードで伝播する光に変換され、導波路領域 103 を伝搬する。そして、界面 105 でモード変換領域 113 を伝搬する光に変換される。モード変換領域 113 を伝播した光は、界面 107 において外部領域 106 を伝搬する光に変換されて外部領域 106 に射出される。

#### 【0172】

先の実施例でも説明したように、本実施例では、 $x-y$  断面において  $x$  軸と  $y$  軸の 2 軸に関して鏡映対称な構造のモード変換領域 113 を用いることで、外部領域 106 へ高い対称性を有する導波モードパターンの光を射出することができる。そして、高い対称性を有する導波モードパターンを持つ光を外部領域 106 に射出することで、高性能なレーザーデバイスを実現することができる。

#### 【0173】

以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0174】

外部領域に高い効率で光を伝播させることができる 3 次元フォトニック結晶および発光素子を提供できる。

#### 【符号の説明】

#### 【0175】

100 フォトニック結晶単位構造

101 (第 1 の) フォトニック結晶基本構造

102 (第 2 の) フォトニック結晶基本構造

102' (第 3 の) フォトニック結晶基本構造

103 導波路領域

104 モード変換領域

106 外部領域