

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4636996号
(P4636996)

(45) 発行日 平成23年2月23日 (2011.2.23)

(24) 登録日 平成22年12月3日 (2010.12.3)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 B 1/02 (2006.01)

G O 2 B 1/02

G O 2 B 6/12 (2006.01)

G O 2 B 6/12

Z

H O 1 S 5/12 (2006.01)

G O 2 B 6/12

N

H O 1 S 5/12

請求項の数 13 (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2005-311260 (P2005-311260)
 (22) 出願日 平成17年10月26日 (2005.10.26)
 (65) 公開番号 特開2007-121523 (P2007-121523A)
 (43) 公開日 平成19年5月17日 (2007.5.17)
 審査請求日 平成20年10月23日 (2008.10.23)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100086818
 弁理士 高梨 幸雄
 (72) 発明者 高木 章成
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内
 (72) 発明者 野林 和哉
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内
 (72) 発明者 星 光
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元フォトリック結晶およびそれを有する機能素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

屈折率周期構造を含む複数の層を周期的に積層した3次元フォトリック結晶であって、
 該層面内方向の第1の軸に沿って周期a、該層面内方向であって該第1の軸と直交する
 第2の軸に沿って周期bを有する長方格子1の各格子点と、
 該長方格子1を該第1の軸に沿ってa/2かつ該第2の軸に沿ってb/4ずらした位置に
 形成される長方格子2の各格子点に、第2の媒質より成る孔を有し、該孔以外の領域を第
 1の媒質で満たした周期構造より成る第1の層と、

該長方格子1を第1の軸に沿って-3b/8ずらした位置に形成され、該第1の軸に沿
 って周期a、該第2の軸に沿って周期bを有する面心長方格子の各格子点に、

第1の媒質からなり積層方向に軸を有する柱状構造と、該柱状構造以外の領域を前記第
 2の媒質で満たした周期構造より成る第2の層と、

前記第1の層に含まれる周期構造が、層面内方向において該第1の層に対して、該第1
 の軸に沿ってa/2かつ該第2の軸に沿ってb/2ずらした位置に形成される周期構造よ
 り成る第3の層と、

前記第2の層に含まれる周期構造が、層面内方向において該第2の層と同じ位置に形成
 される第4の層を有し、

該第1の層、第2の層、第3の層、第4の層の順に積層される層を含む複数の層を含む
 3次元フォトリック結晶であって、

該第1の媒質の屈折率をN1、該第2の媒質の屈折率をN2、前記第1の層及び前記第

10

20

3の層内の有効屈折率を N_{e1} とするとき、

$$1.25 \times N_2 \leq N_{e1} \leq 0.73 \times N_1$$

なる条件を満足することを特徴とする3次元フォトリソニック結晶。

【請求項2】

前記第1の層及び前記第3の層に形成される孔の層面内の断面形状は円形又は楕円形又は多角形孔であることを特徴とする請求項1に記載の3次元フォトリソニック結晶。

【請求項3】

前記第2の層及び前記第4の層内の有効屈折率を N_{e2} とするとき、

$$1.09 \times N_2 \leq N_{e2} \leq 0.67 \times N_1$$

なる条件を満足することを特徴とする請求項1または2に記載の3次元フォトリソニック結晶。

10

【請求項4】

前記第2の層及び前記第4の層は、層面内方向において前記第1の層内の孔および前記第3の層内の孔と同じ位置にある前記第2の媒質で満たされた複数の孔と、該複数の孔以外の領域により前記第1の媒質による前記柱状構造が形成されていることを特徴とする請求項1、2又は3に記載の3次元フォトリソニック結晶。

【請求項5】

前記第2の層及び第4の層内の複数の孔の1つの孔の層面内の断面形状が円形であることを特徴とする請求項4に記載の3次元フォトリソニック結晶。

【請求項6】

20

前記第1の層および前記第3の層内の一つの孔の層面内の形状が、前記第2の層および前記第4の層内の一つの孔の層面内の形状と等しいことを特徴とする請求項4または5に記載の3次元フォトリソニック結晶。

【請求項7】

請求項1乃至6に記載の3次元フォトリソニック結晶と、該3次元フォトリソニック結晶の内部に欠陥部を含むことを特徴とする機能素子。

【請求項8】

前記欠陥部は周期を乱す線状の欠陥部であり、該線状の欠陥部は導波路として機能することを特徴とする請求項7に記載の機能素子。

【請求項9】

30

前記欠陥部は周期を乱す孤立した点状の欠陥部であり、該点状の欠陥部は共振器として機能することを特徴とする請求項7または8に記載の機能素子。

【請求項10】

前記共振器内に発光作用を呈する活性媒質を有する請求項9に記載の機能素子と該活性媒質を励起する励起手段とを有することを特徴とする発光素子。

【請求項11】

請求項10の発光素子は、レーザであることを特徴とする請求項10に記載の発光素子。

【請求項12】

請求項6の3次元フォトリソニック結晶を、隣接する層の孔を同時に形成する工程を用いて作製することを特徴とする3次元フォトリソニック結晶の作製方法。

40

【請求項13】

請求項1から6のいずれか1項の3次元フォトリソニック結晶を、基板上に第1の屈折率周期構造を有する層を形成する工程と、

該第1の屈折率周期構造を有する層上に薄膜を形成する工程と、

該薄膜に第2の屈折率周期構造を該薄膜の膜厚よりも深くエッチングして形成する工程とを用いて作製することを特徴とする3次元フォトリソニック結晶の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本発明は、３次元屈折率周期構造を有する３次元フォトニック結晶及びそれを有する導波路、共振器、フィルタ、偏光素子等の機能素子に関する。

【背景技術】

【０００２】

従来より、波長以下の大きさの構造物によって電磁波の透過・反射特性などを制御するという概念は、Y a b l o n o v i t c hによって提唱されている（非特許文献１）。この非特許文献１によると、波長以下の構造を周期的に配列することによって電磁波の透過・反射特性などが制御可能となる。特に電磁波の波長を光の波長オーダーにまで小さくすることによって、光の透過・反射特性を制御することができる。

【０００３】

このような構造物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、光損失が無損失の１００％の反射率を有する反射ミラーを実現できることが示唆されている。

【０００４】

このように、ある波長域で反射率を１００％にすることができる概念は、従来の半導体を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と言われている。

【０００５】

また、構造を３次元的な微細周期構造にすることによって、あらゆる方向から入射した光に対してフォトニックバンドギャップを実現することができ、以下、これを完全フォトニックバンドギャップと呼ぶことにする。

【０００６】

完全フォトニックバンドギャップが実現できると、発光素子における自然放出の抑制など様々な応用が可能となり、従来にない新しい機能素子の実現が可能となる。また、より広い周波数帯域で動作が可能な機能素子を実現できるため、近年、より広い完全フォトニックバンドギャップ帯域を有する構造が求められている。

【０００７】

このようなフォトニックバンドギャップを呈する構造体が、これまでに幾つか提案されている（特許文献１、２、３）。

【０００８】

図１８（ａ）は、特許文献１にて提案されたウッドパイル構造であり、平行に配置された複数の柱状構造を９０度ずつ回転させながら積層した構造より成っている。

【０００９】

図１８（ｂ）は、特許文献２に開示されているフォトニックバンドギャップを呈する構造体の概略図である。特許文献２にて提案されたフォトニックバンドギャップを呈する構造体は、積層方向に一部重なって平行に配置された複数の柱状構造に垂直に複数の孔を貫通させて形成した構造より成っている。

【００１０】

図１８（ｃ）は特許文献３に開示されているフォトニックバンドギャップを呈する構造体の概略図である。

【００１１】

特許文献３にて提案されたフォトニックバンドギャップを呈する構造体は、三角格子状に形成された孔を有する層と三角格子状に形成された柱状構造を、基本周期の１／３ずつずらしながら積層した構造より成っている。

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

【特許文献１】米国特許５，３３５，２４０号公報

【特許文献２】米国特許５，４４０，４２１号公報

【特許文献３】米国特許６，５９７，８５１号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【００１２】

10

20

30

40

50

特許文献 1 に開示されているウッドパイル構造は、4 層で 1 周期が構成されるため、構造が簡単で作製が容易であるという利点を有する。しかし、90 度の回転対称性を有するため、構造の異方性が強く、フォトリックバンドギャップ帯域の方向依存性が強くなってしまふ。

【0013】

特許文献 2 に開示されている構造も完全フォトリックバンドギャップを有するが、非常に深い複数の孔を形成する必要があるが、作製が非常に困難であった。

【0014】

特許文献 3 に開示されている構造はウッドパイル構造に比べ異方性が少なく、比較的広いフォトリックバンドギャップ幅を有する。しかし、6 層で 1 周期が構成されるため、層同士のアライメントに高い精度が必要になるなど、工程が煩雑となり作製が困難であった。

【0015】

本発明は、広い周波数帯域で良好なるフォトリックバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な 3 次元フォトリック結晶及びそれを有する機能素子の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0016】

本発明の 3 次元フォトリック結晶は、屈折率周期構造を含む複数の層を周期的に積層した 3 次元フォトリック結晶であって、該層面内方向の第 1 の軸に沿って周期 a 、該層面内方向であって該第 1 の軸と直交する第 2 の軸に沿って周期 b を有する長方格子 1 の各格子点と、該長方格子 1 を該第 1 の軸に沿って $a/2$ かつ該第 2 の軸に沿って $b/4$ ずらした位置に形成される長方格子 2 の各格子点に、第 2 の媒質より成る孔を有し、該孔以外の領域を第 1 の媒質で満たした周期構造より成る第 1 の層と、該長方格子 1 を第 1 の軸に沿って $-3b/8$ ずらした位置に形成され、該第 1 の軸に沿って周期 a 、該第 2 の軸に沿って周期 b を有する面心長方格子の各格子点に、第 1 の媒質からなり積層方向に軸を有する柱状構造と、該柱状構造以外の領域を前記第 2 の媒質で満たした周期構造より成る第 2 の層と、前記第 1 の層に含まれる周期構造が、層面内方向において該第 1 の層に対して、該第 1 の軸に沿って $a/2$ かつ該第 2 の軸に沿って $b/2$ ずらした位置に形成される周期構造より成る第 3 の層と、前記第 2 の層に含まれる周期構造が、層面内方向において該第 2 の層と同じ位置に形成される第 4 の層を有し、該第 1 の層、第 2 の層、第 3 の層、第 4 の層の順に積層される層を含む複数の層を含む 3 次元フォトリック結晶であって、該第 1 の媒質の屈折率を N_1 、該第 2 の媒質の屈折率を N_2 、前記第 1 の層及び前記第 3 の層内の有効屈折率を N_{e1} とするとき、

$$1.25 \times N_2 \leq N_{e1} \leq 0.73 \times N_1$$

なる条件を満足することを特徴としている。

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、広い周波数帯域で良好なるフォトリックバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な 3 次元フォトリック結晶を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

【実施例 1】

【0019】

図 1 は、本発明の 3 次元フォトリック結晶の実施例 1 の要部概略図である。

【0020】

図 1 において 3 次元フォトリック結晶 10 は、層内にそれぞれ屈折率周期構造を有する層 110 から層 140 の 4 層を積層方向の基本周期としている。

【0021】

そして基本周期を複数周期積層することにより構成している。

【0022】

ここで、層面内方向に x 軸および層面内方向でかつ x 軸に直交して y 軸、積層方向を z 軸とする。

【 0 0 2 3 】

図 2 (a) ~ (e) は各々、本発明の実施例 1 の 3 次元フォトニック結晶の各層の説明図である。このうち図 2 (a) ~ (d) は層 1 1 0 から層 1 4 0 の $x y$ 断面の一部の概略図を示している。

【 0 0 2 4 】

図 2 (a) は、第 1 の層 1 1 0 の $X Y$ 断面図である。図 1 (a) において 1 1 1 は、 x 軸方向に周期 a 、かつ y 軸方向に周期 b を有する長方形格子である。1 1 2 は、長方形格子 1 1 1 と同形状の長方形格子を x 軸方向に $a / 2$ 、 y 軸方向に $b / 4$ ずれた位置に配置された長方形格子である。

【 0 0 2 5 】

第 1 の層 1 1 0 は、2 つの長方形格子 1 1 1、1 1 2 により定義された屈折率周期構造を有する。

【 0 0 2 6 】

より具体的には、長方形格子 1 1 1 および長方形格子 1 1 2 の各格子点に、第 2 の媒質 (低屈折率 N_2) で形成された半径 R_1 を有する円孔 1 1 3 が配置されている。円孔 1 1 3 以外 (孔以外) の領域 1 1 4 は第 1 の媒質 (高屈折率 N_1) で満たされている。

【 0 0 2 7 】

図 2 (b) は第 2 の層 1 2 0 の $X Y$ 断面図である。図 2 (b) に示す第 2 の層 1 2 0 は、 x 軸方向に周期 a 、かつ y 軸方向に周期 b を有する面心長方形格子 1 2 1 により定義された屈折率周期構造を有する。面心長方形格子 1 2 1 は、第 1 の層 1 1 0 内の長方形格子 1 1 2 と同形状で y 軸方向に $-3b / 8$ ずれた位置に配置されている。

面心長方形格子 1 2 1 の各格子点に第 1 の媒質による積層方向に軸を有した柱状構造 1 2 2 が配置され、柱状構造 1 2 2 以外 (柱状構造以外) の領域 1 2 3 は第 2 の媒質で満たされている。第 2 の層 1 2 0 内の柱状構造は第 1 の層 1 1 0 内の円孔と第 3 の層 1 3 0 内の円孔から等距離の位置に配置される。

【 0 0 2 8 】

図 2 (c) は、第 3 の層 1 3 0 の $X Y$ 断面図である。図 2 (c) において、1 3 1、1 3 2 は、第 1 の層 1 1 0 中の長方形格子 1 1 1 および長方形格子 1 1 2 が、 x 軸方向に $a / 2$ 、 y 軸方向に $b / 2$ だけそれぞれずれた位置に配置された長方形格子である。第 3 の層 1 3 0 は長方形格子 1 3 1 および長方形格子 1 3 2 により定義された屈折率周期構造を有する。

【 0 0 2 9 】

第 1 の層 1 1 0 と同様に、長方形格子 1 3 1 および長方形格子 1 3 2 の各格子点に、第 2 の媒質で形成された半径 R_1 を有する円孔 1 3 3 が配置されている。

【 0 0 3 0 】

円孔 1 3 3 以外の領域 1 3 4 は第 1 の媒質で満たされている。図 2 (d) は第 4 の層 1 4 0 の $X Y$ 断面図である。図 2 (d) に示す第 4 の層は、第 2 の層 1 2 0 内の面心長方形格子 1 2 1 と $x y$ 方向において同じ位置に配置された面心長方形格子 1 4 1 により定義された屈折率周期構造を有する。

【 0 0 3 1 】

面心長方形格子 1 4 1 の各格子点に第 1 の媒質による柱状構造 1 4 2 が配置され、柱状構造 1 4 2 以外の領域 1 4 3 は第 2 の媒質で満たされている。

【 0 0 3 2 】

図 2 (e) は各層内の格子点の関係を示す説明図である。長方形格子 1 1 1 の中心座標を x 軸および y 軸の原点とした時、各基本格子中心点の x 座標および y 座標を (x, y) で表すと、次のようになる。各基本格子の中心点座標は、長方形格子 1 1 1 は $(0, 0)$ 、長方形格子 1 1 2 は $(a / 2, b / 4)$ である。

【 0 0 3 3 】

又、面心長方形格子 1 2 1 および面心長方形格子 1 4 1 は $(0, 3b / 8)$ 、長方形格子 1 3

10

20

30

40

50

1 は $(a/2, b/2)$ 、長方格子 1 3 2 は $(a, 3b/4)$ または $(0, 3b/4)$ となる。

【0034】

第 1 の媒質の屈折率 N_1 および第 2 の媒質の屈折率 N_2 、円孔 1 1 3 および円孔 1 3 3 の半径 R_1 、柱状構造 1 2 2 および柱状構造 1 4 2 の $x-y$ 断面形状、周期 a および周期 b の長さ、および各層の厚さを最適化している。即ち所望の波長域でフォトニックバンドギャップを形成するように決定される。

【0035】

ここで、図 2 (b) に示す第 2 の層 1 2 0 中の柱状構造 1 2 2、および図 2 (d) に示す第 4 の層 1 4 0 中の柱状構造 1 4 2 の形状は、第 2 の媒質による孔 (円孔、多角孔等) で囲まれた形で定義することができる。

10

【0036】

図 3 において、1 2 7 は長方格子 1 2 3、1 2 4、1 2 5、1 2 6 の各格子点に第 2 の媒質 (屈折率 N_2) による半径 R_2 の円孔である。第 2 の層 1 2 0 の柱状構造 1 2 8 は、複数の円孔 (凹形) 1 2 7 以外の領域であって第 1 の媒質 (屈折率 N_1) により構成されている。

【0037】

結果として、柱状構造 1 2 8 は、 x 軸方向に周期 a 、かつ y 軸方向に周期 b を有する面心長方格子 1 2 9 の各格子点に位置している。

【0038】

20

なお、長方格子 1 2 3、1 2 4、1 2 5、1 2 6 は、 $x-y$ 方向において、第 1、第 3 の層 1 1 0、1 3 0 の長方格子 1 1 1、1 1 2、1 3 1、1 3 2 とそれぞれ同じ位置に配置されている。

【0039】

尚、円孔 1 2 7 の形状は円 (円形) 又は楕円 (楕円形) 又は多角形であっても良い。

【0040】

第 2、第 4 の層 1 2 0、1 4 0 の 1 つの凹孔 1 2 7 は第 1、第 3 の層 1 1 0、1 3 0 の孔 1 1 3、1 3 3 の面積と形状が等しくても良い。

【0041】

実施例 1 の 3 次元フォトニック結晶の詳細な構造パラメータを表 1 に示す。なお、第 1 の媒質の屈折率を N_1 、第 2 の媒質の屈折率を N_2 、第 1 の層および第 3 の層の厚さを H_1 、第 2 の層および第 4 の層の厚さを H_2 、第 1 の層から第 4 の層までの厚さの総和である積層方向の周期を c としている。

30

【0042】

表 1 に示した 3 次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を、平面波展開法により計算した結果を図 4 に示す。

【0043】

図 4 において、横軸は、波数ベクトルすなわちフォトニック結晶に入射する電磁波の入射方向を表している。例えば、K 点は z 軸に平行な波数ベクトル、X 点は $x-z$ 平面内において z 軸 (あるいは x 軸) に対して 45° の傾きをもった波数ベクトルをそれぞれ表している。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。

40

【0044】

図 4 中のハッチングで示した規格化周波数 0.454 から規格化周波数 0.497 においては、光の入射方向によらず光が存在できず、完全フォトニックバンドギャップが形成されている。完全フォトニックバンドギャップ中心 (規格化) 周波数を 0 、完全フォトニックバンドギャップ (規格化) 周波数帯域幅を Δ としたとき、この構造における完全フォトニックバンドギャップ比 $\Delta/0$ は、 0.092 となる。

【0045】

この値は、同じ屈折率の媒質 (角柱を構成する媒質の屈折率を 2.4 、角柱以外の領域を構成する媒質の屈折率 1.0) を用いたウッドパイル構造と比べて約 1.2 倍大きい値

50

である。

【 0 0 4 6 】

ここで、 p （周期 a ）の値は、所望の波長域（周波数域）で完全フォトニックバンドギャップを呈するように決定される。

【 0 0 4 7 】

例えば、周期 p を 250 nm とすると、波長 503 nm から波長 550 nm の波長域にて、完全フォトニックバンドギャップを呈する。また、周期 p を 750 nm とすると、波長 1509 nm から波長 1652 nm の波長域にて、完全フォトニックバンドギャップを呈する。

【 0 0 4 8 】

【表 1】

屈折率 N_1	2.4
屈折率 N_2	1.0
周期 a	p
周期 b	$\sqrt{2} \times p$
周期 c	p
円孔半径 R_1	$0.435 \times p$
円孔半径 R_2	$0.34 \times p$
層厚 H_1	$0.28 \times p$
層厚 H_2	$0.22 \times p$

【 0 0 4 9 】

ここで、各層の層内の有効屈折率を N_e とする。層内の第 1 の媒質（屈折率 N_1 ）により形成された領域の容積率を f_1 とし、層内の第 2 の媒質（屈折率 N_2 ）により形成された領域の容積率を f_2 とする。このとき層内の有効屈折率 N_e は、第 1 の媒質の屈折率 N_1 、第 2 の媒質の屈折率 N_2 を用いて数式 1 の関係式で表される。

【 0 0 5 0 】

なお、媒質の屈折率 N_1 及び N_2 はフォトニックバンドギャップの中心波長における媒質の屈折率である。

【 0 0 5 1 】

$$N_e = f_1 \times N_1 + f_2 \times N_2 \quad (1)$$

第 1 の層 110 内の有効屈折率を N_{e1} としたとき、屈折率周期構造を形成する円孔の半径 R_1 の値を変化させることにより、容積率 f_1 および容積率 f_2 を変化させ、結果として有効屈折率 N_{e1} を変化させることができる。

【 0 0 5 2 】

なお、第 3 の層 130 の層内部に形成された屈折率周期構造の形状が第 1 の層 110 と同じであるため、第 3 の層 130 内の有効屈折率 N_{e3} は、第 1 の層 110 内の有効屈折率と同じである。

【 0 0 5 3 】

表 1 に示した構造の円孔の半径 R_1 を変化させ、第 1 の層 110 内および第 3 の層 130 内の有効屈折率 N_{e1} 、 N_{e3} を変化させた場合の、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図 5 に示す。

【 0 0 5 4 】

図 5 において、横軸は有効屈折率 N_{e1} (N_{e3})、縦軸は完全フォトリックバンドギャップ比である。

【 0 0 5 5 】

図 5 に示したように、完全フォトリックバンドギャップを呈するためには、有効屈折率 N_{e1} (N_{e3}) が数式 2 を満たす範囲である必要がある。図 5 に、数式 2 の下限値および上限値を破線で示す。

【 0 0 5 6 】

表 1 に示す屈折率 N_1 、 N_2 の値での下限値は $1.25 (1 \times 1.25)$ 、上限値は $1.752 (2.4 \times 0.73)$ となる。また表 1 に示した構造の第 1 の層 110 内の有効屈折率 N_{e1} は 1.44 であり、数式 2 の条件を満たす。

10

【 0 0 5 7 】

$$1.25 \times N_2 \leq N_{e1} \leq 0.73 \times N_1 \quad (2)$$

ここで、第 1 の層 110 内の有効屈折率 N_{e1} が、数式 2 で示される範囲を満たす必要がある理由を説明する。

【 0 0 5 8 】

フォトリックバンドギャップが発現する原理は、結晶中の電子のエネルギーバンドギャップ発現の原理と対比して説明ができる。

【 0 0 5 9 】

つまり、結晶中の電子の波動が、周期的なポテンシャルエネルギーの並進対称性によって、2 つの異なるエネルギーを有する定在波状態となり、その結果、エネルギーギャップが生じる現象と対比して説明される。

20

【 0 0 6 0 】

すなわち、周期的なポテンシャルエネルギーの代わりに周期的な誘電率分布によって、フォトリック結晶中の電磁波の波動が 2 つの異なるエネルギー（周波数）を有する定在波状態となる。

【 0 0 6 1 】

その結果、フォトリックバンドギャップが発現する。ここで、電子系の有効質量に相当するものが、定在波のエネルギー分布に起因するモード屈折率（モード誘電率）である。

【 0 0 6 2 】

透磁率を 1、真空中の光速を v として、モード屈折率 N_m （モード誘電率 D_m ）を用いて、波数 k と角周波数 ω の関係は 3 式のように表すことができる。

30

【 0 0 6 3 】

【 数 1 】

$$\omega = v \times k / N_m = v \times k / \sqrt{D_m} \cdots \cdots (3)$$

【 0 0 6 4 】

フォトリックバンドギャップの両端での定在波を考えると、低周波数側バンド端の定在波は、高屈折率媒質側にエネルギーが集中するため、モード屈折率が高くなる。

40

【 0 0 6 5 】

結果としてある波数 k に対応する周波数が低くなる。逆に、高周波数側バンド端の定在波は、低屈折率媒質側にエネルギーが集中するため、モード屈折率が低くなる。結果としてある波数 k に対応する周波数が高くなる。

【 0 0 6 6 】

このように、ある同じ波数 k に対して、周波数の異なる 2 つの状態が生じ、その間の周波数の光が存在できない状態となり、フォトリックバンドギャップが発現する。よって、フォトリックバンドギャップが発現するためには、両バンド端での定在波が充分異なるモード屈折率差を有することが必要となる。

【 0 0 6 7 】

50

実施例 1 のフォトニック結晶構造において、有効屈折率 N_{e1} が、数式 2 に示す下限値を下回ると、高屈折率媒質の容積率が低過ぎるため、低周波数側バンド端での高屈折率媒質側へのエネルギー集中が維持できなくなる。

【0068】

よって、エネルギーが低屈折率媒質側に漏れ出してモード屈折率が低下し、高周波数側バンド端との間で、フォトニックバンドギャップ発現に有効なモード屈折率差が得られなくなる。

【0069】

逆に、有効屈折率 N_{e1} が、数式 2 に示す上限値を上回ると、低屈折率媒質の容積率が低過ぎるため、高周波数側バンド端での低屈折率媒質側へのエネルギー集中が維持できなくなる。

10

【0070】

よって、エネルギーが高屈折率媒質側に漏れ出してモード屈折率が上昇し、低周波数側バンド端との間で、フォトニックバンドギャップ発現に有効なモード屈折率差が得られなくなる。

【0071】

特に有効屈折率 N_{e1} の値は、第 1 の層 110 内および第 3 の層 130 内の高屈折率媒質（屈折率 N_1 ）が繋がりを形成する y 軸方向に偏光方向を有する電磁波や、 yz 対角方向、 xz 対角方向に偏光方向を有する電磁波に対して、影響が大きい。

【0072】

20

より広い完全フォトニックバンドギャップ幅を得るためには、第 1 の層 110 内の有効屈折率 N_{e1} は、

$$1.3 \times N_2 \leq N_{e1} \leq 0.7 \times N_1$$

とするのが良い。更に好ましくは

$$1.4 \times N_2 \leq N_{e1} \leq 0.65 \times N_1$$

とするのが良い。

【0073】

従来の 3 次元フォトニック結晶の構造のうち、1 周期を構成する層数の少ない構造であるウッドパイル構造は、積層方向に垂直な面内の構造の等方性は優れている。しかしながら、積層方向を含む面内では異方性が強い。

30

【0074】

このため、構造の異方性に起因するフォトニックバンドギャップ帯域の方向依存性が強く、完全フォトニックバンドギャップの周波数帯域が狭かった。

【0075】

これに対し、本実施例による 3 次元フォトニック結晶は、 yz 対角方向および xz 対角方向に関して、高屈折率媒質が繋がった領域および低屈折率媒質が繋がった領域が増加するため、構造の対称性が高い。

【0076】

よって、構造の対称性に起因するフォトニックバンドギャップ帯域の等方性が得られ、広い完全フォトニックバンドギャップの周波数帯域が得られる。

40

【0077】

さらに、各層内の格子点に配置された孔を、円孔または楕円孔又は多角形孔としている。これにより、孔の重なり部分で形成される突起部が斜め方向の構造の等方性をより向上させ、広い完全バンドギャップ帯域が得られる。

【0078】

以上述べたように、本実施例では屈折率周期構造を有する層を積層してフォトニック結晶を形成している。このとき、第 1 の層 110 内の有効屈折率 N_{e1} が所定範囲内になるように、層内の屈折率周期構造を決定することにより、広い周波数帯域でフォトニックバンドギャップを呈することができる。

【0079】

50

しかも、本実施例によるフォトニック結晶は１周期を構成する層数が少ないため、製造が容易な３次元フォトニック結晶を実現することができる。

【００８０】

以上の実施例１においては、第１の層１１０内の長方格子の格子点に配置される孔として円孔を用いていたが、層面内の断面形状が楕円や多角形でも良い。

【００８１】

また、実施例１においては、第２の層１２０内および第４の層１４０内の屈折率周期構造として、図３に示すような円孔１２７及び円孔１２７以外の領域である柱状構造１２８で定義される構造を用いていたが、異なる構造でも良い。

【００８２】

また、近接する柱状構造同士が第１の媒質による領域で接続されていても良い。

【００８３】

例えば図６に示すように、面心長方格子２０１の各格子点に配置された第１の媒質からなる六角柱構造２０２を有し、六角柱構造２０２以外の領域２０３は第２の媒質により満たされた構造でも良い。

【００８４】

六角柱構造２０２の×ｙ断面の六角形の外接円半径をＲ３として、詳細な構造パラメータを表２に示す。

【００８５】

表２で示された構造を平面波展開法により解析すると、完全フォトニックバンドギャップ比は、０．０８２となる。このときの第１の層１１０内の有効屈折率 N_{e1} は１．４５４となり、数式２を満たす。

【００８６】

以上示したように、第２の層１２０内の屈折率周期構造および第４の層１４０内の屈折率周期構造として、多角柱、円柱や楕円柱を用いても良い。このとき第１の層１１０内の有効屈折率 N_{e1} が所定範囲内とすることにより、広い周波数帯域で完全フォトニックバンドギャップが得られる。

【００８７】

また、本実施例によるフォトニック結晶は１周期を構成する層数が少ないため、製造が容易な３次元フォトニック結晶を実現することができる。

【００８８】

【表２】

屈折率 N_1	２．４
屈折率 N_2	１．０
周期 a	p
周期 b	$\sqrt{2} \times p$
周期 c	p
円孔半径 R_1	$0.43 \times p$
外接円半径 R_3	$0.26 \times p$
層厚 H_1	$0.31 \times p$
層厚 H_2	$0.19 \times p$

10

20

30

40

50

【 0 0 8 9 】

以上のように、実施例 1 の屈折率周期構造を含む複数の層を周期的に積層した 3 次元フォトニック結晶は、次の構成をとることを特徴としている。

【 0 0 9 0 】

長方格子 1 1 1 は、層面内方向の第 1 の軸 (X 軸) に沿って周期 a 、層面内方向であって第 1 の軸と直交する第 2 の軸 (Y 軸) に沿って周期 b を有する長方格子である。長方格子 1 1 2 は長方格子 1 1 1 を第 1 の軸に沿って $a / 2$ かつ該第 2 の軸に沿って $b / 4$ ずらした位置に形成される長方格子である。

【 0 0 9 1 】

第 1 の層 1 1 0 は、長方格子 1 1 1 の各格子点と長方格子 1 1 2 の各格子点に、第 2 の媒質 (屈折率 N_2) より成る孔 1 1 3 を有し、該孔 1 1 3 以外の領域を第 1 の媒質 (屈折率 N_1) で満たした周期構造より成っている。

10

【 0 0 9 2 】

面心長方格子 1 2 1 は第 1 の軸に沿って周期 a 、第 2 の軸に沿って周期 b を有する面心長方格子である。

【 0 0 9 3 】

第 2 の層 1 2 0 は面心長方格子 1 2 1 の各格子点に第 1 の媒質からなり積層方向に軸を有する柱状構造 1 2 2 と、該柱状構造 1 2 2 以外の領域 (凹孔) を第 2 の媒質で満たした周期構造より成っている。

【 0 0 9 4 】

20

第 3 の層 1 3 0 は、第 1 の層 1 1 0 に含まれる周期構造が、層面内方向において第 1 の層 1 1 0 に対して、第 1 の軸に沿って $a / 2$ かつ第 2 の軸に沿って $b / 2$ ずらした位置に形成される周期構造より成っている。

【 0 0 9 5 】

第 4 の層 1 4 0 は、第 2 の層 1 2 0 に含まれる周期構造が、層面内方向において第 2 の層 1 2 0 と同じ位置に形成される周期構造より成っている。

【 0 0 9 6 】

そして 3 次元フォトニック結晶は、第 1 の層 1 1 0、第 2 の層 1 2 0、第 3 の層 1 3 0、第 4 の層 1 4 0 の順に積層される層を含む複数の層を含んでいる。

【 0 0 9 7 】

30

ここで 4 つの層を 1 周期としているが、複数の層は、1 周期となる 4 つの層が含まれていれば良く、必ずしも $4 \times n$ (n は正の整数) 層である必要はない。

【 0 0 9 8 】

そして有効屈折率 N_{e1} が前述の数式 2 を満足するように設定している。

【 実施例 2 】

【 0 0 9 9 】

次に本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 2 について説明する。

【 0 1 0 0 】

実施例 2 は、図 1 から図 3 に示すフォトニック結晶において、表 1 に示した実施例 1 とは、第 1 の媒質の屈折率 N_1 が異なる場合である。実施例 2 の 3 次元フォトニック結晶の詳細な構造パラメータを表 3 に示す。

40

【 0 1 0 1 】

表 3 に示した 3 次元フォトニック結晶のフォトニックバンド構造を、平面波展開法により計算した結果を図 7 に示す。この構造における完全フォトニックバンドギャップ比 / 0 は、0 . 2 3 0 となる。このときの第 1 の層内の有効屈折率 N_{e1} は 1 . 5 7 となり、数式 2 を満たす。

【 0 1 0 2 】

【表 3】

屈折率 N 1	3 . 3
屈折率 N 2	1 . 0
周期 a	p
周期 b	$\sqrt{2} \times p$
周期 c	p
円孔半径 R 1	$0 . 47 \times p$
円孔半径 R 2	$0 . 36 \times p$
層厚 H 1	$0 . 25 \times p$
層厚 H 2	$0 . 25 \times p$

10

【 0 1 0 3 】

20

表 3 に示した構造の円孔の半径 R 1 を変化させ、第 1 の層内および第 3 の層内の有効屈折率 N_{e1} , N_{e3} を変化させた場合の、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図 8 に示す。

【 0 1 0 4 】

また図 8 中に、数式 2 の下限値および上限値を破線で示す。表 3 に示す屈折率 N 1、N 2 の値での数式 2 による有効屈折率 N_{e1} の下限値は $1 . 25 (1 \times 1 . 25)$ 、上限値は $2 . 409 (3 . 3 \times 0 . 73)$ であり、図 8 に示したように、この範囲において完全フォトニックバンドギャップを呈する。

【 0 1 0 5 】

なお、有効屈折率 N_{e1} の上限値および下限値は、実施例 1 の場合と同様の理由により

30

【 0 1 0 6 】

以上示したように、フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が異なる場合でも、本実施例は有効である。

【 0 1 0 7 】

よって、第 1 の層内の有効屈折率が所定の範囲内になるように、層内の屈折率周期構造を決定することにより、広い周波数帯域でフォトニックバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な 3 次元フォトニック結晶を実現することができる。

【実施例 3】

【 0 1 0 8 】

40

次に本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 3 について説明する。

【 0 1 0 9 】

実施例 3 は、図 1 から図 3 に示した構造において、第 2 の層 1 2 0 内の有効屈折率を N_{e2} としたとき、屈折率周期構造を形成する円孔の半径 R 2 の値を変化させている。これにより、容積率 f_1 および容積率 f_2 を変化させ、結果として有効屈折率 N_{e2} を変化させることができる。

【 0 1 1 0 】

なお、第 4 の層 1 4 0 の層内部に形成された屈折率周期構造の形状が第 2 の層 1 2 0 と同じである。このため、第 4 の層 1 4 0 内の有効屈折率 N_{e4} は、第 2 の層 1 2 0 内の有効屈折率 N_{e2} と同じである。

50

【 0 1 1 1 】

表 1 に示した構造の円孔の半径 R_2 を変化させ、第 2 の層 1 2 0 内および第 4 の層 1 4 0 内の有効屈折率 N_{e2} を変化させた場合の、完全フォトリックバンドギャップ比の変化を図 9 に示す。

【 0 1 1 2 】

図 9 において、横軸は有効屈折率 N_{e2} (N_{e4})、縦軸は完全フォトリックバンドギャップ比である。

【 0 1 1 3 】

図 9 に示したように、完全フォトリックバンドギャップを呈するためには、有効屈折率 N_{e2} (N_{e4}) が次の数式 4 を満たす範囲である必要がある。

10

【 0 1 1 4 】

図 9 に、数式 4 の下限値および上限値を破線で示す。表 1 に示す屈折率 N_1 、 N_2 の値での下限値は $1.09 (1 \times 1.09)$ 、上限値は $1.608 (2.4 \times 0.67)$ となる。なお、表 1 に示した構造の、第 2 の層 1 2 0 内の有効屈折率 N_{e2} は 1.28 であり、数式 4 を満たす。また、第 2 の層内の柱状構造の形状が異なる表 2 に示した構造の有効屈折率 N_{e2} は、 1.35 であり、数式 4 を満たす。

【 0 1 1 5 】

$$1.09 \times N_2 \leq N_{e2} \leq 0.67 \times N_1 \quad (4)$$

数式 4 の上限値および下限値は、第 1 の層 1 1 0 内の有効屈折率 N_{e1} の場合と同様の理由により決定される。

20

【 0 1 1 6 】

特に有効屈折率 N_{e2} (N_{e4}) の値は、第 2 の層 1 2 0 内および第 4 の層 1 4 0 内 (第 4 の層内) の高屈折率媒質が繋がりを形成する z 軸方向に偏光方向を有する電磁波や、 yz 対角方向、 xz 対角方向に偏光方向を有する電磁波に対して、影響が大きい。

【 0 1 1 7 】

より広い完全フォトリックバンドギャップ幅を得るためには、第 2 の層 1 2 0 内 (第 4 の層 1 4 0 内) の有効屈折率 N_{e2} (N_{e4}) は、

$$1.1 \times N_2 \leq N_{e2} \leq 0.6 \times N_1 \quad (4a)$$

とするのが良い。

【 0 1 1 8 】

30

以上述べたように、本実施例では屈折率周期構造を有する層を積層して形成したフォトリック結晶において、第 2 の層 1 2 0 内 (第 4 の層 1 4 0 内) の有効屈折率 N_{e2} (N_{e4}) が所定範囲内になるように、層内の屈折率周期構造を決定している。

【 0 1 1 9 】

これにより広い周波数帯域でフォトリックバンドギャップを呈することができる。しかも、本実施例によるフォトリック結晶は 1 周期を構成する層数が少ないため、製造が容易な 3 次元フォトリック結晶を実現することができる。

【 実施例 4 】

【 0 1 2 0 】

次に本発明の 3 次元フォトリック結晶の実施例 4 について説明する。

40

【 0 1 2 1 】

実施例 4 は、実施例 3 とは、第 1 の媒質 1 1 0 の屈折率 N_1 が異なる場合である。実施例 4 の 3 次元フォトリック結晶の詳細な構造パラメータを表 4 に示す。表 4 に示した 3 次元フォトリック結晶のフォトリックバンド構造を、平面波展開法により計算した結果を図 10 に示す。

【 0 1 2 2 】

この構造における完全フォトリックバンドギャップ比 γ は、 0.151 となる。このときの第 2 の層内の有効屈折率 N_{e2} は 1.28 となり、数式 4 を満たす。

【 0 1 2 3 】

【表 4】

屈折率N 1	2. 8
屈折率N 2	1. 0
周期 a	p
周期 b	$\sqrt{2} \times p$
周期 c	p
円孔半径R 1	$0. 44 \times p$
円孔半径R 2	$0. 36 \times p$
層厚H 1	$0. 26 \times p$
層厚H 2	$0. 24 \times p$

10

20

【0124】

表 4 に示した構造の円孔の半径 R 2 を変化させ、第 2 の層 1 2 0 内および第 4 の層 1 4 0 内の有効屈折率 N_{e2} 、 N_{e4} を変化させた場合の、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図 1 1 に示す。

【0125】

また図 1 1 中に、数式 4 の下限値および上限値を破線で示す。表 4 に示す屈折率 N 1、N 2 の値での数式 4 による有効屈折率 N_{e2} の下限値は 1. 09 ($1 \times 1. 09$)、上限値は 1. 876 ($2. 8 \times 0. 67$) であり、図 1 1 に示したように、この範囲において完全フォトニックバンドギャップを呈する。

【0126】

30

有効屈折率 N_{e2} (N_{e4}) の上限値および下限値は、実施例 3 の場合と同様の理由により決定される。

【0127】

以上示したように、フォトニック結晶を構成する媒質の屈折率が異なる場合でも、本実施例は有効である。よって、第 2 の層 1 2 0 内の有効屈折率 N_{e2} が所定の範囲内になるように、層内の屈折率周期構造を決定することにより、広い周波数帯域でフォトニックバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な 3 次元フォトニック結晶を実現することができる。

【0128】

以上の実施例においては、第 2 の媒質 1 2 0 の屈折率 N 2 として 1. 0 を用いていたが、これに限るものではない。

40

【0129】

これらの構造を形成する媒質としては、従来の構造と同様に、高い屈折率比を有する 2 種類以上の媒質を用いる。高屈折率の第 1 の媒質としては、例えば GaAs、InP や GaN などの化合物半導体、Si などの半導体、TiO₂ などの誘電体や金属を用いる。

【0130】

低屈折率の第 2 の媒質としては、SiO₂ などの誘電体や、PMMA などの高分子材料、空気などを用いる。

【0131】

フォトニック結晶の持つフォトニックバンドギャップは、上記で説明したように、結晶

50

内の屈折率分布に起因して得られるものである。このため、相互の屈折率の比が大きい媒質同士を組み合わせる程、より広い完全フォトニックバンドギャップを得ることが出来る。有効な広さを持つ完全フォトニックバンドギャップを得るためには、屈折率比が2以上が望ましい。

【実施例5】

【0132】

次に本発明の3次元フォトニック結晶を用いた機能素子の実施例5を示す。図12は本発明のフォトニック結晶中に、周期を乱す線状の欠陥を配置した導波路400を有した機能素子の断面図である。

【0133】

本実施例では、線状欠陥を設けることにより、周期構造が持つフォトニックバンドギャップ内の一部の周波数帯域の電磁波に対して、欠陥部のみ電磁波が存在できる状態にすることができる。これにより、低損失で急峻な曲げ角度を実現できる導波路を構成している。

【0134】

図12に示す線状欠陥は、導波周波数帯域など所望の性能の導波路となるように、構造を付加、除去、あるいは位置をずらすなどして形成する。

【0135】

これにより、基礎となるフォトニック結晶が広いフォトニックバンドギャップ帯域を有するため、従来の構造を用いたものより、広い波長帯域で動作する導波路を実現することができる。

【0136】

図13は本発明の3次元フォトニック結晶中に周期を乱す孤立した点状の欠陥を配置した共振器410の断面図である。

【0137】

図13の本実施例では、点欠陥を設けることにより、周期構造が持つフォトニックバンドギャップ内の一部の周波数帯域の電磁波に対して、欠陥部にのみ電磁波が存在できる状態にすることができる。これにより、非常に小さい領域に電磁波を閉じ込め、かつ閉じ込め効果の高い高性能な共振器を構成している。

【0138】

この共振器を用いることにより、入射波から共振器の共振波長に対応した非常に狭い波長域の電磁波を取り出す波長選択フィルタなどが実現できる。点欠陥は、選択波長など所望の性能の共振器となるように、構造を付加、除去、あるいは位置をずらすなどして形成する。

【0139】

これにより、基礎となるフォトニック結晶が広いフォトニックバンドギャップ帯域を有するため、従来の構造を用いたものより、広い波長帯域で動作する共振器を実現している。

【0140】

本実施例において、図13に示した共振器内に発光作用を呈する活性媒質を充填し、共振器外部から電磁波や電流などでエネルギーを供給することにより、活性媒質を励起し、非常に効率の高いレーザやLEDなどの発光素子を実現している。

【0141】

活性媒質としては、化合物半導体、無機発光材料、有機発光材料、高分子発光材料、量子ドット、ナノクリスタルなど様々な材料を利用することができる。

【0142】

例えば、前記共振器の共振波長を赤外光通信波長帯域(波長800nm - 1800nm)に対応させることで光通信用光源に用いることができる。これにより、光の三原色である赤(R)緑(G)青(B)に対応させることで画像表示装置用光源に用いることができる。またCDやDVDなどの光ディスクのピックアップ用光源に用いることができる。

10

20

30

40

50

【 0 1 4 3 】

なお、図 1 2 に示した導波路や図 1 3 に示した共振器、発光素子、フォトニックバンド内の分散異常を用いた偏向素子などの様々な機能素子を組み合わせることで、超小型高性能集積回路を実現することができる。

【 0 1 4 4 】

以上述べたように、本発明の 3 次元フォトニック結晶を用いて機能素子を構成することにより、より広い波長帯域で動作する機能素子を実現することができる。

【実施例 6】

【 0 1 4 5 】

図 1 4 (a) ~ 図 1 4 (i) はフォトニック結晶の作製プロセスの実施例 6 の説明図である。

10

【 0 1 4 6 】

まず基板 1 0 0 1 上に結晶成長や蒸着などにより、媒質 1 による薄膜 1 0 0 2 を形成する (図 1 4 (a)) 。

【 0 1 4 7 】

次いで、薄膜 1 0 0 2 上にレジスト 1 0 0 3 を塗布する (図 1 4 (b)) 。

【 0 1 4 8 】

次に、電子ビームリソグラフィなどによって周期レジストパターン 1 0 0 4 を形成し (図 1 4 (c)) 、周期レジストパターン 1 0 0 4 をマスクとしてエッチングにより薄膜 1 0 0 2 に孔を形成する。

20

【 0 1 4 9 】

次に、残存レジスト 1 0 0 3 を除去することで、第 1 の層内の屈折率周期構造 1 0 0 5 を形成している (図 1 4 (d)) 。

【 0 1 5 0 】

次に、別の基板 1 0 0 6 上に結晶成長や蒸着などにより、媒質 1 による薄膜 1 0 0 7 を形成する (図 1 4 (e)) 。

【 0 1 5 1 】

次いで屈折率周期構造 1 0 0 5 のパターン面と、薄膜 1 0 0 7 が対向するように融着した後 (図 1 4 (f)) 、基板 1 0 0 6 をリフトオフやエッチングなどにより除去する (図 1 4 (g)) 。

30

【 0 1 5 2 】

以上の工程により屈折率周期構造 1 0 0 5 上に薄膜 1 0 0 7 を形成している。

【 0 1 5 3 】

屈折率周期構造上に薄膜を形成する為の方法として、屈折率周期構造 1 0 0 5 の空隙を媒質 2 や後工程にて選択エッチング可能な媒質により充填した後、屈折率周期構造 1 0 0 5 上に結晶成長や蒸着を用いて薄膜を形成する方法を用いても良い。

【 0 1 5 4 】

次に、薄膜 1 0 0 7 上にレジストを塗布し、電子ビームリソグラフィなどによって周期レジストパターン 1 0 0 8 を形成する (図 1 4 (h)) 。次に、周期レジストパターン 1 0 0 8 をマスクとして薄膜 1 0 0 7 をエッチング後、残存レジストを除去することによって第 2 の層内の屈折率周期構造を第 1 の層上に形成している (図 1 4 (i)) 。

40

【 0 1 5 5 】

第 3 の層以降も、以上の作製方法を繰り返すことにより、複数層よりなる本発明の 3 次元フォトニック結晶を作製する。

【 0 1 5 6 】

図 1 5 は、実施例 6 の方法で作製した 3 次元フォトニック結晶の要部断面図である。

【 0 1 5 7 】

また、層内の屈折率周期構造は、干渉露光法、ナノインプリント法、超短パルス光による多光子吸収をもちいた方法や、X線露光、紫外線露光、近接場露光などリソグラフィ技術を用いた方法などとエッチングを組み合わせ形成してもよい。

50

【0158】

本実施例中では、第1の層1005上に薄膜を形成後、電子ビームリソグラフィ等とエッチングを組み合わせで第2の層を作製している。

【0159】

しかし、基板1006上の薄膜1007に屈折率周期構造を形成した後、第1の層1005と屈折率周期構造を形成した薄膜1007が対向するようにウエハ融着を行い、基板1007をリフトオフやエッチング等を用いて剥離する方法を用いても良い。

【実施例7】

【0160】

次に、本発明中の3次元フォトニック結晶において、図3に示したような各層内に配置される孔が層面内において同一形状を有している場合で、特に同一面積（例えば $R_1 = R_2$ ）の場合の作製方法について説明する。

【0161】

図16(a)に示すように、基板1201上に結晶成長や蒸着により、媒質1による薄膜1202を形成する。

【0162】

次にレジスト1203を薄膜1202上に塗布する（図16(b)）。次に電子ビームリソグラフィなどによって周期レジストパターンを形成する。その後、該周期レジストパターンをマスクとしてエッチングにより薄膜1202に孔1204を形成する（図16(c)）。次に残存レジスト1203を除去することによって、薄膜1202内の屈折率周期構造を基板上に形成する（図16(d)）。

【0163】

次に、図16(e)に示すように、基板1205上に媒質1による薄膜1206を形成する。そして薄膜1206と薄膜1202内の屈折率周期構造（第1の屈折率周期構造）のパターン面が対向するように融着し（図16(f)）、リフトオフやエッチングなどにより基板1205を除去する（図16(g)）。

【0164】

屈折率周期構造上に薄膜を形成する為の方法として、次の方法を用いても良い。即ち薄膜1202内の屈折率周期構造の空隙（孔1204）を媒質2や後工程にて選択エッチング可能な媒質により充填する。その後、薄膜1202内の屈折率周期構造上に結晶成長や蒸着を用いて薄膜1206を形成する方法を用いても良い。

【0165】

次に、薄膜1206上にレジスト1207を塗布し、電子ビームリソグラフィなどにより周期レジストパターンを形成した後、周期レジストパターンをマスクとしてエッチングにより薄膜1206内に屈折率周期構造（第2の屈折率周期構造）を形成する。このとき孔1208を薄膜1206の膜厚より深くエッチングする（図16(h)）。

【0166】

その後、残存レジスト1207を除去することによって3次元フォトニック結晶の第1の層上に第2の層及び第3の層を同時に形成している（図16(i)）。

【0167】

次に、図16(f)で示す薄膜1202上に薄膜1206を形成した工程と同様の工程を用いることにより、屈折率周期構造を有する薄膜1206上に、媒質1による薄膜1209を形成する（図16(j)）。

【0168】

次に、図16(h)で示す薄膜1206内の屈折率周期構造を形成した工程と同様の工程を用いて、薄膜1209内に孔1210を形成する。

【0169】

以上の工程により、3次元フォトニック結晶の第1の層、第2の層、第3の層、第4の層を形成している（図16(k)）。

【0170】

10

20

30

40

50

図 17 は以上の作製方法を繰り返すことにより、複数層からなる 3 次元フォトニック結晶を作製したときの要部断面図である。

【 0 1 7 1 】

以上の作製方法を用いることで、本発明の 3 次元フォトニック結晶内の隣接する 2 つの層を同時に形成することが可能となる。そのため、より容易に且つ少ない工程で 3 次元フォトニック結晶を作製することが可能となる。

【 0 1 7 2 】

以上のように、各実施例によれば、従来の 3 次元周期構造よりも波長帯域の広い完全フォトニックバンドギャップが得られる。又各実施例の 3 次元周期構造を用いて機能素子を構成すれば、より広い波長帯域で動作する機能素子を実現することができる。またそれら機能素子を組み合わせることで、超小型高機能集積回路を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 1 7 3 】

【図 1】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 の要部概略図

【図 2】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 の各層の概略図

【図 3】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 の第 2 層の説明図

【図 4】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 のフォトニックバンド構造の説明図

【図 5】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 の有効屈折率 $N_e 1$ に対する完全フォトニックバンドギャップ比を示すグラフ

【図 6】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 1 の第 2 層の他の形態の説明図

【図 7】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 2 のフォトニックバンド構造の説明図

【図 8】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 2 の有効屈折率 $N_e 1$ に対する完全フォトニックバンドギャップ比を示すグラフ

【図 9】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 3 の有効屈折率 $N_e 2$ に対する完全フォトニックバンドギャップ比を示すグラフ

【図 10】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 4 のフォトニックバンド構造の説明図

【図 11】本発明の 3 次元フォトニック結晶の実施例 4 の有効屈折率 $N_e 2$ に対する完全フォトニックバンドギャップ比を示すグラフ

【図 12】本発明の機能素子の実施例 5 の説明図

【図 13】本発明の機能素子の実施例 5 の説明図

【図 14】本発明の 3 次元フォトニック結晶の作製方法の説明図

【図 15】本発明の 3 次元フォトニック結晶の説明図

【図 16】本発明の 3 次元フォトニック結晶の作製方法の説明図

【図 17】本発明の 3 次元フォトニック結晶の説明図

【図 18】従来の 3 次元フォトニック結晶の説明図

【符号の説明】

【 0 1 7 4 】

1 0 3 次元フォトニック結晶

1 1 0 第 1 の層

1 2 0 第 2 の層

1 3 0 第 3 の層

1 4 0 第 4 の層

1 1 1 長方格子

1 1 2 長方格子

1 3 1 長方格子

1 3 3 長方格子

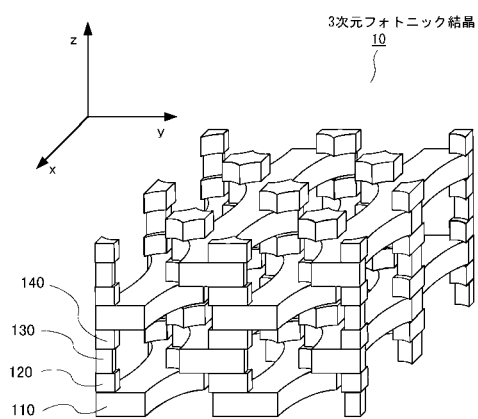
1 2 1 面心長方格子

1 4 1 面心長方格子

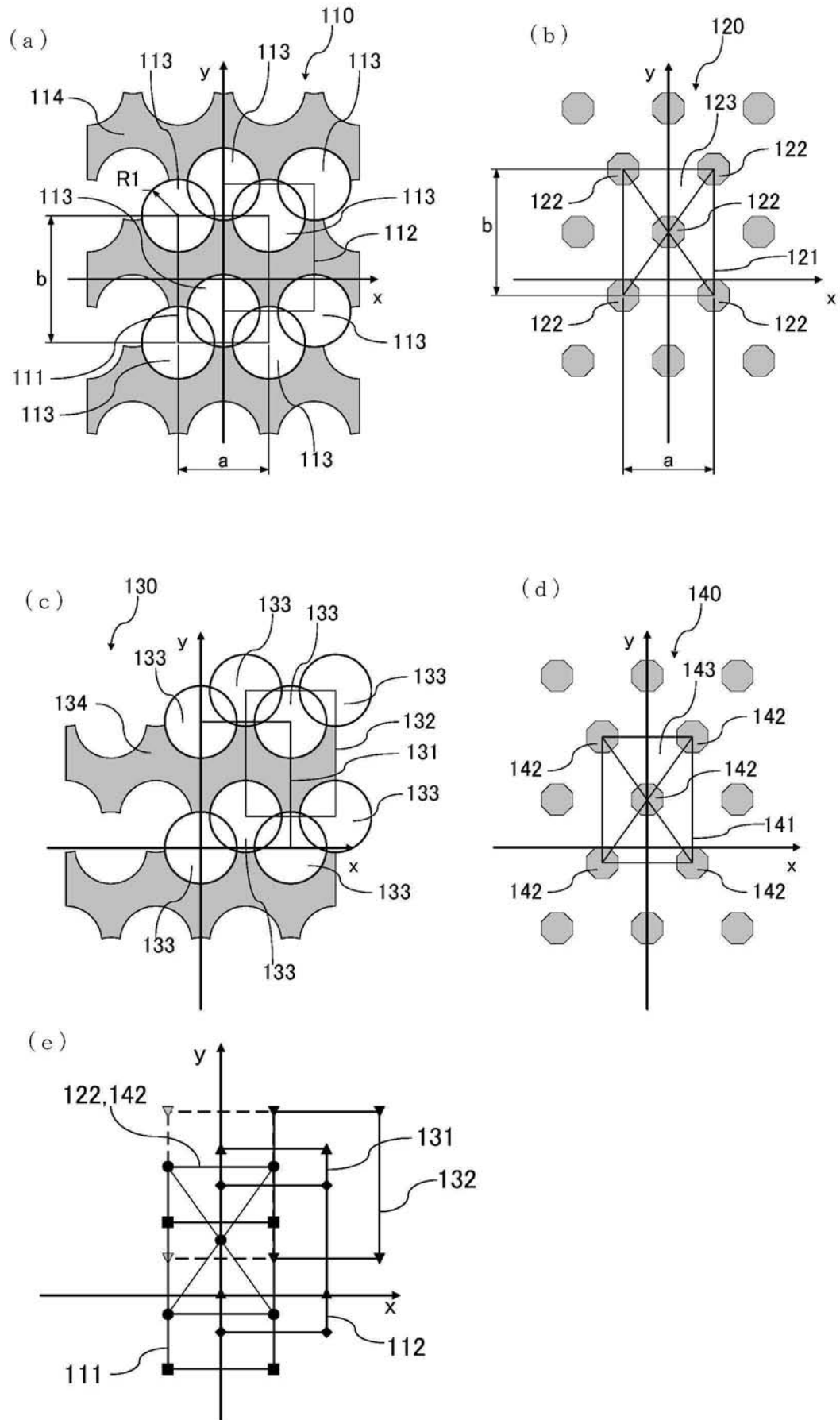
1 1 3 円孔

1 3 3	円孔
1 2 2	柱状構造
1 4 2	柱状構造
1 2 3	長方格子
1 2 4	長方格子
1 2 5	長方格子
1 2 6	長方格子
1 2 7	円孔
1 2 9	円孔
1 2 8	柱状構造
4 0 0	導波路
4 1 0	共振器

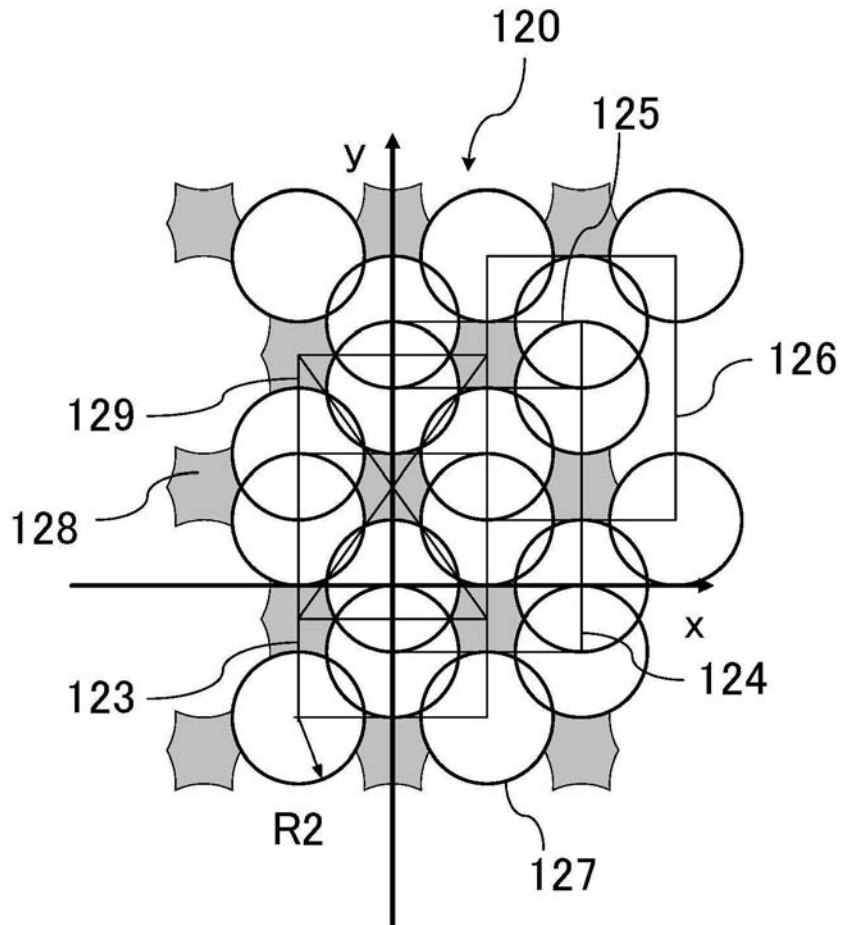
【図 1】



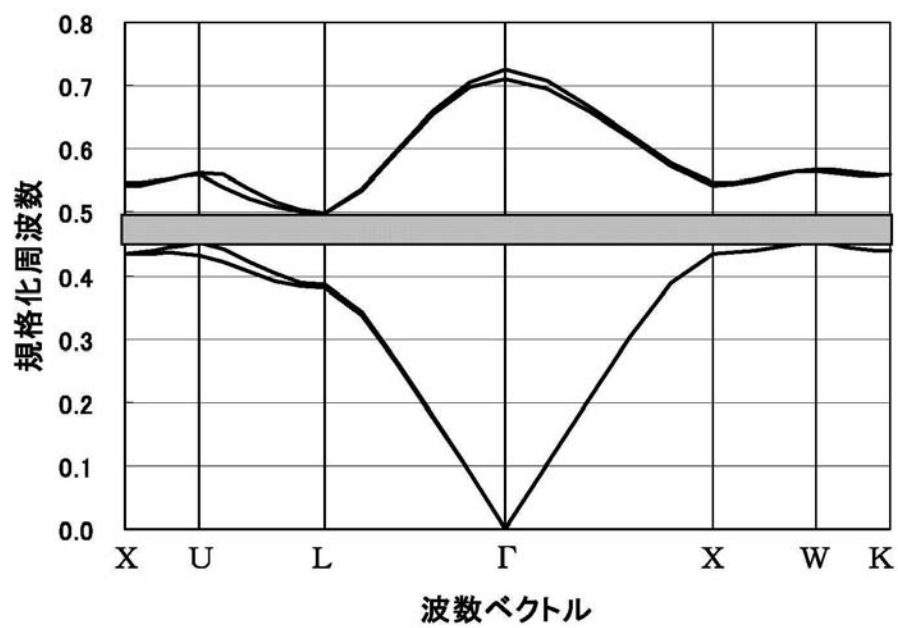
【図2】



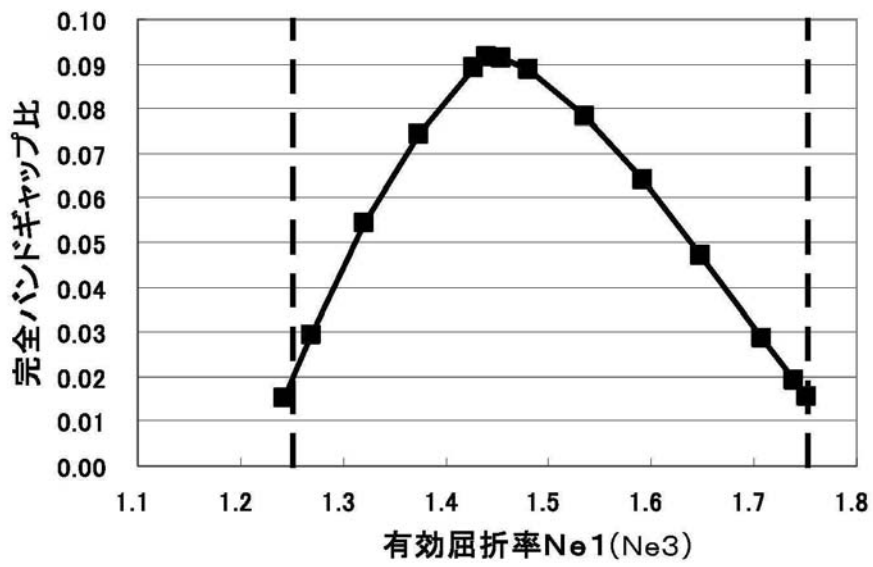
【図3】



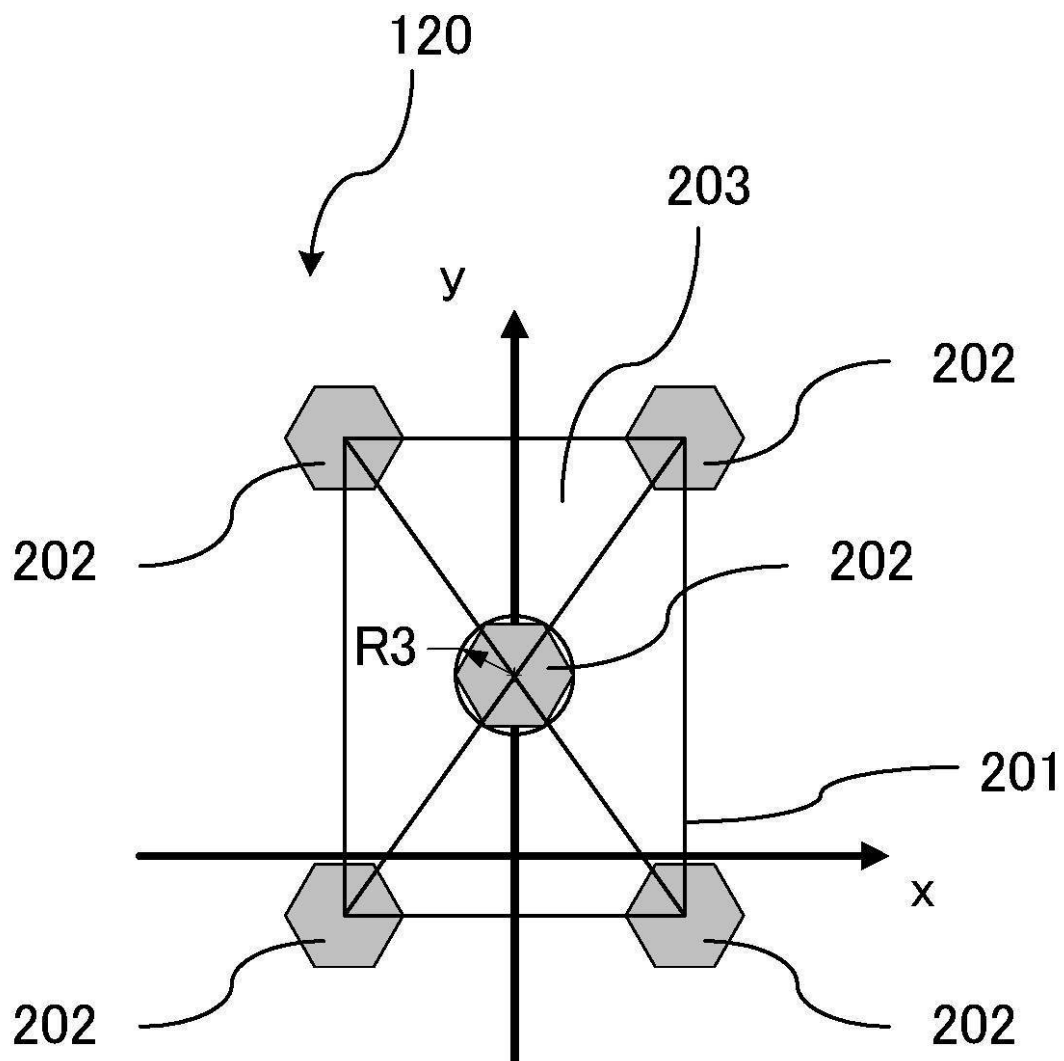
【図4】



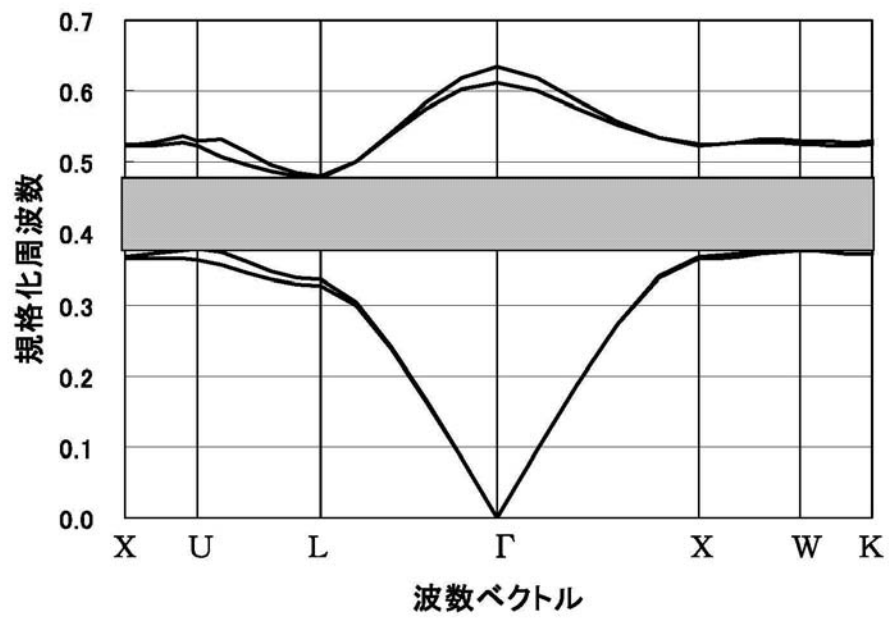
【図5】



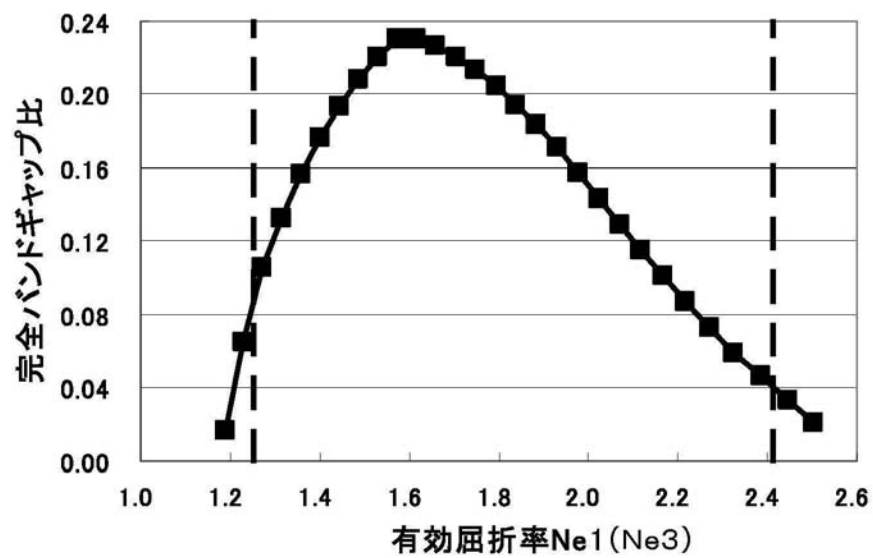
【図6】



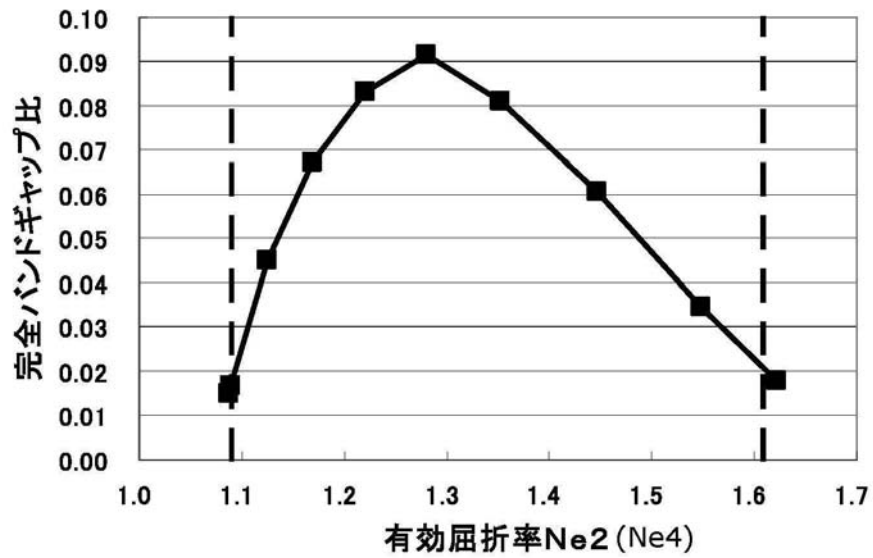
【図 7】



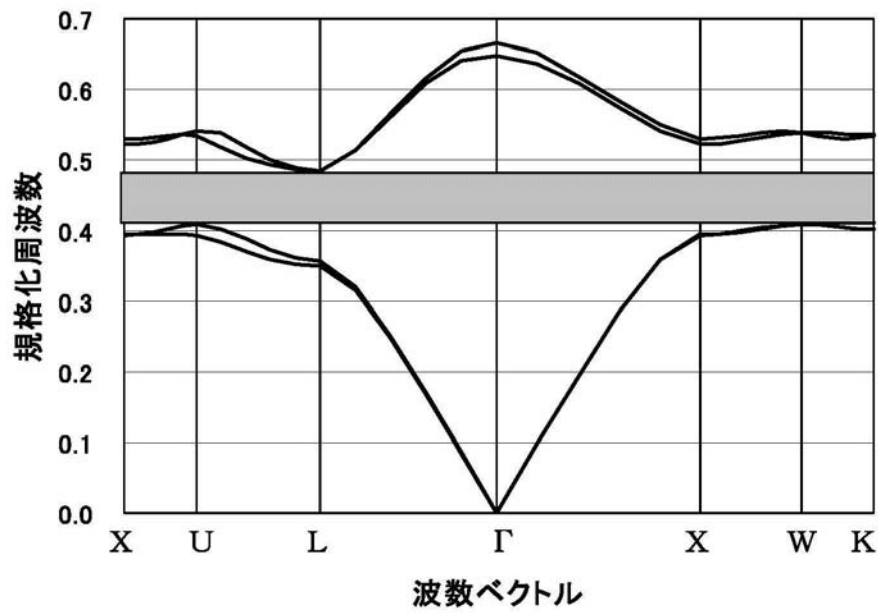
【図 8】



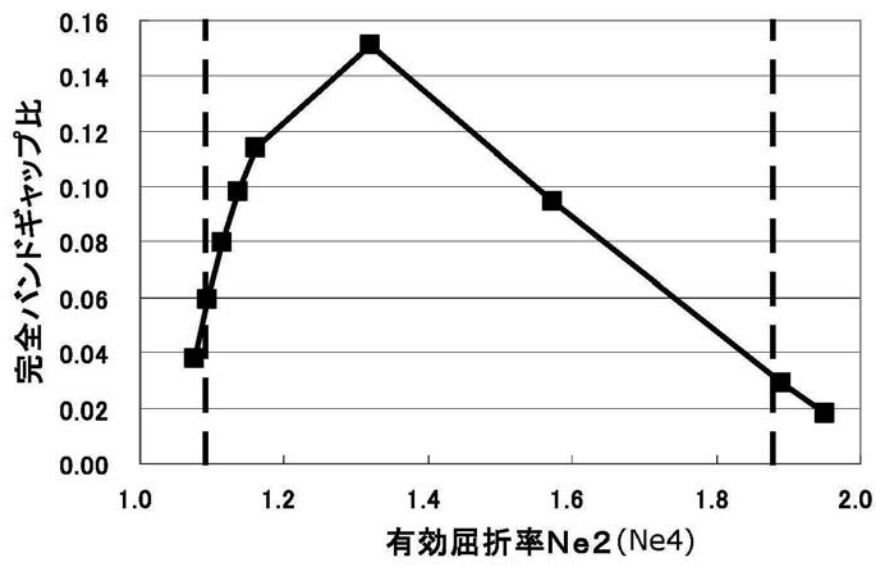
【図 9】



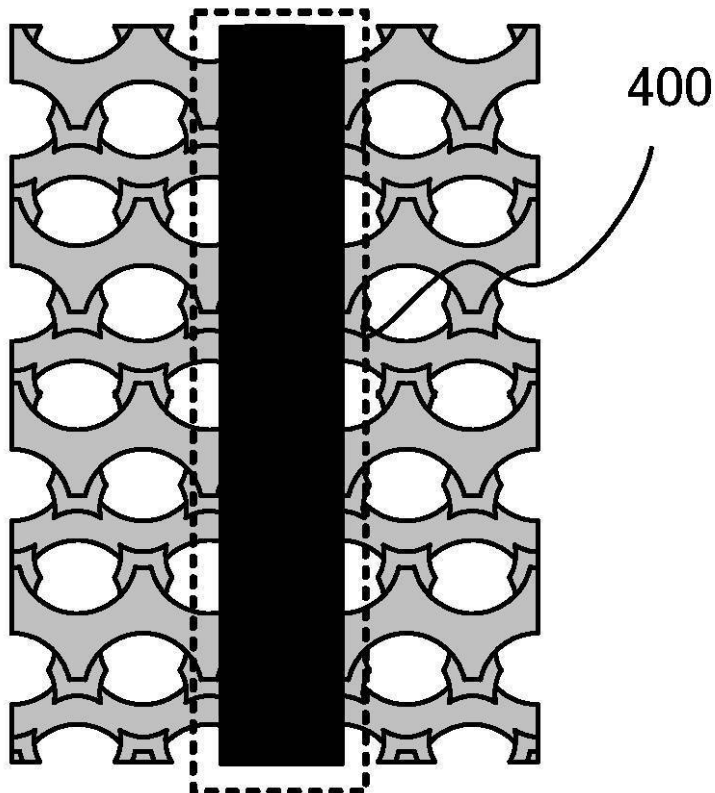
【図 10】



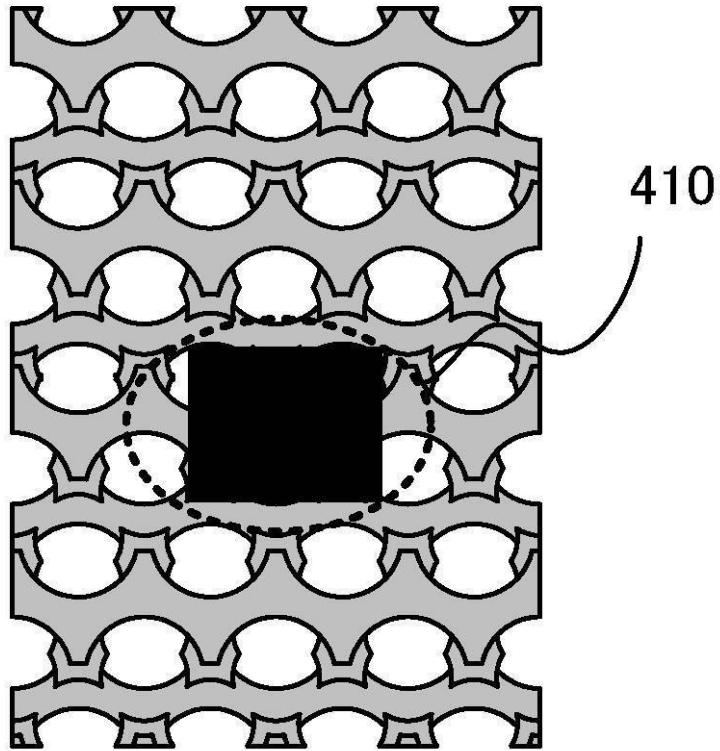
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 13】



【図 14】

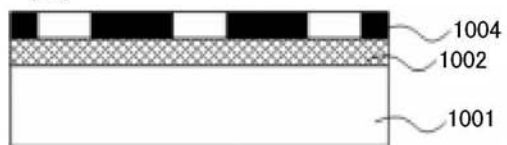
(a)



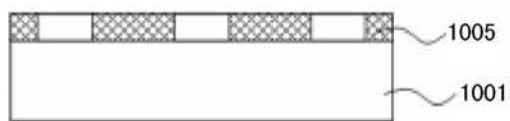
(b)



(c)



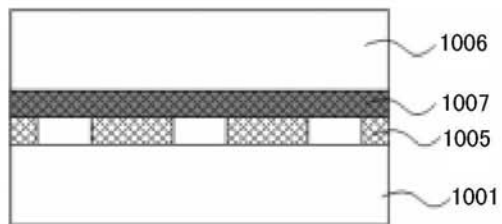
(d)



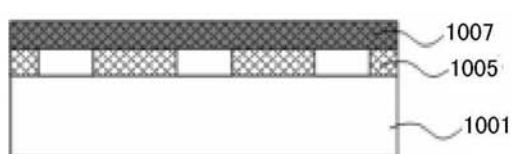
(e)



(f)



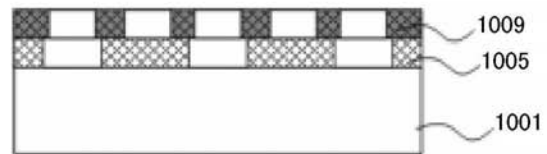
(g)



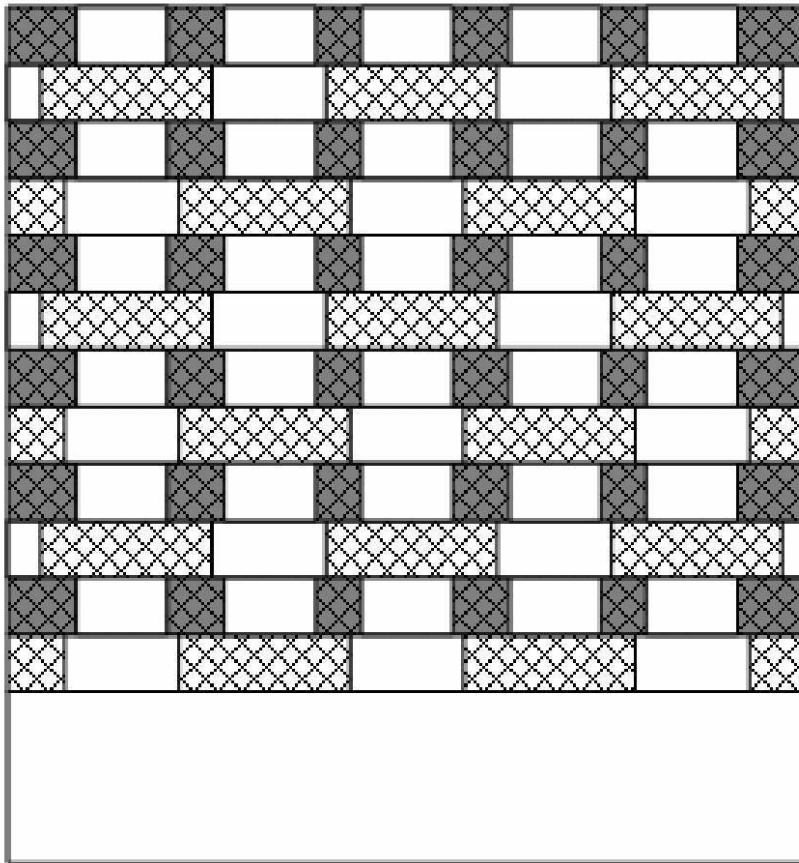
(h)



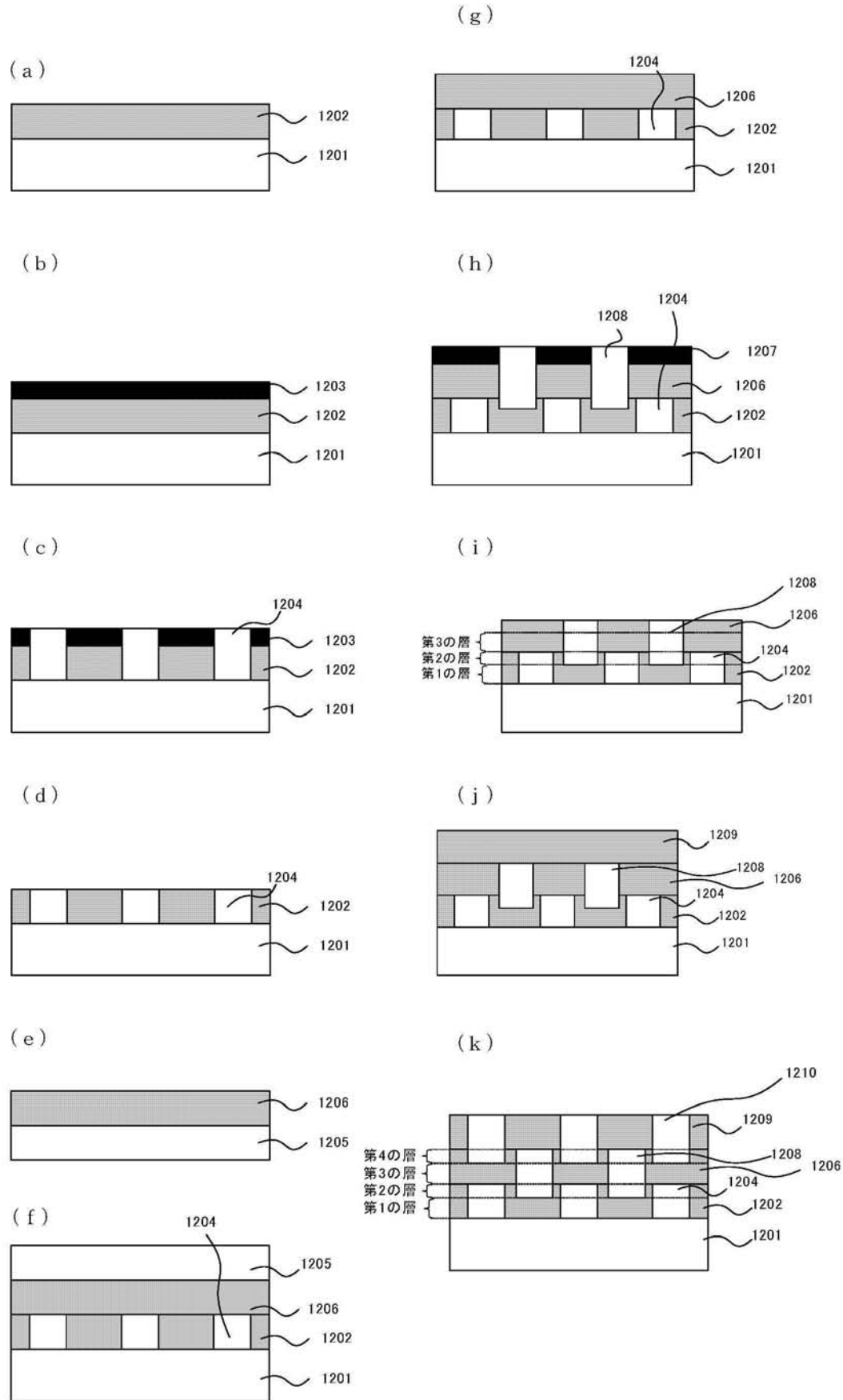
(i)



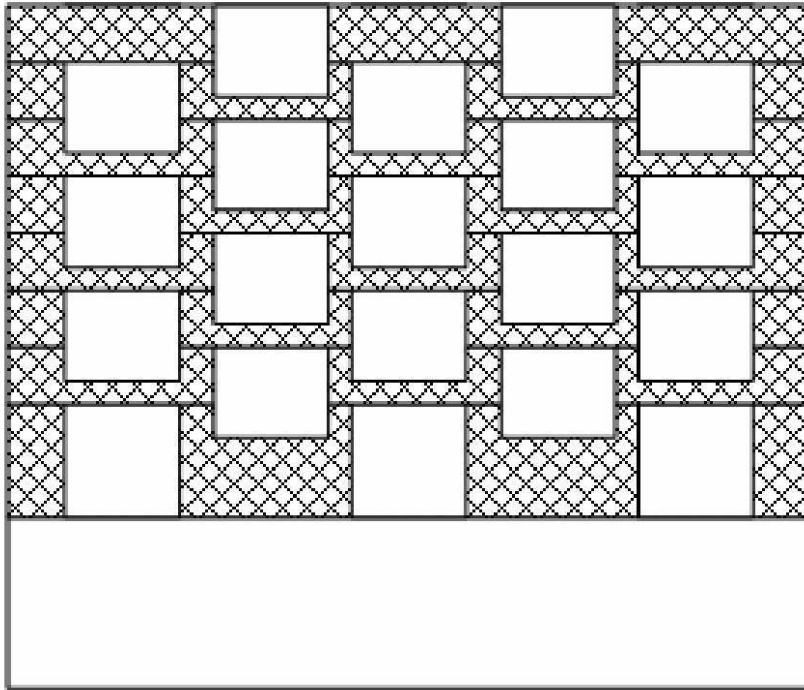
【図 15】



【図16】

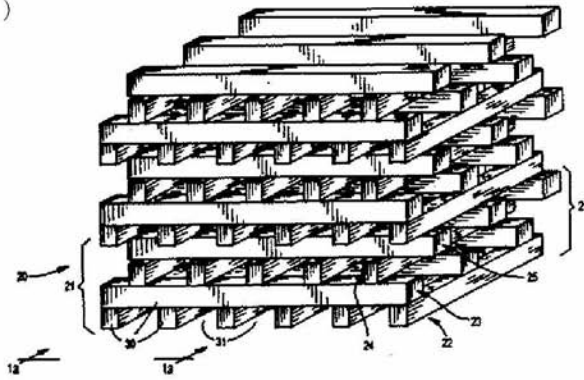


【図 17】

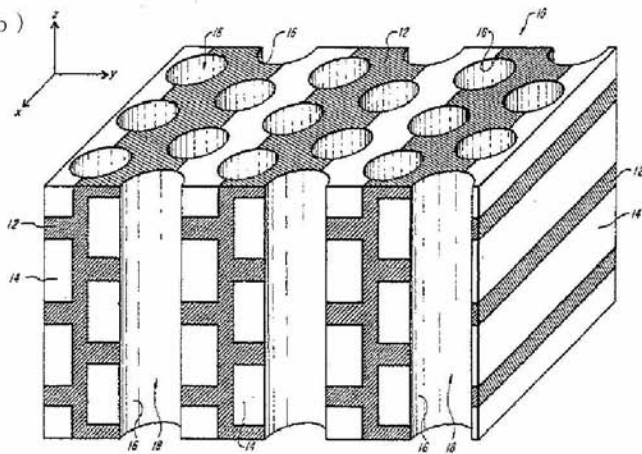


【図 18】

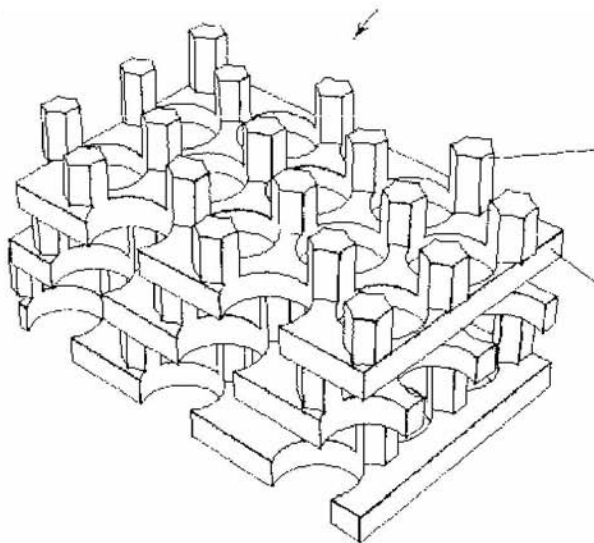
(a)



(b)



(c)



フロントページの続き

(72)発明者 池本 聖雄

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

審査官 大橋 憲

(56)参考文献 特開2005-292787(JP,A)

特開2001-74954(JP,A)

特開2007-148365(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 1/02

G02B 6/12

H01S 5/12