

(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2005-292787
(P2005-292787A)

(43) 公開日 平成17年10月20日(2005.10.20)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/12	GO2B 6/12	2H047
HO1S 5/12	HO1S 5/12	5F173

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2005-16793 (P2005-16793)	(71) 出願人	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
(22) 出願日	平成17年1月25日(2005.1.25)	(74) 代理人	100090538 弁理士 西山 恵三
(31) 優先権主張番号	特願2004-63965 (P2004-63965)	(74) 代理人	100096965 弁理士 内尾 裕一
(32) 優先日	平成16年3月8日(2004.3.8)	(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
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(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

最終頁に続く

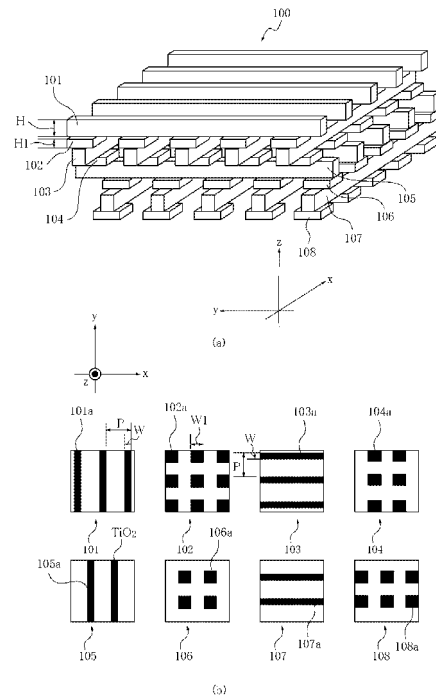
(54) 【発明の名称】 3次元周期構造及びそれを有する機能素子および発光素子

(57) 【要約】

【課題】 広い波長帯域で完全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次元周期構造及びそれを有する機能素子を得ること。

【解決手段】 フォトニックバンドギャップを呈する3次元周期構造であって、複数の角柱が所定の間隔を空けて配列された層が付加層を介して順次積層され、該付加層に含まれる直方体は該角柱の交点に相当する位置に配置され、 $1.21 W1/W2.39$ 、および、 $W1/W1 < W2/W$ を満足することを特徴とする3次元周期構造。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フォトリソグラフィギャップを呈する 3 次元周期構造であって、
 複数の角柱が所定の間隔を空けて配列された第 1 の層と、
 該第 1 の層の前記角柱とは異なる方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 2 の層と、
 該第 1 の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 3 の層と、
 該第 2 の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 4 の層と、
 前記 4 つの層の各層に平行な面内において離散的に配置された直方体を含む層を 1 層含む付加層を有し、
 該第 1 の層から該第 4 の層が各層の間にそれぞれ該付加層を介して順次積層され、
 該第 1 の層と該第 3 の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、
 該第 2 の層と該第 4 の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、
 前記付加層に含まれる直方体は前記角柱の交点に相当する位置に配置され、
 前記第 1 から第 4 の層に含まれる角柱および前記付加層に含まれる直方体を第 1 の媒質で形成し、
 前記第 1 から第 4 の層に含まれる角柱以外の領域であって前記付加層に含まれる直方体以外の領域を前記第 1 の媒質より低い屈折率を有する第 2 の媒質で形成し、
 前記付加層に含まれる直方体の前記各層に平行な平面内における一方の辺の長さを W_1 とし、
 前記各層に平行な平面内において前記角柱が延びる方向と垂直な方向における前記角柱の幅を W とするとき、

$$1.21 \leq W_1 / W \leq 2.39$$
 を満足し、
 前記付加層に含まれる直方体の前記各層に平行な平面内において、 W_1 の長さを有する辺と垂直な他方の辺の長さを W_2 とするとき、

$$W / W_1 < W_2 / W$$
 を満足することを特徴とする 3 次元周期構造。

10

20

30

【請求項 2】

フォトリソグラフィギャップを呈する 3 次元周期構造であって、
 複数の角柱が所定の間隔を空けて配列された第 1 の層と、
 該第 1 の層の前記角柱とは異なる方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 2 の層と、
 該第 1 の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 3 の層と、
 該第 2 の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第 4 の層と、
 前記 4 つの層の各層に平行な面内において離散的に配置された直方体を含む層を 2 層以上含む付加層を有し、
 該第 1 の層から該第 4 の層が各層の間にそれぞれ該付加層を介して順次積層され、
 該第 1 の層と該第 3 の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、
 該第 2 の層と該第 4 の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、
 前記付加層に含まれる直方体は該角柱の交点に相当する位置に配置され、
 前記第 1 から第 4 の層に含まれる角柱および前記付加層に含まれる直方体を第 1 の媒質

40

50

で形成し、

前記第 1 から第 4 の層に含まれる角柱以外の領域であって前記付加層に含まれる直方体以外の領域を前記第 1 の媒質より低い屈折率を有する第 2 の媒質で形成し、

前記角柱を含む層に隣接する前記付加層に含まれる直方体の、前記各層に平行な平面内であって隣接する角柱が延びる方向と垂直な方向における辺の長さを W_1 とし、

前記各層に平行な平面内において前記角柱が延びる方向と垂直な方向における前記角柱の幅を W とするとき、

$$0.81 \quad W_1 / W \quad 1.87$$

を満足し、

前記角柱を含む層に隣接する前記付加層に含まれる直方体の、前記各層に平行な平面内であって隣接する角柱が延びる方向と平行な方向における辺の長さを W_2 とするとき、

$$W / W_1 < W_2 / W$$

を満足することを特徴とする 3 次元周期構造。

【請求項 3】

前記付加層に含まれる直方体の、前記各層に平行な平面内であって隣接する角柱が延びる方向と垂直な方向における辺の長さを W_1 とし、

前記各層に平行な平面内において前記角柱が延びる方向と垂直な方向における前記角柱の幅を W とするとき、

$$1.33 \quad W_1 / W \quad 2.18$$

を満足することを特徴とする請求項 1 に記載の 3 次元周期構造。

【請求項 4】

前記角柱を含む層に隣接する前記付加層に含まれる直方体の、前記各層に平行な平面内であって隣接する角柱が延びる方向と垂直な方向における辺の長さを W_1 とし、

前記各層に平行な平面内において前記角柱が延びる方向と垂直な方向における前記角柱の幅を W とするとき、

$$0.92 \quad W_1 / W \quad 1.59$$

を満足することを特徴とする請求項 2 に記載の 3 次元周期構造。

【請求項 5】

前記付加層は、該付加層に平行な面内において、前記第 1 の層に含まれる角柱の延びる方向の長さ、前記第 2 の層に含まれる角柱の延びる方向の長さが等しい直方体を含む層を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 4 に記載の 3 次元周期構造。

【請求項 6】

前記付加層は、該付加層に平行な面内において、前記第 1 の層に含まれる角柱の延びる方向の長さ、前記第 2 の層に含まれる角柱の延びる方向の長さのうち、前記直方体を含む層に隣接する前記角柱を含む層に含まれる角柱の延びる方向の長さが長い直方体を含む層を含むことを特徴とする請求項 2 または 4 に記載の 3 次元周期構造。

【請求項 7】

前記第 1 の層に含まれる角柱の延びる方向と、前記第 2 の層に含まれる角柱の延びる方向の成す角度は 90 度であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 に記載の 3 次元周期構造。

【請求項 8】

請求項 1 乃至 6 に記載の 3 次元周期構造を複数積層した構造を含み、該構造は線状の周期欠陥部を有し、該周期欠陥部は導波路として機能することを特徴とする機能素子。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 6 に記載の 3 次元周期構造を複数積層した構造を含み、該構造は孤立した周期欠陥部を有し、該周期欠陥部は共振器として機能することを特徴とする機能素子。

【請求項 10】

前記周期欠陥部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】

レーザー発振することを特徴とする請求項 10 に記載の発光素子。

10

20

30

40

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、フォトリックバンドギャップを呈する3次元周期構造及びそれを有する機能素子及び発光素子に関する。

【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、Yablono vitch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・反射特性などを制御可能で、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。このような構造物はフォトリ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。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、従来の半導体が持つエネルギーギャップとの比較から、フォトリックバンドギャップと言われている。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リックバンドギャップを実現することができ、以下、これを完全フォトリックバンドギャップと呼ぶことにする。完全フォトリ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、より広い波長域で完全フォトリックバンドギャップが実現できる構造の機能素子が求められている。

【0003】

このようなフォトリックバンドギャップを呈する構造体がこれまでも幾つか提案されている(特許文献1、2、非特許文献2)。完全フォトリックバンドギャップを実現可能な3次元周期構造としては図21(a)~(f)に示すようないくつかの構造が挙げられ、それぞれ順に、ダイヤモンドオパール構造、ウッドパイル構造、らせん構造、独自の3次元周期構造、前記3次元周期構造の反転構造(インバース構造)、ダイヤモンドウッドパイル構造等がある。

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

【非特許文献2】Applied Physics Letters, Vol. 84, No. 3, pp. 362, 2004年

【特許文献1】特開2002-148463号公報

【特許文献2】特表2002-522810号公報

【特許文献3】米国特許5,335,240号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

一般にフォトリックバンドギャップを呈する3次元周期構造は、構造の大きさが小さく作製が容易でないことから、これら3次元周期構造を光波領域(真空中での波長が数 μm 以下)で動作させたものは、非常に少ない。

【0005】

そのような中、特許文献3にて提案された図21(b)に示すウッドパイル構造は、2次元周期構造を積層することにより作製ができる構造であることから、3次元構造では唯一実験的にフォトリックバンドギャップが観測されている。しかし、ウッドパイル構造は、最も広いフォトリックバンドギャップの波長幅が得られるとされるインバースオパール構造に対して、フォトリックバンドギャップ幅が狭く、広い波長帯域で動作する導波路や波長選択フィルタなどの光学素子を実現することが難しいという問題がある。また、図21(f)に示す非特許文献2にて提案されたダイヤモンドウッドパイル構造は、ウッドパ

イル構造の角柱の間に、底辺が正方形でかつ一辺の長さが角柱の幅と同一幅の正方角柱を付加した構造である。ダイヤモンドウッドパイル構造は、ウッドパイル構造よりも若干広いフォトリソバンドギャップを有するが、その差は小さい。一方、インバースオパール構造は従来の半導体製造プロセスに用いられる手法によっては製造が困難である。

【0006】

本発明は、広い波長領域でフォトリソバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な3次元周期構造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】

【0007】

本発明の3次元周期構造は、フォトリソバンドギャップを呈する3次元周期構造であって、

複数の角柱が所定の間隔を空けて配列された第1の層と、

該第1の層の前記角柱とは異なる方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第2の層と、

該第1の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第3の層と、

該第2の層の前記角柱と同じ方向に延びる複数の角柱が、所定の間隔を空けて配列された第4の層と、

前記4つの層の各層に平行な面内において離散的に配置された直方体を含む層を1層含む付加層を有し、

該第1の層から該第4の層が各層の間にそれぞれ該付加層を介して順次積層され、

該第1の層と該第3の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、

該第2の層と該第4の層に含まれる角柱が、相互に該角柱の延びる方向と垂直な方向に前記所定の間隔の半分ずれるように積層され、

前記付加層に含まれる直方体は前記角柱の交点に相当する位置に配置され、

前記第1から第4の層に含まれる角柱および前記付加層に含まれる直方体を第1の媒質で形成し、

前記第1から第4の層に含まれる角柱以外の領域であって前記付加層に含まれる直方体以外の領域を前記第1の媒質より低い屈折率を有する第2の媒質で形成し、

前記付加層に含まれる直方体の前記各層に平行な平面内における一方の辺の長さを W_1 とし、

前記各層に平行な平面内において前記角柱が延びる方向と垂直な方向における前記角柱の幅を W とするとき、

$$1.21 \quad W_1 / W \quad 2.39$$

を満足し、

前記付加層に含まれる直方体の前記各層に平行な平面内において、 W_1 の長さを有する辺と垂直な他方の辺の長さを W_2 とするとき、

$$W / W_1 < W_2 / W$$

を満足することを特徴とする。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、広い波長帯域で完全フォトリソバンドギャップを呈し、しかも製造が容易な3次元周期構造及びそれを有する機能素子が得られる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0009】

以下に実施例を説明する。

【実施例1】

【0010】

図1(a)は本発明の3次元周期構造の実施例1の要部概略図である。3次元周期構造

100は、 xy 平面を含む層101～108の8層を基本周期として構成されている。図1(b)は各層101～108の xy 断面の一部の概略図を示す。第1の層101および第5の層105は、第1の媒質(高屈折率)による y 軸方向に延びる複数の角柱101aおよび105aが等間隔 P で x 方向に配置されており、角柱101aおよび105aは x 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。また、第3の層103および第7の層107は、第1の媒質による x 軸方向に延びる複数の角柱103aおよび107aが等間隔 P で y 方向に配置されており、角柱103aおよび107aは y 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。

【0011】

第2の層(付加層)102には、第1の層101中の角柱101aおよび第3の層103中の角柱103aの交点に相当する位置に、 xy 平面内において互いに接しないように離散的に配置された第1の媒質による直方体102aが配置されている。ここで、直方体102aの xy 平面内における面積は、第1の層101中の角柱101aと第3の層103中の角柱103aが交差する領域の面積より大きい。

10

【0012】

同様に、角柱を含む層の間にある第4の層(付加層)104、第6の層(付加層)106、第8の層(付加層)108には、隣接する層中の角柱の交点に相当する位置に、 xy 平面内において離散的に配置された直方体102aと同一形状の第1の媒質による直方体104a、106a、108aが配置されている。

【0013】

各層中の角柱101a、103a、105a、107aおよび直方体102a、104a、106a、108aは互いに接しており、各層中の角柱以外の領域および直方体以外の部分1aは第2の媒質(低屈折率)で充填されている。本実施例では、第1、第2の媒質の屈折率、角柱および直方体の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数域(波長域)に非常に広い周波数帯域(波長帯域)で完全なフォトリックバンドギャップ(全方位の反射率が100%に近い波長領域)を得ている。

20

【0014】

例えば、第1の媒質の屈折率を4、第2の媒質の屈折率を1として、角柱101a、103a、105a、107aの間隔を P として、角柱を含む全ての層101、103、105、107の z 軸方向の厚さを $0.23 \times P$ 、直方体102a、104a、106a、108aを含む全ての層102、104、106、108の z 軸方向の厚さを $0.123 \times P$ 、全ての角柱を断面の一辺の長さ W が $0.23 \times P$ の正方形の角柱、全ての直方体102a、104a、106a、108aを xy 断面の一辺の長さ W_1 および W_2 が $0.48 \times P$ の正方形で z 軸方向厚さが $0.123 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトリックバンド構造を解析した結果を図2に示す。平面波展開法をフォトリック結晶に適用することはPhysical Review Letters Vol. 65, pp. 3152, 1990.に記載されている。

30

【0015】

図1(a)に示した構成においては、異なる層に含まれる角柱に挟まれる直方体がダイヤモンド型格子の格子位置に対応する位置に配置される。特に上記の構成を有することで、当該直方体の作るダイヤモンド型格子が立方体となっている。

40

【0016】

図2において、横軸は、波数ベクトルすなわちフォトリック結晶に入射する電磁波の入射方向を表しており、例えば K 点は x 軸(もしくは y 軸)に平行な波数ベクトル、 X 点は xy 平面内において、 x 軸(あるいは y 軸)に対して 45° の傾きをもった波数ベクトルを表している。一方、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2中のハッチングで示した規格化周波数においては、光の入射方向によらず光が存在できず、完全フォトリックバンドギャップが形成されている。この構造における完全フォトリックバンドギャップ中心(規格化)周波数 0 で正規化された完全フォトリックバンドギャップ(規格化)周波数帯域幅である完全フォトリックバンドギャップ比

50

0 は 0 . 2 8 1 となる。

【 0 0 1 7 】

同じ屈折率の媒質（角柱の媒質の屈折率を 4、角柱以外の媒質の屈折率 1）を用いた従来技術であるウッドパイル構造のフォトニックバンド図を図 3（ a ）に示す。なお比較に用いたウッドパイル構造は、各層内の角柱と角柱との間隔を P とした際に、角柱の幅 L 1 および Z 方向の高さ L 2 を数 1 で示されるものとした。

【 0 0 1 8 】

【 数 1 】

$$L1 = L2 = \frac{\sqrt{2}}{4} P$$

（数 1）

10

【 0 0 1 9 】

数 1 で示される L 1、L 2 は、ウッドパイル構造中の隣接する層に含まれる角柱の交点の位置を立方体のダイヤモンド構造の格子位置に対応させるものである。

【 0 0 2 0 】

図 3（ a ）に示したフォトニックバンド図における完全フォトニックバンドギャップ比 / 0 は 0 . 2 1 2 となり、本発明による構造に対してかなり狭い完全フォトニックバンドギャップしか得られないことがわかる。

20

【 0 0 2 1 】

また、L 1 および L 2 を数 2 で示されるものとした場合のフォトニックバンド図を図 3（ b ）に示す。

$$L1 = 0 . 2 5 \times P, L2 = 0 . 3 \times P \quad (\text{数 2})$$

数 2 で示される L 1、L 2 は、ウッドパイル構造中の隣接する層に含まれる角柱の交点の位置を直方体のダイヤモンド構造の格子位置に対応させるものである。

【 0 0 2 2 】

図 3（ b ）に示したフォトニックバンド図における完全フォトニックバンドギャップ比 / 0 は 0 . 2 6 3 となり、本発明による構造に対して狭い完全フォトニックバンドギャップしか得られないことがわかる。

30

【 0 0 2 3 】

さらに、同じ屈折率の媒質（角柱の媒質の屈折率を 4、角柱以外の媒質の屈折率 1）を用いた従来技術であるダイヤモンドウッドパイル構造のフォトニックバンド図を図 3（ c ）に示す。比較に用いたダイヤモンドウッドパイル構造は、角柱と角柱の間隔を a とした際に、全ての角柱の X または Y 方向の幅が 0 . 2 8 × P、Z 方向の高さ 0 . 2 2 × P で、角柱間に配置された角柱と同じ幅（ 0 . 2 8 × P ）の正方角柱の Z 方向の高さが 0 . 1 3 × P とした。図 3（ c ）に示したフォトニックバンド図における完全フォトニックバンドギャップ比 / 0 は 0 . 2 7 4 となり、本発明による構造に対して狭い完全フォトニックバンドギャップしか得られないことがわかる。

【 0 0 2 4 】

従来のウッドパイル構造（ / 0 = 0 . 2 6 3 ）及びダイヤモンドウッドパイル構造（ / 0 = 0 . 2 7 4 ）に比較して、本実施例の 3 次元周期構造 1 0 0 によれば広い完全フォトニックバンドギャップ（ / 0 = 0 . 2 8 1 ）が得られる理由を以下に説明する。3 次元周期構造 1 0 0 は、角柱の交点に相当する位置に X Y 平面内において角柱の交差領域より広い面積を有する直方体を含む層 1 0 2、1 0 4、1 0 6、1 0 8 を付加することにより、図 1（ a ）における z 方向に繋がった構造部分がウッドパイル構造に対して増加する。また、付加した直方体が角柱の交差領域より広い面積を有するため、斜め方向（例えば、X Z の対角方向）に繋がった部分がダイヤモンドウッドパイル構造に対して増加する。このため、z 方向および斜め方向に電界の振動方向を持つ偏光成分の電磁波に対して第 1 の媒質中にエネルギーが集中する定在波および第 2 の媒質中にエネルギー

40

50

が集中する定在波が存在しやすくなり、またそれぞれのエネルギーの集中度合いが高いため、完全フォトニックバンドギャップの帯域が広がる。以上のように、本実施例では、角柱の間に角柱の交差領域より広い面積を有する直方体を設けることによって、完全フォトニックバンドギャップの帯域を拡大している。なお、x方向、y方向に電界の振動方向を持つ偏光成分の電磁波に関しては、従来のウッドパイル構造やダイヤモンドウッドパイル構造と同様に広いフォトニックバンドギャップが得られる。このように、付加層を直方体を含む一つの層で構成した場合は、フォトニックバンドギャップの方向依存性を低減するために、XZ断面およびYZ断面で形状の対称性を持つことが望ましい。このため、直方体のXY平面内の形状はX軸方向の長さY軸方向の長さは等しい方が望ましい。

【0025】

次に同様の3次元周期構造で、直方体102a、104a、106a、108aのXY断面における幅W1および角柱101a、103a、105a、107aのXY断面における幅Wを変化させることによって、直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W1/W$ が変化したときの、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図4に示す。図4は横軸に直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W1/W$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 Γ/Γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。ダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比と比較すると、 $W1/W$ の値を1.21から2.53の間の値とすることで、ダイヤモンドウッドパイル構造より良い性能が得られることが分かる。これは、付加層内の直方体が大きくなりすぎると、Z方向に電界成分を有する電磁波に対して、第1の媒質、第2の媒質へのエネルギー集中の度合いが低下し、その結果フォトニックバンドギャップの幅が狭くなるからである。特に、 $W1/W$ の値を1.34から2.45の間の値とすることで、Z方向に電界成分を有する電磁波に対して第1の媒質、第2の媒質へのエネルギー集中の度合いをより適切にすることができる。また、同様の3次元周期構造において、すべての付加層内の直方体102a、104a、106a、108aのXY断面の一辺の長さW1およびW2を変化させることによって、直方体のXY断面の面積 $W1 \times W2$ が変化したとき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。図5は、横軸に直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W1 \times W2)/(W \times W)$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 Γ/Γ_0 を示している。図5で、ダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比と比較すると、直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W1 \times W2)/(W \times W)$ が1よりも大きいとき、すなわち $W2/W$ の値が $W/W1$ の値よりも大きいときに、ダイヤモンドウッドパイル構造より広い完全フォトニックバンドギャップを実現できることが分かる。また、角柱のWを変えることによって、角柱の交差領域の面積を変化させたときについても同様の結果が得られる。

【0026】

次に、前記の3次元周期構造100で、第1の媒質の屈折率を2.33、第2の媒質の屈折率を1として、角柱101a、103a、105a、107aの間隔をPとして、角柱を含む全ての層101、103、105、107のz軸方向の厚さを $0.25 \times P$ 、直方体102a、104a、106a、108aを含む全ての層102、104、106、108のz軸方向の厚さを $0.10 \times P$ 、全ての角柱101a、103a、105a、107aの断面の一辺の長さWが $0.32 \times P$ の長方形の角柱、全ての直方体をxy断面の一辺の長さW1およびW2が $0.55 \times P$ の正方形でz軸方向厚さが $0.10 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトニックバンド構造を解析すると、完全フォトニックバンドギャップ比は0.080となる。

【0027】

同様の媒質(角柱の屈折率2.33、角柱以外の部分の屈折率1.0)を用いて、従来技術であるウッドパイル構造を形成すると、完全フォトニックバンドギャップ比は0.059となり、第1の媒質の屈折率と第2の媒質の屈折率との比を小さくしても、本発明に

10

20

30

40

50

よる構造がウッドパイル構造よりも完全フォトニックバンドギャップの帯域幅の広い構造であることが分かる。なお比較に用いたウッドパイル構造は、各層内の角柱と角柱との間隔をPとした際に、角柱の幅L1およびz方向の高さL2を数1で示されるものとした。また、同様の媒質（角柱の屈折率2.33、角柱以外の部分の屈折率1.0）を用いて、従来技術であるダイヤモンドウッドパイル構造を形成すると、完全フォトニックバンドギャップ比は0.065となり、第1の媒質の屈折率と第2の媒質の屈折率との比を小さくしても、本発明による構造がダイヤモンドウッドパイル構造よりも完全フォトニックバンドギャップの帯域幅の広い構造であることが分かる。

【0028】

さらに、同様の3次元周期構造で、直方体102a、104a、106a、108aのXY断面における幅W1および角柱101a、103a、105a、107aのXY断面における幅Wを変化させることによって、直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W1/W$ が変化したときの、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図6に示す。図6は横軸に直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W1/W$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 $\gamma/0$ を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。図6よりダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比と比較すると、 $W1/W$ の値を1.16から2.39の間の値とすることで高い性能が得られることが分かる。また、 $W1/W$ の値を1.33から2.18の間の値とすることでより良い性能を得ることが出来る。また、同様の3次元周期構造で、付加層内の直方体102a、104a、106a、108aのXY断面における幅W1およびW2を変化させることによって、直方体のXY断面における面積 $W1 \times W2$ が変化したときの完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図7に示す。図7は横軸に直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W1 \times W2)/(W \times W)$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 $\gamma/0$ を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図7より、ダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比と比較すると、直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W1 \times W2)/(W \times W)$ が1よりも大きいとき、すなわち $W2/W$ の値が $W/W1$ の値よりも大きいときに、ダイヤモンドウッドパイル構造より広い完全フォトニックバンドギャップを実現できることが分かる。また、角柱の幅Wを変えることによって、角柱の交差領域の面積を変化させたときについても同様の結果が得られる。

【0029】

以上のように、本実施例によれば3次元周期構造の付加層に含まれる直方体のXY断面における幅(W1、W2)および角柱のXY断面における幅(W)を適切に調整することで、従来提案されているウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを実現することができる。また、第1の媒質の屈折率と第2の媒質の屈折率との比を小さくしても、3次元周期構造の付加層の各部位の大きさを適切に調整することで、従来提案されているウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを実現することができる。なお、図1および図2に示した実施例において、直方体はXY断面における幅W1と幅W2が同じ構造を用いたが、異なる幅を有する構造を用いてもよく、また、x軸に平行な角柱の幅および間隔とy軸に平行な角柱の幅および間隔をそれぞれ異なる値に設定しても良い。また、隣接する層内の角柱と角柱が互いになす角度を変えることで、フォトニックバンドギャップの入射角依存性、偏光依存性を変化させることが出来る。特に所定の角度の入射光に対して所望の性能を得たい場合や、3次元周期構造に異方性を導入したい場合などに有用である。逆に本実施例のように角柱が互いに90°で交わるとき、入射角依存性、偏光依存性が小さな特性を得ることが出来る。

【0030】

また本実施例において、第1の媒質に屈折率4.0の媒質および屈折率2.33の媒質

を使用した、それ以外の屈折率を有する媒質を使用してもよい。3次元周期構造を形成する媒質としては、従来の3次元周期構造と同様に、角柱や直方体部を形成する高屈折率媒質としては、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、角柱や直方体部以外に充填する低屈折率媒質としては、SiO₂などの誘電体や、PMAAなどの高分子材料、空気などを用いる。広い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（好ましくは2～5）が望ましい。

【0031】

なお、誘電率 ϵ と屈折率 n は以下の式で関係付けられる（ μ は透磁率を示す）。

【0032】

【数2】

$$n = \sqrt{(\epsilon \cdot \mu)}$$

【0033】

なお、第1、第5の層101、105や第3、第7の層103、107の角柱の配置ピッチのずれは、 $P/2$ となることが好ましい。また第1、第5の層101、105と第3、第7の層103、107の角柱の配列方向のずれは略 $P/2$ であれば良く、例えば $0.4P \sim 0.6P$ の範囲内であれば良い。これは以下の各実施例においても同じである。

【実施例2】

【0034】

図8(a)は本発明の3次元周期構造の実施例2の要部概略図である。3次元周期構造200は、 xy 平面を含む層201～212の12層を基本周期として構成されている。図8(b)は各層の xy 断面の一部を示す。第1の層201および第7の層207は、第1の媒質による y 軸方向に延びる複数の角柱201aおよび207aが等間隔 P で x 方向に配置されており、角柱201aおよび207aは x 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。また、第4の層204および第10の層210は、第1の媒質による x 軸方向に延びる複数の角柱204aおよび210aが等間隔 P で y 方向に配置されており、角柱204aおよび210aは y 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。第2の層202および第3の層203には、第1の層201中の角柱201aおよび第4の層204中の角柱204aの交点に相当する位置に、 xy 平面内において互いに接しないように離散的に配置された第1の媒質による直方体202aおよび203aが配置されている。なお、直方体202aと203aは xy 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している。同様に、角柱を含む層の間にある第5の層205、第6の層206、第8の層208、第9の層209、第11の層211、第12の層212には、隣接する層中の角柱の交点に相当する位置に、 xy 平面内において離散的に配置された第1の媒質による直方体205a、206a、208a、209a、211a、212aが配置されている。各層中の角柱および直方体は互いに接しており、各層中の角柱および直方体以外の部分は第2の媒質で充填されている。第1、第2の媒質の屈折率、角柱および直方体の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数域（波長域）に非常に広い周波数帯域（波長帯域）で完全フォトニックバンドギャップを得ている。

【0035】

本実施例では、例えば、第1の媒質の屈折率を4、第2の媒質の屈折率を1として、角柱の間隔を P として、角柱を含む全ての層201、204、207、210の z 軸方向の厚さを $0.174 \times P$ 、直方体を含む全ての層202、203、205、206、208、209、211、212の z 方向の厚さを $0.09 \times P$ 、全ての角柱201a、204a、207a、210aを断面の一辺の長さ W が $0.174 \times P$ の正方形の角柱、全ての直方体202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212aの xy 断面における隣接する角柱が延びる方向と垂直な方向の幅 $W11$ が $0.31 \times P$ 、幅 $W11$ と垂直な方向の幅 $W12$ が $0.655 \times P$ 、の長方形で z 方向厚さ $0.09 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトニックバンド構造を解析した結果を図9

10

20

30

40

50

に示す。

【0036】

この3次元周期構造における完全フォトニックバンドギャップ比は0.303となり、実施例1と同様の理由でウッドパイル構造やダイヤモンドウッドパイル構造よりも完全フォトニックバンドギャップの帯域幅の広い構造が実現できる。このように、2層以上の直方体を含む層で付加層を構成することにより、特に斜め方向（例えば、XZの対角方向）に繋がった部分がダイヤモンドウッドパイル構造に対して増加するため、斜め方向に電界の振動方向を持つ偏光成分の電磁波に対して第1の媒質中にエネルギーが集中する定在波および第2の媒質中にエネルギーが集中する定在波が存在しやすくなり、またそれぞれのエネルギーの集中度合いが高いため、1層で付加層を構成する場合に比べ、完全フォトニックバンドギャップの帯域が非常に広がる。また、2層以上で付加層を構成する場合は、フォトニックバンドギャップの方向依存性を低減するために、付加層毎にXZ断面およびYZ断面の形状対称性を持つほうが望ましい。付加層内に含まれる各直方体のXY平面内の形状は、X軸方向の長さY軸方向の長さを一致させる必要は無く、異なる値としたほうが設計の自由度が増し、より広いフォトニックバンドギャップが得られるため望ましい。特に本実施例に示すように、X軸方向に延びる角柱に隣接する直方体の形状はX軸方向の長さをY軸方向の長さより長く、Y軸方向に延びる角柱に隣接する直方体の形状はY軸方向の長さをX軸方向の長さより長くすることにより、より広いフォトニックバンドギャップを得ることができるため、より望ましい。このように、本実施例によれば実施例1よりもさらに完全フォトニックバンドギャップの広い構造が実現できる。

【0037】

次に、同様の3次元周期構造で、直方体202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212aのXY断面における幅W11および角柱201a、204a、207a、210aのXY断面における幅Wを変化させることによって、直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 W_{11}/W が変化したときの完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図10に示す。図10は横軸に直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 W_{11}/W 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図10より、 W_{11}/W の値を0.77から2.38の間の値とすることで、ダイヤモンドウッドパイル構造より良い性能が得られることが分かる。また、 W_{11}/W の値を0.88から2.10の間の値とすることで、より良い性能を得ることが出来る。

【0038】

さらに、同様の3次元周期構造で、付加層内の直方体202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212aの幅W11を変化させることによって、直方体のXY断面の面積が変化したときの完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図11に示す。図11は横軸に直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W_{11} \times W_{12}) / (W \times W)$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図11より、直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W_{11} \times W_{12}) / (W \times W)$ が1よりも大きいとき、すなわち W_{12}/W の値が W/W_{11} の値よりも大きいときに、ダイヤモンドウッドパイル構造より広い完全フォトニックバンドギャップが得られることが分かる。また、付加層内の直方体の幅W12を変えることによって、直方体のXY平面内における面積を変化させたとき、および角柱の幅Wを変えることによって、角柱の交差領域の面積を変化させたときについても同様の結果が得られる。

【0039】

直方体を付加することにより、斜め方向（例えばXZの対角方向）に電界の振動方向を持つ偏光成分の電磁波に対して、特に第2の媒質中にエネルギーが漏れやすい角柱の幅方向においてエネルギー分布を改善し、第1の媒質中にエネルギーが集中する定在波が存在

10

20

30

40

50

しやすくなり、その結果広い完全フォトニックバンドギャップが得られる。このため、直方体の幅のうち、角柱の幅方向に平行な幅 W_{11} を変化させた時の完全フォトニックバンドギャップの変化量は、角柱の幅方向に垂直な幅 W_{12} を変化させた時の変化量に比べて大きく、直方体の幅 W_{12} の値は、所定の値以上であれば比較的自由に設定することができる。なお、各構造幅を制限する要因については、実施例 1 で述べた理由と同様である。

【0040】

次に、図 8 (a) に示す 3 次元周期構造において、第 1 の媒質の屈折率を 2.33、第 2 の媒質の屈折率を 1.0 として、角柱の間隔を P として、角柱を含む全ての層 201、204、207、210 の z 軸方向の厚さを $0.174 \times P$ 、直方体を含む全ての層 202、203、205、206、208、209、211、212 の z 方向の厚さを $0.09 \times P$ 、全ての角柱 201a、204a、207a、210a を断面の一辺の幅 W が $0.31 \times P$ の長方形の角柱、全ての直方体 202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212a の xy 断面における隣接する角柱が伸びる方向と垂直な方向の幅 W_{11} が $0.37 \times P$ 、幅 W_{11} と垂直な方向の幅 W_{12} が $0.66 \times P$ の長方形で z 方向厚さ $0.09 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトニックバンド構造を解析すると、完全フォトニックバンドギャップ比は 0.088 となり、第 1 の媒質の屈折率と第 2 の媒質の屈折率との比を小さくしても、前記と同様の理由で、実施例 1 よりもさらに完全フォトニックバンドギャップの広い構造が実現できる。

【0041】

さらに、同様の 3 次元周期構造で、直方体 202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212a の XY 断面における幅 W_{11} および角柱 201a、204a、207a、210a の XY 断面における幅 W を変化させることによって、直方体の XY 断面における幅を角柱の XY 断面における幅で割った値 W_{11}/W が変化したときの、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図 12 に示す。図 12 は横軸に直方体の XY 断面における幅を角柱の XY 断面における幅で割った値 W_{11}/W 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例では図 12 より、 W_{11}/W の値を 0.81 から 1.87 の間の値とすることで、ダイヤモンドウッドパイル構造より良い性能が得られることが分かる。また、 W_{11}/W の値を 0.92 から 1.59 の間の値とすることで、より良い性能を得ることが出来る。また、同様の 3 次元周期構造で、付加層内の直方体 202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212a の幅 W_{11} を変化させ、直方体の XY 断面の面積 $W_{11} \times W_{12}$ が変化したときの完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図 13 に示す。図 13 は横軸に直方体の XY 断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W_{11} \times W_{12}) / (W \times W)$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図 13 より、直方体の XY 断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W_{11} \times W_{12}) / (W \times W)$ が 1 よりも大きいとき、すなわち W_{12}/W の値が W/W_{11} の値よりも大きいときに、ダイヤモンドウッドパイル構造より広い完全フォトニックバンドギャップが得られることが分かる。また付加層内の直方体の幅 W_{12} を変えることによって、直方体の XY 平面内における面積を変化させたとき、および角柱の W を変えることによって、角柱の交差領域の面積を変化させたときについても同様の結果が得られる。

【0042】

以上のように、本実施例では、3 次元周期構造の付加層の直方体 202a、203a、205a、206a、208a、209a、211a、212a の XY 断面における幅 W_{11} 、 W_{12} および角柱 201a、204a、207a、210a の XY 断面における幅 W を適切に調整することで、従来提案されているウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを実現することができる。また、第 1 の媒質の屈折率と第 2 の媒質の屈折率との比を小さくしても、3 次元周期構造の

付加層の各部位の大きさを適切に調整することで、従来提案されているウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを実現することができる。なお各構造幅を制限する要因については、上記実施例1中で述べた理由と同様である。また、本実施例の3次元周期構造200は、付加層の数を増加させた為、前記実施例1の構造よりも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。また、実施例1と同様に角柱、直方体、直方体の方向、間隔、構成する媒質の屈折率はこれに制限されるものではない。また、角柱を含む層の間に設けた3つの付加層内の直方体の持つ回転対称の角度は90度に制限されるものではなく、さらに回転対称性を有しなくても良い。また全ての付加層の厚みを同じにしなくても良い。

【実施例3】

10

【0043】

図14(a)は本発明の3次元周期構造の実施例3の要部概略図である。3次元周期構造300は、 xy 平面を含む層301~316の16層を基本周期として構成されている。図14(b)は各層の xy 断面の一部を示す。第1の層301および第9の層309は、第1の媒質による y 軸方向に延びる複数の角柱301aおよび309aが等間隔 A で x 方向に配置されており、角柱301aおよび309aは x 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。

【0044】

また、第5の層305および第13の層313は、第1の媒質による x 軸方向に延びる複数の角柱305aおよび313aが等間隔 P で y 方向に配置されており、角柱305a 20
および313aは y 軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。第2の層302、第3の層303および第4の層304には、第1の層301中の角柱301aおよび第5の層305中の角柱305aの交点に相当する位置に、 xy 平面内において互いに接しないように離散的に配置された第1の媒質による直方体302a、303aおよび304aが配置されている。

【0045】

なお、直方体302aと304aは xy 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している。同様に、角柱を含む層の間にある第6の層306、第7の層307、第8の層308、第10の層310、第11の層311、第12の層312、第14の層314、第15の層315、第16の層316には、隣接する層中の角柱の交点に相当 30
する位置に、 xy 平面内において離散的に配置された第1の媒質による直方体306a、307a、308a、310a、311a、312a、314a、315a、316aが配置されている。各層中の角柱および直方体は互いに接しており、各層中の角柱および直方体以外の部分は第2の媒質で充填されている。第1、第2の媒質の屈折率、角柱および直方体の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数域(波長域)に非常に広い周波数帯域(波長帯域)で完全フォトニックバンドギャップを得ることができる。

【0046】

例えば、第1の媒質の屈折率を4、第2の媒質の屈折率を1として、角柱の間隔を P として、角柱を含む全ての層301、305、309、313の z 軸方向の厚さを $0.174 \times P$ 40
 $4 \times P$ 、直方体を含む全ての層302、303、304、306、307、308、310、311、312、314、315、316の z 方向の厚さを $0.06 \times P$ 、全ての角柱301a、305a、309a、313aを断面の z 方向の一辺の長さが $0.174 \times P$ 、 x あるいは y 方向の長さ W が $0.22 \times P$ の長方形の角柱、直方体302a、304a、306a、308a、310a、312a、314a、316aを xy 断面の隣接する角柱が伸びる方向と垂直な方向の辺の長さ $W11$ が $0.28 \times P$ 、 $W11$ と垂直な方向の辺の長さ $W12$ が $0.66 \times P$ の長方形で z 方向厚さ $0.06 \times P$ の直方体および直方体303a、307a、311a、315aの xy 断面の一辺の長さが $0.43 \times P$ の正方形で z 方向厚さ $0.06 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトニックバンド構造を解析した結果を図15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 50

比は0.307となり、実施例2と同様の理由でウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも完全フォトニックバンドギャップの帯域幅の広い構造が実現できる。また本実施例によれば、実施例1および実施例2よりもさらに完全フォトニックバンドギャップの帯域幅の広い構造が実現できる。

【0047】

以上述べたように、間隔を空けて平行に配置した角柱を含む層の間に、離散的に配置された直方体を含む層を設けることにより、従来の構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを得ることができる。

【0048】

さらに、同様の3次元周期構造で、直方体302a、304a、306a、308a、310a、312a、314a、316aのXY断面における幅W11および角柱のXY断面における幅Wを変化させることによって、直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W11/W$ が変化したときの、完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図16に示す。図16は横軸に直方体のXY断面における幅を角柱のXY断面における幅で割った値 $W11/W$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図16より、 $W11/W$ の値を0.45から2.15の間の値とすることで、ダイヤモンドウッドパイル構造より良い性能が得られることが分かる。また、 $W11/W$ の値を0.64から1.95の間の値とすることで、より良い性能を得ることが出来る。次に、同様の3次元周期構造で、付加層内の直方体302a、304a、306a、308a、310a、312a、314a、316aの長さW11を変化させることによって、直方体のXY平面内における面積 $W11 \times W12$ が変化したときの完全フォトニックバンドギャップ比の変化を図17に示す。図17は、横軸に直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W11 \times W12)/(W \times W)$ 、縦軸に完全フォトニックバンドギャップ比 γ/γ_0 を示している。同図にはダイヤモンドウッドパイル構造の完全フォトニックバンドギャップ比も示している。本実施例は、図17より、直方体のXY断面における面積を角柱の交差領域の面積で割った値 $(W11 \times W12)/(W \times W)$ が1よりも大きいとき、すなわち $W12/W$ の値が $W/W11$ の値よりも大きいときに、ダイヤモンドウッドパイル構造より広い完全フォトニックバンドギャップが得られることが分かる。なお比較に用いたダイヤモンドウッドパイル構造は、前記のダイヤモンドウッドパイル構造109を使用した。また付加層内の直方体の幅W12を変えることによって、直方体のXY平面内における面積を変化させたとき、および角柱の幅Wを変えることによって、角柱の交差領域の面積を変化させたときについても同様の結果が得られる。なお、直方体の幅W12は比較的自由に選択することができ、その要因については、実施例2で述べた理由と同様である。

【0049】

また、各構造幅を制限する要因については、実施例1で述べた理由と同様である。

【0050】

以上のように、本実施例では、直方体302a、304a、306a、308a、310a、312a、314a、316aのXY断面における幅W11、W12および角柱のXY断面における幅Wを適切に調整することで、従来提案されているウッドパイル構造およびダイヤモンドウッドパイル構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップを実現することができる。なお各構造幅を制限する要因については、前記実施例1中で述べた理由と同様である。また、本実施例の3次元周期構造300は、付加層の数を増加させる為に前記実施例1、2の構造よりもさらに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。なお、実施例1と同様に角柱、直方体、角柱の方向、間隔、構成する媒質の屈折率はこれに制限されるものではない。また、角柱を含む層の間に設けた3つの付加層中の直方体の持つ回転対称の角度は90度に制限されるものではなく、さらに回転対称性を有しなくても良い。また、角柱を含む層の間に設けた付加層中の3つの直方体は、xy平面内において、異なる面積であっても良い。例えば、z方向に順に面積が変化する3つの直

方体を含む層からなる付加層であっても良い。また、より広い完全フォトニックバンドギャップを得るためには直方体を含む層が4層以上であるとよいが、作成プロセスが煩雑化するので目的によって選択すればよい。

【実施例4】

【0051】

次に図18に本発明の3次元周期構造を用いた機能素子の実施例4を示す。図18(a)、(b)は本発明による周期構造中に線状に周期欠陥を配置した導波路400の断面図を示したものである。本実施例は、線状の周期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波長域中の一部の波長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、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。図18(a)は本発明による3次元周期構造中の角柱を所定の領域除去し、直線状の導波路を構成したものの断面図、図21(b)は本発明による3次元周期構造中の角柱および直方体を所定の領域を除去し曲げ導波路を構成したものの断面図を示す。

10

【0052】

線状周期欠陥は、角柱部のみでなく、導波波長域など所望の性能の導波路となるように、直方体部や両構造部を除去、あるいは位置をずらすなどして形成する。これにより、基礎となる周期構造部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。

【0053】

図19は本発明による3次元周期構造中に孤立した周期欠陥を配置した共振器410の断面図である。図22では、孤立した周期欠陥を設けることにより、3次元周期構造が持つフォトニックバンドギャップ内の波長域中の一部の波長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、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。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している。孤立した点状の周期欠陥は、選択波長など所望の性能の共振器となるように、角柱部、直方体部および両構造部を除去、あるいは位置をずらすなどして形成する。これにより、基礎となる3次元周期構造部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。

20

30

【0054】

また、本実施例では、図19に示した共振器内に活性媒質を充填し、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、非常に効率の高いレーザーやLEDなどの発光素子を実現している。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。例えば、前記共振器の共振波長を赤外光通信波長帯域(800nm-1800nm)に対応させることで光通信光源に用いることができ、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、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。なお、図18(a)、(b)に示した導波路や図19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、超小型高機能集積回路を実現することができる。なお、図18(a)、(b)、図19に示した実施例では、基礎構造として、図1で示した3次元周期構造を用いたが、図8に示したような構造や図14に示したような構造を用いても良い。

40

【0055】

以上述べたように、各実施例では、間隔を空けて平行に配置した角柱を含む層の間に、離散的に配置された直方体を含む層を設けることにより、従来の構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップが得られ、本発明の3次元周期構造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している。

50

【実施例 5】

【0056】

次に、本発明の3次元周期構造を作製する方法について図20を用いて述べる。図20においては、図1で示した3次元周期構造の作製方法を述べるが、同様の方法で図8に示したような構造や図14に示したような構造を作製することができる。

【0057】

図20(a)、(b)に示すように、基板501上に、第1の媒質によるy軸に平行でかつ間隔Pに配置された角柱511を含み、角柱511以外の領域512を第2の媒質により充填された2次元周期構造510を有する層を形成する。次に図20(c)、(d)に示すように、xy方向に間隔Pで配置された第1の媒質による直方体521を含み、直方体521以外の領域522を第2の媒質により充填された2次元周期構造520を有する層を形成する。次に図20(e)、(f)に示すように、第1の媒質によるx軸に平行でかつ間隔Pに配置された角柱531を含み、角柱531以外の領域532を第2の媒質により充填された2次元周期構造530を有する層を形成する。次に図20(g)、(h)に示すように、xy方向に間隔Pで配置された第1の媒質による直方体541を含み、直方体541以外の領域542を第2の媒質により充填された2次元周期構造540を有する層を形成する、次に図20(i)、(j)に示すように、第1の媒質によるy軸に平行でかつ間隔Pで角柱511とはx軸方向にP/2ずれた位置に配置された角柱551を含み、角柱551以外の領域552を第2の媒質により充填された2次元周期構造550を有する層を形成する。このように角柱を含む2次元周期構造を有する層と直方体を含む2次元周期構造を有する層を交互に形成することにより図20(k)に示すように3次元周期構造の基本周期を作製することができ、さらに本工程を繰り返すことにより、図1に示すような、完全フォトニックバンドギャップの広い3次元周期構造を作製することができる。

【0058】

2次元周期構造は、干渉露光法や、ナノインプリント法、fsレーザーなど超短パルス光による多光子吸収過程を用いた方法や、電子ビーム露光、近接場露光などリソグラフィ技術を用いた方法などで作製し、さらにウェハ融着法などで積層することで3次元周期構造を作製する。

【0059】

以上のように本発明の各実施例によれば、従来の構造よりも広い完全フォトニックバンドギャップが得られ、本発明の3次元周期構造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。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】

【0060】

【図1】(a)は実施例1の要部概略図、(b)は図1(a)の各層のxy断面図

【図2】実施例1のフォトニックバンド構造の説明図

【図3】従来のフォトニックバンド構造の説明図

【図4】実施例1の直方体の幅/角柱の幅に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図5】実施例1の直方体の面積/角柱交差領域の面積に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図6】実施例1の直方体の幅/角柱の幅に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図7】実施例1の直方体の面積/角柱交差領域の面積に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図8】(a)は本発明の実施例2の要部概略図、(b)は図8(a)の各層のxy断面図

【図9】実施例2のフォトニックバンド構造の説明図

10

20

30

40

50

【図10】実施例2の直方体の幅/角柱の幅に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図11】実施例2の直方体の面積/角柱交差領域の面積に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図12】実施例2の直方体の幅/角柱の幅に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図13】実施例2の直方体の面積/角柱交差領域の面積に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図14】(a)は実施例3の要部概略図、(b)は図14(a)の各層のx y断面図

【図15】実施例3のフォトニックバンド構造の説明図

【図16】実施例3の直方体の幅/角柱の幅に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図17】実施例3の直方体の面積/角柱交差領域の面積に対する完全フォトニックバンドギャップ比のグラフ

【図18】実施例4の要部概略図

【図19】実施例4の要部概略図

【図20】(a)~(k)3次元周期構造の製造方法の説明図

【図21】フォトニックバンドギャップを呈する3次元周期構造の概略図、(a)ダイヤモンド構造、(b)ウッドパイル構造、(c)らせん構造、(d)独自3次元構造、(e)インバース構造、(f)ダイヤモンドウッドパイル構造

【符号の説明】

【0061】

100、200、300 3次元周期構造

101~108 第1~第8の層

201~212 第1~第12層

301~316 第1~第16層

101a、103a、105a、107a、201a、204a、207a、210a、
、301a、305a、309a、313a 角柱

102a、104a、106a、108a、202a、203a、205a、206a

、208a、209a、211a、212a、302a、303a、304a、306a

、307a、308a、310a、311a、312a、314a、315a、316a

直方体

a ピッチ

400 導波路

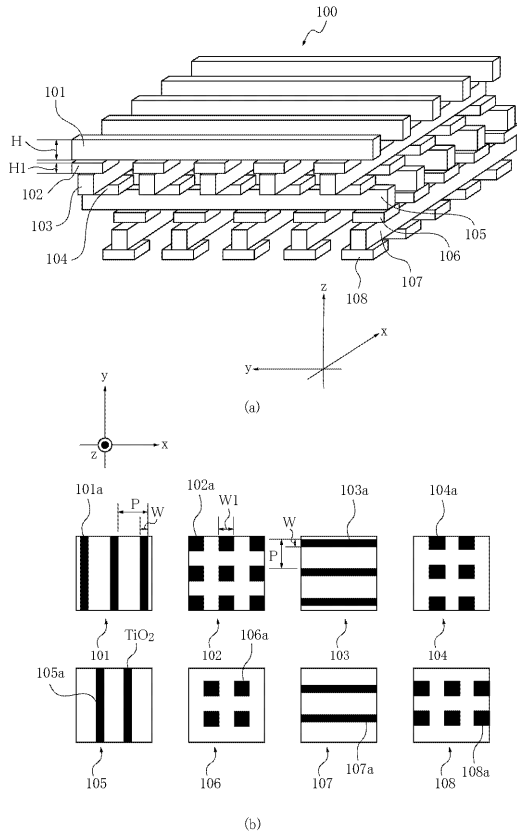
410 共振器

10

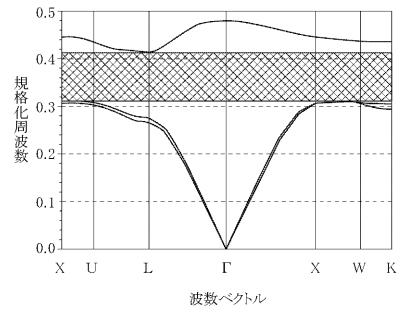
20

30

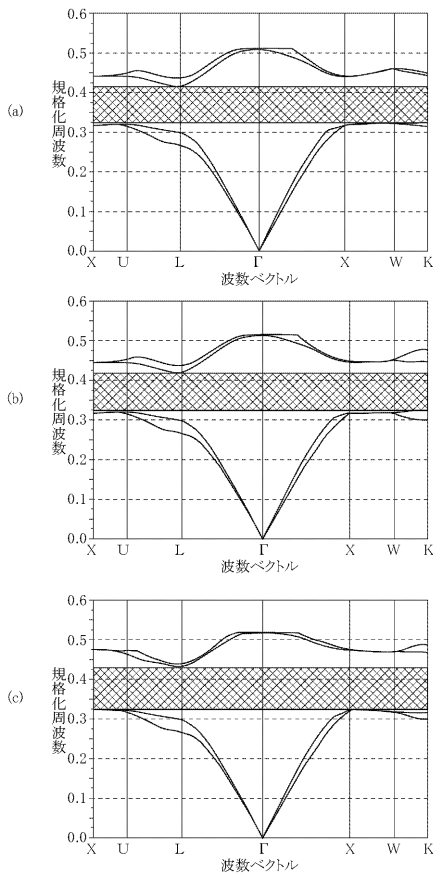
【図1】



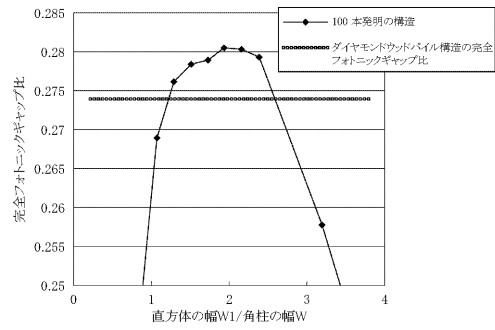
【図2】



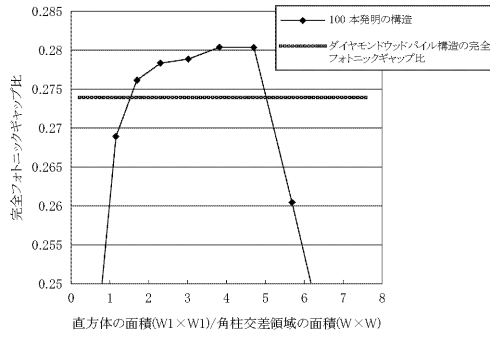
【図3】



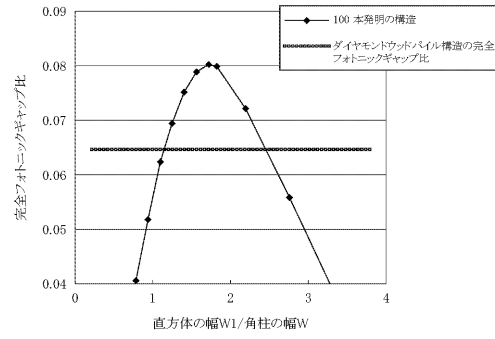
【図4】



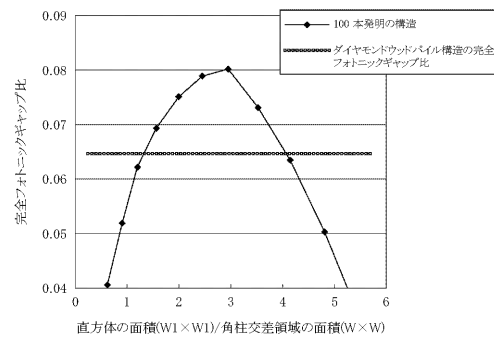
【 図 5 】



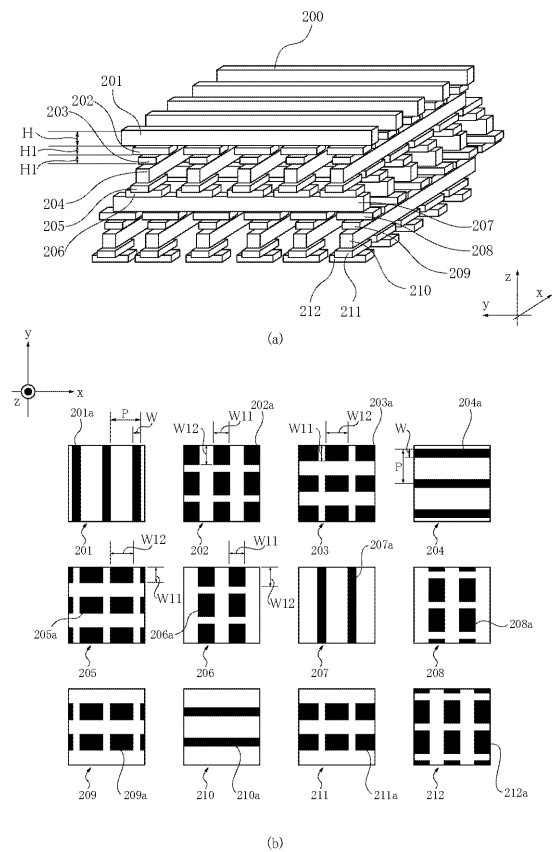
【 図 6 】



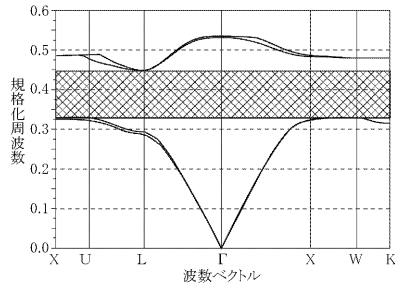
【 図 7 】



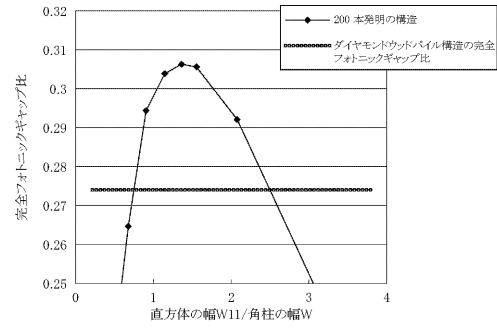
【 図 8 】



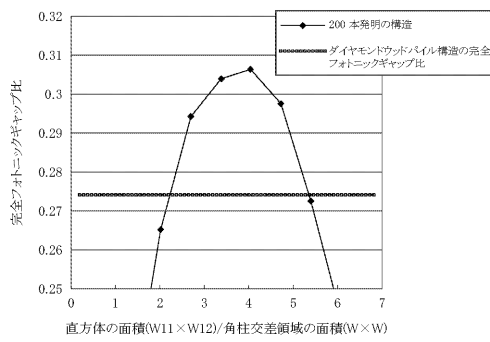
【 図 9 】



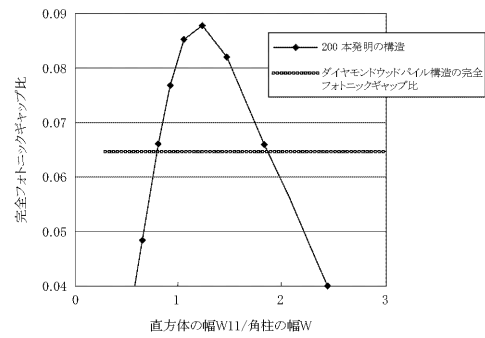
【 図 1 0 】



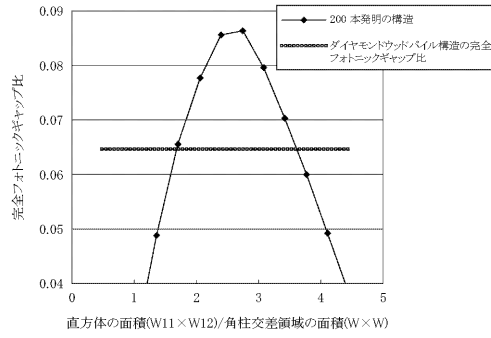
【 図 1 1 】



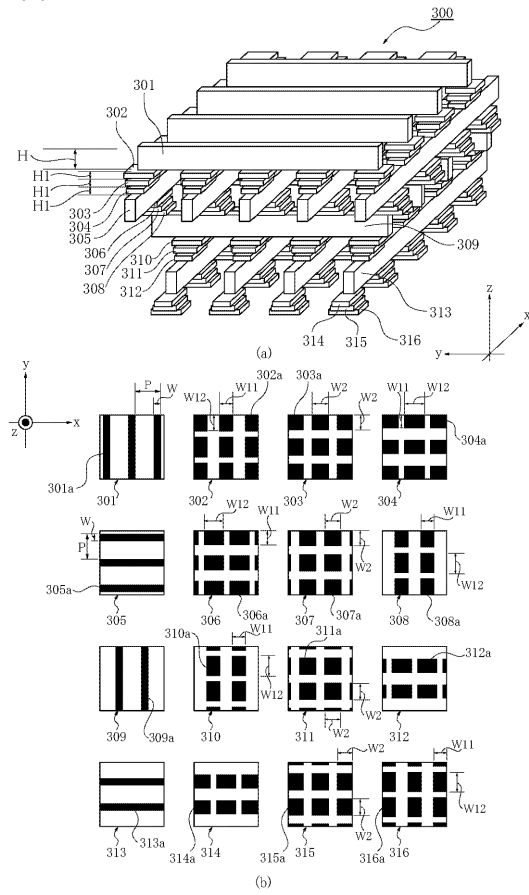
【 図 1 2 】



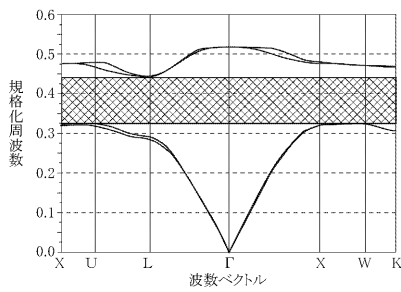
【 図 1 3 】



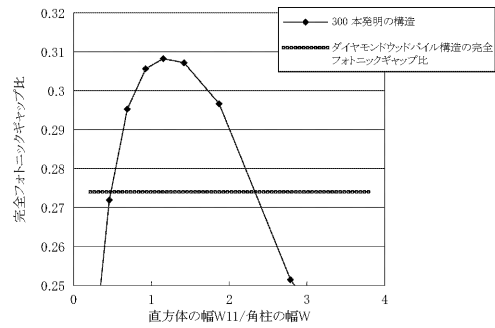
【 図 1 4 】



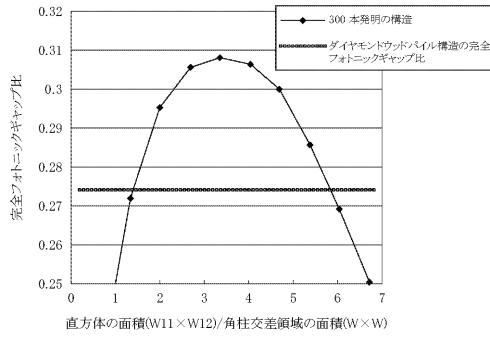
【 図 1 5 】



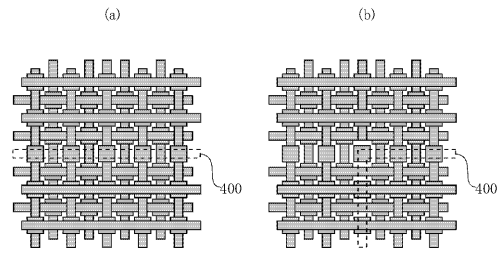
【 図 1 6 】



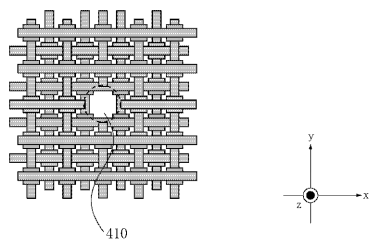
【 図 1 7 】



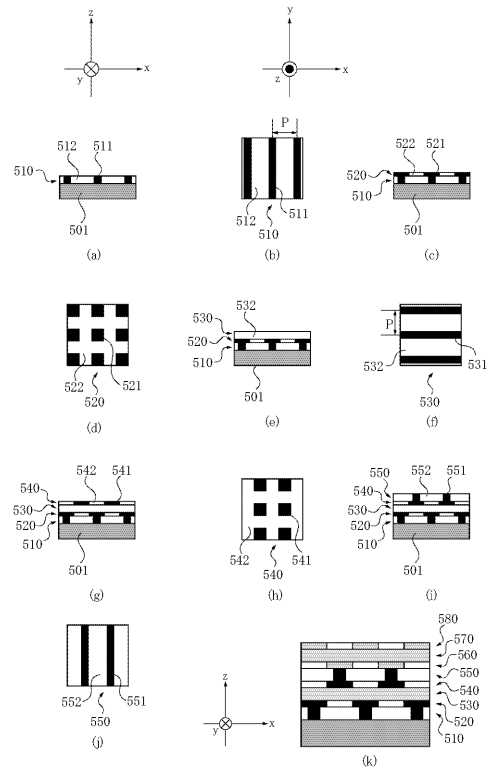
【 図 1 8 】



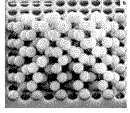
【 図 1 9 】



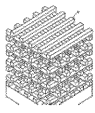
【 図 2 0 】



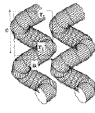
【図 2 1】



(a) ダイヤモンド構造



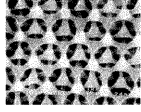
(b) ウッドパイル構造



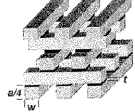
(c) らせん構造



(d) 独自3次元構造



(e) インバース構造



(f) ダイヤモンドウッドパイル構造

フロントページの続き

(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

Fターム(参考) 2H047 KA03 PA22 PA24

5F173 AB90