

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5578829号
(P5578829)

(45) 発行日 平成26年8月27日 (2014. 8. 27)

(24) 登録日 平成26年7月18日 (2014. 7. 18)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 B 1/02 (2006. 01)

G O 2 B 1/02

G O 2 B 3/00 (2006. 01)

G O 2 B 3/00

Z

G O 2 B 6/12 (2006. 01)

G O 2 B 6/12

N

G O 2 B 6/12

Z

請求項の数 6 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2009-237659 (P2009-237659)
 (22) 出願日 平成21年10月14日 (2009. 10. 14)
 (65) 公開番号 特開2011-85708 (P2011-85708A)
 (43) 公開日 平成23年4月28日 (2011. 4. 28)
 審査請求日 平成24年8月31日 (2012. 8. 31)

(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 100110412
 弁理士 藤元 亮輔
 (74) 代理人 100104628
 弁理士 水本 敦也
 (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
 審査官 大森 伸一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元フォトニック結晶の作製方法および機能素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1の媒質により形成された第1の構造部と該第1の媒質とは屈折率が異なる第2の媒質により形成された第2の構造部とが互いに異なる配置パターンで周期的又は離散的に配置された複数の層が積層された3次元フォトニック結晶の作製方法であって、

前記第1の媒質からなる第1の膜を形成する第1の工程と、

前記第1の膜の一部を除去することにより第1の層の前記第1の構造部を形成する第2の工程と、

前記第2の工程において除去された前記第1の膜の一部が存在した領域に、前記第2の媒質からなる前記第1の層の前記第2の構造部を形成し、前記第1の層に積層方向にて隣接する領域に前記第2の媒質からなる第2の膜を形成する第3の工程と、

前記第2の膜を平坦化する第4の工程と、

前記第2の膜の一部を除去することにより、第2の層の前記第2の構造部を形成する第5の工程と、

前記第5の工程において除去された前記第2の膜の一部が存在した領域に、前記第1の媒質からなる前記第2の層の前記第1の構造部を形成する第6の工程とを含み、

前記第4の工程において平坦化された前記第2の膜の厚みは、前記第2の層の厚みと等しいことを特徴とする3次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項 2】

前記第2の層に前記積層方向にて隣接する領域に前記第1の媒質からなる第3の膜を形

10

20

成する第 7 の工程と、

前記第 3 の膜を、その積層方向の端面が前記第 2 の層の前記第 2 の構造部の端面に揃うように平坦化する第 8 の工程とを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の 3 次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項 3】

前記第 1 の工程から前記第 8 の工程までを繰り返して行うことを特徴とする請求項 2 に記載の 3 次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項 4】

前記第 2 の層に前記積層方向にて隣接する領域に前記第 1 の媒質からなる第 3 の膜を形成する第 7 の工程と、

前記第 3 の膜を平坦化する第 8 の工程とを含み、

前記第 8 の工程において平坦化された前記第 3 の膜の厚みは、前記第 1 の層の厚みと等しい、ことを特徴とする請求項 1 に記載の 3 次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項 5】

前記第 1 の工程から前記第 8 の工程までを行った後に、前記第 2 の工程から前記第 8 の工程を繰り返して行うことを特徴とする請求項 4 に記載の 3 次元フォトニック結晶の作製方法。

【請求項 6】

前記第 6 の工程と前記第 7 の工程とは同一の工程で行われることを特徴とする請求項 2 から 5 のいずれか 1 項に記載の 3 次元フォトニック結晶の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、3 次元的な屈折率周期構造を有する 3 次元フォトニック結晶の作製方法及び 3 次元フォトニック結晶を利用した光導波路、光共振器、光学フィルタ、偏光素子等の機能素子に関する。

【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。

【0003】

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（作用）と言われている。

【0004】

また、上記のような構造を 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が得られる。これは、完全フォトニックバンドギャップ（作用）とも称される。

【0005】

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、従来にはない新しい機能素子の実現が可能となる。このため、より広い波長域で完全フォトニ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。

【0006】

このような完全フォトニックバンドギャップ作用を有する構造が、従来幾つか提案されている（特許文献 1, 2, 3）。

【0007】

一般に、完全フォトニックバンドギャップが得られる 3 次元微細周期構造の作製は容易ではない。このため、3 次元微細周期構造を光波領域（真空中での光の波長が数 μm 以下

10

20

30

40

50

の領域)で動作させることは非常に少ない。

【0008】

そのような中、屈折率分布が層内にて周期性を持つ屈折率周期構造を含む層を複数積層することにより作製できる、いわゆるLayer-by-Layer構造(以下、LBL構造)が提案されている。LBL構造の代表的なものとしては、特許文献1にて提案されたウッドパイル構造である。ウッドパイル構造とは、図8に示すように、複数の柱状構造体を等間隔Pにて平行に配置した複数の層を積層することにより構成された構造である。該複数の層において、柱状構造体が延びる方向が交互に90度異なっている。

【0009】

このようなウッドパイル構造の作製方法は、これまでに種々提案されている(特許文献4, 5)。例えば、特許文献4では、ウッドパイル構造を、周期構造の形成、堆積および研磨を繰り返すことにより作製する方法を提案している。さらに、非特許文献2には、周期構造の形成と接合とを繰り返す手法によってウッドパイル構造を作製する方法を提案している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】米国特許5,335,240号

【特許文献2】米国特許6,597,851号

【特許文献3】米国特許6,929,764号

【特許文献4】米国特許5,998,298号

【非特許文献】

【0011】

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

【非特許文献2】Applied Physics Letters、Vol.65、No.13、pp1617、1994年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

非特許文献2にて提案された作製方法は、一度の周期構造の形成工程により2層の周期構造を形成する。しかしながら、周期構造を周囲の枠部によって支えるフリースタANDING構造を作製する必要があり、数100nm程度の厚みを有する微細な構造を作製するのは困難である。

【0013】

また、特許文献4にて提案された作製手法は、接合工程を含まないため、より高精度なLBL構造の作製が可能である。しかしながら、一度の周期構造の形成工程により作製可能な層数が1層のみであるため、工程数が多くなるという問題がある。しかも、各工程において発生する作製誤差が積算されてLBL構造の特性に影響を及ぼす。さらに、平坦化処理を行う工程では、平坦化処理の選択比の異なる材料が面内に存在するために、皿状の凹部としてのディッシングが発生し、該ディッシングによる作製誤差が発生する。ディッシングは上層に対して作製誤差を与えるため、所望の特性を有するLBL構造の作製にはディッシングの発生を抑制することが不可欠となる。

【0014】

本発明は、少ない工程数で作製でき、作製誤差も小さい3次元フォトニック結晶および機能素子を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明の一側面は、第1の媒質により形成された第1の構造部と該第1の媒質とは屈折率が異なる第2の媒質により形成された第2の構造部とが互いに異なる配置パターンで周期的又は離散的に配置された複数の層が積層された3次元フォトニック結晶の作製方法であって、前記第1の媒質からなる第1の膜を形成する第1の工程と、前記第1の膜の一部

10

20

30

40

50

を除去することにより第 1 の層の前記第 1 の構造部を形成する第 2 の工程と、前記第 2 の工程において除去された前記第 1 の膜の一部が存在した領域に、前記第 2 の媒質からなる前記第 1 の層の前記第 2 の構造部を形成し、前記第 1 の層に積層方向にて隣接する領域に前記第 2 の媒質からなる第 2 の膜を形成する第 3 の工程と、前記第 2 の膜を平坦化する第 4 の工程と、前記第 2 の膜の一部を除去することにより、第 2 の層の前記第 2 の構造部を形成する第 5 の工程と、前記第 5 の工程において除去された前記第 2 の膜の一部が存在した領域に、前記第 1 の媒質からなる前記第 2 の層の前記第 1 の構造部を形成する第 6 の工程とを含み、前記第 4 の工程において平坦化された前記第 2 の膜の厚みは、前記第 2 の層の厚みと等しいことを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

10

なお、上記方法で作製された 3 次元フォトニック結晶と、該 3 次元フォトニック結晶内に設けられた欠陥部とを有し、該欠陥部が共振器又は導波路として機能する機能素子も本発明の他の一側面を構成する。

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明によれば、少ない工程数で作製でき、作製誤差も小さい 3 次元フォトニック結晶および機能素子を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

【図 1】本発明の実施例 1 である 3 次元フォトニック結晶の作製方法の説明図。

20

【図 2】実施例 1 の作製方法で作製された 3 次元フォトニック結晶の概略図。

【図 3】本発明の実施例 2 である 3 次元フォトニック結晶の作製方法の説明図。

【図 4】実施例 2 の作製方法で作製された 3 次元フォトニック結晶の概略図。

【図 5】実施例 1 の作製方法で作製された 3 次元フォトニック結晶と比べて広い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の概略図。

【図 6】本発明の実施例 3 である、線状欠陥部を含む 3 次元フォトニック結晶の概略図。

【図 7】本発明の実施例 4 である、点状欠陥部を含む 3 次元フォトニック結晶の概略図。

【図 8】ウッドパイル構造の概略図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 9 】

30

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】

【 0 0 2 0 】

図 2 の (a) ~ (c) には、本発明の実施例 1 である、L B L 構造を有する 3 次元フォトニック結晶 2 0 0 を示している。

【 0 0 2 1 】

3 次元フォトニック結晶 2 0 0 は、それぞれ第 1 の媒質により形成された第 1 の柱状構造部 (第 1 の構造部) と該第 1 の媒質とは屈折率が異なる第 2 の媒質により形成された第 2 の柱状構造部 (第 2 の構造部) が周期的に配置された層が積層されて構成されている。本実施例の 3 次元フォトニック結晶 2 0 0 は、第 1 の層 2 0 1 ~ 第 4 の層 2 0 4 の 4 層を基本周期として構成されている。なお、第 1 および第 2 の媒質は空気であってもよく、該空気によって形成される柱状構造部は空間となる。

40

【 0 0 2 2 】

図 2 の (a) は各層の x z 断面図の一部を示している。(b) は各層の y z 断面図の一部を示している。(c) は、各層の x y 断面図の一部を示している。

【 0 0 2 3 】

第 1 の層 2 0 1 および第 2 の層 2 0 3 では、y 方向に延びる第 1 および第 2 の柱状構造部がそれぞれ、x 方向に等間隔 (ピッチ) P にて並んでいる。第 1 の層 2 0 1 に含まれる各柱状構造部と第 3 の層 2 0 3 に含まれる各柱状構造部とは、互いに x 方向に P / 2 ずれた位置に配置されている。第 2 の層 2 0 2 および第 4 の層 2 0 4 では、x 方向に延びる第

50

1 および第2の柱状構造部がそれぞれy方向に等間隔(ピッチ)Pにて並んでいる。第2の層202に含まれる各柱状構造部と第4の層204に含まれる各柱状構造部とは、互いにy方向にP/2ずれた位置に配置されている。

【0024】

第1の層201は厚みH1を有し、第2の層202は厚みH2を有する。第3の層203は厚みH3を有し、第4の層204は厚みH4を有する。このように、本実施例の3次元フォトニック結晶200は、図8にも示したウッドパイル構造を有する。

【0025】

図1の(a)~(g)には、3次元フォトニック結晶200の作製方法を示している。

【0026】

まず、図1の(a)に示すように、基板101上に、第1の媒質によって、第1の膜102を、図2に示した第1の層201の厚みH1と等しい厚みになるよう形成する(第1の工程)。

【0027】

次に、(b)に示すように、第1の膜102の厚み内に、第1の層の第1の柱状構造部103を形成する(第2の工程)。

【0028】

次に、(c)に示すように、第1の層内において第1の柱状構造部103に隣接する領域および第1の層に積層方向(z方向:以下、z方向を上側とする)にて隣接する領域に、第2の媒質によって第2の膜104を形成する(第3の工程)。このとき、第2の膜104は、図2に示した第1の層201の厚みH1と第2の層202の厚みH2との和(H1+H2)よりも厚い厚みT1を有するように形成される。

【0029】

このようにして、第1の層内における第1の柱状構造部103に隣接する領域に第2の媒質を充填し、第1の層の第2の柱状構造部105を形成する。

【0030】

第3の工程の時点における第2の膜104の厚みT1を、H1+H2よりも厚くすることで、第2の層を構成する第2の媒質を、第1の層への第2の媒質の充填とともに配置することができる。ここで、第1の柱状構造部103の上面と基板101の上面との段差によって、第2の膜104の上面には窪み110が形成される。

【0031】

次に、(d)に示すように、第2の膜104に対して、その厚みが第1の層の厚みH1と第2の層の厚みH2との和(H1+H2)と等しい厚みになるように平坦化処理を行う(第4の工程)。このような平坦化処理を行うことで、窪み110を除去することができる。また、平坦化処理を行う第2の膜104の上面は第2の媒質のみによって形成される面であるため、異なる媒質間での平坦化処理選択比の差に起因するディッシングの発生を回避することができる。以上により、屈折率周期構造層である第1の層の作製が完了する。

【0032】

次に、(e)に示すように、第2の膜104のうち第1の層に上側にて隣接する領域に形成された部分の厚み内に、第2の層の第2の柱状構造部106を形成する(第5の工程)。

【0033】

次に、(f)に示すように、第2の層内において第2の柱状構造部106に隣接する領域および第2の層に上側にて隣接する領域に、第1の媒質によって第3の膜107を形成する(第6の工程)。このとき、第3の膜107を、第2の層の厚みH2よりも厚い厚みT2を有するように形成する。このようにして、第2の層内における第2の柱状構造部106に隣接する領域に第1の媒質を充填し、第2の層の第1の柱状構造部109を形成する。

【0034】

さらに、(g)に示すように、第3の膜107に対して、その上端面が第2の層の第2の柱状構造部106の上端面に揃うように(第3の膜107の厚みがH2と等しくなるように)平坦化処理を行う(第7の工程)。これにより、第2の柱状構造部106と高さが揃った第1の柱状構造部109を含む屈折率周期構造層としての第2の層の作製が完了する。

【0035】

以上の第1から第7の工程により、図2に示した3次元フォトニック結晶200における第1の層201と第2の層202を作製することができる。

【0036】

そして、図2に示した第3の層203および第4の層204も図1(a)~(e)の工程により別途作製し、第1および第2の層201, 202のうち第2の層202の上面に第3の層203を接合してもよい。

10

【0037】

ただし、接合工程において、層間のアライメント誤差が発生する可能性がある。このため、図1(a)~(g)の工程、すなわち第1の工程から第7の工程を繰り返すことで、第2の層202の上に第3の層203および第4の層204を作製してもよい。さらに、第1の工程から第7の工程を繰り返すことで、第1の層201から第4の層204の基本周期が繰り返される3次元フォトニック結晶200を作製してもよい。

【0038】

本実施例にて説明した作製方法では、一度の成膜工程において2層分の厚みを有する膜を形成することにより、L B L構造を1周期作製するために必要な工程数を削減することができる。さらに、フリースタンディング構造の接合工程が必要ないため、数10~数100nmのサイズを有する柱状構造部の形成、層間の高精度アライメントおよび層間の機械的強度(接合強度)を高めることが可能となる。

20

【0039】

一般に、1周期のL B L構造では十分な光の反射率を得ることができないため、数周期~数十周期程度積層して用いられる。L B L構造を1周期作製するために必要な工程数を減らすことにより、L B L構造の作製に必要な工程数を大幅に削減することができる。以上から、本実施例の作製方法を用いて作製されたL B L構造は、微細な構造の作製が可能であり、かつ各工程における作製誤差の積算量が少ないために、光波領域においても良好な特性を得ることができる。

30

【0040】

このような3次元フォトニック結晶を構成する材料として、大きな屈折率差を有する2種類以上の材料を選ぶことが望ましい。高屈折率材料として、例えば、GaAs、InP、GaNなどの化合物半導体、TiO₂、ZnO等の金属酸化物、有機半導体等を用いることができる。低屈折率材料として、例えば、SiO₂等の誘電体、PMMA等の高分子有機材料を用いることができる。より大きな屈折率差を得るために、第1の媒質または第2の媒質を3次元フォトニック結晶の作製後に除去してもよい。除去する媒質としては、例えばAu、Cu等の金属やポリマーを用いることができる。

【0041】

成膜方法としては、蒸着法、スパッタ法、化学気相成長(Chemical Vapor Deposition: CVD)法に代表される結晶成長、エピタキシャル結晶成長などの結晶成長、ナノ粒子充填法手段、スピコート法等を用いることができる。また、FCVA(Filtered Cathodic Vacuum Arc)を用いることもできる。

40

【0042】

柱状形状を形成する方法としては、マスク形成と電子ビームやフォトリソグラフィによる露光とエッチングを組み合わせた半導体リソグラフィ手法や、ナノインプリントによる刻印手法等を用いることができる。

【0043】

平坦化処理として、例えばCMP法、ガスクラスタイオンビーム照射、エッチングな

50

どを用いることができる。

【実施例 2】

【0044】

図3の(a)~(g)には、図2に示した3次元フォトニック結晶200の実施例1とは別の作製方法を示している。

【0045】

まず、図3の(a)に示すように、基板301上に、第1の媒質によって、第1の膜302を、図2に示した第1の層201の厚みH1と等しい厚みになるよう形成する(第1の工程)。

【0046】

次に、(b)に示すように、第1の膜302の厚み内に、第1の層の第1の柱状構造部303を形成する(第2の工程)。

【0047】

次に、(c)に示すように、第1の層内において第1の柱状構造部303に隣接する領域および第1の層に上側にて隣接する領域に、第2の媒質によって第2の膜304を形成する(第3の工程)。このとき、第2の膜304は、図2に示した第1の層201の厚みH1と第2の層202の厚みH2との和($H1 + H2$)よりも厚い厚みT1を有するように形成される。

【0048】

このようにして、第1の層内における第1の柱状構造部303に隣接する領域に第2の媒質を充填し、第1の層の第2の柱状構造部305を形成する。

【0049】

第3の工程の時点における第2の膜304の厚みT1を、 $H1 + H2$ よりも厚くすることで、第2の層を構成することになる第2の媒質を、第1の層への第2の媒質の充填とともに配置することができる。ここで、第1の柱状構造部303の上面と基板301の上面との段差によって、第2の膜304の上面には窪み310が形成される。

【0050】

次に、(d)に示すように、第2の膜304に対して、その厚みが第1の層の厚みH1と第2の層の厚みH2との和($H1 + H2$)と等しい厚みになるように平坦化処理を行う(第4の工程)。このような平坦化処理を行うことで、窪み310を除去することができる。また、平坦化処理を行う第2の膜304の上面は第2の媒質のみによって形成される面であるため、異なる媒質間での平坦化処理選択比の差に起因するディッシングの発生を回避することができる。以上により、屈折率周期構造層である第1の層の作製が完了する。

【0051】

次に、(e)に示すように、第2の膜304のうち第1の層にその上側にて隣接する領域に形成された部分の厚み内に、第2の層の第2の柱状構造部306を形成する(第5の工程)。

【0052】

次に、(f)に示すように、第2の層内において第2の柱状構造部306に隣接する領域および第2の層に上側にて隣接する領域に、第1の媒質によって第3の膜307を形成する(第6の工程)。このとき、第3の膜307は、図2に示した第2の層202の厚みH2と第3の層203の厚みH3との和($H2 + H3$)よりも厚い厚みT3を有するように形成される。

【0053】

このようにして、第2の層内における第2の柱状構造部306に隣接する領域に第1の媒質を充填し、第2の層の第2の柱状構造部308を形成する。

【0054】

第6の工程の時点における第3の膜307の厚みT2を、 $H2 + H3$ よりも厚くすることで、第3の層を構成することになる第1の媒質を、第2の層への第1の媒質の充填と

10

20

30

40

50

もに配置することができる。ここで、第2の柱状構造部306の上面と第1の層の上面との段差によって、第3の膜307の上面には窪み320が形成される。

【0055】

さらに、(g)に示すように、第3の膜307に対して、その厚みが図2に示した第2の層202の厚みH2と第3の層203の厚みH3との和($H2 + H3$)と等しい厚みになるように平坦化処理を行う(第7の工程)。これにより、窪み310を除去することができる。また、平坦化処理を行う第3の膜307の上面は第1の媒質のみによって形成される面であるため、異なる媒質間での平坦化処理選択比の差に起因するディッシングの発生を回避することができる。以上により、第3の層に第1の柱状構造部を作製するための第3の膜307の作製が完了する。この時点での第3の膜307は、図3(a)に示した基板301上に形成された第1の膜302に相当する。

10

【0056】

以上の第1から第7の工程により、図2に示した3次元フォトニック結晶200における第1の層201と第2の層202が作製され、さらに第3の層203に第1の媒質の膜(第3の膜307)が形成される。

【0057】

この後、図3(b)~(g)に示した第2の工程から第7の工程を繰り返すことで第3の層203および第4の層204を作製し、さらに第1の層201から第4の層204の基本周期が繰り返される3次元フォトニック結晶200を作製することができる。

【0058】

20

本実施例の作製方法では、一度の成膜工程において2層分の厚みを有する膜を形成することにより、LBL構造を1周期作製するために必要な工程数を削減することができる。しかも、第1の層201と第2の層202間のみではなく第2の層202と第3の層203間の接合強度を実施例1よりもさらに高めることができる。さらに、フリースタンディング構造の接合工程が必要ないため、数10~数100nmのサイズを有する柱状構造部の形成と層間の高精度アライメントが可能となる。その他、実施例1と同様の効果がある。

【実施例3】

【0059】

図5の(a)~(c)には、本発明の実施例3である3次元フォトニック結晶500を示している。この3次元フォトニック結晶500は、ウッドパイル構造を有する3次元フォトニック結晶に比べて広いフォトニックバンドギャップを有する。

30

【0060】

3次元フォトニック結晶500は、それぞれ第1の媒質により形成された第1の柱状構造部(第1の構造部)と該第1の媒質とは屈折率が異なる第2の媒質により形成された第2の柱状構造部(第2の構造部)が周期的に配置された層が積層されて構成されている。本実施例の3次元フォトニック結晶500は、第1層501~第12の層512の12層を基本周期として構成されている。なお、第1および第2の媒質は空気であってもよく、該空気によって形成される柱状構造部(および後述する離散構造部)は空間となる。

【0061】

40

図5の(a)は各層のxz断面図の一部を示している。(b)は各層のyz断面図の一部を示している。(c)は、各層のxy断面図の一部を示している。

【0062】

第1の層501および第7の層507では、y方向に延びる第1および第2の柱状構造部がそれぞれ、x方向に等間隔(ピッチ)Pにて並んでいる。第1の層501に含まれる各柱状構造部と第7の層507に含まれる各柱状構造部とは、互いにx方向にP/2ずれた位置に配置されている。第4の層504および第10の層510では、x方向に延びる第1および第2の柱状構造部がそれぞれ、y方向に等間隔(ピッチ)Pにて並んでいる。第4の層504に含まれる各柱状構造部と第10の層510に含まれる各柱状構造部とは互いにy方向にP/2ずれた位置に配置されている。

50

【 0 0 6 3 】

第2の層502および第3の層503は、第1の層501の第2の柱状構造部と第4の層504の第2の柱状構造部を積層方向から見たときのそれらの交点に相当する位置に、 xy 断面内にて互いに接しないように離散的に配置された離散構造部を含む。なお、第2の層502の離散構造部と第3の層503の離散構造部は、 xy 断面における90度の回転により相互に重なる対称性を有する。

【 0 0 6 4 】

同様に、第5および第6の層505, 506もそれぞれ、それらの層に積層方向にて隣接する2層の第2の柱状構造部の交点に相当する位置に xy 断面にて離散的に配置された離散構造部を含む。さらに同様に、第9の層508, 509および第11, 第12の層511, 512もそれぞれ、それらの層に積層方向にて隣接する2層の第2の柱状構造部の交点に相当する位置に xy 断面にて離散的に配置された離散構造部を含む。各離散構造部は、第2の媒質により形成されており、該離散構造部を含む層に隣接する層の第2の柱状構造部に接している。

【 0 0 6 5 】

また、本実施例において、第1の層501～第12の層512はそれぞれ、厚み $H1 \sim H12$ を有している。

【 0 0 6 6 】

図4の(a)～(g)には、3次元フォトニック結晶500の作製方法を示している。

【 0 0 6 7 】

まず、図4の(a)に示すように、基板401上に、第1の媒質によって、第1の膜402を、図5に示した第1の層501の厚み $H1$ と等しい厚みになるよう形成する(第1の工程)。

【 0 0 6 8 】

次に、(b)に示すように、第1の膜402の厚み内に、第1の層の第1の柱状構造部403を形成する(第2の工程)。

【 0 0 6 9 】

次に、(c)に示すように、第1の層内において第1の柱状構造部403に隣接する領域および第1の層に上側にて隣接する領域に、第2の媒質によって第2の膜404を形成する(第3の工程)。このとき、第2の膜404は、図5に示した第1の層501の厚み $H1$ と第2の層502の厚み $H2$ との和($H1 + H2$)よりも厚い厚み $T1$ を有するよう形成される。

【 0 0 7 0 】

このようにして、第1の層内における第1の柱状構造部403に隣接する領域に第2の媒質を充填し、第1の層の第2の柱状構造部405を形成する。

【 0 0 7 1 】

第3の工程の時点における第2の膜404の厚み $T1$ を、 $H1 + H2$ よりも厚くすることで、第2の層を構成することになる第2の媒質を、第1の層への第2の媒質の充填とともに配置することができる。ここで、第1の柱状構造部403の上面と基板401の上面との段差によって、第2の膜404の上面には窪み410が形成される。

【 0 0 7 2 】

次に、(d)に示すように、第2の膜404に対して、その厚みが第1の層の厚み $H1$ と第2の層の厚み $H2$ との和($H1 + H2$)と等しい厚みになるように平坦化処理を行う(第4の工程)。このような平坦化処理を行うことで、窪み410を除去することができる。また、平坦化処理を行う第2の膜404の上面は第2の媒質のみによって形成される面であるため、異なる媒質間での平坦化処理選択比の差に起因するディッシングの発生を回避することができる。以上により、屈折率周期構造層である第1の層の作製が完了する。

【 0 0 7 3 】

次に、(e)に示すように、第2の膜404の厚み内に、第2の層の離散構造部406

10

20

30

40

50

を形成する（第５の工程）。

【００７４】

次に、（ｆ）に示すように、第２の層内において離散構造部４０６に隣接する領域および第２の層に上側にて隣接する領域に、第１の媒質によって第３の膜４０７を形成する（第６の工程）。このとき、第３の膜４０７は、図５に示した第２の層５０２の厚み H_2 と第３の層５０３の厚み H_3 との和（ $H_2 + H_3$ ）よりも厚い厚み T_2 を有するように形成される。このようにして、第２の層内における離散構造部４０６に隣接する領域４０８に第１の媒質を充填する。

【００７５】

第６の工程の時点における第３の膜４０７の厚み T_2 を、 $H_2 + H_3$ よりも厚くすることで、第３の層を構成することになる第１の媒質を、第２の層への第１の媒質の充填とともに配置することができる。ここで、離散構造部４０６の上面と第１の層の上面との段差によって、第３の膜４０７の上面には窪み４２０が形成される。

【００７６】

さらに、（ｇ）に示すように、第３の膜４０７に対して、その厚みが図５に示した第２の層５０２の厚み H_2 と第３の層５０３の厚み H_3 との和（ $H_2 + H_3$ ）と等しい厚みになるように平坦化処理を行う（第７の工程）。これにより、窪み４２０を除去することができる。また、平坦化処理を行う第３の膜４０７の上面は第１の媒質のみによって形成される面であるため、異なる媒質間での平坦化処理選択比の差に起因するディッシングの発生を回避することができる。以上により、第３の層に離散構造部を作製するための第３の膜４０７の作製が完了する。この時点での第３の膜４０７は、図４（ａ）に示した基板４０１上に形成された第１の膜４０２に相当する。

【００７７】

以上の第１から第７の工程により、図５に示した３次元フォトニック結晶５００における第１の層５０１と第２の層５０２が作製され、さらに第３の層５０３に第１の媒質の膜（第３の膜４０７）が形成される。

【００７８】

この後、図５に示した各層の構造と厚みを考慮しながら、図４（ｂ）～（ｇ）に示した第２の工程から第７の工程を繰り返すことで、第３の層５０３～第１２の層５１２を作製できる。さらに、第２の工程から第７の工程を繰り返すことで、第１の層５０１から第１２の層５１２の基本周期が繰り返される３次元フォトニック結晶５００を作製することができる。

【００７９】

本実施例の作製方法では、一度の成膜工程において２層分の厚みを有する膜を形成することにより、ＬＢＬ構造を１周期作製するために必要な工程数を削減することができる。しかも、第１の層５０１と第２の層５０２間のみではなく第２の層５０２と第３の層５０３間の接合強度を実施例１よりもさらに高めることができる。さらに、フリースタンディング構造の接合工程が必要ないため、数１０～数１００ｎｍのサイズを有する柱状構造体の形成と層間の高精度アライメントが可能となる。その他、実施例１と同様の効果がある。

【００８０】

本実施例にて説明した３次元フォトニック結晶は、実施例１，２にて説明した３次元フォトニック結晶とは異なる屈折率周期構造を含む層が積層されて構成されている。このように、本発明の３次元フォトニック結晶の作製方法は、各層の屈折率周期構造のパターンに依存しない。

【００８１】

また、本実施例では、柱状構造部の交点に相当する位置に離散構造部を有する層が柱状構造部を有する層の両側に２層ずつ設けられた場合について説明したが、本発明はこれに限定されない。例えば、柱状構造部を有する層の両側に１層又は３層ずつ離散構造部を含む層を設けたり、柱状構造部を有する層の片側にのみ離散構造部を含む層を設けたりして

10

20

30

40

50

もよい。

【実施例 4】

【0082】

次に、実施例 1 ~ 3 の作製方法によって作製された 3 次元フォトニック結晶を用いた機能素子の例について説明する。

【0083】

図 6 の (a) には、3 次元フォトニック結晶の内部に、線状の周期欠陥部 601 を設けて導波路として機能する機能素子 600 の xz 断面を示している。図 6 の (b) は、(a) における A - A 線での断面を示している。

【0084】

3 次元フォトニック結晶中に、線状の周期欠陥部を設けることにより、フォトニックバンドギャップ内の一部の波長帯域に対して、線状の周期欠陥部 601 にのみ電磁波が存在できる状態にすることができる。導波路 600 は、低損失で、急峻な曲げ角度を実現できる導波路である。

【0085】

周期欠陥部 601 は、3 次元フォトニック結晶を作製する際における層内の屈折率周期構造を形成する工程にて、構造部を除去したり位置をずらしたり形状を変えたりすることで作製される。また、3 次元フォトニック結晶の一部を、該結晶を構成する媒質とは異なる屈折率を有する媒質で置換することによっても作製できる。

【0086】

図 7 の (a) には、3 次元フォトニック結晶の内部に、点状の周期欠陥部 701 を設けて共振器として機能する機能素子 700 の xz 断面を示している。図 7 の (b) は、(a) における B - B 線での断面を示している。

【0087】

3 次元フォトニック結晶中に点状の周期欠陥部 701 を設けることにより、フォトニックバンドギャップ内の一部の波長帯域に対して、該周期欠陥部 701 にのみ電磁波が存在できる状態にすることができる。共振器 700 は、非常に小さい領域に電磁波を閉じ込め、且つ閉じ込め効果の高い高性能な共振器である。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帯域の電磁波を取り出す波長選択フィルタなどが構成できる。周期欠陥部 701 は、選択波長が所望の波長帯域となるように、3 次元フォトニック結晶を作製する際における層内の屈折率周期構造を形成する工程にて、構造部を除去したり、位置をずらしたり、形状を変えたりして作製できる。

【0088】

図 6 および図 7 に示した欠陥部を含む 3 次元フォトニック結晶は、実施例 1 ~ 3 のいずれかの作製方法を用いて、少ない工程数で作製されている。また、欠陥部の xy 面での平坦性が高いために、散乱による光の損失を抑制することができる。さらに、作製誤差による欠陥部に存在できる電磁波の波長帯域のずれを抑制することができる。

【0089】

図 7 に示した欠陥部 701 内又はその近傍に活性媒質を充填し、共振器 700 の外部から電磁波や電流により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や LED 等の発光素子を実現することができる。例えば、共振器の共振波長を赤外光通信波長帯域 (800 nm ~ 1800 nm) に対応させることで光通信光源に用いることができる。また、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。さらに、CD や DVD 等の光ピックアップ用光源に用いることもできる。

【0090】

なお、図 6 に示した導波路、図 7 に示した共振器、発光素子およびフォトニックバンド内の分散異常を用いた偏光素子等の様々な機能素子を組み合わせることで、低コストに超小型高機能集積回路を実現することができる。

【0091】

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】

【0092】

少ない工程数で作製でき、作製誤差も小さい３次元フォトニック結晶および機能素子を提供できる。

【符号の説明】

【0093】

101 基板

102, 104, 107 薄膜

103, 106, 109 柱状構造部

105, 108 窪み

200 ３次元フォトニック結晶

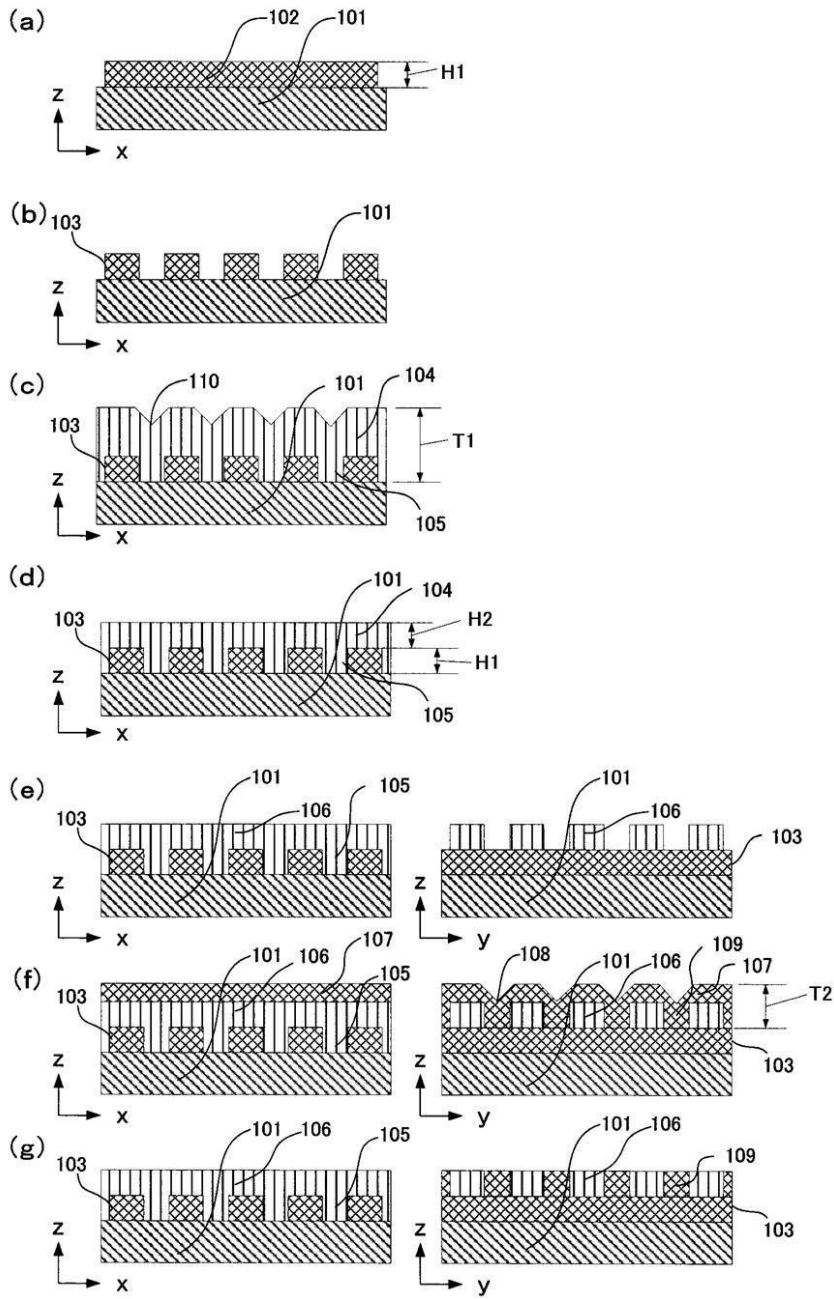
201 第１の層

202 第２の層

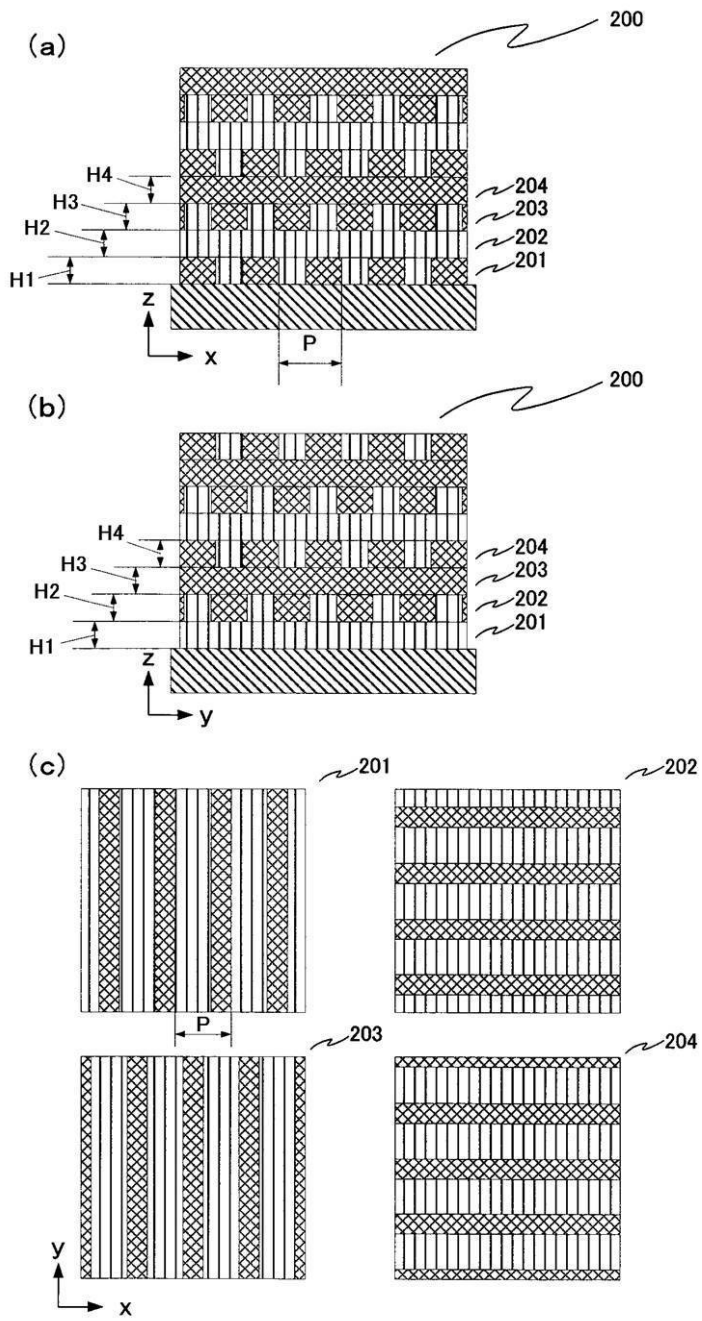
203 第３の層

204 第４の層

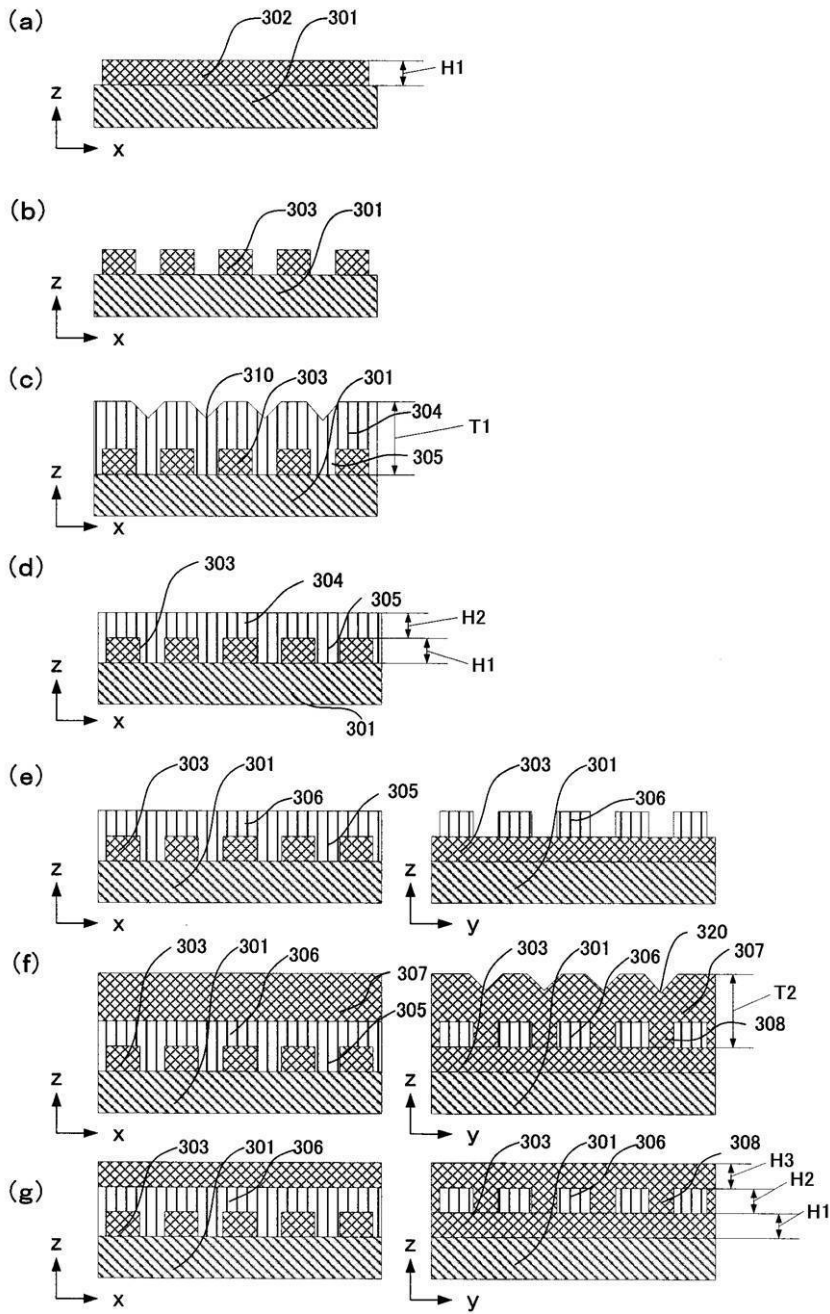
【図 1】



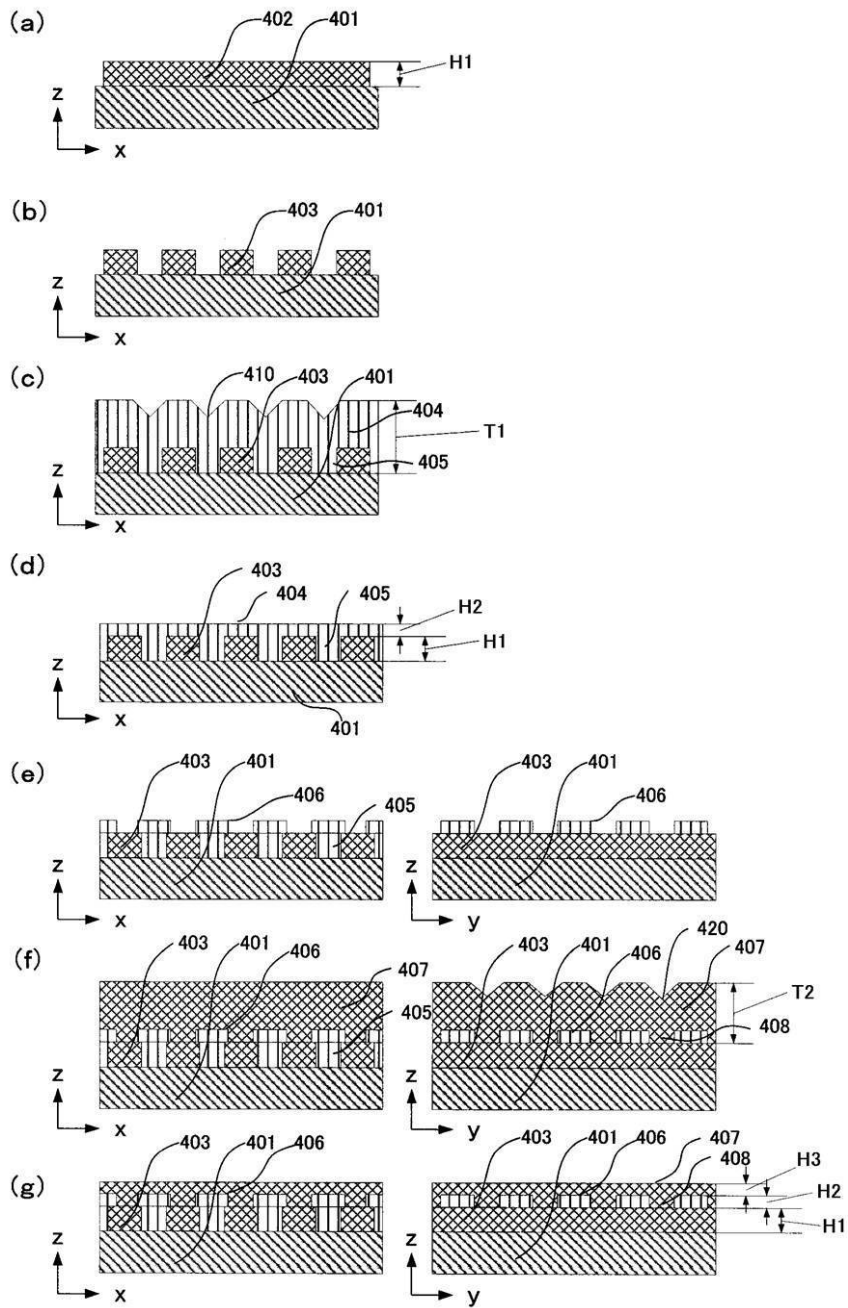
【図 2】



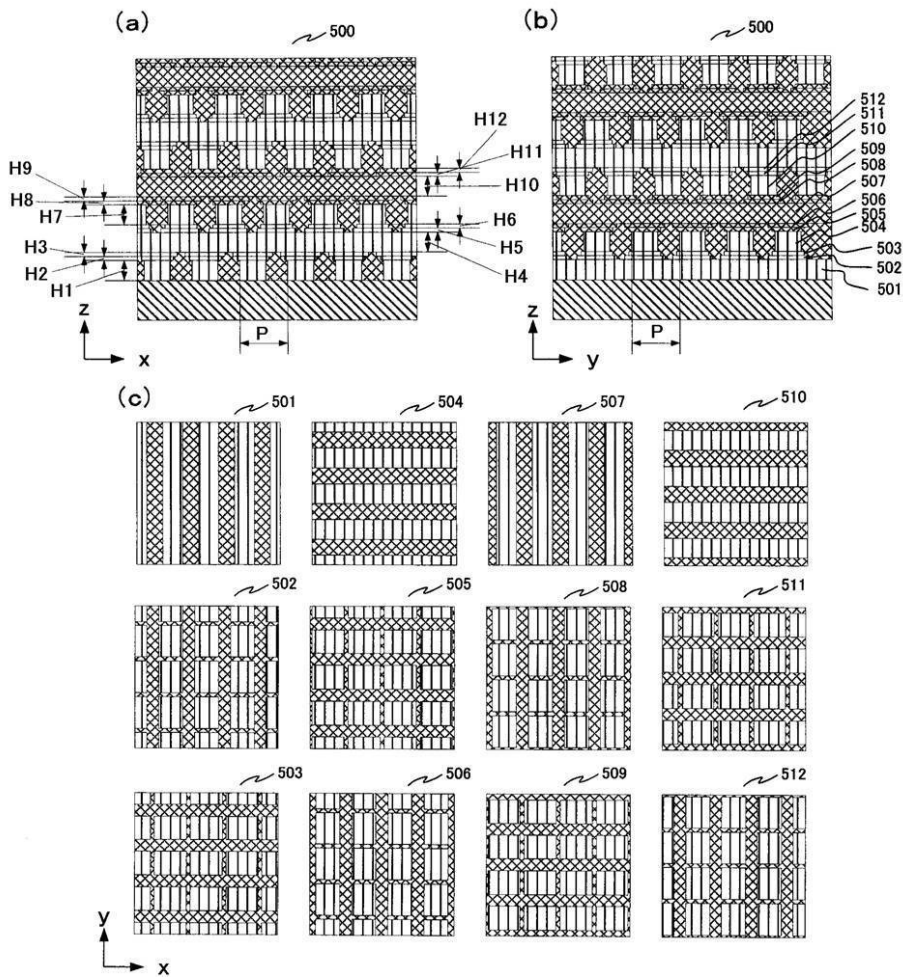
【図 3】



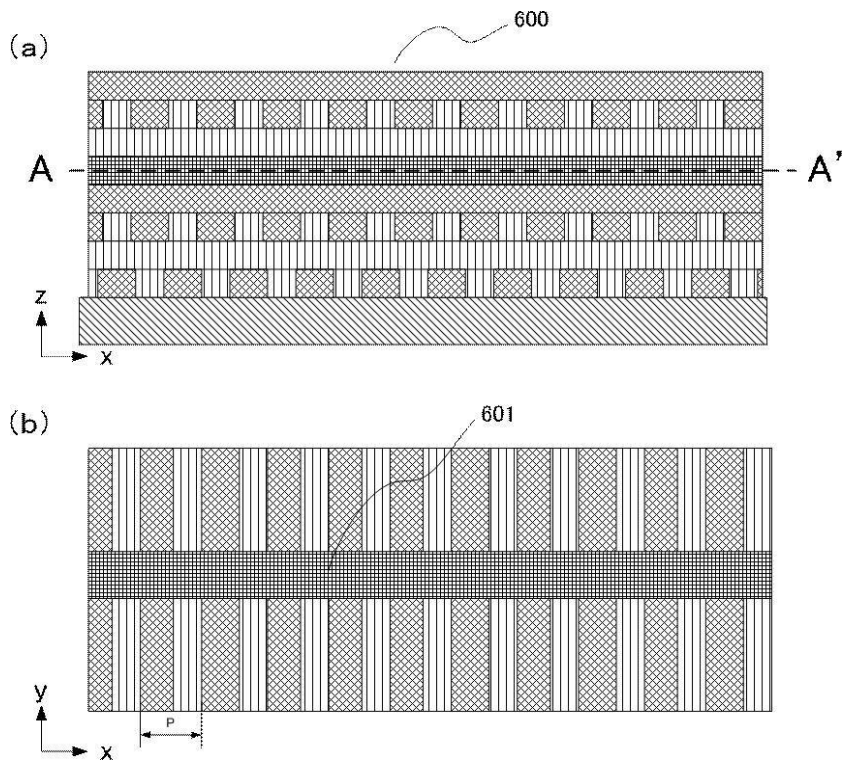
【図 4】



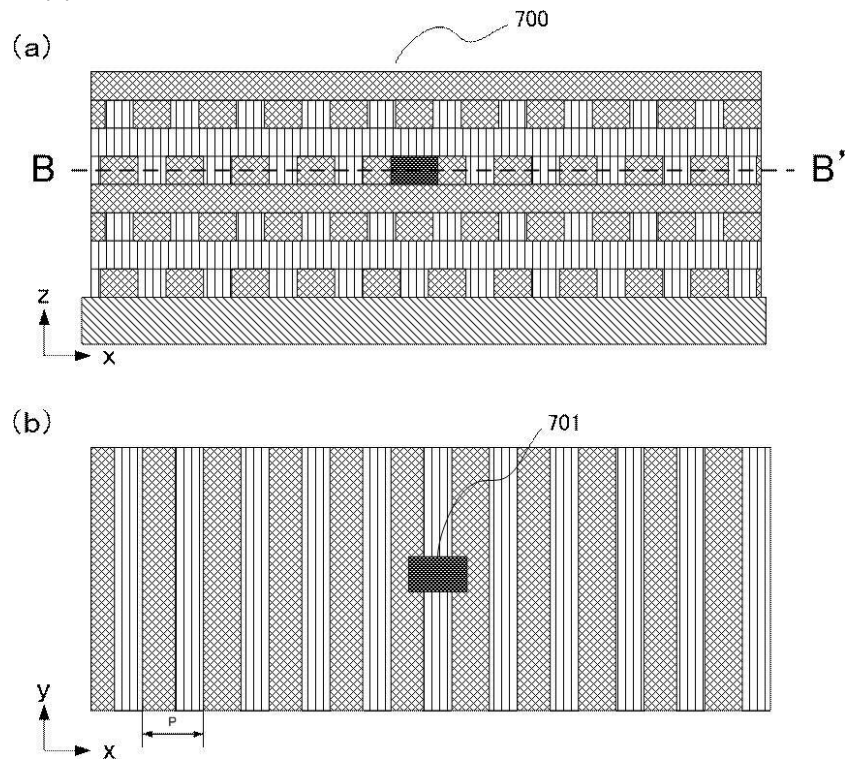
【図 5】



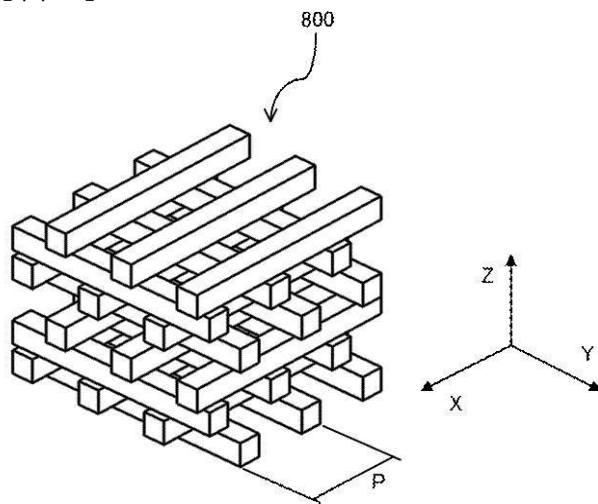
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2004-287248(JP,A)
特開2008-310299(JP,A)
特開2006-313267(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

| | |
|---------|---------|
| G 0 2 B | 1 / 0 2 |
| G 0 2 B | 3 / 0 0 |
| G 0 2 B | 6 / 1 2 |