

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4573942号
(P4573942)

(45) 発行日 平成22年11月4日(2010.11.4)

(24) 登録日 平成22年8月27日(2010.8.27)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/13 (2006.01)

G O 2 B 6/12 M

G O 2 B 6/12 (2006.01)

G O 2 B 6/12 F

G O 2 F 1/03 (2006.01)

G O 2 F 1/03 5 O 5

G O 2 F 1/09 (2006.01)

G O 2 F 1/09 5 O 5

G O 2 F 1/365 (2006.01)

G O 2 F 1/365

請求項の数 3 (全 16 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-108788 (P2000-108788)
 (22) 出願日 平成12年4月11日(2000.4.11)
 (65) 公開番号 特開2001-296442 (P2001-296442A)
 (43) 公開日 平成13年10月26日(2001.10.26)
 審査請求日 平成19年4月11日(2007.4.11)

(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 100086483
 弁理士 加藤 一男
 (72) 発明者 今田 彩
 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 後藤 慎平

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック構造を有する屈折率周期構造体の製造方法、及びそれを用いた光機能素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

2次元周期性を持った凹凸構造を原盤とし、スタンプ材料を堆積し剥離することにより前記凹凸構造の反転構造を有する型を形成し、該型を利用して2次元屈折率周期構造を得るフォトニック構造体の製造方法であって、
 前記型の一部分に光機能材料を充填、硬化した後、前記一部分とは異なる非充填部分に、前記光機能材料とは異なる光機能材料を充填、硬化し、前記屈折率周期構造に欠陥部を形成することを特徴とするフォトニック構造体の製造方法。

【請求項2】

2次元周期性を持った凹凸構造を原盤とし、スタンプ材料を堆積し剥離することにより前記凹凸構造の反転構造を有する型を形成し、該型を利用して2次元屈折率周期構造を得るフォトニック構造体の製造方法であって、
 前記型に光機能材料を充填、硬化する際、前記光機能材料の一部分に非硬化部を形成し、該非硬化部を取り除くことで前記屈折率周期構造に欠陥部を形成することを特徴とするフォトニック構造体の製造方法。

【請求項3】

前記一部分をマスクで覆うことにより非硬化部を形成する請求項2に記載のフォトニック構造体の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10

20

【発明の属する技術分野】

本発明は、フォトニック構造体として使用し得るマイクロ構造体の製造方法、それを用いた光機能素子等に関するものであり、特に、光波長程度の周期を有する多次元屈折率周期構造体すなわちフォトニック構造体の製造方法と、それを用いた光デバイス等に関するものである。

【0002】**【従来の技術】**

光波長程度の屈折率周期を持つ誘電体多層膜は、ミラーとして優れた特性を有することが知られている。このような構造は1次元フォトニック構造体と位置づけられる。これに対し、2軸方向または3軸方向に光波長程度の屈折率周期を持つ構造体は2次元または3次元フォトニック構造体と呼ばれる。これらの構造体内部では、屈折率と周期によって決定される特定の波長の光波の伝搬が禁じられるため、導波路やフィルタ等の光機能素子への応用が期待されている。この禁制帯をフォトニックバンドギャップと呼ぶ。

10

【0003】

実際の2次元ないしは3次元フォトニック構造体の製造手法としては、エッチング技術やフォトリソグラフィ技術を用いて、半導体や誘電体薄膜に2次元面内の光波長程度の2次元的な周期凹凸構造を製造したり、スパッタ法や精密なアライメントにより2次元周期構造体を積層して3次元的な周期構造体を製造する手法が主である(Shawn Yu Lin, Nature, vol.16, p.251, 1998)。

【0004】

20

また、化学合成により製造される光波長程度のサイズの球状粒子(ポリスチレンや SiO_2 など)を、コロイドけん濁液の表面張力や周囲の温度などの条件によって規則的に配列させ、3次元周期構造体を製造する手法も提案されている(N.D. Denkov, Langmuir, vol.8, p.3183, 1992; N.Yamamoto, Jpn.J.Appl.Phys., vol.37, p.L1052, 1998)。

【0005】

また、近年では、カーボンやアルミナを陽極酸化して形成される可視光域にバンドギャップを持つ円形ホール2次元フォトニック構造体も製造されている(H.Masuda, Appl. Phys. Lett., vol.71(19), p.2770, 10 November, 1997)。

【0006】**【発明が解決しようとしている課題】**

30

しかしながら、誘電体や半導体材料に成膜法とエッチング法で広範囲な周期構造を製造し、更に積層するとなると、光波長程度の精密なアライメントを繰り返し行わなければならない。

【0007】

また、化学合成により製造される光波長程度のサイズの球状粒子の周期構造は、主にポリスチレンや SiO_2 の球状粒子けん濁液を利用した毛細管現象や蒸発現象によって自己組織的に製造されるが、けん濁液濃度や周囲の気温や湿度などの条件に左右され易く、広範囲に無欠陥な周期構造を実現できないのが現実であり、多層の完全な周期構造体は期待できない。この球状粒子の周期構造を樹脂等の接着剤で固定した後に積層することは可能だが、周期構造が崩れることによるフォトニックバンド幅の減少が考えられる。また、これらの構造は基板上に製造されており、光波が基板へ伝搬して光閉じ込め効率が低下すると共に、光機能素子への応用に支障を来す。

40

【0008】

本発明は、上記従来技術の課題を解決すべくなされたものであり、その目的は、光波長程度の周期を持ち無欠陥或いは欠陥のあるフォトニック構造体として使用し得る屈折率周期構造体、その応用機能素子、及びそれらの簡易な製造方法等を提供することにある。

【0009】**【課題を解決するための手段】**

上記目的を達成する本発明のフォトニック構造体の製造方法は、2次元周期性を持った凹凸構造を原盤とし、スタンパ材料を堆積し剥離することにより前記凹凸構造の反転構造を

50

有する型を形成し、該型を利用して2次元屈折率周期構造を得るフォトリソグラフィ構造体の製造方法であって、前記型の一部分に光機能材料を充填、硬化した後、前記一部分とは異なる非充填部分に、前記光機能材料とは異なる光機能材料を充填、硬化し、前記屈折率周期構造に欠陥部を形成することを特徴とする。本明細書では、2次元には1次元を、3次元には1次元ないし2次元を含むものとする。また、光波長とは紫外光、可視光、赤外光の波長を意味し、エキシマレーザから炭酸ガスレーザの波長域0.1 μm ~ 10 μm 程度を指すものとする。

【0010】

上記基本構成に基づいて、より具体的な以下の形態が可能である。

前記原盤は、基板に光波長程度の周期を持つ構造体をパターンニングして作製したり、化学合成により製造した光波長程度のサイズの粒子を配列した周期構造体であったり、基板にV溝を形成した該V溝による周期構造体であったりする。

【0011】

前記スタンプ材料の堆積は、金属を電気メッキまたは無電解メッキすること、電着物質を電着すること等で行なわれたり、モールド手法で行なわれたりする。

【0012】

前記型を形成した後、前記型に光機能材料を充填、硬化してもよい。型が光機能材料で出来ていれば、そのままでもフォトリソグラフィ構造体として使用できる。型に光機能材料を充填、硬化した後、該型を除去してもよい。もちろん、この場合も、型が光機能材料で出来ていれば、型を除去しなくてもよい。

【0013】

更に、前記型を除去して形成された前記光機能材料の周期構造に他の光機能材料を充填、硬化してもよい。

【0014】

前記型を複数個対向させ新たに型と成し、該新たな型内に光機能材料を充填、硬化してもよい。この場合も、型をそのまま残しても、除去してもよい。更に、型を除去して形成された前記光機能材料の周期構造に他の光機能材料を充填、硬化してもよい。

【0015】

前記型の少なくとも一部分に光機能材料を充填、硬化した後、該光機能材料とは異なる光機能材料を非充填部分に充填、硬化し、光波長程度の屈折率周期構造の任意の部位に欠陥部を形成してもよい。

【0016】

前記光機能材料を硬化する際、一部分に非硬化部を形成し、光波長程度の屈折率周期構造の任意の部位に欠陥部を形成することもできる。光機能材料が光硬化性である場合、一部分をマスクで覆うことにより非硬化部を作製できる。

【0017】

前記2次元屈折率周期構造を、3次元的な屈折率周期的な構造を形成するようにアライメントして積層し、硬化性材料で固定することで、3次元フォトリソグラフィ構造体を作製できる。

【0019】

前記欠陥部は、周りと異なる光機能材料から成る部分であったり、光機能材料が抜けた部分であったりする。

【0020】

前記3次元屈折率周期構造は、欠陥部のある2次元屈折率周期構造体を含む複数の2次元屈折率周期構造体を3次元的に周期的な構造を形成するように積層させて構成されうる。

【0021】

前記欠陥部は、典型的には、フォトリソグラフィ効果により光波を閉じ込める光導波路として構成しうる。更には、前記欠陥部が分岐導波路を構成して、その周囲に無欠陥のフォトリソグラフィ構造体が配置されている形態や、前記欠陥部が曲がり導波路を構成して、その周囲に無欠陥のフォトリソグラフィ構造体が配置されている形態を採りうる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 2 】

また、上記目的を達成する本発明の光導波路構造は、分岐導波路部を有する光導波路であって、該分岐導波路の周囲に、光波長程度の光機能材料から成る3次元屈折率周期構造であるフォトニック構造体が配置されていることを特徴とする。或いは、曲がり導波路部を有する光導波路であって、少なくとも該曲がり導波路部の外側の角部（図14に示すように、ミラー面が形成されている様な場合もある）に接して、光波長程度の光機能材料から成る3次元屈折率周期構造であるフォトニック構造体が配置されていることを特徴とする。

【 0 0 2 3 】

また、上記目的を達成する本発明の分波器は、光波長程度の光機能材料から成る欠陥のない2次元屈折率周期構造であるフォトニック構造体を光導波路端面に配置して、ブラッグ回折現象を利用して導波光を波長によって異なる方向に波長分波することを特徴とする。或いは、光波長程度の光機能材料から成る欠陥のない2次元屈折率周期構造であるフォトニック構造体を光導波路端面に配置して、ブラッグ回折現象を利用して導波光を異なる方向に強度分波することを特徴とする。

【 0 0 2 4 】

また、上記目的を達成する本発明の光配線装置は、電気配線基板に凹部を設け、該凹部の壁面に発光素子と受光素子を配置し、該凹部に、上記の光機能素子と光導波路構造と分波器のうちの少なくとも1つを挿入して光配線経路を構成し、該光配線経路を介して発光素子からの光を受光素子に導くことを特徴とする。或いは、基板に凹部を設け、該凹部の壁面に光導波路を配置し、該凹部に、上記の光機能素子と光導波路構造と分波器のうちの少なくとも1つを挿入して光配線経路を構成し、該光配線経路を介して前記光導波路へ光を導くことを特徴とする。

【 0 0 2 5 】

上記各構成において、前記光機能材料は、光学的分極率が非線型性である材料、発光性材料、磁性体材料、導電性材料、電気光学的材料、または光増幅材料を混入した光または熱硬化性樹脂材料などである。

【 0 0 2 6 】

【 発明の実施の形態 】

以下に、図面を参照しつつ本発明の実施の形態を説明する。

【 0 0 2 7 】

（ 第1の実施例 ）

先ず、原盤となる2次元フォトニック構造体について説明する。基板上に、金属、半導体、或いは絶縁体からなる単層膜を成膜し、ウェットエッチングやドライエッチングのパターニング技術を用いて、例えば図1(a)のような、光波長(0.1 μ m～10 μ m)程度の2次元的周期性を持った矩形凹凸構造1を基板面内に製造する。通常のフォトニック構造体は、PMMA(ポリメタクリル酸メチル)やSiO₂などの誘電体や高分子材料で製造する。しかし、本発明では原盤として使用するため、光波長程度の周期構造を形成できる材料であれば、プロセスのみを考慮すれば良く、多孔質でない限り（多孔質は周期を乱すので）金属などのあらゆる材料を取り扱うことが可能である。

【 0 0 2 8 】

また、化学合成により製造される光波長程度の径を持つ球状粒子(ポリスチレンやSiO₂など)がけん濁した液を、基板上に滴下し配列させる手法もある。この基板に傾斜を持たせ、周囲の温度、湿度や傾斜角度の条件を調節して放置すると、けん濁液の表面張力と蒸発現象と粒子間力の働きで、傾斜した基板の高い側へ粒子が引き寄せられる。このとき、球状粒子は図1(b)に示すように自己組織的に密な状態へ集積する。この構造は、基板の2次元面内に周期構造を持つ球状粒子凹凸構造2である。

【 0 0 2 9 】

また、図1(c)に示す構造体を使用することもできる。これは、Si基板3を水酸化カリウム溶液でウェットエッチングすることで出来る(111)面のV型の溝4を等間隔で製造し

10

20

30

40

50

た1次元構造体である。この構造体も、通常はフォトニック構造体とはなり得ないが、原盤として使用することが出来る。最終的に作製するフォトニック構造体のサイズは、この原盤にスパッタ堆積するスタンプ材として利用する媒質や使用する光波長により異なる。周期構造が無限に続くほど良いが、100周期程度でもフォトニックバンドギャップが認められる。

【0030】

次に、モールド手法などによる凹凸反転型製造について述べる。

図1(a)の原盤の場合、例えば、モールド手法により凹凸反転型を製造して、各セルに硬化性液状材料を注入する。これに関しては後記する図5の例で詳述される。

【0031】

図1(b)の原盤の場合は次のように行なう。図2(a)は、基板5上に置かれた光波長程度の周期を持つ構造体2を示す。このような原盤に図2(b)、(c)のようにスタンプ材をスパッタ堆積した後に剥離することで、原盤凹凸構造の反転構造を有する型6を形成する。原盤凹凸構造は必ずしも無欠陥ではないので、任意の構造を持つ原盤領域を選択してスタンプ材を塗布する。

【0032】

スタンプ材のスパッタにおいては、応力の小さい金属を電気メッキ又は無電解メッキする方法がある。この場合、例えば原盤2上にTi, Au, MoO_x 、ないしはCr, Pt, MoO_x の順にスパッタし、更に金属をメッキする。第1層のTiないしCrは、原盤2と第2層のAuないしPt間の密着性を上げるために塗布する。第2層のAuないしPtと第3層の MoO_x 間で原盤2と型6を剥離し、型側に残る MoO_x は $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ で除去して型6が完成する。

【0033】

また、金属メッキではなく SiO_2 や樹脂を厚く塗布して剥離し、型6を形成することも出来る。この手法では、原盤2上にTiや MoO_x などの $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ に溶解する材料を中間層として塗布した後に SiO_2 や樹脂を塗布し、中間層を $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ 中で侵食させて型6を剥離する。

【0034】

製造した型6を複数個組み合わせて接着し、新たな凹凸形状を持つ型として利用することもできる。図2(d)に示す断面図のように、この型6を1つないし複数個組み合わせることによって新規形状を有する型を製造し(広い面積に渡って型6を並べることもできる)、図2(d)に示すように硬化性液状材料7を充填した後に、紫外光照射または加熱することでこれを硬化し、多次元フォトニック構造体を成形する。硬化性液状材料7は、例えば、求める物理特性に応じて光学的分極率が非線型性である材料、発光性材料、磁性体材料、導電性材料、電気光学的材料、光増幅材料などを混入した光硬化性材料または熱硬化性材料などである。

【0035】

図2(d)の左部分のように型を向き合わせて複数個組み合わせる場合には、凹部周期構造間に多少隙間を形成するようにこれらを接着し、型6に傾斜を持たせ、上部から硬化性液状材料7を注入する。硬化性液状材料7の粘性が高い場合は、型内部の気体が排出されず充填が不完全になることを防ぐため、図3に示すように空気孔17を空けておくのがよい。

【0036】

また、この空気孔17から硬化性液状材料7を部分的に注入しても良い。凹部周期構造6間の隙間は小さいほど、形成されるフォトニック構造体のフォトニックバント現象に影響を与えずに済む。硬化性液状材料7を硬化して出来上がったフォトニック構造体は、型6を除去せずそのまま利用する方法と除去する方法の2種類が考えられる。例えばスタンプ材が SiO_2 であれば、 $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ に浸すことで、2次元フォトニック構造体から型6を除去でき、図4(b)に示すようにフォトニックバント効果への型6による影響のないフォトニック構造体8が出来上がる。また、型6になるスタンプ材もPMMAなどの光機能材料で製造しておけば、これをクラッドとして機能させてフォトニックバント幅を調節することができ、シングルモードの導波路などとして利用が可能である。

10

20

30

40

50

【0037】

図1(b)の場合について、より具体的な例を説明する。

傾斜を持たせたガラス基板の上部に、化学合成により作製される粒径 $0.5\mu\text{m}$ のポリスチレン微小球のけん濁液を滴下する。前述した様に、周囲の温度、湿度や傾斜角度の条件を調節し放置すると、けん濁液の表面張力と蒸発現象と粒子間力の働きで、基板の高い側へ粒子が引き寄せられ、球状粒子は図1(b)に示すように自己組織的に密な状態へ集積する。この製法では、正方格子よりも六方格子の方が安定であるため作製しやすい。この構造を原盤とし、欠陥のない周期構造部分を選択し、Ti, Au, MoO_x の順にスパッタし、更に金属をメッキする。第1層のTiは、原盤と第2層Au間の密着性を上げるために塗布する。第2層Auと第3層 MoO_x 間で原盤と型を剥離し、型に残る MoO_x は $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ で除去し、型を製造する。この型を図3に示すように2つ対向させ球形の凹構造を作り、屈折率1.6のUV硬化性樹脂を注入し、UV硬化する。原盤を剥離すると、屈折率1.6の $0.5\mu\text{m}$ の周期を持つ球状粒子六方格子2次元フォトニック構造体が出来ると、可視光範囲内にフォトニックバンドギャップが位置しているため、可視光に対するミラー等に応用する事が出来る。

10

【0038】

図1(c)の原盤の場合、原盤3にスタンパ材をスパッタ堆積した後に、これを剥離して1次元周期構造体を形成する。これは、溝を何らかの材料で埋めて用いてもよい。単独で用いてもよいし、積層させたりして適当に組み合わせて用いてもよい。

20

【0039】

(第2の実施例)

矩形凹凸構造を持った原盤の例を図5(a)、(b)に示す。金属、半導体或いは絶縁体にエッチング技術やフォトリソグラフィ技術を用いて、2次元面内に光波長程度の周期を持つ凹凸構造を製造する。例えば図5(a)のような原盤9を製造した場合、モールド手法により凹凸反転型を製造すると図5(b)の形状の型9が出来ると、可視光範囲内にフォトニックバンドギャップが位置しているため、可視光に対するミラー等に応用する事が出来る。

30

【0040】

図5(a)の型は各セルに硬化性液状材料7を注入するため、第3の実施例に述べるように欠陥を製造する用途に適している。これら図5(a)、(b)の型9で2次元フォトニック構造体を製造し(例えば、凹部10に硬化性液状材料11を注入して硬化させる)、型9を剥離した後、フォトニック構造体の凹部に第1に注入硬化した硬化性液状材料11とは異なる光機能材料12を充填し、フォトニック構造体の屈折率差を減少させることもできる(図6(a)、(b))。また、型9を予めPMMA等の光機能材料で製造し、剥離せずに光機能材料12としても良い。

【0041】

より具体的な例を説明する。

基板上にPMMA(ポリメタクリル酸メチル)、シリコン系フォトレジスト(FHSP)の順に塗布し、フォトリソグラフィによりFHSPに図5(b)に示す周期 $0.5\mu\text{m}$ の正方矩形パターンを形成する。FHSPは酸素ドライエッチングに対し耐性を持つため、このパターンをマスクとして酸素を反応性ガスとしたエッチングに適している。反応性イオンエッチング(RIE法)によりPMMAをエッチングし、矩形凹凸構造を有する原盤9が出来上がる。凹部に屈折率1.6のUV硬化性樹脂を注入し、UV硬化し、原盤を剥離すると、屈折率1.6の $0.5\mu\text{m}$ の周期を持つ正方矩形2次元フォトニック構造体が出来ると、可視光範囲内にフォトニックバンドギャップが位置しているため、可視光に対するミラー等に応用する事が出来る。

40

【0042】

(第3の実施例)

任意形状に欠陥を有するフォトニック構造体の製造法について述べる。図7(a)に示すように、型6に入れた硬化性液状材料7を硬化する際、一部分を光非透過部14としたマスク13で覆うことにより非硬化部15を製造する(この場合、光の当たった部分のみが硬化する)。そして、型6を除去した後に非硬化部15を取り除くことで、図7(b)に示すようにフォトニック構造8に任意形状の欠陥を形成することができる。

50

【 0 0 4 3 】

また、図 8 (a) に示すように、まず型 6 の少なくとも一部分に硬化性液状材料 7 を充填、UV 光 1 6 など硬化した後、この液状材料 7 と異なる硬化性液状材料 1 8 を非充填部分に充填、硬化することによって、フォトニック構造 8 に欠陥 1 5 を形成することができる。図 8 (b) のように球状凹凸構造を持った原盤で製造した型 6 を 2 つ組み合わせる場合には、例えば型 6 を組み合わせる前に欠陥を形成する部分に硬化性液状材料 7 を注入硬化し、その後に型 6 を組み合わせて、孔 1 7 から硬化性液状材料 7 と異なる硬化性液状材料 1 8 を注入、硬化する。

【 0 0 4 4 】

より具体的な例を説明する。

第 1 の実施例で作製する原盤 2 (図 1 (b) 参照) を用い、2 次元面内に連続した欠陥を作製する。図 1 2 (a) の 2 層目の欠陥のパターンの光非透過部を有するマスクを通して、原盤 2 による型 6 内に注入した屈折率 1 . 6 の UV 硬化樹脂を硬化させる。型 6 を剥離し、非硬化部の樹脂を除去すると、図 1 2 (a) の 2 層目の導波路として用いる欠陥を有する屈折率 1 . 6 の 0 . 5 μm の周期を持つ六方格子球状 2 次元フォトニック構造体ができる。

【 0 0 4 5 】

(第 4 の実施例)

製造した 2 次元フォトニック構造体を積層する例について述べる。図 9 (a)、(b) に示す断面図のように、2 次元フォトニック構造体 8 を 3 次元の周期構造を形成するよう積層して硬化性液状材料で固定すると、多次元フォトニック構造体となる。図 1 0 (a)、(b)、(c)、(d) は光波長程度のサイズの球状粒子正方格子フォトニック構造体 8 を積層する例である。或る球の中心を原点とみると、図 1 0 (a) は、1 層目の原点 1 9 と 2 層目の原点 2 0 が同じ Z 軸上 (2 次元フォトニック構造体の面に対し垂直方向) にある場合を示し、図 1 0 (b) はその上面図である。図 1 0 (c) は、1 層目の原点 1 9 と 2 層目の原点 2 0 が XY 平面内に半周期ずれる場合を示し、図 1 0 (d) はその上面図である。従来の球状粒子けん濁液の蒸発を利用した手法では、球が下層の球と球の中間に安定してしまうため、この図 9 (a)、(b) や図 1 0 (a) の積層形態は実現が難しい。

【 0 0 4 6 】

図 1 1 (a)、(b) は、図 6 (a)、(b) に示した矩形 2 次元フォトニック構造体を積層する例である。同じ媒質からなる矩形ユニットセル 1 1 或いは 1 2 の中心を原点とみると、図 1 1 (a) は 1 層目の原点と 2 層目の原点が同じ Z 軸上にある場合を示し、図 1 1 (b) は、1 層目の原点と 2 層目の原点が XY 平面内に半周期ずれる場合を示している。この手法を用いると、空気欠陥を有するフォトニック構造体の上層にも、その欠陥を埋めることなくフォトニック構造体を積層することが可能である。

【 0 0 4 7 】

より具体的な例を説明する。第 1 の実施例で作製する屈折率 1 . 6 の 0 . 5 μm の周期を持つ球状粒子六方格子 2 次元フォトニック構造体 (図 4 参照) を、精密なアライメントにより 3 次元的にも周期を持つよう積層する。球配列構造体の積層では、図 1 0 (a)、(b) に示すような積層形態は安定性が悪く困難である。反面、図 1 0 (c)、(d) に示すような球間の隙間に上層の球が入る積層形態は非常に安定であり、アライメントはさほど精密でなくとも良い。第 1 の実施例で作製する 2 次元フォトニック構造体の上面に、該構造体を形成する樹脂と同種の屈折率 1 . 6 の樹脂を薄く塗布し、2 層目の 2 次元フォトニック構造体を、1 層目の球間に 2 層目の球が位置するよう積層し、UV 照射にて両者を固定する。この際、接着剤としての樹脂の厚みが大きくなると、周期構造が破られるため、フォトニックバンドギャップが浅くなる。3 層目の積層は、1 層目の格子軸と同じ配列をする場合と、格子軸が 3 0 度ずれる配列をする 2 通りが考えられるが、最密六方構造を作製するために前者で積層を行う。この手順を繰り返し、多次元フォトニック構造体を製造する。

【 0 0 4 8 】

(第 5 の実施例)

誘電体などの光導波路においては、光波を分岐したり曲げたりする際の損失を如何にして

10

20

30

40

50

減少させるかということが最大の課題である。例えば六方格子球状多次元フォトニック構造体は、全方位に広がりを持つバンドギャップを持つため、低損失なミラーとして利用できる。

【 0 0 4 9 】

例えば、図 1 2 に示す球状粒子正方格子 2 次元フォトニック構造体のように、2 層目の 2 次元フォトニック構造体 8 に欠陥 1 5 を製造し、この 2 次元フォトニック構造体 8 に固有のフォトニックバンドギャップ内部に位置する波長を有する光波 3 5 を欠陥部 1 5 の端面より入射する（出射光を 3 6 で示す）。光波は結晶内部の伝搬を禁じられるため、図 1 2 の構造体は、欠陥部 1 5 を光が伝搬する光導波路を有する構造体となる。

【 0 0 5 0 】

また、図 1 3 と図 1 4 に示す上面図のように、Y 字型光導波路 3 4 の分岐部ないし曲がり導波路 3 3 の屈曲部の周囲のみに多次元フォトニック構造体 8 を配置する構造も構成できる。この多次元フォトニック構造体 8 は、光導波路 3 3、3 4 内部を伝搬する光波の波長域にフォトニックバンドギャップを持つように設計されている。光波はフォトニック構造体 8 内部での伝搬を禁じられるため、分岐または鋭角的な曲がり導波路でも外部へ放射されず、低損失に導波する。

【 0 0 5 1 】

図 1 4 は、45 度の切断面と外部（空気層など）によるミラー構造を曲がり部に持つ曲がり導波路 3 3 の上面図であるが、このミラー部に多次元フォトニック結晶 8 を配置して更に外部ミラーの機能を持たせ、光波の伝搬損失を減じている。

【 0 0 5 2 】

この様に、フォトニック構造体を、フォトリソグラフィなどで作製する従来の誘電体光導波路の周囲に配置し、ミラーとして使用する事で伝搬損失を低下できる。より具体的には、図 1 4 のように曲がり部に 45 度のミラー形状を有する曲がり導波路 3 3 の外部に、第 4 の実施例で作製する屈折率 1.6 の 0.5 μm の周期を持つ球状粒子六方格子 3 次元フォトニック構造体 8 を配置する。この構造体 8 は 640 nm 付近にフォトニックバンドギャップが位置しているため、光導波路 3 3 内を伝搬するこの波長の光波の曲がり部における伝搬損失を低減出来る。

【 0 0 5 3 】

（第 6 の実施例）

次に、多次元フォトニック構造体を光波長分波器ないしは光強度分波器として利用する例を述べる。無欠陥な多次元フォトニック構造体 8 を、図 1 5 (a) に示すように光導波路 2 1 の終端部断面に配置する。フォトニック構造体 8 は、フォトニックバンドギャップ外の波長を持つ光波に対しては 2 次元の回折格子として機能し、光導波路 2 1 内部を伝搬する光波 2 2 は 2 次元的な空間広がりを持って出射する。光波 2 2 が単色レーザー光であれば、光波 2 2 の伝搬方向に対して垂直な面（図 1 5 (a) の YZ 面）には図 1 5 (b) のようなブラッグ回折スポットパターンが見られる。2 3、2 4、2 5、2 6 は夫々 0 次光、1 次光、2 次光、3 次光である。光波 2 2 の波長が短いほど、同一面内でのスポット間隔は減少し、またスポットが高次になるほど光強度は減少する。従って、図 1 6 (a) のように複数の光導波路 2 1 を配置して各光導波路 2 1 を各スポットと結合させれば、光強度分波器として利用することができる。

【 0 0 5 4 】

また、波長の異なる複数の光波 2 2 が光導波路 2 1 内を伝搬するとき、各波長ごとに異なる回折角度を持って分解されるため、複数のスポットパターンが得られる。例として、白色光（可視光）が光導波路 2 1 内を伝搬するとき、化学合成により製造されるポリスチレン球状粒子（屈折率 1.6、粒径 1 μm ）による六方格子の 2 次元フォトニック構造体 8 を光導波路 2 1 端に配置すれば、各スポット 2 7 は図 1 5 (c) に示すように軸の原点 O 側が短波長となる波長分布を持つ。図 1 6 (b) のようにバンドルファイバ 3 2 へ結合し、光波長分波器として利用する事が出来る。高次まで回折スポットが見られる場合には、同時に光強度分波器としても用いられる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 5 】

より具体的な例を説明する。第1の実施例の手法で作製する屈折率1.6の1.0 μm の周期を持つ球状粒子六方格子2次元フォトニック構造体8を、図15(a)に示すように矩形導波路21端面に対し垂直に配置する。この構造体8は可視光波長域にはバンドギャップを持たないので、導波路21から出射する可視光波長域の光波に対してはブラッグ回折現象を生じさせるのみである。この構造体8に直接、He-Neレーザ等のコヒーレント光を入射すると、図15(b)の3対称のブラッグ回折スポットが観察される。図15(a)のように光導波路21を介したHe-Neレーザ光では、導波路21内の反射により光波が広がりを持つため、多少広がりのあるスポット形状となる。また、この構造体8に白色光を入射すると、図15(c)のような軸の原点O側が短波長となる連続的な波長分布を持つ1次スポット27が観察される。図16(b)のようにバンドルファイバ32へ結合し、光波長分波器として利用出来る。

10

【 0 0 5 6 】

(第7の実施例)

少なくとも一部に欠陥15を有する多次元フォトニック構造体8を、アライメントで3次元周期性を持つよう積層する。例えば、図17に示すような数列の欠陥15を有する2次元フォトニック構造体8を重ねると、連続して繋がった欠陥部15に光を閉じ込める3次元光導波路となる。このとき、このフォトニック構造8が全方位に渡るバンドギャップを有している必要があり、欠陥部15に閉じ込めの起こる光波長は、使用するフォトニック構造体8に固有の周期構造と媒質誘電率に依存する。

20

【 0 0 5 7 】

より具体的な例を説明する。第3の実施例で作製する連続的な欠陥15を有する屈折率1.6の1.0 μm の周期を持つ球状粒子六方格子2次元フォトニック構造体8の上下が、第1の実施例で作製する欠陥のない2次元フォトニック構造体となるよう、第4の実施例と同様な3次元的最密六方構造として10層積層する。この構造は、640 nm付近の波長の光波を伝搬する光導波路となり、急激な曲げや分岐でも高効率な閉じ込め効果を有する。

【 0 0 5 8 】

(第8の実施例)

図18に示すような発光素子28や受光素子29を含み電気配線を有する配線基板31の一部に、欠陥15を有する3次元フォトニック構造体8を埋め込む例について述べる。図18では電気配線基板31に凹部30を設け、その壁面に半導体レーザ等の発光素子28とフォトダイオード等の受光素子29を配置している。一方で、配線基板31上の発光素子28、受光素子29と光結合するような3次元フォトニック構造体8を製造し、配線基板凹部30へ挿入する。この構成では、電気配線基板31と光配線部すなわち3次元フォトニック構造体8との製造プロセスを同時に行えるという利点がある。また、第7の実施例と同様に導波路の曲がり部が円弧である必要がなく、光配線経路を立体的に構成できることから、交差部の問題がなく、従来の光導波路と比較して素子の小型化が可能である。

30

【 0 0 5 9 】

より具体的な例を説明する。第7の実施例の連続的な欠陥15を有する屈折率1.6の1.0 μm の周期を持つ球状粒子六方格子2次元フォトニック構造体8を、図18に示すような発光波長650 nmの半導体レーザ28とフォトダイオード29を含み電気配線を有する配線基板31の一部に埋め込む。電気配線基板31は、3次元フォトニック構造体に対応する凹部30が設けてあり、その壁面には、3次元フォトニック構造体を挿入したときに、連続した欠陥部15の始端側に半導体レーザ28、終端側にフォトダイオード29が位置するような構造である。

40

【 0 0 6 0 】

【発明の効果】

以上説明した様に、本発明により、従来技術の課題が解決され、光波長程度の周期を持つ無欠陥ないし欠陥部のあるフォトニック構造体とその応用機能素子が柔軟かつ確実に実現

50

され、更にそれらの簡易な製造方法も実現される。

【図面の簡単な説明】

【図 1】図 1 (a)、(b)、(c) は、本発明の工程に用いられる原盤の例を示す斜視図である。

【図 2】図 2 (a)、(b)、(c)、(d) は、球状凹凸構造の型の製造法の例を示す断面図である。

【図 3】図 3 は、図 2 (d) の構造において空気孔を空けた型を示す断面図である。

【図 4】図 4 は、無欠陥多次元フォトリソニック構造体の製造法の断面図である。

【図 5】図 5 (a)、(b) は、矩形凹凸構造の原盤または型の例を示す本発明の第 2 の実施例の上面図である。

【図 6】図 6 (a)、(b) は、図 5 の原盤または型を用いて製造される矩形 2 次元フォトリソニック構造体の一例を示す上面図と斜視図である。

【図 7】図 7 (a)、(b) は、欠陥を製造する手法の一例を示す本発明の第 3 の実施例の断面図である。

【図 8】図 8 (a)、(b)、(c) は、欠陥を製造する手法の他の例の断面図である。

【図 9】図 9 (a)、(b) は、3 次元フォトリソニック構造体を示す本発明の第 4 の実施例の断面図である。

【図 10】図 10 (a)、(b) は、1 層目と 2 層目の原点が同一 Z 軸上にある球状粒子正方格子 3 次元フォトリソニック構造体の斜視図と上面図、図 10 (c)、(d) は、1 層目と 2 層目の原点が XY 平面内に半周期ずれる球状粒子正方格子 3 次元フォトリソニック構造体の斜視図と上面図である。

【図 11】図 11 (a)、(b) は、1 層目と 2 層目の原点が同一 Z 軸上にある矩形 3 次元フォトリソニック構造体の斜視図、及び 1 層目と 2 層目の原点が XY 平面内に半周期ずれる矩形 3 次元フォトリソニック構造体の斜視図である。

【図 12】図 12 (a)、(b) は、2 次元フォトリソニック構造体による光導波路を示す本発明の第 5 の実施例の斜視図である。

【図 13】図 13 は、周辺に多次元フォトリソニック構造体を配置した Y 字分岐路の上面図である。

【図 14】図 14 は、曲がり部に多次元フォトリソニック構造体を配置した曲がり導波路の上面図である。

【図 15】図 15 (a)、(b)、(c) は、端に多次元フォトリソニック構造体を配置した光導波路を示す本発明の第 6 の実施例の斜視図、フォトリソニック構造体に単色光を入射したときのブラッグ回折パターンの図、フォトリソニック構造体に白色光を入射したときのブラッグ回折パターンの図である。

【図 16】図 16 (a)、(b) は、フォトリソニック構造体を光波長分波器ないしは光強度分波器として用いるときの光結合系の例の斜視図である。

【図 17】図 17 は、欠陥を有する多次元フォトリソニック構造体を積層する一例を説明する本発明の第 7 の実施例の斜視図である。

【図 18】図 18 は、多次元フォトリソニック構造体を、電気配線等を施した基板に挿入する一例を説明する本発明の第 8 の実施例の斜視図である。

【符号の説明】

- 1 矩形凹凸構造を持った原盤
- 2 球状凹凸構造を持った原盤
- 3 Si 基板
- 4 V 溝
- 5 基板
- 6 スタンパ材による型
- 7 硬化性液状材料
- 8 硬化した液状材料の 2 次元フォトリソニック構造体
- 9 矩形フォトリソニック構造体によって製造した型

10

20

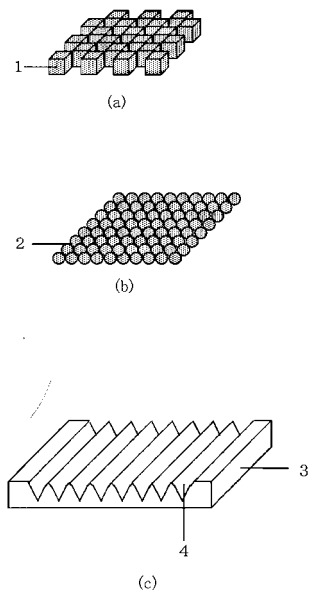
30

40

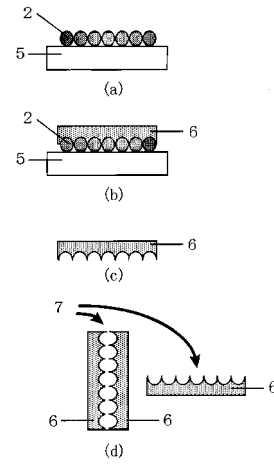
50

1 0	凹部	
1 1	光機能材料	
1 2	光機能材料 1 1 とは異なる光機能材料または空気	
1 3	マスク	
1 4	マスクの光非透過部	
1 5	非硬化部(欠陥)	
1 6	UV光	
1 7	空気孔	
1 8	硬化性液状材料 7 とは異なる硬化性液状材料	
1 9	1 層目の原点	10
2 0	2 層目の原点	
2 1	光導波路	
2 2	光波	
2 3	0 次光	
2 4	1 次光	
2 5	2 次光	
2 6	3 次光	
2 7	白色光の 1 次回折スポット	
2 8	半導体レーザ	
2 9	フォトダイオード	20
3 0	凹部	
3 1	配線基板	
3 2	バンドルファイバ	
3 3	曲がり導波路	
3 4	Y字型光導波路	
3 5	入射光	
3 6	出射光	

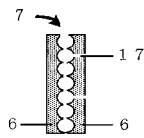
【図 1】



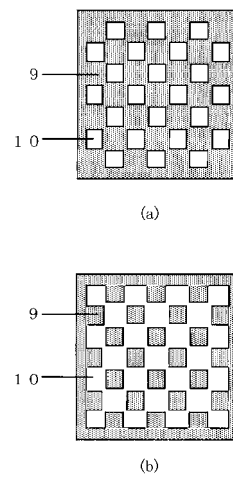
【図 2】



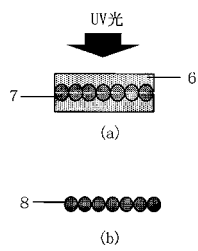
【図 3】



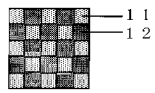
【図 5】



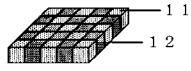
【図 4】



【図 6】

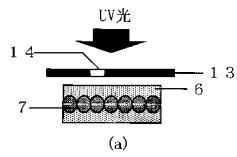


(a) 上面図

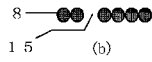


(b) 斜視図

【図 7】



(a)



(b)

【図 9】

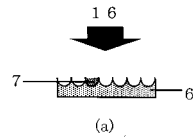


(a) 断面図

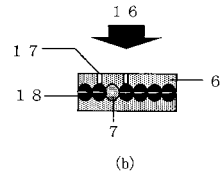


(b) 断面図

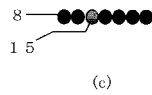
【図 8】



(a)

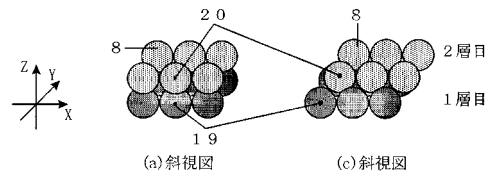


(b)



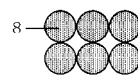
(c)

【図 10】

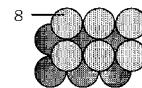


(a) 斜視図

(c) 斜視図

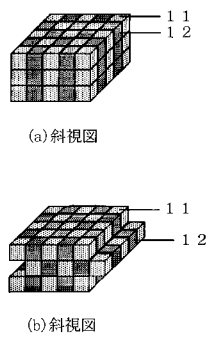


(b) 上面図

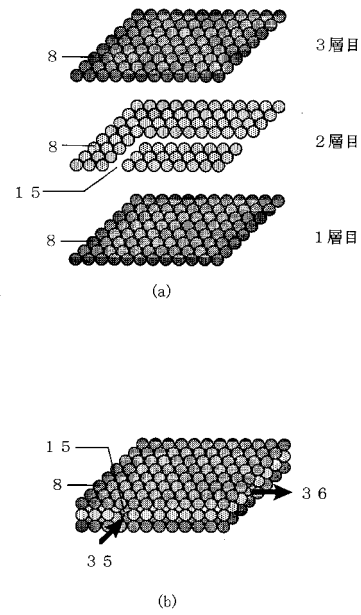


(d) 上面図

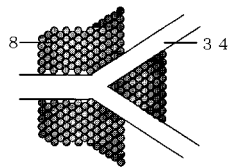
【図 1 1】



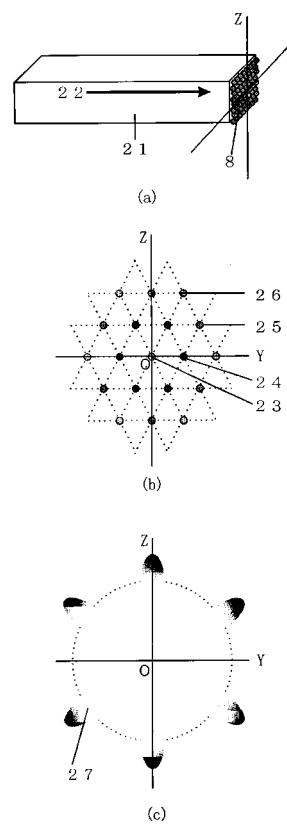
【図 1 2】



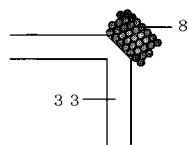
【図 1 3】



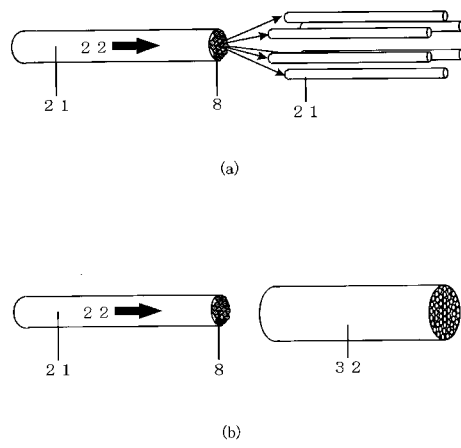
【図 1 5】



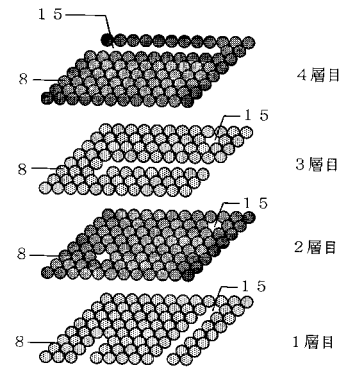
【図 1 4】



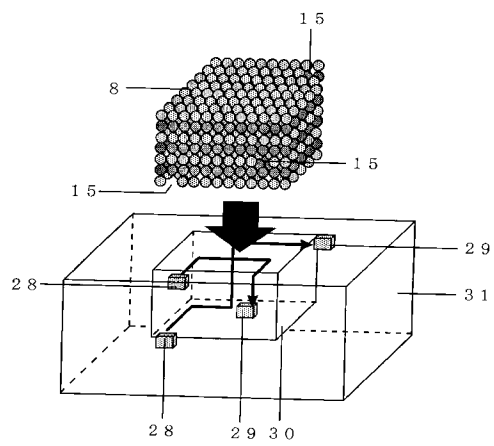
【図 16】



【図 17】



【図 18】



 フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I		
H 0 1 L	31/0232	(2006.01)	H 0 1 L	31/02	D
H 0 1 S	5/02	(2006.01)	H 0 1 S	5/02	
G 0 2 B	1/02	(2006.01)	G 0 2 B	1/02	

(56)参考文献 国際公開第 9 9 / 0 6 4 9 3 3 (W O , A 1)
 国際公開第 0 0 / 0 1 0 0 4 0 (W O , A 1)
 特開平 1 0 - 0 6 2 6 1 5 (J P , A)
 特開平 1 0 - 0 9 6 8 0 8 (J P , A)
 特開平 1 1 - 3 2 6 6 0 3 (J P , A)
 Masatoshi Tokushima, Hideo Kosaka, Akihisa Tomita, and Hirohito Yamada , Lightwave propagation through a 120 ° sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide , APPLIED PHYSICS LETTERS , 米国 , American Institute of Physics , 2 0 0 0 年 2 月 2 1 日 , VOLUME 76, NUMBER 8 , 952-954

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G02B 1/00-1/08

G02B 6/10-6/12