

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4642527号  
(P4642527)

(45) 発行日 平成23年3月2日(2011.3.2)

(24) 登録日 平成22年12月10日(2010.12.10)

(51) Int.Cl.

F 1

HO 1 S 3/081 (2006.01)

HO 1 S 3/081

HO 1 S 3/23 (2006.01)

HO 1 S 3/23

G02 F 1/13 (2006.01)

G02 F 1/13 505

請求項の数 10 (全 22 頁)

(21) 出願番号

特願2005-102596 (P2005-102596)

(22) 出願日

平成17年3月31日 (2005.3.31)

(65) 公開番号

特開2005-328040 (P2005-328040A)

(43) 公開日

平成17年11月24日 (2005.11.24)

審査請求日

平成20年3月24日 (2008.3.24)

(31) 優先権主張番号

特願2004-116806 (P2004-116806)

(32) 優先日

平成16年4月12日 (2004.4.12)

(33) 優先権主張国

日本国 (JP)

(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 100126240

弁理士 阿部 琢磨

(74) 代理人 100124442

弁理士 黒岩 創吾

(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

(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

審査官 傍島 正朗

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】積層型3次元フォトニック結晶及び発光素子及び画像表示装置

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

互いに異なるフォトニックバンドギャップを有する複数の3次元フォトニック結晶を積層して構成される積層型3次元フォトニック結晶であって、

前記複数の3次元フォトニック結晶はそれぞれの内部に周期欠陥で形成された共振器を有し、

前記周期欠陥は、励起されることにより発光する活性媒質を含んでおり、

前記複数の3次元フォトニック結晶の共振器は互いに異なる波長の光を放出し、

前記複数の3次元フォトニック結晶は、それぞれのフォトニックバンドギャップの中心波長が、光の放出方向に対して、順に短波長側へ変化するように積層されていることを特徴とする積層型3次元フォトニック結晶。

## 【請求項2】

前記活性媒質は、電流注入により発光する活性媒質であることを特徴とする請求項1に記載の積層型3次元フォトニック結晶。

## 【請求項3】

前記活性媒質は、励起光照射により発光する活性媒質であることを特徴とする請求項1に記載の積層型3次元フォトニック結晶。

## 【請求項4】

請求項1乃至3のいずれかに記載の積層型3次元フォトニック結晶と、前記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。

10

20

**【請求項 5】**

請求項4に記載の発光素子の発光状態を切換える切換手段を有することを特徴とする発光素子。

**【請求項 6】**

前記切換手段は前記励起手段の駆動信号を切換えることを特徴とする請求項5に記載の発光素子。

**【請求項 7】**

前記切換手段は前記共振器の共振波長を変更して前記発光素子の発光状態を切換えることを特徴とする請求項5に記載の発光素子。

**【請求項 8】**

前記切換手段は前記共振器より放出される光の光路を遮断して前記発光素子の発光状態を切換えることを特徴とする請求項5に記載の発光素子。

10

**【請求項 9】**

R G B のうち少なくとも 1 以上の波長領域で発光することを特徴とする請求項4 乃至 8のいずれかに記載の発光素子。

**【請求項 10】**

請求項4 乃至 9のいずれかに記載の発光素子を配置して構成されることを特徴とする画像表示装置。

20

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0 0 0 1】**

本発明は、フォトニック結晶を用いて多波長の光を選択的に発光可能な構造に関するものである。

**【背景技術】****【0 0 0 2】**

従来、所定の波長の光を選択的に発するための構成としていくつかの方法が知られており、主に能動的な発光方法と受動的な発光方法に大別される。能動的な発光方法としては発光ダイオードやプラズマ発光等が挙げられ、使用する媒質により決まる特定の波長で発光する。また、蛍光物質に励起エネルギーを印加して所望の波長の光を得る方法も知られている。受動的な発光方法としては、白色光のように比較的広い波長域を持つ光に対して、特定の波長の光のみが透過可能な波長選択フィルターを用いる方法が知られている。

30

**【0 0 0 3】**

上記のいずれの方法においても各発光構造は所定の波長分布を持つ光を発するため、従来の発光構造を用いて例えば表示装置を構成する場合には、異なる波長の光を発する複数の発光構造をグループとして平面的に配列することで、全体として任意の色彩を表現している。したがって、例えば R G B の各色を発する構造を画素として組み合わせて表示装置を構成する際には、それを交互に配置する必要があるために表示可能な画像の分解能が実際の画素数の 1 / 3 になる。

**【0 0 0 4】**

特許文献 1 は、単一の発光素子から多波長のレーザー光を取り出す構造について開示している。より具体的には多層膜共振器構造を使用したいわゆる半導体レーザーを複数積層して多波長のレーザー光を取り出す構成が開示されている。

40

**【0 0 0 5】**

一方、発光素子としてフォトニック結晶を用いることが知られている。所定の波長領域の光がほとんど透過しないフォトニックバンドギャップ ( P B G ) を利用することにより、フォトニック結晶内部に設けた周期欠陥部に光を閉じ込め、光エネルギーを集中させて高効率で発光させることができる（特許文献 2）。光閉じ込め効果が高く、高効率な発光素子を実現するためには、すべての方向に P B G を有する 3 次元フォトニック結晶を用いることが特に有効である。このような発光素子は、光通信や表示装置など多様な用途に応用することができ、その用途から広い動作波長帯域を持つ構造が求められている。例えば

50

、表示装置を構成する場合には、光の三原色である R G B の波長に対応する光を発生する発光素子が求められる。

【特許文献 1】特開平 6 - 283812 号

【特許文献 2】U S P 5 , 784 , 400

【非特許文献 1】Physical Review Letters , Vol . 59 , p  
p . 2059 , 1989 年

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

单一の発光素子から多波長の光を選択的に取り出すために、特許文献 1 のような多層膜共振器構造を有する半導体レーザを複数積層した構造を用いた場合、反射多層膜の反射率が特定波長の光に対して十分でないために各単位発光素子において高い発光効率が得られず、発熱量も大きくなりやすい。また、各単位発光素子の反射多層膜が他の単位発光素子の発する光に対しても一定の反射率を持つため、相互に発光を阻害し、発光効率が低くなると共に、発熱量が増大しやすい。この結果、例えば複数の波長域の光を発光可能な発光素子を集積して表示装置を形成する場合においては、発熱量の増大のために集積密度を十分に高めることが難しい。10

【0007】

また、従来技術の反射多層膜を用いた共振器構造においては、一次元的な薄膜構造をとるため共振器面内方向に対して閉じ込められる光のモードパターン制御が困難であった。20

【0008】

一方、フォトニック結晶を発光構造に用いる場合には、3 次元フォトニック結晶により実現できる完全フォトニックバンドギャップの波長領域を制御することが難しい。例えば、インバースダイヤモンドオパール構造のフォトニック結晶（高屈折率材料の屈折率：2 . 33、低屈折率材料の屈折率：1 . 00、P B G 中心波長：550 nm）においては、完全フォトニックバンドギャップが約 50 nm 程度の帯域でしか得られず、R G B の波長に対応するすべての光を单一の 3 次元フォトニック結晶で制御することは難しい。

【0009】

フォトニック結晶を構成する高屈折率材料と低屈折率材料との屈折率差が大きいほど P B G が広くなることが知られているが、可視波長域において透明な材料は一般に屈折率が低いため、広い P B G を得ることは難しい（材料：屈折率 TiO<sub>2</sub> : 2 . 3、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 2 . 1、CeO<sub>2</sub> : 2 . 05、ZrO<sub>2</sub> : 2 . 03、GaN : 2 . 4、LiNbO<sub>3</sub> : 2 . 2、LiTaO<sub>3</sub> : 2 . 1、BaTiO<sub>3</sub> : 2 . 3）。上記の材料は赤外波長域で一般的に使用される材料（材料：屈折率 Si : 3 . 4、GaAs : 3 . 6、Ge : 4 . 0）と比較しても屈折率が低いため、特に使用波長領域が可視波長域の場合において広帯域動作を実現することが難しい。30

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の積層型 3 次元フォトニック結晶は、互いに異なるフォトニックバンドギャップを有する複数の 3 次元フォトニック結晶を積層して構成される積層型 3 次元フォトニック結晶であって、前記複数の 3 次元フォトニック結晶はそれぞれの内部に周期欠陥で形成された共振器を有することを特徴とする。また本発明の発光素子は、積層型 3 次元フォトニック結晶とその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。また本発明の画像表示装置は、積層型 3 次元フォトニック結晶を平面的に配置して構成されることを特徴とする。40

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、单一の発光構造から広い波長領域にわたる複数の波長分布を有する光を発することが可能であって、高密度に集積することができ、さらに放射光の放射モードパターンについて制御可能な発光構造を提供できる。50

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

図1は、複数の波長分布を有する光を発する発光構造の概略図である。複数の波長分布を有する光を発する発光構造は、互いに異なるフォトニックバンドギャップを有する複数の3次元フォトニック結晶を、光の放出方向に積層することで得られる。このような複数のフォトニック結晶においては、上層に配置される構成が下層に配置される構成の発する光に対して透明であることが必要である。これにより各層から発せられた光は上層を透過して積層構造の最上面から射出され、複数の異なる波長分布を有する光が混合して放出される発光構造を構成することができる。

【0013】

10

本発明を説明するにあたり、まずフォトニック結晶について説明する。フォトニック結晶は所定の屈折率周期分布を有する構造体であって、フォトニック結晶中では、その屈折率周期より長い波長の光の挙動を制御できることがYablonovitchによって明らかにされている（非特許文献1）。

【0014】

図2は、回折格子による回折の様子を示したものである。回折格子に入射した光は、回折格子の周期や、回折格子への入射角度や光の波長などによって決まる複数の方向（0次、1次、・・・）に回折される。この際に回折を生じる方向は異なる点で散乱された光の位相が相互に強めあう方向である。

【0015】

20

図3は、フォトニック結晶表面における回折の様子を模式的に示したものである。フォトニック結晶は入射光の波長よりも短い屈折率周期構造を有するため、入射光の回折が生じる。特にフォトニック結晶においては、特定の波長を持つ入射光に対して、いずれの方向から結晶に入射した光であっても当該周期構造で回折された結果として生じる光が強めあう方向が全て反射側に分布するように当該周期構造が構成されている。特定の波長を有する光に対して、入射する光線の入射角度によらず回折方向が全て反射側に存在し、結晶表面を透過する回折光が存在しないようにすることで、フォトニック結晶はその波長の光に対しては反射ミラーとして機能し、他の波長に対しては透明性を有するという特徴を有する。

【0016】

30

フォトニック結晶の特徴は、その構造によって決まる特定波長域の光がフォトニック結晶内に存在できない点にあり、通常の結晶物質が持つエネルギー・バンドギャップとの比較から、フォトニック結晶内に存在できない波長域はフォトニック・バンドギャップ（PBG）と呼ばれている。

【0017】

また、あらゆる方向から入射した光に対してフォトニック・バンドギャップを有することは、完全フォトニック・バンドギャップを有すると表現される。図19は従来知られた完全フォトニック・バンドギャップが得られる3次元フォトニック結晶の例である。完全フォトニック・バンドギャップが得られる3次元構造としては、低屈折率材質の内部に高屈折率材質をダイヤモンド型の結晶構造の原子位置に配置したダイヤモンド構造、低屈折率材質の内部に柱状の高屈折率材質を構成した格子層を所定の周期で積層したウッドパイル構造、その他にらせん構造、独自な3次元周期構造等がある。またダイヤモンド構造等の3次元構造において、高屈折率材質内部に低屈折率材質を配置したインバース構造（反転構造）では比較的広い完全フォトニック・バンドギャップが得られる。

40

【0018】

各3次元構造において、高屈折率材質と低屈折率材質の誘電率や構造の大きさ、周期等を適宜最適に選択することによりPBGの中心波長や波長幅を選択することができる。

【0019】

一方、フォトニック結晶内で一定の波長を持つ光の存在が抑制されるのは屈折率周期構造に起因するため、フォトニック結晶の一部について屈折率周期構造を乱した部分（周期

50

欠陥部分)を設けることで、周期欠陥部分付近の実効的な屈折率が変化し、その部分には光が存在することが可能となり、その部分に光を閉じ込めることができる。

#### 【0020】

さらに周期欠陥部分の形状を適当にすることで特定波長の光のみを共振させることができ、周期欠陥部分の構造や大きさを設計することでフォトニック結晶内に任意波長で動作可能な光共振器構造を実現することができる。このような構造は周期欠陥共振器構造として知られている。

#### 【0021】

このような周期欠陥共振器構造(欠陥共振器構造)の特徴は、(1)微細周期構造および欠陥共振器構造を制御することで、PBG内の任意波長の光を共振器内に閉じ込めることができる。(2)PBGを利用した高効率反射特性によって高効率共振器を実現できることが挙げられる。このような欠陥共振器構造を利用して特定波長の光を生成し、それを取り出すことによって、任意波長の光を高効率で発光可能な発光構造やそれを用いた発光素子が実現できる。

10

#### 【0022】

特許文献2には、このような完全フォトニックバンドギャップを構成するフォトニック結晶内部に欠陥共振器構造を設け、更に欠陥共振器構造内部に発光部を設け任意の励起手段によって発光させることで、レーザー発振ができることが開示されている。

#### 【0023】

図4は、特定波長の光を共振する欠陥共振器構造を有するフォトニック結晶における、フォトニックバンドギャップと欠陥共振器構造の共振波長との関係の一例である。図4に示す特性を有するフォトニック結晶の周期構造部分、及び欠陥共振器構造はそれぞれ表1、表2に示す構造を有する。

20

#### 【0024】

##### 【表1】

格子構造	インバースダイヤモンドオパール構造
構成材質1(屈折率)	TiO <sub>2</sub> (n = 2.33)
構成材質2(屈折率)	空気又は真空 (n = 1.00)
格子周期	a = 365 nm
構成材質2の半径	0.30a

30

#### 【0025】

##### 【表2】

欠陥共振器形状	略球状
共振器部の材質(屈折率)	TiO <sub>2</sub> (n = 2.33)
共振器直径(実効値)	231.7 nm

40

#### 【0026】

上記欠陥共振器構造は、欠陥部分として格子点に配置した空気球にTiO<sub>2</sub>(屈折率=2.33)を充填して構成される。

#### 【0027】

図4に示すように、フォトニック結晶は特定波長の光に対して反射ミラーとして機能し、その透過率13をほぼ完全に無くすることができる。フォトニック結晶の透過率13が実質的に無くなる波長域がフォトニックバンドギャップ(PBG)12である。一方、欠陥共振器構造の共振波長は、フォトニック結晶で反射される必要があるから、図4に示すようにフォトニックバンドギャップ12内にその波長が存在する。

50

## 【0028】

上記の周期構造を持つフォトニック結晶は、図4に示すように525nm～575nmの波長帯にフォトニックバンドギャップを有してその波長域の光を反射する。また、上記の欠陥共振器構造では、当該フォトニックバンドギャップに含まれる540nm近辺の光が共振可能である。

## 【0029】

欠陥共振器構造を有することで特定波長の光の共振を行うフォトニック結晶の構造及び材質は上記に限定されることはなく、フォトニックバンドギャップ内に共振波長を有する欠陥共振器構造を形成することができる構造及び材質を選択することができる。

## 【0030】

フォトニック結晶とその内部に形成した欠陥共振器構造によって、複数の波長の光が選択的に放出可能な発光構造を構成する場合、少なくとも下層の単位発光構造から放出された光に対して、その上層が透明なければならない。

## 【0031】

図5は異なる欠陥共振器構造を有する2種類のフォトニック結晶についてのフォトニックバンドギャップと共振波長の関係を示している。図5に示す特性を有する第一及び第二のフォトニック結晶の屈折率周期構造及び欠陥共振器構造はそれぞれ表3、表4に示す構造を有する。

## 【0032】

## 【表3】

	第一のフォトニック結晶	第二のフォトニック結晶
格子構造	インバースダイヤモンド オパール構造	インバースダイヤモンド オパール構造
高屈折率材質（屈折率）	TiO <sub>2</sub> (n=2.33)	TiO <sub>2</sub> (n=2.33)
低屈折率材質（屈折率）	空気又は真空 (n=1.00)	空気又は真空 (n=1.00)
格子周期	a = 365nm	a = 432nm
低屈折率材質（空気球） の半径	0.30a	0.30a
PBG波長域	525nm～575nm	625nm～685nm

10

20

30

## 【0033】

## 【表4】

	第一のフォトニック結晶	第二のフォトニック結晶
欠陥共振器形状	略球状	略球状
共振器部の材質（屈折率）	TiO <sub>2</sub> (n=2.33)	TiO <sub>2</sub> (n=2.33)
共振器直径（実効値）	231.7nm	274.7nm
中心共振波長	540nm	640nm

40

## 【0034】

表4に示す欠陥共振器構造は、どちらのフォトニック結晶においても、欠陥部分として格子点に配置した低屈折率材質（空気球）に媒質（n=2.33）を充填した構造である。

## 【0035】

表3に示すように、フォトニック結晶の持つ周期構造の格子周期を変化させることで、図5のようにフォトニックバンドギャップ12、12aの波長域を変更することができる。

50

## 【0036】

このように、相互にフォトニックバンドギャップが重複しないフォトニック結晶を積層することにより、各フォトニック結晶から発する光を相互に遮ることなく複数の波長の光を選択的に発光可能な発光構造を形成することができる。また、表4に示すように欠陥共振器の実効的な直径を変えることにより、フォトニックバンドギャップ内において共振波長を変化させることができる。

## 【0037】

フォトニック結晶内部の欠陥共振器構造により特定波長の光を共振させて生じる発光を利用する際には、共振した光の一部をフォトニック結晶外に取り出す必要がある。

## 【0038】

図6は3次元フォトニック結晶の周期数と、フォトニックバンドギャップにおける反射率との関係を示している。横軸は結晶の1周期を1単位としている。3次元フォトニック結晶の厚さが数周期程度の場合には一定割合の光が透過するため、欠陥共振器構造を形成するフォトニック結晶の一部を一定割合の光が透過する程度に薄くすることで、欠陥共振器構造から光を取り出すことができる。

## 【0039】

図7はフォトニック結晶中の欠陥共振器構造23から光を取り出す他の構成である。欠陥共振器構造を形成するフォトニック結晶の一部の規則性を乱すことで導波路を形成し、この導波路を介して光を取り出すことができる。導波路構造の種類としては、取り出す波長を含む導波モードを有する線欠陥型導波路24や点欠陥結合型導波路25など様々な導波路構造をとることができる。

## 【0040】

欠陥共振器構造が有する発光媒質を励起して発光させる励起手法としては、外部光源による光励起や電流注入による励起等がある。電流注入による励起の場合には、例えば、A1やCrなどの金属材料やITOなどの透明導電性材料を電極として発光媒質を狭持し発光させることが可能である。また、複数の共振器構造に対して、独立して動作する電極を作製することによって、それぞれの波長の光を独立に制御することも可能である。

## 【0041】

図8は、発光材料に無機発光材料を用いたときの発光構造の一例を示している。無機発光材料からなる発光層803の上下を絶縁層802、804で挟み、更にその両側に電極801、805を具備した構造とすることで発光材料によって決まる波長の光を発する発光部とすることができます。このような発光部を欠陥共振器構造内部に設けることで、欠陥共振器構造によって決まる波長の光を共振させて取り出すことができる。電極には、ITOやインジウムスズ酸化物などの透明材料を用いることが望ましいが、A1やCrなどの金属を用いてもよい。また、無機発光材料の一例として、ZnS:Mn、ZnMgS:Mn、ZnS:Sm、ZnS:Tb、ZnS:Tm、CaS:Eu、SrS:Ce、SrS:Cu、SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Ce、BaAl<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu等を用いることができる。また、絶縁膜としてSiO<sub>2</sub>、SiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SrTiO<sub>3</sub>などが使用できる。無機発光材料、絶縁体はこれらに限定されること無く、電流の注入により発光する構造を形成できれば、この他の材料を用いることができる。また、無機発光材料を用いた発光構造は図8に示したもの以外であってもよい。

## 【0042】

図9は、発光材料に有機発光材料を用いたときの発光構造の一例を示している。有機発光材料を含む発光層903を電子輸送層902とホール輸送層904で挟み、さらに電極901、905で挟み込んだ構造とすることで発光材料によって決まる波長の光を発する発光構造としている。この構造以外にも、電子注入層やホール注入層を備えた構造などがある。発光した光が透過する上部電極901には、ITOやインジウムスズ酸化物などの透明電極材料を用いることが望ましい。背面電極には、ITOやインジウムスズ酸化物のほか、不透明であるA1やCrなどの金属を用いることも可能である。

## 【0043】

10

20

30

40

50

典型的な低分子有機発光材料としてAlq, Eu(DBM)3(Phen), BzBq, DPVBiなど、典型的なホール輸送性低分子材料としてTPD, -NPD, TPT, Spiro-TPD、典型的な電子輸送性低分子材料としてPBD, TAZ, OXD, Bphen、典型的な高分子有機発光材料として、発光層にポリスチレンスルホン酸やカソニアースルホン酸などの酸でドーピングしたポリチオフェンやポリアニリンなどを用いた導電性ポリマーを用いてもよい。以上に挙げた材料以外にも様々な材料を用いることができる。

#### 【0044】

図8、図9に示した以外にも、化合物半導体材料、無機発光材料、有機発光材料、高分子発光材料、量子ドットやナノ結晶を含む発光媒質など用いて欠陥共振器構造内部に電流注入型の発光構造を設けることで、所望の波長を有する光を共振させて取り出すことができる。

10

#### 【0045】

図10は、電流注入用の電極材料として特にITO等の導電性透明電極材料を用いた場合の構成例を示している。電流注入用の電極材料としてITO等を用いる場合には、フォトニック結晶中の欠陥共振器構造から光を取り出すための導波路と兼用する構造にすることで、単純な構成にすることができる。欠陥共振器1001内部に挿入された発光材料1004に対して、フォトニック結晶1002を貫通する透明電極1003により電流を注入し、発光を生じさせる。この際、透明電極1003はフォトニック結晶1002の周期性に対して線欠陥となり、また透明電極1003自体が導波路になるため、欠陥共振器1001で共振された光の一部が透明電極1003を通じてフォトニック結晶外に導かれる。

20

#### 【0046】

また、外部光源による光励起を行う場合には、フォトニックバンドギャップ以外の波長を用いることで、フォトニック結晶内の発光媒質を効率よく励起して発光させることができる。

#### 【0047】

図11は、外部光源により発光層の光励起を行う場合の一例である発光構造1100を示している。フォトニック結晶1102の内部にPBGに含まれる波長の蛍光を発する蛍光物質を内側に含んだ共振器構造1103を有している。また、フォトニック結晶1102の下部には共振器構造1103内の蛍光物質を励起して発光させるために、フォトニック結晶1102のPBGより短波長の光を発する紫外線光源1104が設けられている。更に、フォトニック結晶1102の上部には、共振器構造1103から発せられた光を透過する一方で、紫外線光源1104から発せられた励起光のみを遮断する波長選択フィルター1101が設けられている。

30

#### 【0048】

図11の構成において、外部に設けた制御回路により紫外線光源1104のON/OFFを制御することにより、発光構造の上部に共振器構造1103で共振された光の出力を制御することができる。このような構造にすることによって、フォトニック結晶1102内部に電流注入用の電極などを作り込むことが不要となり、より完全なPBGをもつフォトニック結晶を用いた発光構造を構成することができる。複数のフォトニック結晶を有する発光構造から複数の波長を持つ光を任意に選択して発光するためには、各単位発光構造からの発光のON/OFFを自由に選択するためのスイッチング機構が必要である。

40

#### 【0049】

各フォトニック結晶からの発光をスイッチングする機構としては、発光媒質の発光自体をON/OFFする方法と、欠陥共振器構造（又は単位発光構造）からの光の取り出しをON/OFFする方法がある。電流注入による励起を行う場合には比較的応答性良く発光のON/OFFが可能であるため、注入する電流によりスイッチングをすることが好ましいが、外部光源による光励起の場合には、発光媒体からの発光を継続的に行う一方で、欠陥共振器構造又はフォトニック結晶からの光の取り出しをスイッチングすることが好ま

50

しい。

#### 【0050】

次に3次元フォトニック結晶の作成方法を説明する。ダイヤモンドオパール構造のように格子点に配置される構造が球状である場合は、所定の材質で製作された部材を適宜三次元格子構造に積層して製作可能である。また、格子点に配置される部材の誘電率がそれらの周囲に配置される部材の誘電率と比較して高誘電率であり、特に格子点に配置される材質が低屈折率材料であるインバース構造の場合は、はじめにシリカ球やポリマー球にて3次元格子構造（面心立方構造やダイヤモンドオパール構造など）を作製した後、球と球との隙間に誘電体材料などの格子材料を充填し、最後にシリカ球やポリマー球を取り除く方法が知られている。格子材料の充填方法としては、ゾルゲル法、ナノ粒子充填法などがある。また、シリカ球やポリマー球を取り除く方法としては、溶剤による溶解、焼成による除去などがある。10

#### 【0051】

一方、ウッドパイル構造などについては、リソグラフィ、成膜、エッチングを含む通常の半導体プロセスを応用することによりその各層を製造することが可能である。また、層数の多い結晶を製作する場合には、通常の半導体プロセスにより所定数のパイル構造を作製したのち、ウエハ融着法などを用いてパイル構造同士を貼り合わせる工程を繰り返し行うことで作製できる。

#### 【0052】

以下に、上記技術を用いて作成される積層型3次元フォトニック結晶構造の実施例を説明する。20

#### 【実施例1】

#### 【0053】

電流注入励起型の積層発光構造についての概略図を図12に示す。それぞれ異なる波長の光 $1201\text{a} \sim \text{c}$ を共振して発光するフォトニック結晶が3層重ねられており、各フォトニック結晶は点欠陥共振器部、発光媒質を含む発光部とを有している。各々の構造 $1204\text{a} \sim \text{c}$ を形成するフォトニック結晶構造および共振器構造 $1205\text{a} \sim \text{c}$ について表5、表6に示す。

#### 【0054】

#### 【表5】

	第一のフォトニック 結晶構造	第二のフォトニック結晶 構造	第三のフォトニック結晶 構造
格子構造	インバース ダイヤモンドオパール 構造	インバース ダイヤモンドオパール 構造	インバース ダイヤモンドオパール 構造
構成材質4 (屈折率)	$\text{TiO}_2$ ( $n = 2.33$ )	$\text{TiO}_2$ ( $n = 2.33$ )	$\text{TiO}_2$ ( $n = 2.33$ )
構成材質5 (屈折率)	空気（または真空、 $n = 1.00$ ）	空気（または真空、 $n = 1.00$ ）	空気（または真空、 $n = 1.00$ ）
格子周期	$a = 300\text{nm}$	$a = 365\text{nm}$	$a = 432\text{nm}$
構成材質5の 半径	$0.30a$	$0.30a$	$0.30a$
バンドギャップ 帯域	$428\text{nm} - 476\text{nm}$	$521\text{nm} - 579\text{nm}$	$617\text{nm} - 686\text{nm}$

#### 【0055】

【表 6】

	第一の共振器構造	第二の共振器構造	第三の共振器構造
欠陥共振器形状	略球状	略球状	略球状
欠陥共振器の材質 (屈折率)	T i O 2 (n = 2.33)	T i O 2 (n = 2.33)	T i O 2 (n = 2.33)
共振器直徑	190.4 nm	231.7 nm	274.7 nm
中心共振波長	443 nm	540 nm	640 nm

10

## 【0056】

本実施例においては、各発光部 1211 に無機発光材料を用いて図 8 に示した構造により発光を生じさせている。各層の共振器内部に具備した発光部に電極 1210 を介して外部から電流を注入することにより特定の波長の光を発生することができる。

## 【0057】

既存の発光材料としては以下のようなものが挙げられる。ZnS や CaS、SrS などの材料を母体として発光中心として希土類イオンを添加すると様々な波長で発光する EL が得られる。例えば、赤色では ZnS を母体に Sm<sup>3+</sup> を添加した ZnS : Sm<sup>3+</sup>、CaS : Ce<sup>3+</sup>、緑色では、ZnS : Tb<sup>3+</sup>、SrS : Ce<sup>3+</sup>、青色では ZnS : Tm<sup>3+</sup>、SrS : Cu<sup>+</sup>などが知られている。これらの無機発光材料を用いて発光させるためには、例えばエレクトロルミネセンスを用いることができる。発光層を絶縁層で狭持しさらに両側に電極を配置した構造により発光層に高電界を安定して印加することで、電界励起による発光が可能である。上記以外にも、化合物半導体材料、有機発光材料、高分子発光材料、量子ドットやナノ結晶を含む発光媒質などを用いてもよい。

20

## 【0058】

また、各共振器上部のフォトニック結晶の層数を、共振器下部のフォトニック結晶の層数よりも少なくすることで、共振した光は上部にのみ放出される。発光部の構造はこれに限定されず、用途に応じて適当な構造を用いることができる。

## 【0059】

図 13 は本実施例における積層発光構造の各層のフォトニックバンドギャップと共振波長との関係を示す。各層はそれぞれ一般の RGB に対応する波長の光を発するように設計されており、各層を形成するフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ (PBG) は、他の層から発せられる光の波長を含まないようにすることで、各層は相互に透明になっている。

30

## 【0060】

必要に応じて各層の発光部に注入する電流をスイッチング手段 1212a～c により ON/OFF することにより、RGB を組み合わせた所望の色合いの光束を発光素子の最上面から放出することができる。本実施例ではフォトニック結晶の発光部に注入する電流の ON/OFF により、発光を ON/OFF 制御しているが、以下に説明する他のスイッチング方法を用いることにより各フォトニック結晶から放出される光の ON/OFF を制御することも可能である。

40

## 【0061】

図 14 は欠陥共振器構造又はフォトニック結晶からの光の取り出しをスイッチングする方法の一例を示している。図 14 (a) は、構成材質 221 および 222 として液晶を採用したフォトニック結晶の層をスイッチング層として有する例を示している。このスイッチング層においては、その外部に設けた電極から印加される電圧で液晶分子の方向を制御することで、液晶分子の誘電率がその方位によって大きく異なることを利用して、フォトニック結晶内の誘電率分布を変化させてそのフォトニックバンドギャップを変化させていく。

## 【0062】

50

図14(a)-1に示すように、液晶を用いたスイッチング層においては、透明電極を介して電圧を印加することで各分散粒子内の液晶分子の配向が揃うため、この状態で下層の欠陥共振器構造で共振された光の波長に対してフォトニックバンドギャップを形成するように液晶分子の特性や、構成材質221の大きさや周期が設定される。

#### 【0063】

他方、上記の構造において、図14(a)-2に示すように、電圧を印加しない場合には各分散粒子内の液晶分子はランダムな配向を持つため、スイッチング層内の誘電率分布はフォトニックバンドギャップを形成するための理想的な分布から外れて、特定波長の光を反射する能力が低下する。この結果、欠陥共振器構造で共振された光に対して一定の透過率を持つようになり、構成材質221により散乱された光がスイッチング層を介して放射されることとなる。上記の構造においては、欠陥共振器構造とスイッチング層間のフォトニック結晶の層数が数層程度であって、欠陥共振器構造が良好に保たれると同時に、欠陥共振器構造で共振された光の一部がスイッチング層にまで到達することが好ましい。10

#### 【0064】

図15は、図14(a)に示したスイッチング層の形成するフォトニックバンドギャップの変化の一例を示す。スイッチング層に電圧が印加された場合には、比較的大きなフォトニックバンドギャップ151が形成され、欠陥共振器構造から放出される光11に対して反射面として機能する。一方、スイッチング層に電圧が印加され無い場合には、スイッチング層が形成するフォトニックバンドギャップ152は不完全となって、欠陥共振器構造から放出される光11を透過する。20

#### 【0065】

図14(a)に示した液晶を用いたスイッチング層において、所望のフォトニックバンドギャップが得られれば、構成材質211は下層の発光構造を形成するフォトニック結晶の構成材質21と同じ材質であっても、異なる材質であっても良い。また、図14(a)では、構成材質211の内部に液晶層が配置されている場合について示したが、配置を逆にして、液晶層内部に構成材質を配置するインバース型をとることも可能である。

#### 【0066】

図14(b)は、構成材質222を強誘電体材料としたフォトニック結晶の層をスイッチング層として有する例を示している。このスイッチング層においては、その外部に設けた電極から印加される電圧で強誘電体層に電界を印加することで、強誘電体材料が微小に変形することを利用して、フォトニック結晶内の誘電率分布を変化させてそのフォトニックバンドギャップを変化させている。30

#### 【0067】

スイッチング層に強誘電体を用いた場合にも、上記説明した液晶を用いる場合と同様に、印加する電圧によってフォトニックバンドギャップを変化させ、下層の欠陥共振器構造から放出される光に対して反射面である場合と透過面である場合とをスイッチングする。

#### 【0068】

図14(b)は構成材質222として強誘電体材料を用いているが、使用する光に対して十分な透過性を持つ強誘電体材料を用いる場合には、構成材質212部分について強誘電体材料としても良い。40

#### 【0069】

図14(c)は、誘電率が可変の層を含む多層膜をスイッチング層として有するフォトニック結晶の一例を示している。このスイッチング層においては、例えば液晶を用いることで、電界を加えることにより特定の方向に関しての誘電率が変化する多層膜を使用している。これにより下層の欠陥共振器から放出される光に対して多層反射膜となる状態と、透過膜になる状態を切り替える。ここで、多層膜に入射する光の角度により反射層として機能しないことを防ぐため、図8に示したような導波路により取り出された光に対して図14(c)に示すようなスイッチング方法を用いることが好ましい。

#### 【0070】

図14(d)-1は、外部からの熱エネルギー供給により誘電率分布を変化させ、P B50

Gを変化させることによりスイッチングする例である。フォトニック結晶1400にヒータ1410を接触させることにより熱エネルギーを供給し、熱による誘電率変化によりPBGの制御が可能である。熱エネルギー供給手段としては図14(d)-2に示すように、フォトニック結晶の吸収波長に対応する光を照射したり、ペルチ工素子を用いたりすればよい。

#### 【0071】

図14(f)は、外力によりフォトニック結晶を変形させることでPBGを変化させることによりスイッチングする例である。フォトニック結晶1400に駆動機構1420を接続した変形機構の一例を示す。駆動機構1420の伸縮によりフォトニック結晶構造に外力が加わることで、フォトニック結晶1400が伸縮し、フォトニック結晶の格子周期、充填率(高屈折材質と低屈折率材質との体積比)等の構造パラメータが変化するために有効屈折率が変化する。これによりPBGを制御し、光のスイッチングを行なうことができる。

#### 【0072】

図14(f)では、フォトニック結晶全体に外力を加えて変形させたが、構造の一部に対して外力を加えてもよく、例えば導波路に外力を加えることでスイッチングしてもよい。

#### 【0073】

また、図14(g)に示すように導波路を形成することによりスイッチングしてもよく、フォトニック結晶1400において導波路のみを駆動機構1420に接続した構造を示す。

#### 【0074】

駆動機構1420が伸長しているときには、導波路部分はフォトニック結晶構造内に配置されており、PBGを形成するため光は外部に漏れないが、駆動機構1420が伸縮した場合、導波路部分はフォトニック結晶構造外部に引き出され、線欠陥導波路が形成されるためフォトニック結晶外部へ光を取り出すことができる。これによりスイッチングすることができる。

#### 【0075】

以上のような発光部を備えた積層型3次元フォトニック結晶により、電流注入型の積層発光構造を実現することができる。また本実施例では、それぞれRGBに対応するフォトニック結晶を3層だけ積層した例について説明したが、層数はこれに限定されることはなく、必要に応じて任意の層数を積層することができる。以上、本実施例によればフルカラー動作する発光素子を実現することができる。

#### 【0076】

また、積層型3次元フォトニック結晶を一画素として、二次元的に配置することにより、外部信号に基づいてRGBを組み合わせて任意の色彩を表現することができる画像表示装置を構成することができる。

#### 【実施例2】

#### 【0077】

紫外光励起型の積層発光構造について図16に示す。フォトニック結晶1602a~cと欠陥共振器構造1603a~c、スイッチング層1601a~cからなるフォトニック結晶が積層され、その最下層に欠陥共振器構造1603a~c内に設けられた蛍光物質を励起可能な波長の光を発する紫外線光源1605が配置され、最上層には当該紫外線光源1605からの光のみを遮断する波長選択フィルター1604が設けられている。

#### 【0078】

紫外線光源1605から発せられる紫外光により、各フォトニック結晶内の欠陥共振器構造1603a~cに設けられた蛍光物質を励起して発光を生じさせる。各欠陥共振器構造1603a~cで共振して取り出された各波長の光はスイッチング層1601a~cの状態に応じて積層発光構造の上部へ透過する。この際に、各欠陥共振器構造1603a~cから取り出される光をRGBの各波長に設計すると、フルカラー動作する紫外光励起型

10

20

30

40

50

の発光素子を実現することができる。

**【0079】**

それぞれのフォトニック結晶構造 1602a～c、欠陥共振器構造 1603a～c は表 5、表 6 に示したものと同様であって、図 16 と同様のフォトニックバンドギャップと共に振波長との関係を有する。ただし欠陥共振器構造 1603a～c は、紫外線励起によって所望の波長の蛍光を発する蛍光物質を有している。紫外線光源 1605 に 400 nm 以下の波長を使用した場合には、表 5 の各フォトニック結晶は当該光に対して透明であるため、紫外光は各欠陥共振器構造 1603a～c 内の蛍光物質を励起することができる。

**【0080】**

紫外光励起により蛍光を発する蛍光物質の一例としては、赤色については、Y2O2S を母体結晶として Eu イオンを不純物として添加した Y2O2S : Eu などを用いることができる。同様に、緑色に対して ZnS : Cu, Al、青色に対して ZnS : Ag, Cl など既存の材料を用いることができる。

**【0081】**

各スイッチング層 1601a～c は図 14(a) で説明したような、液晶を用いたスイッチング層である。外部から入力される信号により、液晶が所定の状態に配向した場合に対応する欠陥共振器構造から発する光の波長を含む P BG を形成し、当該光が単位発光構造外に放出されないようにしている。また、液晶が配向していない場合にはスイッチング層は対応する欠陥共振器構造からの光を透過し、上部に向けて光を放出する。また、いずれのスイッチング層も他の単位発光構造から発せられた光、及び紫外線光源 1605 から発せられた光に対しては透明であるような P GB を有している。

**【0082】**

ただし各スイッチング層 1601a～c の構造は上記で説明したものに限られず、強誘電体を用いたもの等から適宜選択することができる。

**【0083】**

最上層の波長選択フィルター 1604 は、紫外線光源 1605 から発せられた光が積層発光構造外に放射されることを防止しており、公知の紫外線吸収剤、又は紫外線光源 1605 から光の波長に P BG を有するフォトニック結晶としてもよい。特に波長選択フィルター 1604 として所定の P BG を有するフォトニック結晶を用いた場合には、励起用光線の利用効率を高めることができる。

**【0084】**

以上のような積層型 3 次元フォトニック結晶により、光励起型の積層発光構造を実現することができる。また本実施例では、それぞれ RGB に対応するフォトニック結晶を 3 層だけ積層した例について説明したが、層数はこれに限定されることなく、必要に応じて任意の層数を積層することができる。以上、本実施例によればフルカラー動作する発光素子を実現することができる。

**【0085】**

また、積層型 3 次元フォトニック結晶を一画素として、二次元的に配置することにより、外部信号に基づいて RGB を組み合わせて任意の色彩を表現することができる画像表示装置を構成することができる。

**【実施例 3】**

**【0086】**

次に、フォトニック結晶の積層順番による光取り出し効率の違いについて述べる。図 17 に積層型 3 次元フォトニック結晶の模式図を示す。基板上に、点欠陥共振器 1702 を含む 3 次元フォトニック結晶 1701 を積層した。ここで示した 3 つの 3 次元フォトニック結晶構造 (1701b, 1701g, 1701r) を表 7 に示す。

**【0087】**

【表7】

構造	1701b	1701g	1701r
格子構造	インバース ダイヤモンドオパール	インバース ダイヤモンドオパール	インバース ダイヤモンドオパール
構成材質6 (屈折率)	TiO <sub>2</sub> (n = 2.33)	TiO <sub>2</sub> (n = 2.33)	TiO <sub>2</sub> (n = 2.33)
構成材質7 (屈折率)	空気(または真空) (n = 1.00)	空気(または真空) (n = 1.00)	空気(または真空) (n = 1.00)
構成材質7の 半径	0.30a (aは格子周期)	0.30a (aは格子周期)	0.30a (aは格子周期)
格子周期(a)	300 nm	365 nm	432 nm
共振波長	450 nm	530 nm	640 nm

## 【0088】

基板の法線方向に上記3つの3次元フォトニック結晶を積層し、空気側から光を取り出す場合を考える。このとき、基板上に積層する順番として6種類の組み合わせを考えることができる。空気側からより効率的に光を取り出すことができる組み合わせを調べた。6種類の組み合わせについては図18に示す。

10

## 【0089】

格子周期の異なる3次元フォトニック結晶を積層するため、それぞれの構造においてフォトニックバンドギャップ帯域が異なる。フォトニックバンドギャップ帯域においては光はほぼ100%反射される。例えば、表6に記載した構造1701gを8周期の厚みにした場合の波長530 nmにおける透過率は0.099%である。

20

## 【0090】

上記6種類の組み合わせについて、各3次元フォトニック結晶から放出された光が、それぞれ空気側へどのくらい透過するかを調べた。各フォトニック結晶構造の周期数は8周期とし、それぞれの共振波長に対する透過率をもとに比較した結果を表8に示す。(1)基板-R-G-Bの積層順番であるときのGについては、フォトニック結晶1701gから放出された光がフォトニック結晶1701bを透過したときの透過率がGの透過率68.25%である。同様にRについては、フォトニック結晶1701rから放出された光がフォトニック結晶1701g及びフォトニック結晶1701bを透過したときの透過率がRの透過率67.15%である。

30

## 【0091】

【表8】

積層順番	透過率 B (450 nm)	透過率 G (530 nm)	透過率 R (640 nm)
(1) 基板-R-G-B	—	68.25%	67.15%
(2) 基板-G-R-B	—	0.99%	83.95%
(3) 基板-R-B-G	2.98%	—	67.15%
(4) 基板-B-R-G	0.23%	—	79.98%
(5) 基板-G-B-R	7.86%	0.99%	—
(6) 基板-B-G-R	0.23%	1.45%	—

## 【0092】

表8に示すように、基板上にフォトニック結晶を積層するときの順番よりそれぞれの光に対する透過率が異なっており、適切な積層順番を選択することが重要である。

40

50

## 【0093】

特に格子周期に対して光の波長がほぼ等しいか数倍の領域においては、フォトニックバンドギャップ以外の波長帯域において、回折効率が不安定になる現象がアノマリーとして知られている。例えば、Bの光がフォトニック結晶1701rを透過する際の透過率が低くなる。

## 【0094】

表8より積層順番が(1)基板-R-G-Bの場合が最適であることがわかる。つまり、光取り出し対象となる光の波長とフォトニックバンドギャップとが一致しないようにするとともに、それぞれのフォトニックバンドギャップの中心波長が積層方向に対して順に短波長側へ変化するように積層されていることが光取り出し効率を向上する上で重要である。

10

## 【0095】

なお本発明の上記の説明において、光の三原色R G Bとは、発光スペクトルの中心波長が600nm-780nmの範囲にある場合にR(赤色)とし、500nm-600nmの範囲にある場合にG(緑色)とし、380nm-500nmの範囲にある場合にB(青色)としている。

## 【0096】

以上のように、本発明によれば単一の発光構造から広い波長領域にわたる複数の波長分布を有する光を発することが可能であって、高密度に集積することができ、さらに放射光の放射モードパターンについて制御可能な発光構造を提供できる。

20

## 【図面の簡単な説明】

## 【0097】

【図1】複数の波長分布を有する光を発する積層発光構造の概略図

【図2】回折格子による回折の概略図

【図3】フォトニック結晶表面における回折の概略図

【図4】PBGと共振波長との関係図

【図5】2種類のフォトニック結晶についてのPBGと共振波長の関係図

【図6】フォトニック結晶の周期数と反射率との関係図

【図7】欠陥共振器から光を取り出す手段の説明図

【図8】発光材料に無機発光材料を用いたときの発光構造の概略図

30

【図9】発光材料に有機発光材料を用いたときの発光構造の概略図

【図10】導電性透明電極材料を電流注入用電極として用いた時の概略図

【図11】光励起型の発光構造の概略図

【図12】電流注入型発光構造を用いた積層発光構造の概略図

【図13】積層発光構造の各層のフォトニックバンドギャップと共振波長との関係図

【図14】光取り出しをスイッチングする手段の説明図

【図15】スイッチング機構によるフォトニックバンドギャップの変化の説明図

【図16】光励起型発光構造を用いた積層発光構造の概略図

【図17】積層型3次元フォトニック結晶の概略図

【図18】3次元フォトニック結晶の積層順番の説明図

40

【図19】3次元フォトニック結晶構造の説明図

## 【符号の説明】

## 【0098】

11 欠陥共振器構造内の発光強度

12 フォトニックバンドギャップ

13 透過率

151 スイッチング層の透過率(V<sub>on</sub>)

152 スイッチング層の透過率(V<sub>off</sub>)

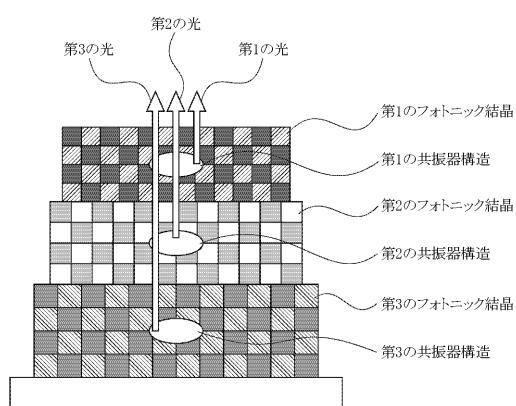
211、212 スイッチング層の構成材料

221 液晶材料

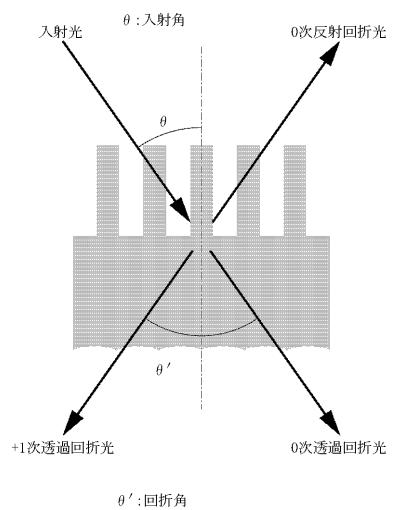
50

2 2 2	強誘電体材料	
2 3	欠陥共振器構造	
2 4	線欠陥導波路構造	
2 5	点欠陥結合型導波路構造	
3 1	透明電極	
3 2	電極	
3 4	多層反射膜	
1 4 0 0	フォトニック結晶	
1 4 1 0	ヒータ	
1 4 2 0	駆動装置	10
8 0 1	上部透明電極	
8 0 2	上部絶縁層	
8 0 3	発光層	
8 0 4	下部絶縁層	
8 0 5	下部透明電極	
9 0 1	背面電極	
9 0 2	電子輸送層	
9 0 3	発光層	
9 0 4	ホール輸送層	
9 0 5	透明電極	20
1 0 0 1	欠陥共振器	
1 0 0 2	フォトニック結晶	
1 0 0 3	透明電極	
1 0 0 4	発光材料	
1 1 0 1	波長選択フィルター	
1 1 0 2	フォトニック結晶	
1 1 0 3	共振器構造	
1 1 0 4	紫外線光源	
1 2 0 1 a ~ c	第1～3のフォトニック結晶からの光	
1 2 0 4 a ~ c	第1～3のフォトニック結晶	30
1 2 0 5 a ~ c	第1～3の共振器構造	
1 2 1 0	電極	
1 2 1 1	発光部	
1 2 1 2 a ~ c	スイッチング手段	
1 6 0 1 a ~ c	第1～3の光	
1 6 0 2 a ~ c	第1～3のフォトニック結晶	
1 6 0 3 a ~ c	第1～3の共振器構造	
1 6 0 4	波長選択フィルター	
1 6 0 5	励起光源	
1 6 0 6 a ~ c	第1～3のフォトニック結晶からの発光	40
1 6 0 7 a ~ c	スイッチング手段	
1 7 0 1	3次元フォトニック結晶	
1 7 0 2	欠陥共振器	

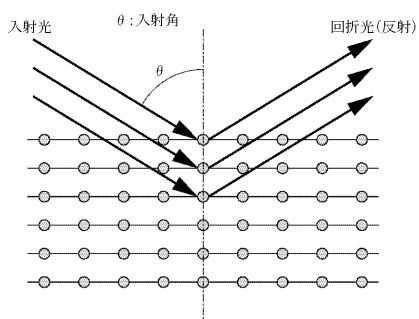
【図1】



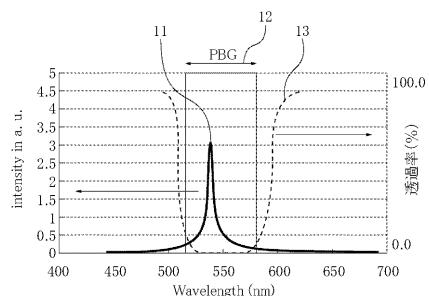
【図2】



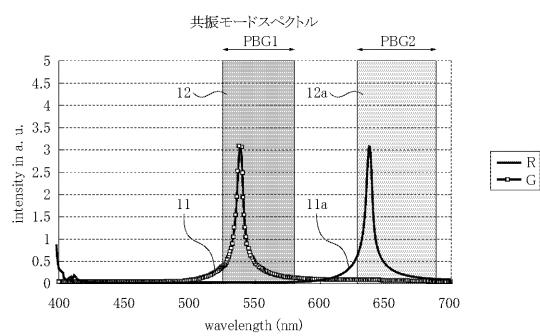
【図3】



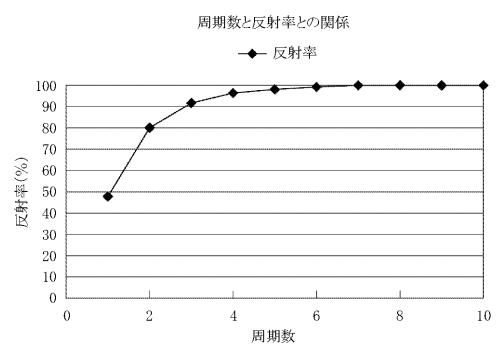
【図4】



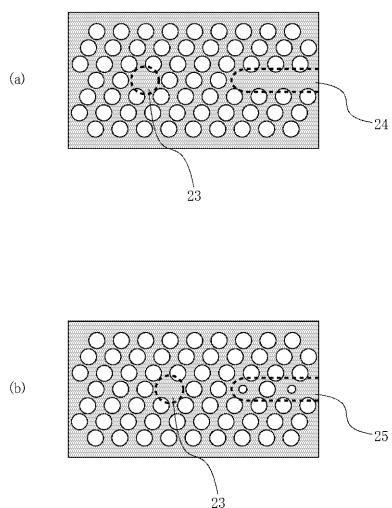
【図5】



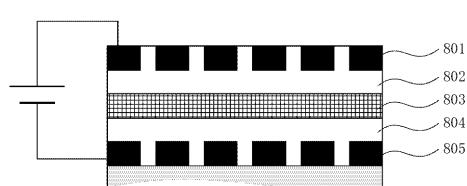
【図6】



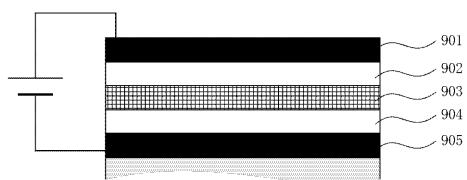
【図7】



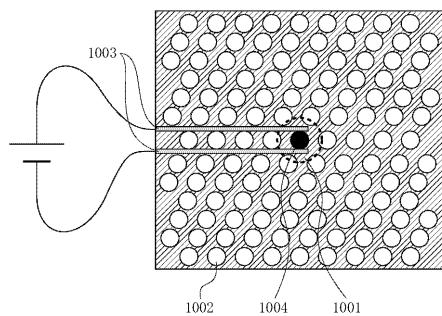
【図8】



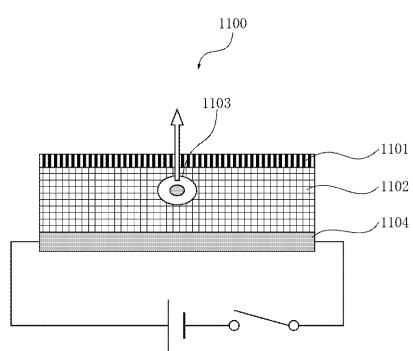
【図9】



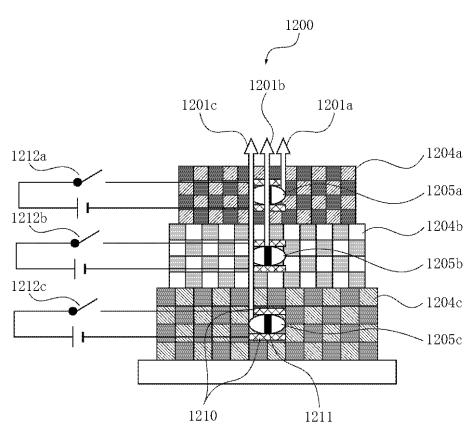
【図10】



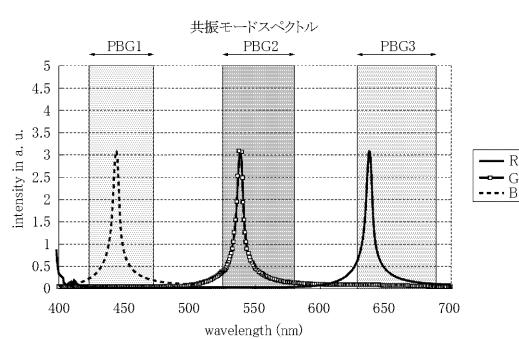
【図11】



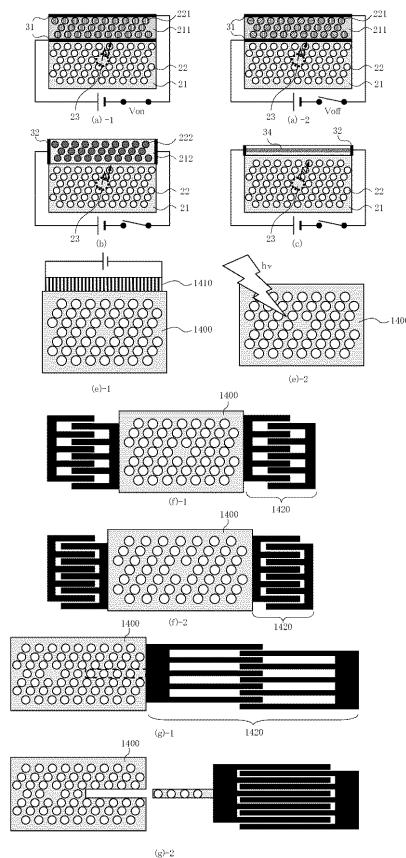
【図12】



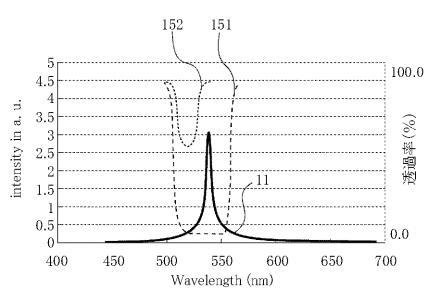
【図13】



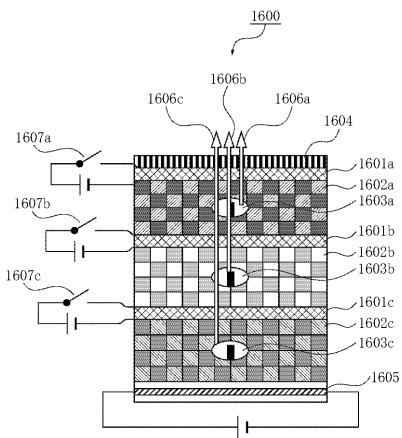
【図14】



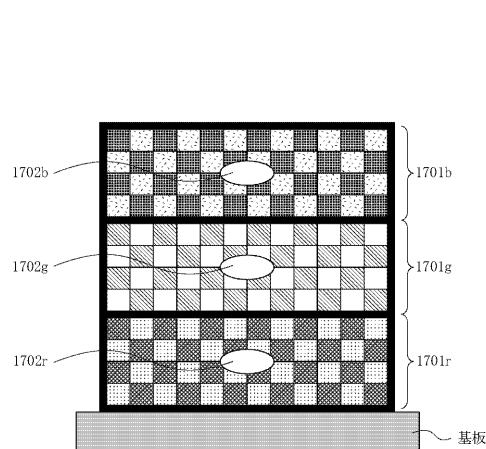
【図15】



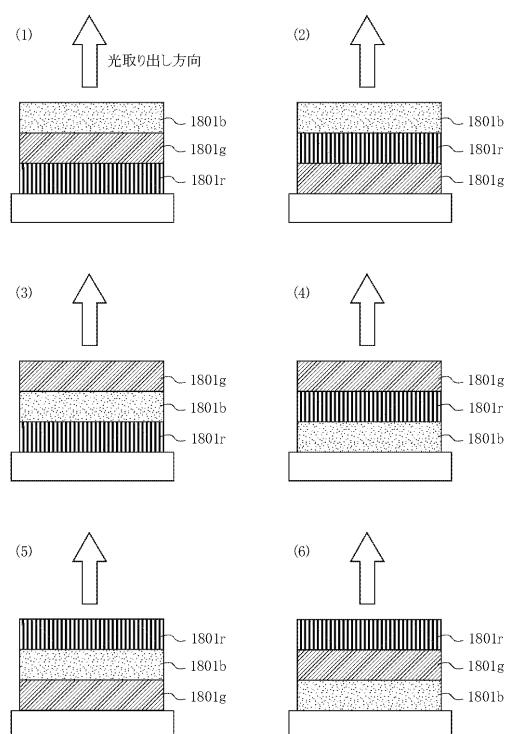
【図16】



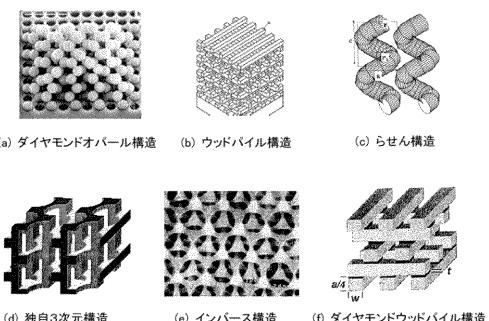
【図17】



【図18】



【図19】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許出願公開第2003/0235229(US, A1)  
特開平07-094819(JP, A)  
特開2004-006567(JP, A)  
特開平07-263752(JP, A)  
特開2003-179315(JP, A)  
米国特許出願公開第2004/0062505(US, A1)  
特開2005-157336(JP, A)  
Makoto Okano, Alongkarn Chutinan, and Susumu Noda, Analysis and design of single-defect cavities in a three-dimensional photonic crystal, PHYSICAL REVIEW B, 2002年10月17日, Vol.66, 165211

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00 - 3/30  
Cini  
JSTPlus (JDreamII)