

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02014/171457

発行日 平成29年2月23日 (2017. 2. 23)

(43) 国際公開日 平成26年10月23日 (2014. 10. 23)

(51) Int.Cl.			F I	テーマコード (参考)
<b>GO2B</b>	<b>1/02</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2B 1/02	2H249
<b>GO2B</b>	<b>5/18</b>	<b>(2006.01)</b>	GO2B 5/18	5F151
<b>HO1L</b>	<b>31/068</b>	<b>(2012.01)</b>	HO1L 31/06	300
<b>HO1L</b>	<b>31/054</b>	<b>(2014.01)</b>	HO1L 31/04	620

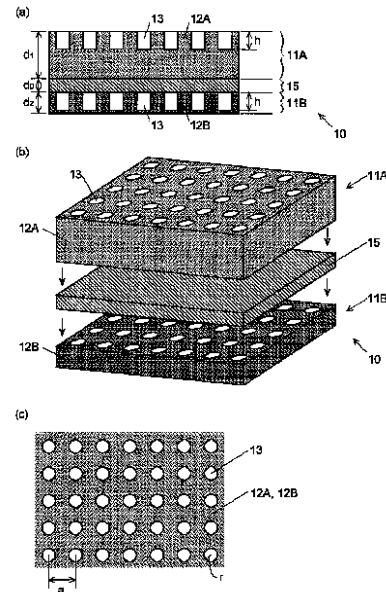
審査請求有 予備審査請求有 (全 26 頁)

出願番号	特願2015-512489 (P2015-512489)	(71) 出願人	503360115 国立研究開発法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(21) 国際出願番号	PCT/JP2014/060731	(74) 代理人	110001069 特許業務法人京都国際特許事務所
(22) 国際出願日	平成26年4月15日 (2014. 4. 15)	(72) 発明者	野田 進 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内
(31) 優先権主張番号	特願2013-86902 (P2013-86902)	(72) 発明者	オスクイ アルダバン 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内
(32) 優先日	平成25年4月17日 (2013. 4. 17)	(72) 発明者	田中 良典 京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学 法人京都大学大学院工学研究科内
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	Fターム(参考)	2H249 AA03 AA13 AA42 AA55 AA65 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶及びそれを利用した光機能デバイス

(57) 【要約】

本発明は、特定の周波数範囲内において、より多数の共振周波数で光を共振させることができるフォトニック結晶を提供することを目的とする。板状部材内に周期的な屈折率分布が形成されているフォトニック結晶構造形成体11A、11Bが複数、該板状部材の厚み方向に互いに離間して設けられており、複数のフォトニック結晶構造形成体のうちの少なくとも1つが、前記周波数範囲内にある少なくとも2つの周波数の光に共振し、該2つの周波数が他のフォトニック結晶構造形成体のうちの少なくとも1つにおける共振周波数と異なるように、前記複数のフォトニック結晶構造形成体の屈折率分布が設定されている。



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

所定の周波数範囲内にある複数の周波数の光に共振するフォトニック結晶であって、板状部材内に周期的な屈折率分布が形成されているフォトニック結晶構造形成体が複数、該板状部材の厚み方向に互いに離間して設けられており、

前記複数のフォトニック結晶構造形成体のうちの少なくとも1つが、前記周波数範囲内にある少なくとも2つの周波数の光に共振し、該2つの周波数が他のフォトニック結晶構造形成体のうちの少なくとも1つにおける共振周波数と異なるように、前記複数のフォトニック結晶構造形成体の屈折率分布が設定されていることを特徴とするフォトニック結晶。

10

**【請求項 2】**

前記フォトニック結晶構造形成体の数が2であることを特徴とする請求項1に記載のフォトニック結晶。

**【請求項 3】**

前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が、前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点に配置されることにより形成されていることを特徴とする請求項1又は2に記載のフォトニック結晶。

**【請求項 4】**

各異屈折率領域の平面形状が最小値と最大値の間でランダムな大きさを有するように、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項3に記載のフォトニック結晶。

20

**【請求項 5】**

前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点から該板状部材に平行に、最大ずれ量  $p_{max}$  (0) 以下のずれ量  $p$  だけランダムにずれて配置されることにより、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項1又は2に記載のフォトニック結晶。

**【請求項 6】**

請求項1～5のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする、所定の周波数範囲内の複数の周波数における光の共振を利用した光機能デバイス。

**【請求項 7】**

所定の周波数範囲の光を電力に変換する、半導体から成る光電変換層が1対の電極の間に設けられた光電変換装置であって、前記光電変換層内に請求項1～5のいずれかに記載のフォトニック結晶が形成されていることを特徴とする光電変換装置。

30

**【請求項 8】**

各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体を接合したものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、導電体から成るスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項7に記載の光電変換装置。

**【請求項 9】**

前記フォトニック結晶構造形成体の数が2であって、一方のフォトニック結晶構造形成体がp型半導体に形成され、他方のフォトニック結晶構造形成体がn型半導体に形成されていることを特徴とする請求項7に記載の光電変換装置。

40

**【請求項 10】**

各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体を接合したものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、第1導電体層、絶縁体層、第2導電体層をこの順に積層したスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項7に記載の光電変換装置。

**【請求項 11】**

所定の周波数範囲の光を散乱させる回折素子であって、請求項1～5のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする回折素子。

**【発明の詳細な説明】**

50

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、光電変換素子や回折素子等の光機能デバイスに用いることができるフォトリソグラフィック結晶、及び該フォトリソグラフィック結晶を用いた光機能デバイスに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

光電変換素子の一種である太陽電池は、入射した光（電磁波）のエネルギーを電流に変換するための、半導体から成る光電変換層を有している。入射光は、光電変換層に吸収され、そのエネルギーによって光電変換層の半導体内の電子が価電子帯から伝導帯に励起されることにより、電流に変換される。ここで、入射光が光電変換層に吸収されることなく通過すると、光電変換の効率が低下する。そのため、太陽電池では、光電変換層における入射光の吸収率を高めることが重要となる。この吸収率を高める手法の1つとして、光電変換層の厚みを大きくすることが挙げられるが、半導体材料の使用量が増加するため、コストが上昇してしまう、あるいは電子の取り出しの効率が低下してしまうという問題がある。

10

## 【0003】

特許文献1には、入射光の吸収率を高めるためにフォトリソグラフィック結晶（Photonic Crystal）を用いた太陽電池が記載されている。フォトリソグラフィック結晶は、一般的には周期的な屈折率分布を有する構造体をいい、特許文献1に記載の太陽電池では、光電変換層内に空孔が周期的に配置されることにより屈折率分布が形成されている。このような構成により、光電変換層に入射した光のうち、屈折率分布の周期に対応した特定の周波数を有する光が定在波を形成して共振状態を形成するため、その光は光電変換層内に留まり易くなる。そのため、当該特定の周波数（共振周波数）において、フォトリソグラフィック結晶が無い場合よりも入射光の吸収率が向上する。ここで、フォトリソグラフィック結晶内では、通常、単一構造であっても単一の周期のみが存在するというのではなく、複数の周期が存在することから、複数の周波数において定在波が形成される。例えば、正方格子状の屈折率分布を有するフォトリソグラフィック結晶では、正方格子の周期長 $a$ に対応する波長となる周波数の他、単位格子である正方形の対角線の長さの半分である $(2^{1/2}/2)a$ に対応する波長やそれらの整数倍の波長となる周波数の定在波が形成される。従って、屈折率分布の周期構造を適切に設定することにより、光電変換層において光電変換が可能な周波数範囲の全体に亘って、複数の共振周波数の光における吸収率を高めることができる。

20

30

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

【特許文献1】国際公開W02011/083674号

【特許文献2】国際公開W02005/086302号

【特許文献3】国際公開W02007/029661号

【特許文献4】特開2001-074955号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

40

## 【0005】

しかしながら、このようにフォトリソグラフィック結晶を用いた太陽電池では、複数の共振周波数において光の吸収率を高めることができるものの、それでもなお、光電変換が可能な周波数範囲の全体としては共振する周波数の部分が少ないため、入射光は十分に利用されるとはいえない。従って、光電変換が可能な周波数範囲内において、より多数の共振周波数で光を共振させることができれば、光の吸収率をより高めることができると期待される。

## 【0006】

本発明が解決しようとする課題は、特定の周波数範囲内において、より多数の共振周波数で光を共振させることができるフォトリソグラフィック結晶、及び該フォトリソグラフィック結晶を用いた光

50

機能デバイスを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するために成された本発明に係るフォトニック結晶は、  
所定の周波数範囲内にある複数の周波数の光に共振するフォトニック結晶であって、  
板状部材内に周期的な屈折率分布が形成されているフォトニック結晶構造形成体が複数、  
該板状部材の厚み方向に互いに離間して設けられており、  
前記複数のフォトニック結晶構造形成体のうちの少なくとも1つが、前記周波数範囲内  
にある少なくとも2つの周波数の光に共振し、該2つの周波数が他のフォトニック結晶構  
造形成体のうちの少なくとも1つにおける共振周波数と異なるように、前記複数のフォト  
ニック結晶構造形成体の屈折率分布が設定されている  
ことを特徴とする。

10

【0008】

本発明に係るフォトニック結晶では、複数設けられたフォトニック結晶構造形成体（こ  
こで、「フォトニック結晶構造形成体」とは、フォトニック構造が形成された物体の意味  
である。）の少なくとも1つ（これを「第1形成体」とする）が、前記周波数範囲内  
にある少なくとも2つの周波数の光に共振し、且つ、それら2つの周波数が他のフォトニッ  
ク結晶構造形成体のうちの少なくとも1つ（これを「第2形成体」とする）における共振  
周波数と異なる。このように、第1形成体と第2形成体の共振周波数が異なるため、それ  
ら2つの形成体に着目すると、第1形成体又は第2形成体が単独で存在する場合よりも、  
多くの共振周波数の光に共振する。従って、本発明に係るフォトニック結晶は、前記周波  
数範囲内において、より多数の共振周波数で光を共振させることができる。

20

【0009】

なお、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が接していると、それら2つのフォ  
トニック結晶構造形成体内の光同士で相互作用が生じ、それにより定在波が形成されな  
くなるおそれがある。そのため、本発明では、フォトニック結晶構造形成体同士を、前記板  
状部材の厚み方向に互いに離間するように設ける。

【0010】

各フォトニック結晶構造形成体における共振周波数は、例えば周期的屈折率分布の周期  
長や、フォトニック結晶構造形成体の平均の屈折率等を調整することにより、設定する  
ことができる。このような共振周波数の設定は、当業者であれば、例えば特許文献2、3等  
の開示に基づいて行うことができるものである。

30

【0011】

フォトニック結晶構造形成体では、周期的な屈折率分布を2次元状に形成してもよいし  
、3次元状に形成してもよい。作製の容易さという点からは、前記板状部材とは屈折率が  
異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点に配置されることにより  
形成されている2次元状のフォトニック結晶構造形成体を用いることが望ましい。異屈折  
率領域は、板状部材とは屈折率が異なる材料から成る部材であってもよいが、板状部材に  
空孔を空けたものであってもよい。後者の方が容易に形成することができる。

【0012】

また、フォトニック結晶構造形成体には、前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領  
域が該部材に平行な2次元格子の各格子点から該板状部材に平行に、最大ずれ量  $p_{max}$  ( $0$ )  
以下のずれ量（距離） $p$ だけランダムに（すなわち、ランダムな大きさ及び方向に）  
ずれて配置されることにより、周期的な屈折率分布が形成されているものを用いること  
もできる。このように、周期性を有する2次元格子の格子点を基準としつつ、そこからず  
れ量  $p$  というランダムネスを導入することにより、フォトニック結晶構造形成体内にお  
ける、各共振周波数を有する光の強度は低下するものの、共振周波数の周囲の周波数にお  
ける光の強度が増加する。すなわち、周波数を横軸、光の強度を縦軸とするグラフにお  
いて、ランダムネスの導入により、共振周波数を中心とするピークの幅が広がる。これによ  
り、前記周波数範囲の全体におけるフォトニック結晶構造形成体内の光の強度を高めるこ

40

50

とができる。

【0013】

あるいは、フォトニック結晶構造形成体には、前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点に配置され、各異屈折率領域の平面形状が最小値と最大値の間でランダムな大きさを有するように、周期的な屈折率分布が形成されていてよい。この場合にも、屈折率分布にランダムネスが導入され、それにより、前記周波数範囲の全体におけるフォトニック結晶構造形成体内の光の強度を高めることができる。

【0014】

本発明に係るフォトニック結晶は、前記周波数範囲内の光を効率良く利用することができる光機能デバイスに用いることができる。

10

そのような光機能デバイスの一例として、所定の周波数範囲の光を電力に変換する、半導体から成る光電変換層が1対の電極の間に設けられた光電変換装置であって、前記光電変換層内に、本発明に係るフォトニック結晶が設けられている光電変換装置が挙げられる。この光電変換装置は、典型的には、太陽電池や光センサとして用いることができる。

【0015】

この光電変換装置では、前記周波数範囲内の光が光電変換層に入射すると、本発明に係るフォトニック結晶の各フォトニック結晶構造形成体内に、該フォトニック結晶構造形成体の共振周波数を有する定在波が形成される。このような定在波が形成された光は、光電変換層に留まり易くなるため、光電変換層に吸収されて電流に変換され易くなり、その結果、当該共振周波数の光における光電変換効率が高まる。本発明に係るフォトニック結晶では、このような共振周波数が多数存在するため、光電変換効率を一層高めることができる。

20

【0016】

本発明に係る光電変換装置は、各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体（またはp型半導体、真性半導体とn型半導体）を接合されたものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、導電体層により離間されている構成を取ることができる。この場合、各フォトニック結晶構造形成体が1つの光電変換部として機能し、これら光電変換部が導電体層を介して直列に接続される。

【0017】

30

あるいは、各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体（またはp型半導体、真性半導体とn型半導体）を接合されたものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、第1導電体層、絶縁体層、第2導電体層をこの順に積層したスペーサ層により離間されている構成を取ることにもできる。この場合にも、各フォトニック結晶構造形成体がそれぞれ独立した1つの光電変換部として機能する。第1導電体層及び第2導電体層は、それに隣接するフォトニック結晶構造形成体から成る光電変換部の電極として用いることができ、絶縁体層は光電変換部同士を電氣的に絶縁する機能を有する。

【0018】

前記光電変換層における前記半導体は、典型的にはp型半導体とn型半導体を接合したものである。このようなp-n接合型の半導体を用いる場合には、フォトニック結晶構造形成体の数を2つとし、一方のフォトニック結晶構造形成体をp型半導体に、他方のフォトニック結晶構造形成体をn型半導体に形成すればよい。あるいは、p型半導体とn型半導体の間に真性半導体を介挿した構成を取ることにもできる。

40

【0019】

また、光機能デバイスの他の例として、所定の周波数範囲の光を散乱させる回折素子であって、本発明に係るフォトニック結晶を有するものが挙げられる。フォトニック結晶において光の共振が生じる条件、すなわち光の定在波が形成される条件は、ブラッグ反射が生じる条件と等しい。ブラッグ反射は光の回折現象の1つであるため、このようなブラッグ反射の条件を満たすフォトニック結晶は、回折素子として用いることもできる。

【0020】

50

本発明に係る回折素子は、各共振周波数に対応する周波数の光の定在波がフォトニック結晶構造形成体内に形成され、それらの光が周期的な屈折率分布により回折して外部に取り出される。このような回折素子は、例えば液晶ディスプレイの側部に設けられた光源から光を背面に導いて、該背面から該光を放出する導光板において、光を拡散させるために、好適に用いることができる。

【発明の効果】

【0021】

本発明により、特定の周波数範囲内において、より多数の共振周波数で光を共振させることができるフォトニック結晶を得ることができる。また、このフォトニック結晶を用いて、前記周波数範囲内の光を効率良く利用することができる、光電変換装置や回折素子等の光機能デバイスを得ることができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明に係るフォトニック結晶の第1実施例の構成を示す縦断面図(a)、並びに、該フォトニック結晶が有する第1フォトニック結晶構造形成体、第2フォトニック結晶構造形成体、及びスペーサ層の構成を示す斜視図(b)、並びに、第1フォトニック結晶構造形成体及び第2フォトニック結晶構造形成体の構成を示す上面図(c)。

【図2】第1実施例におけるフォトニック結晶構造形成体内に生じる定在波の例を示す概念図。

【図3】第1実施例における第1フォトニック結晶構造形成体の共振周波数(a)、第2フォトニック結晶構造形成体の共振周波数(b)、及び第1実施例のフォトニック結晶の共振周波数(c)を示す概念図。

20

【図4】第1実施例の第1の変形例を示す上面図。

【図5】第1実施例の第2の変形例を示す縦断面図。

【図6】第1実施例の第3の変形例を示す縦断面図。

【図7】第1実施例の第4の変形例を示す縦断面図。

【図8】本発明に係るフォトニック結晶の第2実施例の構成を示す縦断面図(a)、第1フォトニック結晶構造形成体及び第2フォトニック結晶構造形成体の構成を示す上面図(b)、並びに(b)の部分拡大図(c)。

【図9】第1実施例のフォトニック結晶と第2実施例のフォトニック結晶の共振周波数を比較した概念図。

30

【図10】第2実施例の変形例を示す上面図。

【図11】本発明に係る光電変換素子の第1実施例を示す縦断面図。

【図12】第1実施例及び比較例の光電変換素子における、波長毎の光の吸収率を計算した結果を示すグラフ。

【図13】第1実施例の光電変換素子の変形例を示す縦断面図。

【図14】本発明に係る光電変換素子の第2実施例である太陽電池を示す縦断面図。

【図15】第2実施例の太陽電池と比較例の太陽電池における、波長毎の光の吸収率を計算した結果を示すグラフ。

【図16】第2実施例の太陽電池と比較例の太陽電池における、積分吸収率を計算した結果を示すグラフ。

40

【図17】本発明に係る回折素子の一実施例を用いた導光板を示す縦断面図。

【発明を実施するための形態】

【0023】

本発明に係るフォトニック結晶及び光機能デバイスの実施例を、図1～図17を用いて説明する。

【実施例】

【0024】

(1) 本発明に係るフォトニック結晶の第1実施例

第1実施例のフォトニック結晶10は、図1(a)及び(b)に示すように、第1フォトニッ

50

ク結晶構造形成体 1 1 A、スペーサ層 1 5、及び第 2 フォトニック結晶構造形成体 1 1 B の 3 層が、この順に積層された構成を有する。なお、図 1 (b)では、これら 3 層の構成を示すために、隣接する層同士を離して描いたが、実際には、図 1 (a)に示すように、隣接する層同士は接している。以下では、「フォトニック結晶構造形成体」を「PC 構造形成体」と略記する。

#### 【0025】

第 1 PC 構造形成体 1 1 A は、p 型シリコン半導体から成る第 1 板状部材 1 2 A に、円柱状の空孔 1 3 が多数、正方格子状に周期的に配置されて成る。空孔 1 3 の円柱の高さ方向は第 1 板状部材 1 2 A の厚み方向に一致しており、該第 1 板状部材 1 2 A の厚み  $d_1$  よりも、該円柱の高さ  $h$  は低い。第 2 PC 構造形成体 1 1 B は、n 型シリコン半導体から成る第 2 板状部材 1 2 B に、第 1 PC 構造形成体 1 1 A と同様に円柱状の空孔 1 3 が多数、正方格子状に周期的に配置されて成る。第 1 PC 構造形成体 1 1 A と第 2 PC 構造形成体 1 1 B の構成要素の大きさを比較すると、空孔 1 3 の円柱の半径  $r$  及び高さ  $h$ 、並びに正方格子の周期長  $a$  は同じであるが、第 1 板状部材 1 2 A の厚み  $d_1$  よりも第 2 板状部材 1 2 B の厚み  $d_2$  の方が薄いという点で相違する。従って、第 1 PC 構造形成体 1 1 A よりも第 2 PC 構造形成体 1 1 B の方が、板状部材中で空孔が占める体積の割合が高く、それゆえ平均屈折率が低い。

10

#### 【0026】

スペーサ層 1 5 の材料には、本実施例では、目的の周波数領域（前述の「所定の周波数範囲」）が可視光領域である場合に使用可能な、可視光に対して透明であって且つ導電性を有するインジウム・錫酸化物（ITO）を用いた。このスペーサ層 1 5 の材料も、フォトニック結晶の用途等に応じて種々のものを用いることができる。また、例えば p 型半導体、真性半導体及び n 型半導体をこの順で接合した pin 型太陽電池で本実施例のフォトニック結晶を用いる場合には、スペーサ層 1 5 の材料に板状部材より屈折率の低い他の材料の真性半導体を用いてもよい。

20

#### 【0027】

第 1 実施例のフォトニック結晶では、目的の周波数領域（例えば可視光領域、太陽電池の光電変換を効率よく行うことができる領域など）内にある様々な周波数の光の混合光が外部から導入されると、第 1 PC 構造形成体 1 1 A 及び第 2 PC 構造形成体 1 1 B のそれぞれにおいて、配置された空孔の周期長に対応して、複数の周波数（波長）の定在波が形成される。これら複数の定在波には、例えば図 2 に示すように、波面が格子に平行であって、空孔の周期長  $a$  と等しい波長  $\lambda_{11}=a$  を有するものや、波面が格子に対して  $45^\circ$  傾斜した方向を向き、波長  $\lambda_{21}=(2^{1/2}/2)a$  を有するもの、あるいはそれらの波長の整数倍の波長を有するもの、等が挙げられる。

30

#### 【0028】

本実施例では、第 1 PC 構造形成体 1 1 A と第 2 PC 構造形成体 1 1 B は、共に正方格子であって同じ格子定数  $a$  を有するため、それらの内部における定在波の波長が等しい。しかし、内部での波長が同じであっても、第 1 PC 構造形成体 1 1 A と第 2 PC 構造形成体 1 1 B では平均屈折率が異なるため、定在波の周波数は両者で異なる。従って、フォトニック結晶 1 0 内に導入される前、及びフォトニック結晶 1 0 から取り出された後の光の波長も、第 1 PC 構造形成体 1 1 A 内の定在波に関するものと、第 2 PC 構造形成体 1 1 B 内の定在波に関するものでは相違する。

40

#### 【0029】

従って、第 1 PC 構造形成体 1 1 A と第 2 PC 構造形成体 1 1 B における定在波の周波数（共振周波数）及びフォトニック結晶外での波長の相違により、フォトニック結晶 1 0 は個々の PC 構造形成体が単独で存在する場合よりも共振周波数の数を多くすることができる。この点を、図 3 を用いて説明する。図 3 の (a) ~ (c) の各図は、横軸を周波数、縦軸を光の強度としたグラフであり、(a)では第 1 PC 構造形成体 1 1 A 内の、(b)では第 2 PC 構造形成体 1 1 B 内の、(c)では両者を合わせたフォトニック結晶 1 0 内の光の強度の周波数による変化を示している。これら各グラフ内にはいずれも、共振周波数を中心する

50

ピークが複数現れており、(a)第1PC構造形成体11Aと(b)第2PC構造形成体11Bを比較すると共振周波数が異なっている。そのため、第1PC構造形成体11Aの共振周波数と第2PC構造形成体11Bの共振周波数の双方が、(c)フォトニック結晶10の共振周波数となる。

#### 【0030】

各PC構造形成体内に閉じ込められる定在波の光は、該光の波長程度の距離だけ、該PC構造形成体に垂直な方向に浸み出す。そのため、第1PC構造形成体11Aと第2PC構造形成体11Bの距離が前記光の波長の距離よりも短い場合には、2つのPC構造形成体の間で光の相互作用が生じる。このような光の相互作用は、第1PC構造形成体11Aと第2PC構造形成体11Bが接していると定在波が形成されなくなる原因となるおそれがあるが、両者を少し離しておく、一方のPC構造形成体の共振周波数を有する光が、他方のPC構造形成体の方に導入されたとしても、当該他方のPC構造形成体において、当該一方のPC構造形成体による光の共振も生じさせることができる。このような光の相互作用が、目的とする周波数領域のうち少なくとも一部において生じるように、第1PC構造形成体11Aと第2PC構造形成体11Bの距離、すなわちスペーサ層15の厚みは、目的の周波数領域のうち周波数が最小(波長が最大)である光の、スペーサ層15内における波長よりも短くすることが望ましい。また、このような相互作用が目的とする周波数領域全体で生じるように、前記距離は、目的の周波数領域のうち周波数が最大(波長が最小)である光の、スペーサ層15内における波長よりも短くすることが、より望ましい。

10

20

#### 【0031】

##### (2) 第1実施例のフォトニック結晶の変形例

第1実施例では、2つのPC構造形成体における周期長 $a$ を等しくしたが、図4(a)に示すように、両者の周期長を異なる値 $a_1$ 、 $a_2$ としてもよい(変形例1)。これにより、2つのPC構造形成体内での共振波長が互いに異なる値になるため、両PC構造形成体の厚み $d$ が等しくとも、両者の共振周波数を異なる値にすることができる。

#### 【0032】

また、第1実施例では、2つのPC構造形成体における空孔13の径 $r$ を等しくしたが、図4(b)に示すように、両者の空孔の径を異なる値 $r_1$ 、 $r_2$ としてもよい(変形例2、フォトニック結晶10B)。これにより、第1実施例と同様に、2つのPC構造形成体の平均屈折率を異なる値にすることができ、それにより、両PC構造形成体の厚み $d$ 及び周期長 $a$ が等しくとも、両者の共振周波数を異なる値にすることができる。あるいは、図5に示すように、2つのPC構造形成体における空孔13の高さを異なる値 $h_1$ 、 $h_2$ としてもよい。

30

#### 【0033】

第1実施例では、1個のフォトニック結晶に、PC構造形成体を2つ設ける例を示したが、図6に示すように、PC構造形成体を3つ以上設けてもよい(変形例3、フォトニック結晶10C)。図6に示した例では、第1実施例における2つのPC構造形成体の間に、第3PC構造形成体11Cが設けられている。第3PC構造形成体11Cは、厚み $d_3$ が $d_1$ と $d_2$ の間の値を有し、空孔13が他の2つのPC構造形成体に形成されたものと同じ形状及び大きさ且つ同じ周期長 $a$ で正孔格子状に形成されている。これにより、第3PC構造形成体11C内には、その内部における波長が他のPC構造形成体と同じであって、周波数及びフォトニック結晶外における波長が異なる定在波が形成される。これにより、変形例3のフォトニック結晶では、第1実施例よりもさらに、共振周波数の数を多くすることができる。

40

#### 【0034】

その他、空孔13の形状は円柱状には限られず、三角柱や四角柱(直方体)等の角柱状、円錐状、三角錐や四角錐等の角錐状、部分球状、部分楕円球状等の種々の形状のものを用いることができる。空孔13が配置される周期も、正方格子状には限られず、三角格子状、長方格子状、斜方格子状等とすることができる。また、第1板状部材12A及び第2

50



板状部材 1 2 B の材料は上記のものには限られず、目的の周波数領域内の光の定在波が P C 構造形成体内に形成されるように、該周波数領域内の光が伝播することが可能な材料であればよい。さらには、ここまで説明した板状部材に異屈折率領域を周期的に配置した 2 次元フォトニック結晶以外にも、例えば特許文献 4 に記載の 3 次元フォトニック結晶など、種々の形態のフォトニック結晶を用いることもできる。

#### 【 0 0 3 5 】

あるいは、図 7 に示すように、第 1 板状部材 1 2 A には p 型半導体層 1 2 A P と n 型半導体層 1 2 A N を接合したものを、第 2 板状部材 1 2 B にも p 型半導体層 1 2 B P と n 型半導体層 1 2 B N を接合したものを、用いてもよい（変形例 4）。この場合、スペーサ層 1 5 には、導電体から成るものを用いてもよい（図 7 (a)、フォトニック結晶 1 0 D）し、第 1 導電体層 1 5 1、絶縁体層 1 5 3、第 2 導電体層 1 5 2 をこの順で積層した 3 層構造のものを用いてもよい（図 7 (b)、フォトニック結晶 1 0 E）。このようなフォトニック結晶は、後述の光電変換装置において好適に用いることができる。

10

#### 【 0 0 3 6 】

### (3) 第 2 実施例のフォトニック結晶

第 2 実施例のフォトニック結晶 2 0 は、図 8 (a) に示すように、第 1 P C 構造形成体 2 1 A、スペーサ層 2 5、及び第 2 P C 構造形成体 2 1 B の 3 層が、この順に積層された構成を有する点では、第 1 実施例のフォトニック結晶 1 0 と同様である。また、第 1 P C 構造形成体 2 1 A 及び第 2 P C 構造形成体 2 1 B（の板状部材）の厚み  $d_1$  及び  $d_2$  も第 1 実施例と同様である。

20

#### 【 0 0 3 7 】

第 1 P C 構造形成体 2 1 A 及び第 2 P C 構造形成体 2 1 B 内には、半径  $r$ 、高さ  $h$  の空孔 2 3 が多数設けられている。各空孔 2 3 は、円柱における円の中心が、正方格子（図 8 (b) 中に一点鎖線で示したものの）の各格子点から  $p$  だけずれて配置されている。ずれの大きさ  $p$  は、0 ~ 最大ずれ量  $p_{max}$  の範囲内に分布しており、その分布には法則性が無い。また、空孔 2 3 が格子点からずれる方向も一様ではなく、各空孔 2 3 間での相違には法則性が無い。すなわち、各空孔 2 3 は、正方格子の格子点から、最大ずれ量  $p_{max}$ （0）以下のずれ量  $p$  だけランダムにずれて配置されている。

#### 【 0 0 3 8 】

なお、第 1 P C 構造形成体 2 1 A と第 2 P C 構造形成体 2 1 B を比較したときの空孔 2 3 の位置のずれ方は、両者において同じであってもよいし、異なってもよい。

30

#### 【 0 0 3 9 】

第 2 実施例のフォトニック結晶 2 0 では、空孔 2 3 が正方格子の各格子点からランダムにずれて配置されていることにより、2 次元フォトニック結晶には、周期性がある程度保持されつつランダムネスが導入された屈折率分布が形成される。これにより、第 1 P C 構造形成体 2 1 A 及び第 2 P C 構造形成体 2 1 B では、横軸を周波数、縦軸を光の強度としたグラフで見ると、格子点の基本的な周期性に対応した複数の波長においてピークを有するが、ランダムネスによって、第 1 実施例よりもピークトップの高さが低くなる一方、幅が広がるため、ピークトップからある程度離れた周波数では強度が大きくなる（図 9 (a)）。そして、フォトニック結晶 2 0 では、共振周波数の数は第 1 実施例のフォトニック結晶と同様に個々の P C 構造形成体よりも多くなり、個々のピークは本実施例における P C 構造形成体と同様にピークトップの高さが低くなりながらも幅が広がる。このようにピークの幅が広がることにより、目的とする周波数領域全体で見れば、フォトニック結晶内の光の強度を、第 1 実施例よりも強めることができる。また、空孔 2 3 を格子点からランダムにずらして配置することにより、共振モードのもつ放射方向依存性が小さくなることから、入射角度の変化に対して吸収特性の変化が小さい、という特性が得られる。

40

#### 【 0 0 4 0 】

最大ずれ量  $p_{max}$  を大きくすると、隣接する空孔同士が重なることがある。このように空孔同士が重なると、複数の空孔が 1 つの異屈折率領域となるため、正方格子による周期性が必要以上に乱れる。また、複数の空孔の輪郭が重なった点において、P C 構造形成体

50

の板状部材が空孔側に向かって尖った形状となるため、作製し難い、という問題が生じる。そのため、最大ずれ量  $p_{max}$  は、空孔（異屈折率領域）の形状及び大きさを勘案して、隣接する空孔同士が分離する（重ならない）ように設定することが望ましい。

【0041】

(4) 第2実施例フォトニック結晶の変形例

第2実施例のフォトニック結晶20のように空孔23を格子点からランダムにずらす代わりに、図10に示すように、空孔23Aを正方格子の各格子点に配置し、各空孔23Aの大きさ、例えば半径が $r_{min} \sim r_{max}$ の範囲内でランダムになるようにしてもよい。これにより、第2実施例のフォトニック結晶20と同様に、横軸を周波数、縦軸を光の強度としたグラフにおける個々のピークは、ピークトップの高さが低くなりながらも幅が広がるため、目的とする周波数領域全体ではフォトニック結晶内の光の強度を強めることができる。なお、ここでは空孔23Aの大きさを半径で定めたが、面積や体積などで定めてもよい。また、この場合にも、隣接する空孔同士が分離する（重ならない）ように、 $r_{max}$ を設定することが望ましい。

10

【0042】

(5) 本発明に係る光電変換装置の第1実施例

図11及び図12を用いて、本発明に係る光電変換装置の第1実施例を説明する。

本実施例の光電変換装置30は、図11に示すように、上記第1実施例のフォトニック結晶10を板状の透明電極321及び板状の裏面電極322で挟んだものである。

【0043】

20

上記のように、フォトニック結晶10を構成する第1板状部材12Aはp型シリコン半導体から成り、第2板状部材12Bはn型シリコン半導体から成るため、このフォトニック結晶10は、導電性のスペーサ層15を挟んだpn接合から成る光電変換層31として機能する。この光電変換層は、空気中における波長が約600~1100nm、周波数が $2.7 \times 10^{14} \sim 5.0 \times 10^{14}$ Hzの範囲内の光を吸収して電流に変換することができるものである。第1板状部材12Aの厚み $d_1$ は700nm、第2板状部材12Bの厚み $d_2$ は300nmとした。空孔13は、第1PC構造形成体11A及び第2PC構造形成体11Bのいずれにおいても、高さ $h$ が260nm、半径が200nm、正方格子の周期長 $a$ が700nmである。スペーサ層15の厚み $d_0$ は230nmである。スペーサ層15及び透明電極321は、上記周波数範囲内の光に対して透明なITOから成り、裏面電極322は銀から成る。

30

【0044】

第1実施例の光電変換装置30は、周波数が上記範囲内にある光が透明電極321側から光電変換層31内に入射すると、光電変換層31であるフォトニック結晶10における多数の共振周波数に対応した周波数の光による定在波がフォトニック結晶10内に形成される。これにより、それら共振周波数の光が光電変換層31内に留まり易くなり、光電変換層31に吸収されて電流に変換され易くなる。その結果、光電変換効率が高まる。ここで、第1実施例の光電変換装置30は、PC構造形成体が複数（2つ）設けられているため、同様のPC構造形成体を1つだけ設けた場合よりも共振周波数の数が多く、それゆえ光電変換効率を高めることができる。

【0045】

40

図12(a)に、第1実施例の光電変換装置30につき、太陽光を入射させた場合における、光電変換層31の光の吸収率を計算した結果を、空気中における光の波長を横軸としたグラフで示す。図12(a)には併せて、比較例として、フォトニック結晶ではなく、光入射面にランバーシアンテクスチャ（Lambertian texture）と呼ばれる凹凸が設けられた太陽電池（比較例1）と、フォトニック結晶及びランバーシアンテクスチャのいずれも設けられていない太陽電池（比較例2）における光の吸収率のグラフを示す。ここで、第1実施例、比較例1及び2では、光電変換層を構成する半導体材料やその量を等しくすることにより、フォトニック結晶の空孔やテクスチャ構造の有無以外の、光の吸収に関する条件を等しくした。図12(a)より、対象とする波長帯の全体に亘って吸収率のグラフを積分したうえで規格化することにより求められる積分吸収率が、比較例1では43.0%、比較

50

例 2 では 10.2% であるのに対して、第 1 実施例では 48.8% という、2 つの比較例よりも高い値が得られた。

【0046】

さらに、第 1 実施例の光電変換装置 30 につき、フォトニック結晶 10 で吸収された光を、第 1 PC 構造形成体 11A において吸収された光 (図 12(b)) と、第 2 PC 構造形成体 11B において吸収された光 (図 12(c)) に分けて、吸収率をグラフに示す。これらのグラフ内に縦方向の矢印で示した複数の波長において、第 1 PC 構造形成体 11A ではほとんど吸収されず、第 2 PC 構造形成体 11B において高い効率で吸収されることがわかる。すなわち、第 1 実施例では、PC 構造形成体が 1 つ (第 1 PC 構造形成体 11A) のみである場合よりも、吸収率の高い波長 (共振波長、共振周波数) の数を多くすることができ、それにより、光電変換層 31 の全体としての吸収率も高めることができる。

10

【0047】

図 13 に、第 1 実施例の光電変換装置の変形例として、上記変形例 4 のフォトニック結晶 10D を用いた光電変換装置 30A、及びフォトニック結晶 10E を用いた光電変換装置 30B を示す。これらの光電変換装置 30A、30B では、第 1 PC 構造形成体 11A と第 2 PC 構造形成体 11B は、前述のようにいずれも p 型半導体層と n 型半導体を積層した構成を有し、それぞれ独立に光電変換装置として機能する。そして、光電変換装置 30A では、独立した 2 つの光電変換装置をスペーサ層 15 が直列に接続する役割を有する。一方、光電変換装置 30B では、スペーサ層 15 中の第 1 導電体層 151 は第 1 PC 構造形成体 11A に、第 2 導電体層 152 は第 2 PC 構造形成体 11B に、それぞれ電流を注入する電極としての役割を有する。また、絶縁体層 153 は、2 つの光電変換層を電氣的に分離する役割を有する。

20

【0048】

(6) 本発明に係る光電変換装置の第 2 実施例

図 14 ~ 図 16 を用いて、本発明に係る光電変換装置の第 2 実施例を説明する。

第 2 実施例の光電変換装置 40 は、図 14 に示すように、上記第 2 実施例のフォトニック結晶 20 を板状の透明電極 421 及び板状の裏面電極 422 で挟んだものである。透明電極 421 及び裏面電極 422 の材料は、第 1 実施例の光電変換装置で用いたものと同じである。

30

【0049】

本実施例では、第 1 PC 構造形成体 21A 及び第 2 PC 構造形成体 21B における最大ずれ量  $p_{max}$  が 1 以下の複数の値において、波長毎の吸収率、及び積分吸収率を計算で求めた。本実施例では、最大ずれ量  $p_{max}$  の値は、空孔の周期長に対する比で表す。最大ずれ量  $p_{max}$  以外の条件は、第 1 実施例の光電変換装置と同様である。

【0050】

図 15 に、最大ずれ量  $p_{max}$  が 0.1 ~ 0.5 の範囲内で、波長毎の吸収率を求めたグラフを示す。このグラフには複数のピークが見られる。第 1 実施例 (図 12(a)) と比較すると、本実施例では鋭いピークトップは見られない一方、ピークの幅が広く、計算を行った波長範囲に全体に亘って、特定の波長において吸収率が落ち込むことが無い。

40

【0051】

図 16 に、第 2 実施例における積分吸収率と最大ずれ量  $p_{max}$  の関係をグラフに示す。このグラフには、 $p_{max} = 0$ 、すなわち第 1 実施例における積分吸収率も併せて示す。また、比較のために、PC 構造形成体が 1 層のみである場合についても計算を行った結果を示す。このグラフより、全ての  $p_{max}$  の範囲に亘って、PC 構造形成体が 1 層のみの場合よりも本実施例の方が、積分吸収率が高くなっている。また、 $p_{max}$  が 0.4 以下のときに、第 1 実施例よりも積分吸収率が高くなっている。

【0052】

(7) 本発明に係る回折素子の実施例

本発明のフォトニック結晶は、そのまま、回折効果を用いた光取り出し素子として用いることができる。ここでは、図 17 を参照しつつ、本発明に係る回折素子を用いる具体例

50

として、導光板 50 について説明する。導光板 50 は、例えば液晶ディスプレイにおいて、エッジライト型のバックライトユニットに用いられるものである。エッジライト型のバックライトユニットでは一般に、液晶ディスプレイのパネルの側部に設けられた光源から、導光板を介してパネルの背面全体に光を供給し、該背面からパネル全体に照明光を照射する。

#### 【0053】

本実施例の導光板 50 は、図 17 に示すように、フォトニック結晶 10 に、スペーサ層 15 とは反対側の第 2 PC 構造形成体 11B の面に反射板 52 を設けた構成を有する。但し、本実施例では、第 1 板状部材 12A 及び第 2 板状部材 12B には、可視光を吸収し難い材料であるアクリル等のプラスチックやガラス等を用いる。この構成において、フォトニック結晶 10 が回折素子 51 の役割を有する。導光板 50 の側部には、回折素子 51 内に導入される可視光の光源 61 が設けられる。なお、光源 61 は、導光板 50 の構成要素ではないが、導光板 50 と合わせてバックライトユニットを構成する。

10

#### 【0054】

本実施例の導光板 50 では、光源 61 から可視光が回折素子 51 内に導入されると、フォトニック結晶 10 の共振周波数に対応する多数の周波数において光の定在波が形成される。それら定在波はやがて、空孔 13 により散乱され、フォトニック結晶 10 の 2 つの面からフォトニック結晶 10 の外に放出される。ここで、反射板 52 が設けられた側に放出された光は反射板 52 により反射されるため、放出光はいずれも、反射板 52 が設けられた側とは反対側の面から導光板 50 の外に放出される。

20

#### 【0055】

本実施例の導光板 50 では、フォトニック結晶 10 の共振周波数に対応する多数の周波数の光を高い確率で散乱させることができるため、バックライトの発光の効率を高めることができる。

#### 【符号の説明】

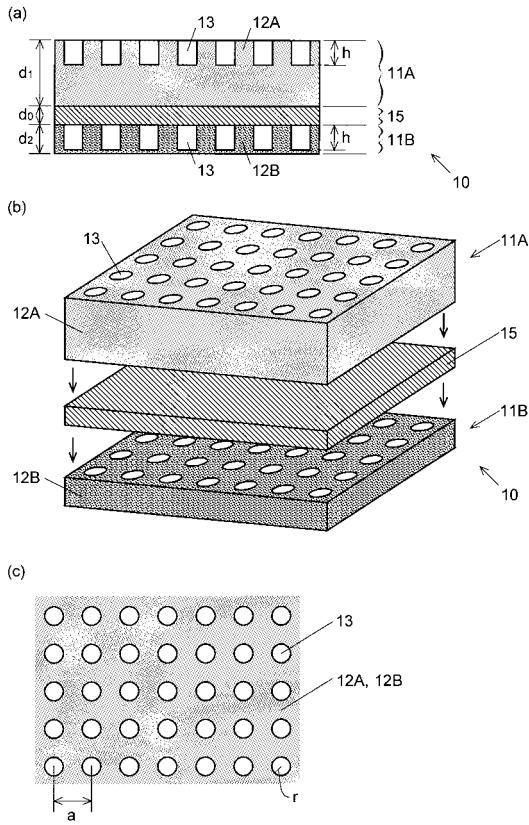
#### 【0056】

10、10B、10C、10D、20...フォトニック結晶  
 11A、21A...第1フォトニック結晶(PC)構造形成体  
 11B、21B...第2フォトニック結晶(PC)構造形成体  
 11C...第3フォトニック結晶(PC)構造形成体  
 12A...第1板状部材  
 12AN...第1n型半導体層  
 12AP...第1p型半導体層  
 12B...第2板状部材  
 12BN...第1n型半導体層  
 12BP...第1p型半導体層  
 13、23...空孔  
 15、25...スペーサ層  
 151...第1導電体層  
 152...第2導電体層  
 153...絶縁体層  
 30、30A、40...光電変換装置  
 31...光電変換層  
 321、421...透明電極  
 322、422...裏面電極  
 50...導光板  
 51...回折素子  
 52...反射板

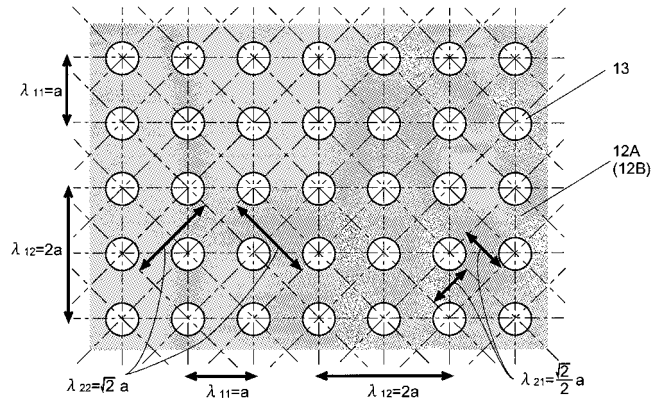
30

40

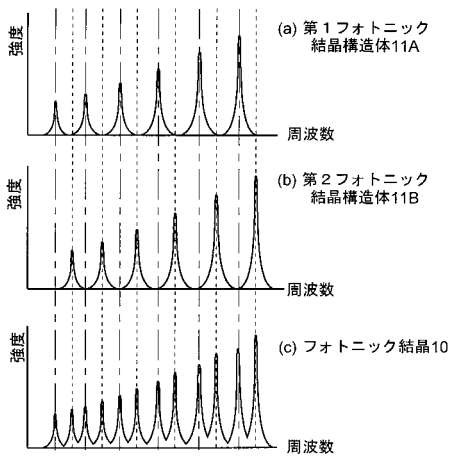
【 図 1 】



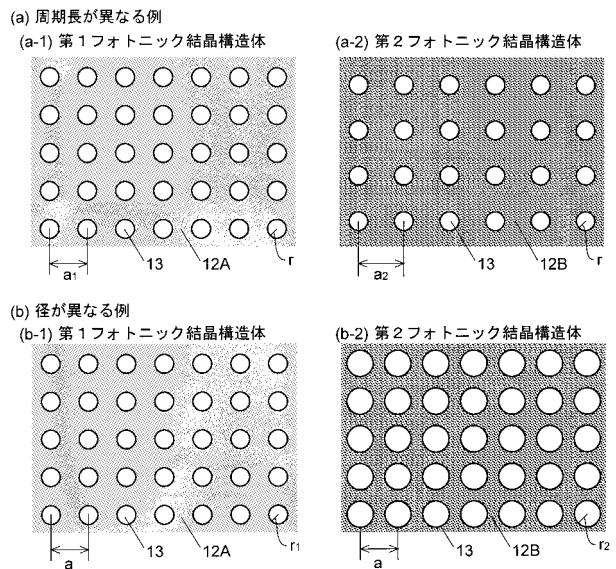
【 図 2 】



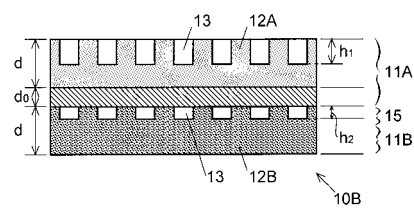
【 図 3 】



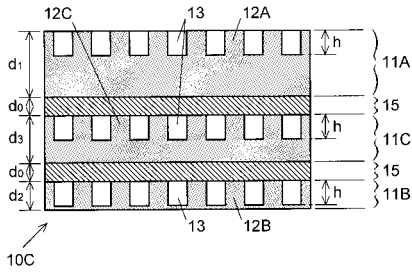
【 図 4 】



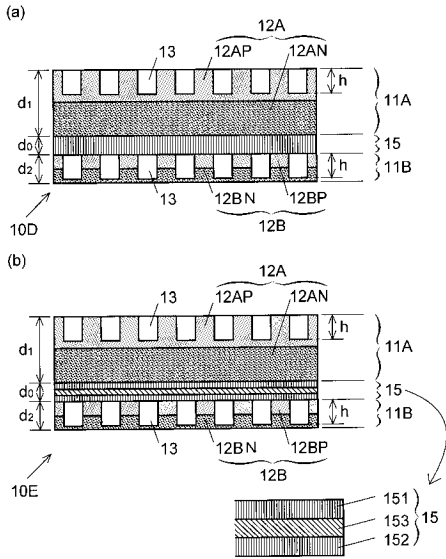
【 図 5 】



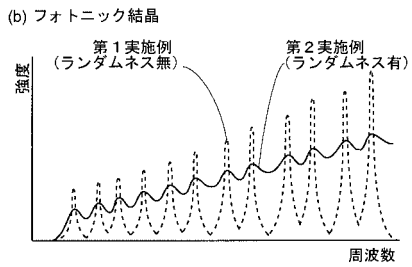
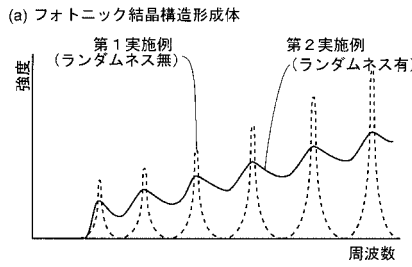
【図6】



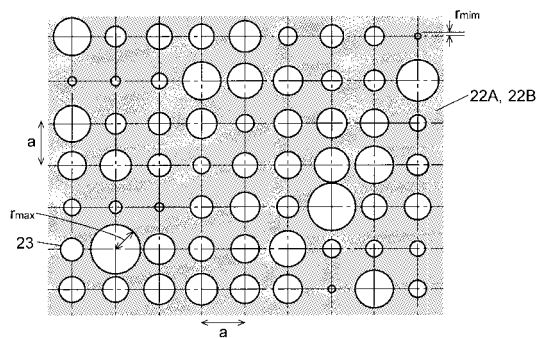
【図7】



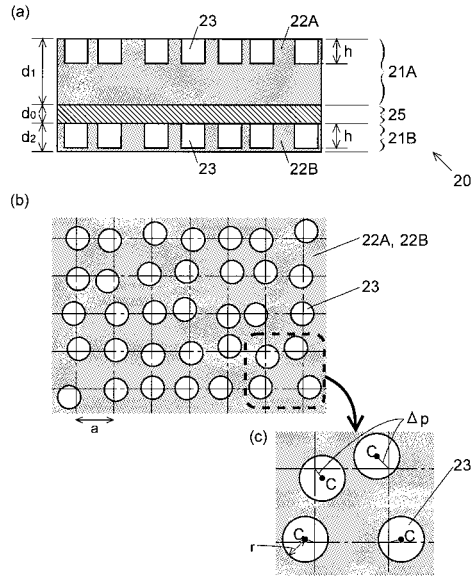
【図9】



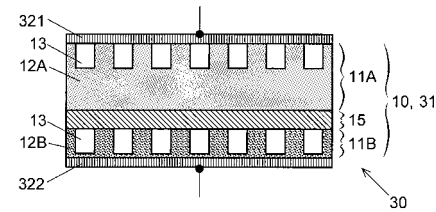
【図10】



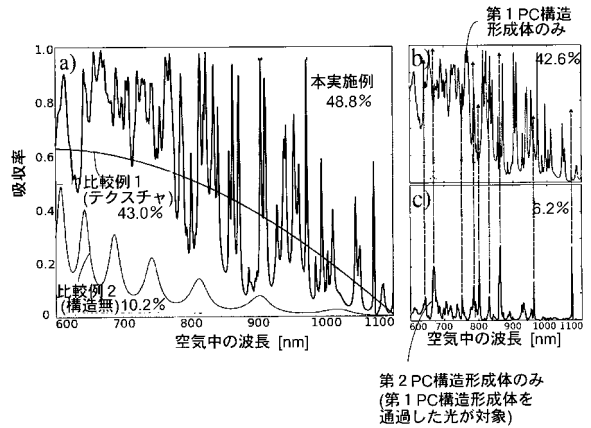
【図8】



【図11】

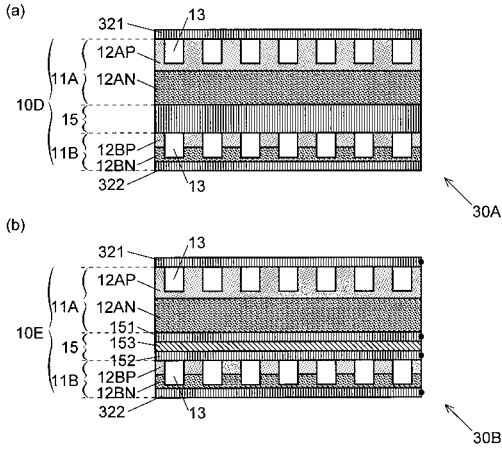


【図12】

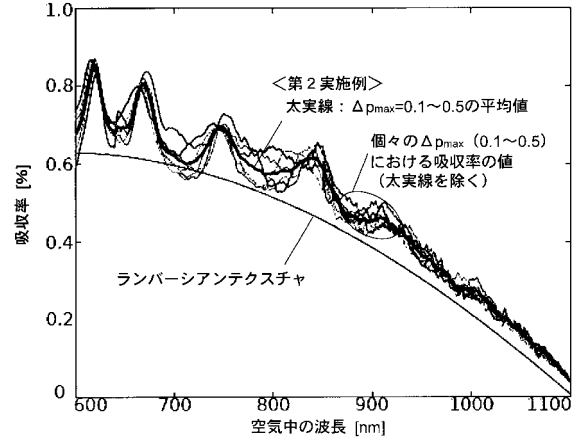


第2 PC構造形成体のみ (第1 PC構造形成体を通過した光が対象)

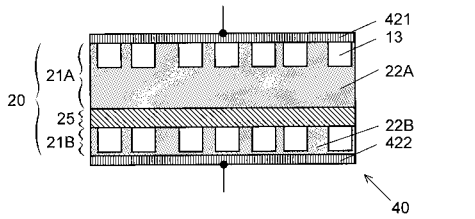
【 図 1 3 】



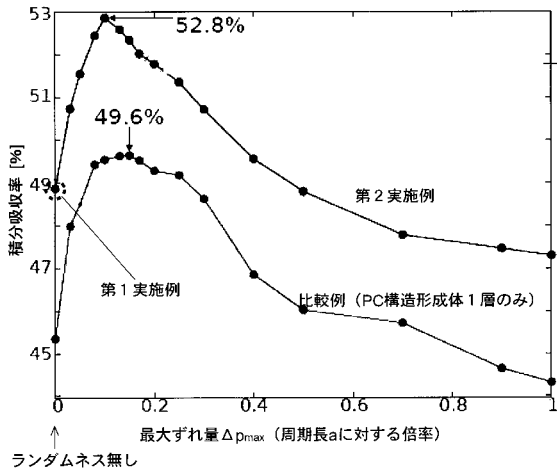
【 図 1 5 】



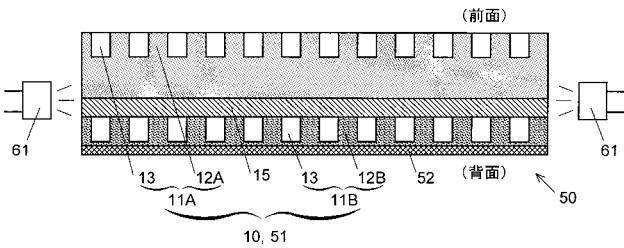
【 図 1 4 】



【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



## 【手続補正書】

【提出日】平成26年11月12日(2014.11.12)

## 【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定の周波数範囲内にある複数の周波数の光に共振するフォトニック結晶であって、板状部材内に周期的な屈折率分布が形成されているフォトニック結晶構造形成体が複数、該板状部材の厚み方向に互いに離間して設けられており、

前記複数のフォトニック結晶構造形成体のうちの1つである第1フォトニック結晶構造形成体が、前記周波数範囲内にある少なくとも2つの共振周波数の光に共振し、該2つの共振周波数が他のフォトニック結晶構造形成体のうちの1つである第2フォトニック結晶構造形成体における全ての共振周波数と異なり、該第2フォトニック結晶構造形成体における共振周波数のうち少なくとも1つが前記2つの共振周波数の間の値を有するように、前記第1フォトニック結晶構造形成体及び前記第2フォトニック結晶構造形成体の屈折率分布が設定されている

ことを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項2】

前記フォトニック結晶構造形成体の数が2であることを特徴とする請求項1に記載のフォトニック結晶。

【請求項3】

前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が、前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点に配置されることにより形成されていることを特徴とする請求項1又は2に記載のフォトニック結晶。

【請求項4】

各異屈折率領域の平面形状が最小値と最大値の間でランダムな大きさを有するように、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項3に記載のフォトニック結晶。

【請求項5】

前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な2次元格子の各格子点から該板状部材に平行に、最大ずれ量  $p_{max}$  ( $> 0$ ) 以下のずれ量  $p$  だけランダムにずれて配置されることにより、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項1又は2に記載のフォトニック結晶。

【請求項6】

請求項1～5のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする、所定の周波数範囲内の複数の共振周波数における光の共振を利用した光機能デバイス。

【請求項7】

所定の周波数範囲の光を電力に変換する、半導体から成る光電変換層が1対の電極の間に設けられた光電変換装置であって、前記光電変換層内に請求項1～5のいずれかに記載のフォトニック結晶が形成されていることを特徴とする光電変換装置。

【請求項8】

各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体を接合したものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、導電体から成るスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項7に記載の光電変換装置。

【請求項9】

前記フォトニック結晶構造形成体の数が2であって、一方のフォトニック結晶構造形成体がp型半導体に形成され、他方のフォトニック結晶構造形成体がn型半導体に形成され



ていることを特徴とする請求項 7 に記載の光電変換装置。

【請求項 10】

各フォトニック結晶構造形成体が p 型半導体と n 型半導体を接合したものに形成されており、隣接する 2 つのフォトニック結晶構造形成体が、第 1 導電体層、絶縁体層、第 2 導電体層をこの順に積層したスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項 7 に記載の光電変換装置。

【請求項 11】

所定の周波数範囲の光を散乱させる回折素子であって、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする回折素子。

【手続補正書】

【提出日】平成27年10月16日(2015.10.16)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の周波数範囲内にある複数の周波数の光に共振するフォトニック結晶であって、板状部材内に周期的な屈折率分布が形成されているフォトニック結晶構造形成体が複数、該板状部材の厚み方向に互いに離間して設けられており、

前記複数のフォトニック結晶構造形成体のうちの 1 つである第 1 フォトニック結晶構造形成体が、前記周波数範囲内にある少なくとも 2 つの共振周波数の光に共振し、該 2 つの共振周波数が他のフォトニック結晶構造形成体のうちの 1 つである第 2 フォトニック結晶構造形成体における全ての共振周波数と異なり、該第 2 フォトニック結晶構造形成体における共振周波数のうち少なくとも 1 つが前記 2 つの共振周波数の間の値を有するように、前記第 1 フォトニック結晶構造形成体及び前記第 2 フォトニック結晶構造形成体の屈折率分布が設定されている

ことを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項 2】

前記フォトニック結晶構造形成体の数が 2 であることを特徴とする請求項 1 に記載のフォトニック結晶。

【請求項 3】

前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が、前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な 2 次元格子の各格子点に配置されることにより形成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶。

【請求項 4】

各異屈折率領域の平面形状が最小値と最大値の間でランダムな大きさを有するように、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項 3 に記載のフォトニック結晶。

【請求項 5】

前記板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域が該板状部材に平行な 2 次元格子の各格子点から該板状部材に平行に、最大ずれ量  $p_{max}$  ( 0 ) 以下のずれ量  $p$  だけランダムにずれて配置されることにより、前記フォトニック結晶構造形成体の周期的な屈折率分布が形成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶。

【請求項 6】

請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする、所定の周波数範囲内の複数の共振周波数における光の共振を利用した光機能デバイス。

【請求項 7】

所定の周波数範囲の光を電力に変換する、半導体から成る光電変換層が 1 対の電極の間

に設けられた光電変換装置であって、前記光電変換層内に請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載のフォトニック結晶が形成されていることを特徴とする光電変換装置。

【請求項 8】

各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体を接合したものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、導電体から成るスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項 7 に記載の光電変換装置。

【請求項 9】

前記フォトニック結晶構造形成体の数が2であって、一方のフォトニック結晶構造形成体がp型半導体に形成され、他方のフォトニック結晶構造形成体がn型半導体に形成されていることを特徴とする請求項 7 に記載の光電変換装置。

【請求項 10】

各フォトニック結晶構造形成体がp型半導体とn型半導体を接合したものに形成されており、隣接する2つのフォトニック結晶構造形成体が、第1導電体層、絶縁体層、第2導電体層をこの順に積層したスペーサ層により離間されていることを特徴とする請求項 7 に記載の光電変換装置。

【請求項 11】

所定の周波数範囲の光を散乱させる回折素子であって、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載のフォトニック結晶を有することを特徴とする回折素子。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0022

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0022】

【図 1】本発明に係るフォトニック結晶の第 1 実施例の構成を示す縦断面図(a)、並びに、該フォトニック結晶が有する第 1 フォトニック結晶構造形成体、第 2 フォトニック結晶構造形成体、及びスペーサ層の構成を示す斜視図(b)、並びに、第 1 フォトニック結晶構造形成体及び第 2 フォトニック結晶構造形成体の構成を示す上面図(c)。

【図 2】第 1 実施例におけるフォトニック結晶構造形成体内に生じる定在波の例を示す概念図。

【図 3】第 1 実施例における第 1 フォトニック結晶構造形成体の共振周波数(a)、第 2 フォトニック結晶構造形成体の共振周波数(b)、及び第 1 実施例のフォトニック結晶の共振周波数(c)を示す概念図。

【図 4】第 1 実施例の(a)第 1 の変形例、及び(b)第 2 の変形例を示す上面図。

【図 5】第 1 実施例の第 3 の変形例を示す縦断面図。

【図 6】第 1 実施例の第 4 の変形例を示す縦断面図。

【図 7】第 1 実施例の第 5 の変形例を示す縦断面図。

【図 8】本発明に係るフォトニック結晶の第 2 実施例の構成を示す縦断面図(a)、第 1 フォトニック結晶構造形成体及び第 2 フォトニック結晶構造形成体の構成を示す上面図(b)、並びに(b)の部分拡大図(c)。

【図 9】第 1 実施例のフォトニック結晶と第 2 実施例のフォトニック結晶の共振周波数を比較した概念図。

【図 10】第 2 実施例の変形例を示す上面図。

【図 11】本発明に係る光電変換素子の第 1 実施例を示す縦断面図。

【図 12】第 1 実施例及び比較例の光電変換素子における、波長毎の光の吸収率を計算した結果を示すグラフ。

【図 13】第 1 実施例の光電変換素子の変形例を示す縦断面図。

【図 14】本発明に係る光電変換素子の第 2 実施例である太陽電池を示す縦断面図。

【図 15】第 2 実施例の太陽電池と比較例の太陽電池における、波長毎の光の吸収率を計算した結果を示すグラフ。

【図16】第2実施例の太陽電池と比較例の太陽電池における、積分吸収率を計算した結果を示すグラフ。

【図17】本発明に係る回折素子の一実施例を用いた導光板を示す縦断面図。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0032

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0032】

また、第1実施例では、2つのPC構造形成体における空孔13の径 $r$ を等しくしたが、図4(b)に示すように、両者の空孔の径を異なる値 $r_1$ 、 $r_2$ としてもよい(変形例2)。これにより、第1実施例と同様に、2つのPC構造形成体の平均屈折率を異なる値にすることができ、それにより、両PC構造形成体の厚み $d$ 及び周期長 $a$ が等しくとも、両者の共振周波数を異なる値にすることができる。あるいは、図5に示すように、2つのPC構造形成体における空孔13の高さを異なる値 $h_1$ 、 $h_2$ としてもよい(変形例3、フォトニック結晶10B)。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0033

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0033】

第1実施例では、1個のフォトニック結晶に、PC構造形成体を2つ設ける例を示したが、図6に示すように、PC構造形成体を3つ以上設けてもよい(変形例4、フォトニック結晶10C)。図6に示した例では、第1実施例における2つのPC構造形成体の間に、第3PC構造形成体11Cが設けられている。第3PC構造形成体11Cは、厚み $d_3$ が $d_1$ と $d_2$ の間の値を有し、空孔13が他の2つのPC構造形成体に形成されたものと同じ形状及び大きさ且つ同じ周期長 $a$ で正方格子状に形成されている。これにより、第3PC構造形成体11C内には、その内部における波長が他のPC構造形成体と同じであって、周波数及びフォトニック結晶外における波長が異なる定在波が形成される。これにより、変形例4のフォトニック結晶では、第1実施例よりもさらに、共振周波数の数を多くすることができる。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0035

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0035】

あるいは、図7に示すように、第1板状部材12Aにはp型半導体層12APとn型半導体層12ANを接合したものを用い、第2板状部材12Bにもp型半導体層12BPとn型半導体層12BNを接合したものを用いてもよい(変形例5)。この場合、スペーサ層15には、導電体から成るものを用いてもよい(図7(a)、フォトニック結晶10D)し、第1導電体層151、絶縁体層153、第2導電体層152をこの順で積層した3層構造のものを用いてもよい(図7(b)、フォトニック結晶10E)。このようなフォトニック結晶は、後述の光電変換装置において好適に用いることができる。

【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0041

【補正方法】変更

【補正の内容】

## 【 0 0 4 1 】

## (4) 第 2 実施例フォトニック結晶の変形例

第 2 実施例のフォトニック結晶 2 0 のように空孔 2 3 を格子点からランダムにずらす代わりに、図 1 0 に示すように、空孔 2 3 A を正方格子の各格子点に配置し、各空孔 2 3 の大きさ、例えば半径が  $r_{min} \sim r_{max}$  の範囲内でランダムになるようにしてもよい。これにより、第 2 実施例のフォトニック結晶 2 0 と同様に、横軸を周波数、縦軸を光の強度としたグラフにおける個々のピークは、ピークトップの高さが低くなりながらも幅が広がるため、目的とする周波数領域全体ではフォトニック結晶内の光の強度を強めることができる。なお、ここでは空孔 2 3 A の大きさを半径で定めたが、面積や体積などで定めてもよい。また、この場合にも、隣接する空孔同士が分離する（重ならない）ように、 $r_{max}$  を設定することが望ましい。

## 【 手 続 補 正 7 】

【 補 正 対 象 書 類 名 】 明 細 書

【 補 正 対 象 項 目 名 】 0 0 4 7

【 補 正 方 法 】 変 更

【 補 正 の 内 容 】

## 【 0 0 4 7 】

図 1 3 に、第 1 実施例の光電変換装置の変形例として、上記変形例 5 のフォトニック結晶 1 0 D を用いた光電変換装置 3 0 A、及びフォトニック結晶 1 0 E を用いた光電変換装置 3 0 B を示す。これらの光電変換装置 3 0 A、3 0 B では、第 1 P C 構造形成体 1 1 A と第 2 P C 構造形成体 1 1 B は、前述のようにいずれも p 型半導体層と n 型半導体を積層した構成を有し、それぞれ独立に光電変換装置として機能する。そして、光電変換装置 3 0 A では、独立した 2 つの光電変換装置をスペーサ層 1 5 が直列に接続する役割を有する。一方、光電変換装置 3 0 B では、スペーサ層 1 5 中の第 1 導電体層 1 5 1 は第 1 P C 構造形成体 1 1 A に、第 2 導電体層 1 5 2 は第 2 P C 構造形成体 1 1 B に、それぞれ電流を注入する電極としての役割を有する。また、絶縁体層 1 5 3 は、2 つの光電変換層を電氣的に分離する役割を有する。

## 【 手 続 補 正 8 】

【 補 正 対 象 書 類 名 】 明 細 書

【 補 正 対 象 項 目 名 】 0 0 5 6

【 補 正 方 法 】 変 更

【 補 正 の 内 容 】

## 【 0 0 5 6 】

1 0、1 0 B、1 0 C、1 0 D、2 0 ... フォトニック結晶  
 1 1 A、2 1 A ... 第 1 フォトニック結晶 ( P C ) 構造形成体  
 1 1 B、2 1 B ... 第 2 フォトニック結晶 ( P C ) 構造形成体  
 1 1 C ... 第 3 フォトニック結晶 ( P C ) 構造形成体  
 1 2 A ... 第 1 板状部材  
 1 2 A N ... n 型半導体層  
 1 2 A P ... p 型半導体層  
 1 2 B ... 第 2 板状部材  
 1 2 B N ... n 型半導体層  
 1 2 B P ... p 型半導体層  
 1 3、2 3 ... 空孔  
 1 5、2 5 ... スペーサ層  
 1 5 1 ... 第 1 導電体層  
 1 5 2 ... 第 2 導電体層  
 1 5 3 ... 絶縁体層  
 3 0、3 0 A、4 0 ... 光電変換装置  
 3 1 ... 光電変換層

- 3 2 1、4 2 1 ... 透明電極
- 3 2 2、4 2 2 ... 裏面電極
- 5 0 ... 導光板
- 5 1 ... 回折素子
- 5 2 ... 反射板

## 【国際調査報告】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/060731

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G02B1/02(2006.01)i, G02B5/18(2006.01)i, H01L31/0352(2006.01)n		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B1/02, G02B5/18, H01L31/0352		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) Scitation		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2013-41948 A (Kyoto University, Rohm Co., Ltd.), 28 February 2013 (28.02.2013), paragraphs [0020] to [0023], [0036] to [0044]; fig. 2, 9 & US 2013/0039375 A1	1-4, 6, 11 5, 7-10
X A	JP 2009-76900 A (Japan Science and Technology Agency, Rohm Co., Ltd.), 09 April 2009 (09.04.2009), paragraphs [0027] to [0029]; fig. 1 to 2 & US 2009/0074024 A1	1-4, 6, 11 5, 7-10
X A	JP 2011-205038 A (Fujifilm Corp.), 13 October 2011 (13.10.2011), paragraphs [0076] to [0077]; fig. 8 & TW 201133831 A	1-4, 6-7, 11 5, 8-10
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art	
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 16 July, 2014 (16.07.14)	Date of mailing of the international search report 29 July, 2014 (29.07.14)	
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer	
Facsimile No.	Telephone No.	

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/060731

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 7-122762 A (Asahi Chemical Industry Co., Ltd.), 12 May 1995 (12.05.1995), paragraphs [0008] to [0023]; fig. 1 to 4 (Family: none)	1-11
Y	WO 2011/083674 A1 (Sharp Corp.), 14 July 2011 (14.07.2011), paragraphs [0018] to [0122]; fig. 1, 13 & US 2012/0273911 A1 & EP 2523219 A1 & CN 102696114 A & RU 2012132819 A	1-11
Y	WO 2012/141141 A1 (Sharp Corp.), 18 October 2012 (18.10.2012), paragraphs [0027] to [0113]; fig. 1 to 3 (Family: none)	1-11
Y	OSKOOI, A., FAVUZZI, P.A., TANAKA, Y., SHIGETA, H., KAWAKAMI, Y., NODA, S., "Partially disordered photonic-crystal thin films for enhanced and robust photovoltaics", Applied Physics Letters, 2012.04.30, Vol. 100, No. 18, p.181110-1 - 181110-4	5
P,Y	JP 2013-157567 A (Kyoto University, Sharp Corp.), 15 August 2013 (15.08.2013), claims (Family: none)	4-5
P,Y	JP 2013-156585 A (Kyoto University, Sharp Corp.), 15 August 2013 (15.08.2013), claims (Family: none)	4-5

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 4 / 0 6 0 7 3 1									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G02B1/02(2006.01)i, G02B5/18(2006.01)i, H01L31/0352(2006.01)n											
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G02B1/02, G02B5/18, H01L31/0352											
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2014年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2014年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2014年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2014年	日本国実用新案登録公報	1996-2014年	日本国登録実用新案公報	1994-2014年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2014年										
日本国実用新案登録公報	1996-2014年										
日本国登録実用新案公報	1994-2014年										
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) Scitation											
C. 関連すると認められる文献											
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号									
X A	JP 2013-41948 A (国立大学法人京都大学、ローム株式会社) 2013.02.28, 【0020】 - 【0023】 , 【0036】 - 【0044】 , 【図2】 , 【図9】 & US 2013/0039375 A1	1-4, 6, 11 5, 7-10									
X A	JP 2009-76900 A (独立行政法人科学技術振興機構、ローム株式会社) 2009.04.09, 【0027】 - 【0029】 , 【図1】 - 【図2】 & US 2009/0074024 A1	1-4, 6, 11 5, 7-10									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。											
* 引用文献のカテゴリー		の日の後に公表された文献									
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの		「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの									
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの		「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの									
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)		「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの									
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献									
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願											
国際調査を完了した日 16.07.2014		国際調査報告の発送日 29.07.2014									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 大隈 俊哉	20 4638								
		電話番号 03-3581-1101 内線 3271									



国際調査報告		国際出願番号 PCT/JP2014/060731
C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 2011-205038 A (富士フイルム株式会社) 2011. 10. 13, 【0076】 - 【0077】 , 【図 8】 & TW 201133831 A	1-4, 6-7, 11 5, 8-10
Y	JP 7-122762 A (旭化成工業株式会社) 1995. 05. 12, 【0008】 - 【0023】 , 【図 1】 - 【図 4】 (ファミリーなし)	1-11
Y	WO 2011/083674 A1 (シャープ株式会社) 2011. 07. 14, [0018]- [0122], [図 1], [図 13] & US 2012/0273911 A1 & EP 2523219 A1 & CN 102696114 A & RU 2012132819 A	1-11
Y	WO 2012/141141 A1 (シャープ株式会社) 2012. 10. 18, [0027]-[0113], [図 1]-[図 3] (ファミリーなし)	1-11
Y	OSKOOI, A., FAVUZZI, P.A., TANAKA, Y., SHIGETA, H., KAWAKAMI, Y., NODA, S., "Partially disordered photonic-crystal thin films for enhanced and robust photovoltaics", Applied Physics Letters, 2012. 04. 30, Vol. 100, No. 18, p.181110-1 - 181110-4	5
P, Y	JP 2013-157567 A (国立大学法人京都大学、シャープ株式会社) 2013. 08. 15, 【特許請求の範囲】 (ファミリーなし)	4-5
P, Y	JP 2013-156585 A (国立大学法人京都大学、シャープ株式会社) 2013. 08. 15, 【特許請求の範囲】 (ファミリーなし)	4-5

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

Fターム(参考) 5F151 AA01 DA03 FA04 FA06 GA04 HA20

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。