(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6083703号
(P6083703)
(45)発行日　平成29年2月22日(2017.2.22)　(24)登録日　平成29年2月3日(2017.2.3)

(51)Int.Cl.　F I
H01S 5/183 (2006.01)　H01S 5/183

請求項の数 10　(全 21 頁)

(21)出願番号　特願2013-37152(P2013-37152)
(22)出願日　平成25年2月27日(2013.2.27)
(65)公開番号　特開2013-211542(P2013-211542A)
(43)公開日　平成25年10月10日(2013.10.10)
審査請求日　平成27年10月9日(2015.10.9)
(31)優先権主張番号　特願2012-41399(P2012-41399)
(32)優先日　平成24年2月28日(2012.2.28)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

(73)特許権者　504132272
国立大学法人京都大学
京都府京都市左京区吉田本町３６番地１
(73)特許権者　000116024
ローム株式会社
京都府京都市右京区西院溝崎町２１番地
(74)代理人　110001069
特許業務法人京都国際特許事務所
(72)発明者　野田　進
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
(72)発明者　岩橋　清太
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

最終頁に続く

(54)【発明の名称】２次元フォトニック結晶面発光レーザ

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
a) 電流が注入されることにより所定の波長域の光を生じさせる活性層と、
b) 板状の母材内に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が配置された２次元フォトニック結晶から成る２次元フォトニック結晶層
が積層されたものであって、前記２次元フォトニック結晶層が、
b-1) ２次元定在波を形成することによって前記波長域内の波長である出射波長λの光の共振状態を形成し、且つ該出射波長λの光を外部に出射させないように定められる周期性を持つ光共振状態形成用格子の格子点に異屈折率領域が配置された光共振状態形成用フォトニック結晶構造と、
b-2) 逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑との和の大きさが0よりも大きく且つ($|k↑|/n_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置された光出射用フォトニック結晶構造と
を備えることを特徴とする２次元フォトニック結晶面発光レーザ。
【請求項２】
1) 前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造が、実空間において正方格子であって、その格子定数aが、前記波長域内の波長である出射波長λ及び該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}より式(1)

【数１】

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\lambda}{n_{\mathrm{eff}}} \qquad (1)$$

で定められる光共振状態形成用格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものであり、

2) 前記光出射用フォトニック結晶構造が、逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑=±(1/2)b$_1$↑±(1/2)b$_2$↑（複号任意。b$_1$↑及びb$_2$↑は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の正方格子における2つの基本逆格子ベクトル。）との和の大きさが0よりも大きく且つ(|k↑|/n$_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものである

ことを特徴とする請求項１に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項３】

1) 前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造が、実空間において長方格子であって、その格子定数a$_1$及びa$_2$、前記波長域内の波長である出射波長λ並びに該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n$_{eff}$より式(2)

【数２】

$$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{a_1^2}+\frac{1}{a_2^2}} = \frac{n_{\mathrm{eff}}}{\lambda} \qquad (2)$$

で定められる格子点に異屈折率領域が配置されたものであり、

2) 前記光出射用フォトニック結晶構造が、逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑=±(1/2)b$_1$↑±(1/2)b$_2$↑（複号任意。b$_1$↑及びb$_2$↑は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の長方格子における2つの基本逆格子ベクトル）との和の大きさが0よりも大きく且つ(|k↑|/n$_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものである

ことを特徴とする請求項１に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項４】

1) 前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造が、実空間において三角格子であって、その格子定数a、前記波長域内の波長である出射波長λ及び該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n$_{eff}$より式(3)

【数３】

$$a = \frac{2}{3} \frac{\lambda}{n_{\mathrm{eff}}} \qquad (3)$$

で定められる格子点に異屈折率領域が配置されたものであり、

2) 前記光出射用フォトニック結晶構造が、逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑=(1/3)b$_1$↑+(1/3)b$_2$↑，(-2/3)b$_1$↑+(1/3)b$_2$↑，及び(1/3)b$_1$↑-(2/3)b$_2$↑（b$_1$↑及びb$_2$↑は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の三角格子における2つの基本逆格子ベクトル）との和の大きさが0よりも大きく且つ(|k↑|/n$_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものである

ことを特徴とする請求項１に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項５】

前記光出射用フォトニック結晶構造が、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造における2つの基本並進ベクトルの方向をそれぞれx方向及びy方向とする直交座標系を持つ実空間において基本並進ベクトルc$_1$↑=(r$_1$，1)a及びc$_2$↑=(r$_2$，1)aを有する斜交格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものであって、

【数４】

$$r_1 = \frac{n_{\mathrm{eff}} + \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (4)$$

$$r_2 = \frac{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (5)$$

の関係を満たす、前記２次元フォトニック結晶層の法線に対する傾斜角θ及び前記x方向を基準とする方位角φの方向にレーザビームが出射されることを特徴とする請求項２に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項６】

前記２次元フォトニック結晶層が、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造と前記光出射用フォトニック結晶構造が重畳的に形成された１層構造のものであることを特徴とする請求項１～５のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項７】

さらに、前記活性層中に電流を注入する位置を制御する電流注入位置制御手段を備え、

前記光出射用フォトニック結晶構造の周期構造が、前記２次元フォトニック結晶層内の位置によって異なることを特徴とする請求項１～６のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項８】

前記光出射用フォトニック結晶構造が、周期構造の異なる複数の異周期領域を備えることを特徴とする請求項７に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項９】

前記光出射用フォトニック結晶構造の周期構造が、前記２次元フォトニック結晶層内の位置により連続的に変化することを特徴とする請求項７に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【請求項１０】

前記電流注入位置制御手段が、前記活性層に電流を注入する１対の電極のうちのいずれか一方又は両方が、該活性層に平行な方向に複数分割して設けられたものであることを特徴とする請求項７～９のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、２次元フォトニック結晶面発光レーザに関し、より詳しくは、レーザビームを面に垂直な方向から傾斜した方向に出射する２次元フォトニック結晶面発光レーザに関する。

【背景技術】

【０００２】

半導体レーザは小型、安価、低消費電力、長寿命等の多くの利点を有し、光記録用光源、通信用光源、レーザディスプレイ、レーザプリンタ、レーザポインタ等の幅広い分野で使用されている。レーザディスプレイやレーザプリンタではビームを走査して文字や図形を形成する方式が一般的であるが、現在用いられている半導体レーザのレーザビームは、多角形形状反射鏡（ポリゴンミラー）やMEMS（Micro-Electro Mechanical System）マイクロミラー、音響光学素子を用いたものなど、外部に設けた付加的な要素によりレーザビームの出射方向を制御することによって走査が実現されている。しかしながら、このように半導体レーザに走査のための機構を付加すると、小型化、並びに動作速度及び耐久性の向上が困難になるという問題がある。

【０００３】

このような観点に基づき、本発明者らは、出射方向が可変である２次元フォトニック結晶面発光レーザ（以下、「出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザ」と呼ぶ）

を発明した（特許文献１）。
ここではまず、出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザの説明の前提として、一般的な（それ自体では出射方向が可変ではない）２次元フォトニック結晶面発光レーザについて説明する。一般的な２次元フォトニック結晶面発光レーザは、活性層と、板状の部材内にその板状部材とは屈折率が異なる異屈折率領域（空孔や板状部材とは屈折率が異なる部材から成る領域）を周期的に配置した２次元フォトニック結晶層を有する。このような２次元フォトニック結晶面発光レーザでは、活性層に電荷を注入することにより、その活性層の材料により定まる波長域の光が発生し、その光のうち、異屈折率領域の周期により定まる所定の媒質内波長（２次元フォトニック結晶層内における波長であり、真空中での波長を２次元フォトニック結晶層の平均屈折率で除したもの）を有する光が定在波を形成し、それによって光の共振状態が形成される。例えば、異屈折率領域が正方格子状に配置されている例では、媒質内波長と周期長が一致した場合などに光の共振状態が形成される。
このように共振を起こした光は、２次元フォトニック結晶層内において、異屈折率領域により様々な方向に散乱されるが、互いに隣接する2個の異屈折率領域によりそれぞれ２次元フォトニック結晶層に垂直な方向に散乱された光の光路差が波長と一致すると、それら散乱光の位相が揃う。例えば、異屈折率領域が正方格子状に配置され、媒質内波長と周期長が一致した場合には、この条件を満たす。このように垂直な方向に散乱される光の位相が揃うことにより、２次元フォトニック結晶層に垂直な方向にレーザビームが出射される。
【０００４】
一方、特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザは、活性層と、異屈折率領域の周期が互いに異なる2つの２次元フォトニック結晶層を有する。これにより、2つの２次元フォトニック結晶層では、活性層で発生する光のうち、各々の屈折率分布の周期長に対応した互いに異なる波長の光が定在波を形成することによって共振状態が形成される。そして、それらの定在波の周波数差によってうなりが空間的に生じることにより、出射されるレーザビームは２次元フォトニック結晶層の法線に対して傾斜した方向を向く。このような方向に出射するレーザビームを、以下では「傾斜ビーム」と呼ぶ。２次元フォトニック結晶層の法線に対する傾斜ビームの角度（傾斜角）は、上記周波数差が大きくなるほど、その値が大きくなる。そして、少なくとも一方の２次元フォトニック結晶層の屈折率分布の周期長を面内の位置によって異なるように形成することで、活性層に電荷を注入する位置（レーザ発振させる面内位置）によって傾斜角の異なる傾斜ビームを出射させることが可能となる。
【０００５】
このように２次元フォトニック結晶面発光レーザ自体に傾斜ビームの出射方向を制御する機能を付加することにより、前述した既存の半導体レーザの利用分野において小型化、並びに動作速度及び耐久性の向上が可能になるうえに、モバイルレーザディスプレイ、チップ間光コミュニケーション、カプセル内視鏡に搭載するレーザメスなど新しい応用分野の創出が期待される。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００６】
【特許文献１】特開2009-076900号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００７】
特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザでは、レーザビームが２次元フォトニック結晶層に垂直な方向に出射される特性を有する2つの２次元フォトニック結晶を組み合わせて用いているため、傾斜角は0°（２次元フォトニック結晶層に垂直）から一定の狭い範囲内にしか傾斜させることができない。また、2つの２次元

フォトニック結晶層が全く異なる周期構造を有すると、光の定在波のうなりを形成することができないため、２次元フォトニック結晶層の設計の自由度が低い。

【０００８】

また、特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザでは、２つの２次元フォトニック結晶層において互いに周期長が異なる結晶軸の方向を揃えなければ、うなりを形成することができないため、レーザビームは、これら２次元フォトニック結晶層への射影が上記結晶軸上となる方向にしか出射することができなかった。

【０００９】

本発明が解決しようとする課題は、レーザビーム出射の傾斜角をより大きくすることが可能であり、２次元フォトニック結晶層の設計の自由度がより高い２次元フォトニック結晶面発光レーザを提供し、さらには、それを用いた出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【００１０】

本願発明者は種々の検討を行った結果、２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、(I)２次元定在波を形成することによって該所定波長の光の共振状態を形成する機能を有する一方、該所定波長の光を外部に出射させる機能を有しない第１の２次元フォトニック結晶構造と、(II)該所定波長の光を外部に出射させる機能を有する第２の２次元フォトニック結晶構造（それ自体は前記所定波長の光の共振状態を形成しない）を２次元フォトニック結晶層内に形成することに想到した。以下では（簡単のため、「２次元」という語は省略したうえで）、第１の２次元フォトニック結晶構造を「光共振状態形成用フォトニック結晶構造」、第２の２次元フォトニック結晶構造を「光出射用フォトニック結晶構造」と呼ぶ。

【００１１】

すなわち、上記課題を解決するために成された本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザは、

a) 電流が注入されることにより所定の波長域の光を生じさせる活性層と、

b) 板状の母材内に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が配置された２次元フォトニック結晶から成る２次元フォトニック結晶層

が積層されたものであって、前記２次元フォトニック結晶層が、

b-1) ２次元定在波を形成することによって前記波長域内の波長である出射波長λの光の共振状態を形成し、且つ該出射波長λの光を外部に出射させないように定められる周期性を持つ光共振状態形成用格子の格子点に異屈折率領域が配置された光共振状態形成用フォトニック結晶構造と、

b-2) 逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑との和の大きさが0よりも大きく且つ($|k↑|/n_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置された光出射用フォトニック結晶構造と

を備えることを特徴とする。

【００１２】

光共振状態形成用フォトニック結晶構造には下記の3種類のフォトニック結晶構造のいずれかを用いることができる。また、光出射用フォトニック結晶構造には、逆格子ベクトルが下記の所定の条件を満たす２次元周期構造を有するものを用いることができる。

【００１３】

すなわち、本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザの第１の態様のものは、

a) 電流が注入されることにより所定の波長域の光を生じさせる活性層と、

b) 板状の母材内に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が配置された２次元フォトニック結晶から成る２次元フォトニック結晶層

が積層されたものであって、前記２次元フォトニック結晶層が、

b-1) 実空間において正方格子であって、その格子定数aが、前記波長域内の波長であ

る出射波長λ及び該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}より式(1)
【数１】

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\lambda}{n_{\mathrm{eff}}} \qquad (1)$$

で定められる光共振状態形成（光増幅）用格子の格子点に異屈折率領域が配置された光共振状態形成用フォトニック結晶構造と、

b-2) 逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトル$k\uparrow=\pm(1/2)b_1\uparrow\pm(1/2)b_2\uparrow$（複号任意。$b_1\uparrow$及び$b_2\uparrow$は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の正方格子における2つの基本逆格子ベクトル。）との和の大きさが0よりも大きく且つ($|k\uparrow|/n_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置された光出射用フォトニック結晶構造と
を備えることを特徴とする。
【００１４】
本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザの第２の態様のものは、
a) 電流が注入されることにより所定の波長域の光を生じさせる活性層と、
b) 板状の母材内に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が配置された２次元フォトニック結晶から成る２次元フォトニック結晶層
が積層されたものであって、前記２次元フォトニック結晶層が、

b-1) 実空間において長方格子であって、その格子定数a_1及びa_2、前記波長域内の波長である出射波長λ並びに該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}より式(2)
【数２】

$$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{a_1^2}+\frac{1}{a_2^2}} = \frac{n_{\mathrm{eff}}}{\lambda} \qquad (2)$$

で定められる格子点に異屈折率領域が配置された光共振状態形成（光増幅）用フォトニック結晶構造と、

b-2) 逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における前記出射波長λに対応する波数ベクトル$k\uparrow=\pm(1/2)b_1\uparrow\pm(1/2)b_2\uparrow$（複号任意。$b_1\uparrow$及び$b_2\uparrow$は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の長方格子における2つの基本逆格子ベクトル）との和の大きさが0よりも大きく且つ($|k\uparrow|/n_{eff}$)よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置された光出射用フォトニック結晶構造と
を備えることを特徴とする。
【００１５】
本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザの第３の態様のものは、
a) 電流が注入されることにより所定の波長域の光を生じさせる活性層と、
b) 板状の母材内に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が配置された２次元フォトニック結晶から成る２次元フォトニック結晶層
が積層されたものであって、前記２次元フォトニック結晶層が、

b-1) 実空間において三角格子であって、その格子定数a、前記波長域内の波長である出射波長λ及び該２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}より式(3)
【数３】

$$a = \frac{2}{3}\frac{\lambda}{n_{\mathrm{eff}}} \qquad (3)$$

で定められる格子点に異屈折率領域が配置された光共振状態形成（光増幅）用フォトニック結晶構造と、

b-2) 逆格子空間において、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造内における

前記出射波長λに対応する波数ベクトルk↑=(1/3)b_1↑+(1/3)b_2↑，(-2/3)b_1↑+(1/3)b_2↑，及び(1/3)b_1↑-(2/3)b_2↑（b_1↑及びb_2↑は前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造の三角格子における2つの基本逆格子ベクトル）との和の大きさが0よりも大きく且つ(|k↑|/n_{eff})よりも小さくなる逆格子ベクトルG'↑を有する格子の格子点に異屈折率領域が配置された光出射用フォトニック結晶構造と
を備えることを特徴とする。

【００１６】

第１～第３の態様において、前記２次元フォトニック結晶層は、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造と前記光出射用フォトニック結晶構造が重畳的に形成された１層構造のものでもよいし、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造が形成された第１層及び前記光出射用フォトニック結晶構造が形成された第２層の２つの層を合わせた２層構造のものであってもよい。２層構造の場合には、これら第１層及び第２層は、共に前記活性層の一方の側に設けてもよいし、前記活性層を挟むように設けてもよい。１層構造のものは、構造を簡素化することができるという利点を有する。

【００１７】

第１～第３の態様においては、前記活性層及び前記２次元フォトニック結晶層の他に、クラッド層やスペーサ層等の層が積層されていてもよい。

【００１８】

上記波長域及び上記出射波長λは、真空中における光の波長域及び波長をいう。また、上記有効屈折率n_{eff}は、２次元フォトニック結晶層内において光が感じる実効的な屈折率をいう。上記（真空中における）出射波長λ、該出射波長λを有する光の２次元フォトニック結晶層内における波長λ_{PC}、及び上記有効屈折率n_{eff}は、$\lambda=n_{eff}\times\lambda_{PC}$の関係を満たす。「複号任意」とは、第１及び第２の態様における波数ベクトルk↑=±(1/2)b_1↑±(1/2)b_2↑に含まれる2つの符号"±"の組み合わせが任意であることを意味し、具体的は、k↑=+(1/2)b_1↑+(1/2)b_2↑，+(1/2)b_1↑-(1/2)b_2↑，-(1/2)b_1↑+(1/2)b_2↑，-(1/2)b_1↑-(1/2)b_2↑の4種類の波数ベクトルを意味する。

【００１９】

以下、第１～第３の態様における(I)光共振状態形成用フォトニック結晶構造及び(II)光出射用フォトニック結晶構造について詳しく説明する。

【００２０】

(I) 光共振状態形成用フォトニック結晶構造

(I-1) 第１の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造

第１の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、正方格子であってその格子定数aが上記式(1)を満たす周期構造を有する。図１(a)に、その周期構造を模式的に示す。この光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ａでは、以下に述べる理由により、波長λ_{PC}が格子定数aの$2^{0.5}$倍である光の共振状態が形成される。

【００２１】

２次元フォトニック結晶層内を伝播する光は、光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ａの正方格子の格子点１１Ａ（に配置された異屈折率領域）において様々な方向に散乱される。それら散乱光のうち、ある１個の格子点１１１Ａにおいて、散乱前の進行方向とは180°異なる方向に散乱（180°散乱）された光L1は、その格子点に最隣接の格子点１１２Ａにおいて180°散乱された光L2との光路差が波長λ_{PC}に一致するため、干渉により共振状態が形成される。また、格子点１１１Ａにおいて散乱前の進行方向とは90°異なる方向に散乱（90°散乱）された光L3は、格子点１１２Ａにおいて90°散乱された光L4との光路差が波長λ_{PC}に一致するため、干渉により共振状態が形成される。このように、第１の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造では、180°散乱と90°散乱の双方によって光の共振状態が形成されることにより、（１次元定在波ではなく）２次元定在波が形成される。

【００２２】

一方、２次元フォトニック結晶層内を伝播する光は格子点１１Ａにおいて該層に対して

角度をもった方向にも散乱される。しかしながら、格子点１１１Ａにおいて２次元フォトニック結晶層に垂直な方向に散乱される光と、格子点１１２Ａにおいて該方向に散乱される光の光路差が$\lambda_{PC}/2$になり、両者の位相が一致しない（πだけずれる）ため、２次元フォトニック結晶層に垂直な方向にはレーザビームが出射されない（なお、格子定数aと波長λ_{PC}が等しい従来の２次元フォトニック結晶面発光レーザでは、この光路差がλ_{PC}に一致するため、２次元フォトニック結晶層に垂直な方向にレーザビームが出射される）。

【００２３】

上記２次元定在波は、図１(b)に示す逆格子空間では以下のように説明される。逆格子空間では、その光の波数を表す$(\pm 1/2, \pm 1/2)\times(2\pi/a)$（複号任意）の4つの点であるＭ点１３Ａ、あるいはこれらＭ点と逆格子空間の原点を結ぶ波数ベクトル$\vec{k}$で示される。この波数ベクトル$\vec{k}$は、正方格子の基本逆格子ベクトル$\vec{b_1}$及び$\vec{b_2}$を用いて、$\vec{k}=\pm(1/2)\vec{b_1}\pm(1/2)\vec{b_2}$で表される。すなわち、実空間において式(1)の関係を満たすことと、逆格子空間において上記関係を満たすことは等価である。

【００２４】

そして、光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ａの格子点１１Ａにおける光の散乱は、これらＭ点に関する波数ベクトル$\vec{k}$と、格子点１１Ａを逆格子空間で表す逆格子ベクトル$\vec{G}$（上述した逆格子ベクトル$\vec{G'}$は、光出射用フォトニック結晶構造の格子点を逆格子空間で表す点で、この逆格子ベクトル$\vec{G}$とは相違する）の和が、同じくＭ点に関する他の波数ベクトルと一致する場合に生じる。上記180°散乱は、逆格子ベクトル$\vec{G_1}=\pm\vec{b_1}\pm\vec{b_2}$で表される。また、上記90°散乱は、逆格子ベクトル$\vec{G_2}=\pm\vec{b_1}$又は$\vec{G_2}=\pm\vec{b_2}$で表される。

【００２５】

また、逆格子空間では、２次元フォトニック結晶層に対して傾斜した方向に光が出射されるか否かという点も示される。波数ベクトルと逆格子ベクトルの和が0になるような逆格子ベクトルが存在すれば、光は２次元フォトニック結晶層に垂直に出射されるが、Ｍ点に関する波数ベクトル$\vec{k}$ではそのような逆格子ベクトル$\vec{G}$は存在しない。また、逆格子空間の原点を中心とし、波数ベクトルの大きさ$|\vec{k}|$の$1/n_{eff}$の半径を有する円で表されるライトコーン１４Ａ内に、波数ベクトル$\vec{k}$と逆格子ベクトル$\vec{G}$の和$\vec{k}+\vec{G}$が存在する場合、２次元フォトニック結晶層内の光が２次元フォトニック結晶層と外部との界面において全反射を生じることなく外部に出射されるが、Ｍ点に関する波数ベクトルではそのような逆格子ベクトルは存在しない。従って、第１の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。

【００２６】

(I-2) 第２の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造

第２の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ｂは、長方格子の格子点１１Ｂに異屈折率領域が配置され、その長方格子の格子定数a_1及びa_2が上記式(2)を満たす周期構造を有する（図２(a)）。この周期構造においては、$\lambda_{PC}=2a_1a_2(a_1^2+a_2^2)^{-0.5}$の波長を有する２次元定在波が形成される。この２次元定在波は、逆格子空間では、$(\pm(1/2)\times(2\pi/a_1), \pm 1/2\times(2\pi/a_2))$（複号任意）の4つの点であるＭ点１３Ｂ、あるいはこれらの点と逆格子空間の原点を結ぶ波数ベクトルで示される（図２(b)）。この波数ベクトル$\vec{k}$は、長方格子の基本逆格子ベクトル$\vec{b_1}$及び$\vec{b_2}$を用いて、$\vec{k}=\pm(1/2)\vec{b_1}\pm(1/2)\vec{b_2}$（複号任意）で表され、第１の態様の光共振状態形成用フォトニック結晶構造と同様に、逆格子ベクトル$\vec{G_1}=\pm\vec{b_1}\pm\vec{b_2}$（複号任意）で表される180°散乱と、逆格子ベクトル$\vec{G_2}=\pm\vec{b_1}$又は$\vec{G_2}=\pm\vec{b_2}$で表される90°散乱の双方が生じる。これは、２次元定在波が形成されることを意味する。また、波数ベクトル$\vec{k}$と逆格子ベクトル$\vec{G}$の和$\vec{k}+\vec{G}$がライトコーン１４Ｂ内に存在するような逆格子ベクトル$\vec{G}$はない。従って、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。なお、第２の態様において、長方格子には面心長方格子が含まれるものとする。

【００２７】

(I-3) 第３の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造

第３の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ｃは、三角格子の格子点１１Ｃに異屈折率領域が配置され、その三角格子の格子定数aが上記式(3)を満たす周期構造を有する（図３(a)）。この周期構造においては、$\lambda_{PC}=3a/2$の波長を有する２次元定在波が形成される。この２次元定在波は、逆格子空間では、互いに60°に交差する2つの基本逆格子ベクトル$b_1\uparrow$及び$b_2\uparrow$を用いて、波数ベクトル$k\uparrow$が$(1/3)b_1\uparrow+(1/3)b_2\uparrow$，$(-2/3)b_1\uparrow+(1/3)b_2\uparrow$，及び$(1/3)b_1\uparrow-(2/3)b_2\uparrow$で表される（図３(b)）。これら波数ベクトル$k\uparrow$が指す点を、三角格子ではＪ点と呼ぶ。そして、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造では、逆格子ベクトル$G_1\uparrow=\pm b_1\uparrow$で表される第１の120°散乱と、逆格子ベクトル$G_2\uparrow=\pm b_2\uparrow$で表される第２の120°散乱と、逆格子ベクトル$G_3\uparrow=\pm b_1\uparrow\pm b_2\uparrow$で表される第３の120°散乱が生じることにより、２次元定在波が形成される。また、波数ベクトル$k\uparrow$と逆格子ベクトル$G\uparrow$の和$k\uparrow+G\uparrow$がライトコーン１４Ｃ内に存在するような逆格子ベクトル$G\uparrow$はない。従って、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。

【００２８】

(II) 光出射用フォトニック結晶構造

光出射用フォトニック結晶構造では、第１～第３の態様のいずれの場合も、逆格子空間において、光共振状態形成用フォトニック結晶構造により共振状態が形成される光の波数ベクトル$k\uparrow$と、光出射用フォトニック結晶構造における逆格子ベクトル$G'\uparrow$の和であるベクトル$\Delta k\uparrow=k\uparrow+G'\uparrow$の大きさ$|k\uparrow+G'\uparrow|$が$(|k\uparrow|/n_{eff})$よりも小さくなる逆格子ベクトル$G'\uparrow$が存在するように、格子構造を形成する。ここでベクトル$\Delta k\uparrow$は、波数ベクトル$k\uparrow$を有する光が光出射用フォトニック結晶構造において散乱された（すなわち、波数ベクトルの向きが変化した）後の波数ベクトルを表す。これにより、光共振状態形成用フォトニック結晶構造において共振状態が形成された光が、光出射用フォトニック結晶構造によって散乱され、その散乱光の波数ベクトル$\Delta k\uparrow$がライトコーン内に存在することとなる。そのため、２次元フォトニック結晶層内の光は２次元フォトニック結晶層と外部との界面において全反射を生じることなく外部に出射し、レーザビームが得られる。その際、２次元フォトニック結晶層に平行な方向の波数成分が上記界面において維持されるため、散乱光の波数ベクトルの大きさ$|\Delta k\uparrow|$が0である（本発明には含まれない）場合には、レーザビームは２次元フォトニック結晶層に垂直に出射し、$|\Delta k\uparrow|$が0以外の値を有する（本発明の）場合には、その散乱ベクトル$\Delta k\uparrow$の大きさ及び向きに対応した傾斜角を有する傾斜ビームが得られる。

【００２９】

例えば、図４(a)に示すように、第１の態様において光出射用フォトニック結晶構造１５Ａが異屈折率領域１６Ａを斜交格子状に配置した構成を有する場合には、斜交格子の格子定数c_1，c_2及びα（格子点を結ぶ直線が交差する角度）を適宜設定することにより、図４(b)に示すように、散乱光の波数ベクトル$\Delta k\uparrow$がライトコーン１４内に存在するように逆格子ベクトル$G'\uparrow$を形成することができ、それにより、傾斜ビームが得られる。また、傾斜ビームの傾斜角θ、及び傾斜ビームの２次元フォトニック結晶層に平行な面への射影の該面内での向きを表す方位角φも、計算により適宜定めることができる。例えば、光共振状態形成用フォトニック結晶構造における2つの基本並進ベクトルの方向をそれぞれx方向及びy方向とする直交座標系を持つ実空間において、光出射用フォトニック結晶構造が基本並進ベクトル$c_1\uparrow=(r_1,\ 1)a$及び$c_2\uparrow=(r_2,\ 1)a$を有する斜交格子である（従って、光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造のいずれも、y方向の格子点の間隔がaとなる）場合には、所望の傾斜角θ及び方位角φに応じて、r_1及びr_2を

【数４】

$$r_1 = \frac{n_{\mathrm{eff}} + \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (4)$$

$$r_2 = \frac{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (5)$$

とすればよい。これら式(4)及び(5)の導出法は後述する。

【００３０】

第１～第３の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、前記活性層中に電流を注入する位置を制御する電流注入位置制御手段を設け、前記光出射用フォトニック結晶構造の周期構造を、前記２次元フォトニック結晶層内の位置によって異なるように形成することにより、出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザが得られる。この出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザでは、電流注入位置制御手段により活性層中の一部の領域に電流を注入することにより発生する光が、その領域に対応した２次元フォトニック結晶層の一部分に導入される。そして、その２次元フォトニック結晶層の一部分における光共振状態形成用フォトニック結晶構造及び光出射用フォトニック結晶構造により定まる傾斜角θ、及び方位角φに傾斜ビームが出射される。

【００３１】

光出射用フォトニック結晶構造の周期構造には、２次元フォトニック結晶層内を複数の領域に区切って、各領域毎に異なる周期構造を有するように形成した複数の異周期領域を備えるものを用いることができる。また、光出射用フォトニック結晶構造の周期構造が、前記２次元フォトニック結晶層内の位置により連続的に変化するようにしてもよい。電流注入位置制御手段は、例えば前記活性層に電流を注入する１対の電極のうちのいずれか一方又は両方を、該活性層に平行な方向に複数分割して設け、それら分割された電極のうち、電流の注入に用いる電極を変えることで実現される。

【発明の効果】

【００３２】

本発明により、光共振状態形成用フォトニック結晶構造によって所望の波長の光の共振状態を形成し、光出射用フォトニック結晶構造によって所望の方向に傾斜ビームを出射させることができる２次元フォトニック結晶面発光レーザが得られる。

【図面の簡単な説明】

【００３３】

【図１】第１の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。

【図２】第２の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。

【図３】第３の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。

【図４】光出射用フォトニック結晶構造の一例(a)、及び光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造を組み合わせることによる散乱の状態(b)を示す図。

【図５】本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザの一実施例を示す斜視図。

【図６】第１実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。

【図７】第１実施例で作製した２次元フォトニック結晶層の一例の電子顕微鏡写真(a)及びその写真に光共振状態形成用格子である正方格子（実線）及び光出射用格子である斜交格子（破線）を記載したもの(b)を示す平面図。

【図８】第１実施例で作製した２次元フォトニック結晶面発光レーザにより得られたレー

ザビームのスポットを示す写真。
【図９】第２実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１０】第３実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１１】第４実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１２】第５実施例の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)、(b)及び電極(c)を示す平面図。
【図１３】第６実施例の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)、(b)及び電極(c)を示す平面図。
【図１４】第１～第６実施例の変形例を示す斜視図。
【発明を実施するための形態】
【００３４】
本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザ（以下、「フォトニック結晶レーザ」とする）の実施例を、図５～図１４を用いて説明する。
【実施例１】
【００３５】
図５は第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０の斜視図である。このフォトニック結晶レーザ２０は、裏面電極２５１と、下部基板２４１と、第１クラッド層２３１と、２次元フォトニック結晶層２１と、活性層２２と、第２クラッド層２３２と、上部基板２４２と、窓状電極２５２とをこの順に積層したものである。本実施例のフォトニック結晶レーザ２０では、レーザビームは、窓状電極２５２の中央部に設けられた空洞（窓）２５２１を通って、上部基板２４２の窓状電極２５２側の表面に対する垂線から出射角θだけ傾斜した方向に出射される。なお、２次元フォトニック結晶層２１と、活性層２２の順番は上記のものとは逆であってもよい。また、本願では便宜上、「上」及び「下」という語を用いるが、これらの語は実際にフォトニック結晶レーザを使用する際の向き（上下）を規定するものではない。
【００３６】
本実施例では、下部基板２４１にはp型半導体のガリウムヒ素（GaAs）を、上部基板２４２にはn型GaAsを、第１クラッド層２３１にはp型半導体のアルミニウム・ガリウム砒素（AlGaAs）を、第２クラッド層２３２にはn型AlGaAsを、それぞれ用いた。活性層２２には、インジウム・ガリウム砒素／ガリウムヒ素（InGaAs/GaAs）から成る多重量子井戸（Multiple-Quantum Well; MQW）を有するものを用いた。裏面電極２５１及び窓状電極２５２の材料には金を用いた。なお、これら各層の材料は上記のものには限定されず、従来のフォトニック結晶面発光レーザで用いられている各層の材料をそのまま用いることができる。また、上記各層の間には、スペーサ層などの他の層が介挿されていてもよい。
【００３７】
２次元フォトニック結晶層２１は、板状の母材（スラブ）２１４内に空孔（異屈折率領域）２１１を、後述の格子点上に周期的に配置したものである。本実施例では、スラブ２１４の材料にはp型GaAsを用いた。空孔２１１の形状は、本実施例では正三角形であるが、円形などの他の形状を用いてもよい。なお、スラブ２１４の材料は上記のものには限られず、従来のフォトニック結晶レーザで用いられているものを用いることができる。また、異屈折率領域には、空孔２１１の代わりに、スラブ２１４とは屈折率が異なる部材（異屈折率部材）を用いてもよい。空孔は容易に加工することができるという点において優れ

ているのに対して、異屈折率部材は加工時の加熱などにより母材が変形するおそれがある場合に有利である。

【００３８】

図６を用いて、２次元フォトニック結晶層２１において空孔２１１が配置される格子点について説明する。本実施例の２次元フォトニック結晶層２１は、光共振状態形成用フォトニック結晶構造を形成する光共振状態形成用格子２１２Ａ（図６(a)）と、光出射用フォトニック結晶構造を形成する光出射用格子２１２Ｂ（図６(b)）を有する。

【００３９】

光共振状態形成用格子２１２Ａは、格子定数aを有する正方格子から成る。以下、この正方格子において、格子点２１３Ａが間隔aで並ぶ2方向のうちの一方をx方向と呼び、他方をy方向と呼ぶ。従って、格子点２１３Ａのx-y座標は、整数m及びnを用いて(ma，na)と表される。

【００４０】

それに対して光出射用格子２１２Ｂでは、c_1↑=(r_1，1)a及びc_2↑=(r_2，1)aの基本並進ベクトルを有する斜交格子が構成される。この斜交格子の格子定数c_1、c_2はそれぞれ、基本並進ベクトルc_1↑及びc_2↑の大きさである($r_1^{0.5}$+1)a及び($r_2^{0.5}$+1)aであり、c_1↑とc_2↑の成す角度αは$\cos\alpha=(r_1r_2+1)\times(r_1^2+1)^{-0.5}\times(r_2^2+1)^{-0.5}$の関係を満たす。格子点２１３Ａ，２１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子２１２Ａ及び光出射用格子２１２Ｂ共に、間隔aで並ぶ。

【００４１】

本実施例では、出射波長λは980nmとした。また、２次元フォトニック結晶層２１の有効屈折率n_{eff}は、スラブ２１４の材料であるp型GaAsの屈折率（3.55）及びスラブ２１４中で空孔２１１（屈折率1）の占める割合により定まる。本実施例では空孔２１１の面積を調整することにより、２次元フォトニック結晶層２１の有効屈折率n_{eff}は3.5とした。従って、本実施例における格子定数aは式(1)より$2^{-0.5}\times$980nm/3.5　200nmとした。

【００４２】

本実施例の２次元フォトニック結晶層２１では、これら光共振状態形成用格子２１２Ａ及び光出射用格子２１２Ｂを重ね合わせた格子２１２Ｃ（図６(c)）の格子点に空孔２１１を配置することにより、フォトニック結晶構造が形成されている（図６(d)）。

【００４３】

本実施例の２次元フォトニック結晶層２１では、格子点２１３Ｂの位置を示すパラメータであるr_1及びr_2が上記(4)及び(5)式を満たす方向にレーザビームが出射される。以下、その理由を説明する。

裏面電極２５１と窓状電極２５２の間に電圧が印加されると、活性層２２に電荷が注入され、所定の波長域の光が発光する。この光は活性層２２に隣接する２次元フォトニック結晶層２１に導入され、２次元フォトニック結晶層２１内における波長(λ/n_{eff})が格子定数aの$2^{0.5}$倍である光、すなわち（真空中での）出射波長がλである光が、光共振状態形成用フォトニック結晶構造により共振状態を形成する。格子定数aの$2^{0.5}$倍という長さが正方格子の単位格子の対角線の長さに対応することからわかるように、この共振状態を起こす光の波面は、x軸に対して±45°の方向を向いている。このような波長及び波面の向きを有する光の波数ベクトルk↑は、上記波面の方向が+45°のものに関しては

k_+↑=(1/2，1/2)×(2π/a)　　(6)

と、上記波面の方向が-45°のものに関しては

k_-↑=(1/2，-1/2)×(2π/a)　　(6')

と、それぞれ表される。ここで、k_+↑及びk_-↑はそれぞれ、光共振状態形成用格子２１２Ａの基本逆格子ベクトルb_1↑及びb_2↑の大きさを1/2にしたベクトルに対応する。

【００４４】

一方、光出射用格子２１２Ｂは、実空間において上記基本並進ベクトルc_1↑=(r_1，1)a及びc_2↑=(r_2，1)aを有するため、その逆格子空間における基本逆格子ベクトルd_1↑及びd_2↑は、

$d_1\uparrow=(1/(r_1+r_2),\ r_2/(r_1+r_2))\times(2\pi/a)$ (7)

$d_2\uparrow=(-1/(r_1+r_2),\ r_1/(r_1+r_2))\times(2\pi/a)$ (8)

で表される。また、光出射用フォトニック結晶構造における逆格子ベクトルG'↑（光共振状態形成用フォトニック結晶構造における逆格子ベクトルとは異なる）は、整数p，qを用いて、$G'\uparrow=pd_1\uparrow+qd_2\uparrow$で表される。

【００４５】

光出射用フォトニック結晶構造では、光出射用格子２１２Ｂの格子点２１３Ｂに配置された空孔２１１により、波数ベクトルk↑を有する光の向きが変化するように散乱される。そのような散乱は、波数ベクトルk↑と、光出射用フォトニック結晶構造における逆格子ベクトルG'↑の和をとったベクトルΔk↑の方向に生じる。以下では、波数ベクトル$k_+\uparrow$と逆格子ベクトル$G'\uparrow=-d_1\uparrow$（p=-1，q=0）の和をとったベクトルについて説明するが、波数ベクトル$k_-\uparrow$と、逆格子ベクトル$G'\uparrow=+d_2\uparrow$（p=0，q=1）の和をとったベクトルからも同様の結果が得られる。Δk↑は、

$\Delta k\uparrow=k_+\uparrow-b_1\uparrow=((r_1+r_2-2)/2(r_1+r_2),\ (r_1-r_2)/(r_1+r_2))\times(2\pi/a)$ (9)

と表される。ここで、散乱後の光が２次元フォトニック結晶層２１内を進行する方向と２次元フォトニック結晶層２１の成す角度θ_{in}、フォトニック結晶の外（真空中）での傾斜角θ及び方位角φ、Δk↑のx成分Δk_x及びy成分Δk_y、並びにΔk↑及びk↑の大きさとの間で、以下の式(10)～(12)を満たす必要がある。

$\sin\theta_{in}=|\Delta k\uparrow|/|k_+\uparrow|$ (10)

$\sin\theta_{in}=(1/n_{eff})\sin\theta$ (11)

$|\Delta k\uparrow|=\Delta k_x/\cos\phi=\Delta k_y/\sin\phi$ (12)

従って、

$\Delta k_x=(|k_+\uparrow|/n_{eff})\sin\theta\cos\phi$ (13)

$\Delta k_y=(|k_+\uparrow|/n_{eff})\sin\theta\sin\phi$ (14)

となる。ここで式(13)及び(14)は、上記式(10)～(12)を満たせば、|Δk↑|の大きさがライトコーンの半径$(|k_+\uparrow|/n_{eff})$よりも小さくなり、全反射を生じることなくフォトニック結晶レーザの外部へレーザビームを取り出すことができることを意味している。

【００４６】

式(9)，(13)及び(14)式より、

$(r_1+r_2-2)/2(r_1+r_2)\times(2\pi/a)=(|k_+\uparrow|/n_{eff})\sin\theta\cos\phi$ (15)

$(r_1-r_2)/(r_1+r_2)\times(2\pi/a)=(|k_+\uparrow|/n_{eff})\sin\theta\sin\phi$ (16)

というr_1及びr_2の連立方程式となり、これを解くと、上記式(4)及び(5)が得られる。

【００４７】

以上に示したように、式(4)及び(5)を満たすことにより、所望の傾斜角θ及び方位角φで、フォトニック結晶レーザの外部へレーザビームを取り出すことができる。

【００４８】

図７(a)に、本実施例で作製した２次元フォトニック結晶層２１の一例の電子顕微鏡写真を示す。この電子顕微鏡写真から、スラブ２１４内に正三角形の空孔２１１が多数配置されていることがわかる。そして、これら空孔２１１は、図７(b)に実線で示す正方格子（光共振状態形成用格子２１２Ａ）と、同図に破線で示す斜交格子（光出射用格子２１２Ｂ）を重ね合わせた格子点上に配置されていることがわかる。

【００４９】

図８に、本実施例で作製したフォトニック結晶レーザ１０により得られたレーザビームの写真を示す。この図では、フォトニック結晶レーザ１０の窓状電極２５２の上方において、２次元フォトニック結晶層２１に平行な面でレーザビームを観測した結果を示しており、図中に現れた白い点がレーザビームのスポットである。図８の(a)～(c)は、(4)式のφが0°である条件において、θがそれぞれ0°、10°及び20°となるようにr_1及びr_2を定めたフォトニック結晶レーザ１０により得られたレーザビームのスポットを示している。また、図８の(a)，(d)，(g)は、(4)式のφが90°である条件において、θがそれぞれ0°、10°及び20°となるようにr_1及びr_2を定めたフォトニック結晶レーザ１０により得られ

たレーザビームのスポットを示している。図８の(e)及び(f)は、y方向のスポットの位置を(d)と同じとし、x方向のスポットの位置をそれぞれ(b)及び(c)と同じとするようにθ及びφを定め、それらθ及びφからr_1及びr_2を定めたフォトニック結晶レーザ１０により得られたレーザビームのスポットを示している。図８の(h)及び(i)は、y方向のスポットの位置を(g)と同じとし、x方向のスポットの位置をそれぞれ(b)及び(c)と同じとするようにθ及びφを定め、それらθ及びφからr_1及びr_2を定めたフォトニック結晶レーザ１０により得られたレーザビームのスポットを示している。これら(a)～(i)のいずれにおいても、設計通りにスポットが得られており、所望の方向に傾斜したレーザビームが得られていることがわかる。

【００５０】

本実施例では、光共振状態形成用格子２１２Ａの正方格子と光出射用格子２１２Ｂの斜交格子は共に、y方向には格子点が間隔aで並ぶように配置したが、光共振状態形成用格子と光出射用格子が互いに無関係な方向を向くように両者を配置してもよい。また、光出射用格子は斜交格子には限られず、正方格子、長方格子、面心長方格子、あるいは三角格子であってもよい。その一例として、光出射用格子を正方格子としたものを第２実施例として説明する。

【実施例２】

【００５１】

図９を用いて、第２実施例のフォトニック結晶レーザを説明する。第２実施例のフォトニック結晶レーザは、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０における２次元フォトニック結晶層２１の代わりに、以下に述べる２次元フォトニック結晶層３１を有する。それ以外の本実施例のフォトニック結晶レーザの構成は、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０のものと同様である。

【００５２】

２次元フォトニック結晶層３１は、板状のスラブ内に空孔（異屈折率領域）３１１を、光共振状態形成用格子２１２Ａ（図９(a)）と光出射用格子３１２Ｂ（図９(b)）を重ね合わせた格子３１２Ｃ（図９(c)）の格子点上に配置したものである（図９(d)）。光共振状態形成用格子２１２Ａの構成は第１実施例と同様である。また、異屈折率領域の形状やスラブの材料なども第１実施例と同様である。光出射用格子３１２Ｂは、光共振状態形成用格子２１２Ａの結晶軸（x軸方向及びy軸方向）から２次元フォトニック結晶層３１の面内に45°回転させた方向の結晶軸を有し、格子定数がcである正方格子である。

【００５３】

光共振状態形成用格子２１２Ａにおける共振光の波数ベクトルは上記式(6)及び(6')となる。また、光出射用格子３１２Ｂでは、逆格子空間の基本逆格子ベクトルは

$$d_1\uparrow=(2\pi/(2^{0.5}c),\ 2\pi/(2^{0.5}c)) \qquad (17)$$

$$d_2\uparrow=(-2\pi/(2^{0.5}c),\ 2\pi/(2^{0.5}c)) \qquad (18)$$

で表される。従って、逆格子ベクトル$G'\uparrow=-d_1\uparrow$の場合には、共振光の波数ベクトル$k_+\uparrow$（式(6)）に関して、

$$\Delta k\uparrow=k_+\uparrow-d_1\uparrow$$

$$=2\pi((2a)^{-1}-(2^{0.5}c)^{-1},\ (2a)^{-1}-(2^{0.5}c)^{-1}) \qquad (19)$$

となる。このベクトルは、方向がx軸に対して+45°を向き、大きさが$(2a)^{-1}-(2^{0.5}c)^{-1}$である。従って、ベクトルの大きさ$(2a)^{-1}-(2^{0.5}c)^{-1}$がライトコーンの半径($|k_+\uparrow|/n_{eff}$)よりも小さくなるように光出射用格子３１２Ｂの格子定数cを定めることにより、傾斜ビームを出射させることができる。

【実施例３】

【００５４】

図１０を用いて、第３実施例のフォトニック結晶レーザを説明する。第３実施例のフォトニック結晶レーザは、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０における２次元フォトニック結晶層２１の代わりに、以下に述べる２次元フォトニック結晶層４１を有する。それ以外の本実施例のフォトニック結晶レーザの構成は、第１実施例のフォトニック結晶レ

ーザ２０のものと同様である。

【００５５】

２次元フォトニック結晶層４１は、板状のスラブ内に空孔（異屈折率領域）４１１を、光共振状態形成用格子４１２Ａ（図１０(a)）と光出射用格子４１２Ｂ（図１０(b)）を重ね合わせた格子４１２Ｃ（図１０(c)）の格子点上に配置したものである（図１０(d)）。異屈折率領域の形状やスラブの材料などは第１実施例と同様である。

【００５６】

光共振状態形成用格子４１２Ａは、x方向の格子定数がa_1、y方向の格子定数がa_2である長方格子から成る。このような光共振状態形成用格子４１２Ａに空孔４１１を配置した場合に共振を起こす光の波数ベクトルk↑は、

$$k↑=(\pm(1/2)\times(2\pi/a_1),\ \pm(1/2)\times(2\pi/a_2)) \quad (20)$$

（複号任意）で表される。光出射用格子４１２Ｂは、$c_1↑=(r_1,\ 1)a_2$及び$c_2↑=(r_2,\ 1)a_2$の基本並進ベクトルを有する斜交格子である。格子点４１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子４１２Ａ及び光出射用格子４１２Ｂ共に、間隔a_2で並ぶ。この光出射用格子４１２Ｂの基本逆格子ベクトルは

$$d_1↑=(1/(r_1+r_2),\ r_2/(r_1+r_2))\times(2\pi/a_2) \quad (21)$$

$$d_2↑=(-1/(r_1+r_2),\ r_1/(r_1+r_2))\times(2\pi/a_2) \quad (22)$$

で表され、逆格子ベクトルG'↑はG'↑=pd_1↑+qd_2↑（p、qは整数）で表される。そして、ベクトルΔk↑=k↑+G'↑の大きさ|Δk↑|=|k↑+G'↑|がライトコーンの半径|k↑|/neffよりも小さくなるようにr_1及びr_2を定めることにより、傾斜ビームを出射させることができる。

【実施例４】

【００５７】

図１１を用いて、第４実施例のフォトニック結晶レーザを説明する。第４実施例のフォトニック結晶レーザは、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０における２次元フォトニック結晶層２１の代わりに、以下に述べる２次元フォトニック結晶層５１を有する。それ以外の本実施例のフォトニック結晶レーザの構成は、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０のものと同様である。

【００５８】

２次元フォトニック結晶層５１は、板状のスラブ内に空孔（異屈折率領域）５１１を、光共振状態形成用格子５１２Ａ（図１１(a)）と光出射用格子５１２Ｂ（図１１(b)）を重ね合わせた格子５１２Ｃ（図１１(c)）の格子点上に配置したものである（図１１(d)）。異屈折率領域の形状やスラブの材料などは第１実施例と同様である。

【００５９】

光共振状態形成用格子５１２Ａは、格子定数がaである三角格子から成る。このような光共振状態形成用格子５１２Ａに空孔５１１を配置した場合に共振状態が形成される光の波数ベクトルk↑は、

$$k_1↑=(1/3)\times(2\times3^{0.5}\pi/a,\ 2\pi/a) \quad (23)$$

$$k_2↑=(1/3)\times(-2\times3^{0.5}\pi/a,\ 2\pi/a) \quad (24)$$

$$k_3↑=(1/3)\times(0,\ -4\pi/a) \quad (25)$$

で表される。光出射用格子５１２Ｂは、$c_1↑=(r_1,\ 1)\times(3^{0.5}a/2)$及び$c_2↑=(r_2,\ 1)\times(3^{0.5}a/2)$の基本並進ベクトルを有する斜交格子である。格子点５１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子５１２Ａ及び光出射用格子５１２Ｂ共に、間隔$3^{0.5}a/2$で並ぶ。この光出射用格子５１２Ｂの基本逆格子ベクトルは

$$d_1↑=(1/(r_1+r_2),\ r_2/(r_1+r_2))\times(4\times3^{-0.5}\pi/a) \quad (26)$$

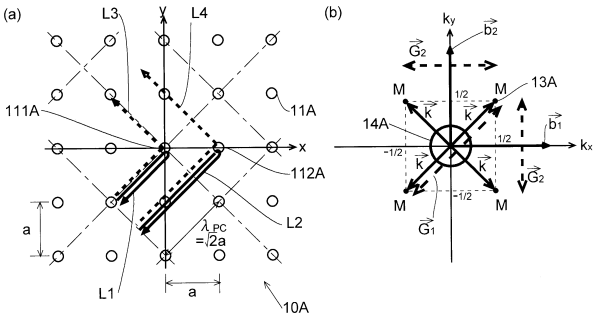
$$d_2↑=(-1/(r_1+r_2),\ r_1/(r_1+r_2))\times(4\times3^{-0.5}\pi/2a) \quad (27)$$

で表され、逆格子ベクトルG'↑はG'↑=pd_1↑+qd_2↑（p、qは整数）で表される。そして、ベクトルΔk↑=k↑+G'↑の大きさ|Δk↑|=|k↑+G'↑|がライトコーンの半径|k↑|/neffよりも小さくなるようにr_1及びr_2を定めることにより、傾斜ビームを出射させることができる。

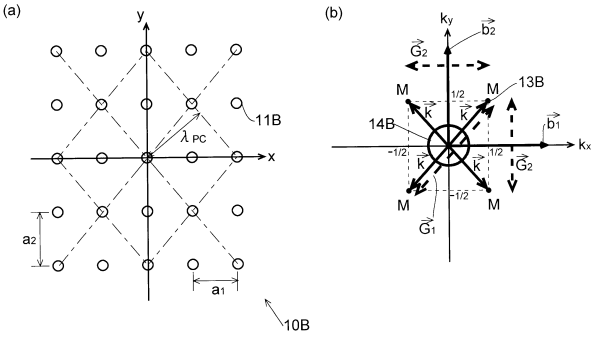
【実施例５】
【００６０】
第５実施例として、出射方向可変フォトニック結晶レーザの例を、図１２を用いて説明する。第５実施例のフォトニック結晶レーザは、第１実施例における２次元フォトニック結晶層２１の代わりに、以下に述べる２次元フォトニック結晶層６１を有する。また、第１実施例における裏面電極２５１及び窓状電極２５２の代わりに、以下に述べる電極を用いる。それら以外の本実施例のフォトニック結晶レーザの構成は、第１実施例のフォトニック結晶レーザ２０のものと同様である。
【００６１】
２次元フォトニック結晶層６１は、光共振状態形成用格子６１２Ａ（図１２(a)）と光出射用格子６１２Ｂ（図１２(b)）を重ね合わせた格子（図示せず）の格子点上に空孔（異屈折率領域）が配置されたものである。光共振状態形成用格子６１２Ａは第１実施例と同様に、格子定数aの正方格子である。光出射用格子６１２Ｂは、y方向には格子点が間隔aで並んでいる点では第１実施例と同様である。一方、x方向には、光出射用格子６１２Ｂが仮想的に分割された複数の領域６６（異周期領域と呼ぶ。これは、異屈折率領域とは異なるものである。）毎に異なる間隔で格子点が並んでいる。
【００６２】
下部基板２４１の下面及び上部基板の上面にはそれぞれ、下部電極６５１及び上部電極６５２が設けられている。これら下部電極６５１及び上部電極６５２は、x方向の幅が異周期領域６６の幅よりも狭い電極が多数、x方向に並べられたものである（図１２(c)）。なお、下部電極６５１又は上部電極６５２のうちの一方のみをこのように多数の電極で構成し、他方はx方向全体に亘る1枚の電極としてもよい。
【００６３】
本実施例のフォトニック結晶レーザでは、下部電極６５１及び／又は上部電極６５２として設けられた多数の電極のうち、1つの異周期領域６６の直上及び／又は直下にあるもののみから電流を活性層２２に注入する。これにより、その異周期領域６６の直下にある活性層２２において所定の波長の光を含む波長域の光が発光し、その所定波長の光がその異周期領域６６において共振を起こし、傾斜ビームが出射する。ここで、異周期領域６６毎に光出射用格子６１２Ｂの構造が異なるため、光が共振を起こす異周期領域６６を切り替える、すなわち、電流を注入する下部電極６５１及び／又は上部電極６５２中の個別の電極を切り替えることにより、傾斜ビームの出射方向を変化させることができる。
【実施例６】
【００６４】
第６実施例として、出射方向可変フォトニック結晶レーザの他の例を、図１３を用いて説明する。第６実施例のフォトニック結晶レーザは、第５実施例における光出射用格子６１２Ｂの代わりに、以下に述べる光出射用格子７１２Ｂを有する。また、第５実施例における下部電極６５１又は上部電極６５２の代わりに、以下に述べる電極を用いる。それら以外の本実施例のフォトニック結晶レーザの構成は、第５実施例と同様である。
【００６５】
光出射用格子７１２Ｂは斜交格子であり、その格子点はx方向にa1，a2，a3...(a1<a2<a3<...)と徐々に大きくなる間隔で並ぶと共に、x軸からα°だけy方向に傾斜した方向に一定の間隔(a/sinα)で並んでいる（図１３(b)）。従って、格子点は、y方向には、光共振状態形成用格子６１２Ａの格子点と同じ間隔aで並んでいる。
【００６６】
下部基板２４１の下面及び上部基板の上面にはそれぞれ、下部電極７５１及び上部電極７５２が設けられている。下部電極７５１及び上部電極７５２は、x方向に平行であって互いに向かい合う2本の短辺と、該短辺との成す角度がα°であって互いに平行である2本の長辺から成る平行四辺形である同一形状の電極が多数、x方向に並べられたものである（図１３(c)）。なお、下部電極７５１又は上部電極７５２のうちの一方のみをこのように多数の電極で構成し、他方はx方向全体に亘る1枚の電極としてもよい。

【００６７】
本実施例のフォトニック結晶レーザでは、下部電極７５１及び／又は上部電極７５２として設けられた多数の電極のうちの1つ又は隣接する複数個の電極のみから電流を活性層２２に注入する。これにより、活性層２２のうちの電流が注入された電流注入領域において、所定の波長の光を含む波長域の光が発光し、その所定波長の光が、その電流注入領域に面した光共振状態形成用格子６１２Ａの一部領域で共振を起こし、その一部領域における光出射用格子７１２Ｂの構造に応じて定まる傾斜角で、傾斜ビームが出射する。従って、下部電極７５１及び／又は上部電極７５２が有する多数の電極の中で、電流を注入する電極を切り替えることにより、傾斜ビームの出射方向を変化させることができる。
【００６８】
以上に述べた第１～第６実施例ではいずれも、光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造を１つの層に形成しているが、図１４(a)に示すように、２次元フォトニック結晶層８１は、光共振状態形成用フォトニック結晶構造を有する第１層８１Ａと、光出射用フォトニック結晶構造を有する第２層８１Ｂの２層構造を有する２次元フォトニック結晶層８１を用いてもよい。また、図１４(a)の例では第１層８１Ａと第２層８１Ｂを共に活性層２２よりも裏面電極２５１側に設けたが、これら２層を共に活性層２２よりも窓状電極２５２側に設けてもよい。また、図１４(b)に示すように、第１層８１Ａと第２層８１Ｂのうちの一方を活性層２２よりも裏面電極２５１側に設け、他方を活性層２２よりも窓状電極２５２側に設ける、すなわち第１層８１Ａと第２層８１Ｂで活性層２２を挟むようにしてもよい。
【符号の説明】
【００６９】
１０、２０…フォトニック結晶レーザ
１０Ａ、１０Ｂ、１０Ｃ…光共振状態形成用フォトニック結晶構造
１１１Ａ、１１２Ａ、４１３Ｂ、５１３Ｂ…格子点
１１Ａ、１１Ｂ、１１Ｃ、２１３Ａ、２１３Ｂ…格子点
１３Ａ、１３Ｂ…Ｍ点
１４、１４Ａ、１４Ｂ、１４Ｃ…ライトコーン
１５…光出射用フォトニック結晶構造
１６Ａ…異屈折率領域
２１、３１、４１、５１、６１…２次元フォトニック結晶層
２１１、４１１、５１１…空孔
２１２Ａ、４１２Ａ、５１２Ａ、６１２Ａ…光共振状態形成用格子
２１２Ｂ、３１２Ｂ、４１２Ｂ、５１２Ｂ、６１２Ｂ…光出射用格子
２１２Ｃ、３１２Ｃ、４１２Ｃ、５１２Ｃ…格子
２１４…母材（スラブ）
２２…活性層
２３１…第１クラッド層
２３２…第２クラッド層
２４１…下部基板
２４２…上部基板
２５１…裏面電極
２５２…窓状電極
６５１…下部電極
６５２…上部電極
６６…異周期領域

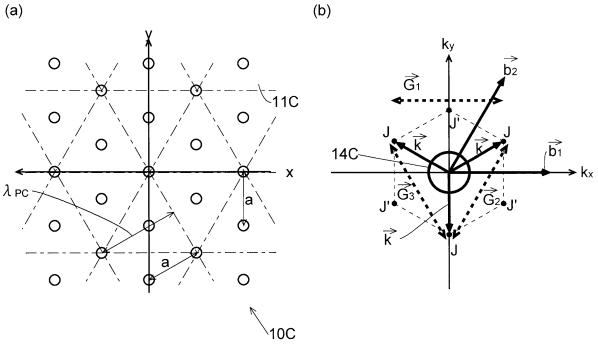
【図１】



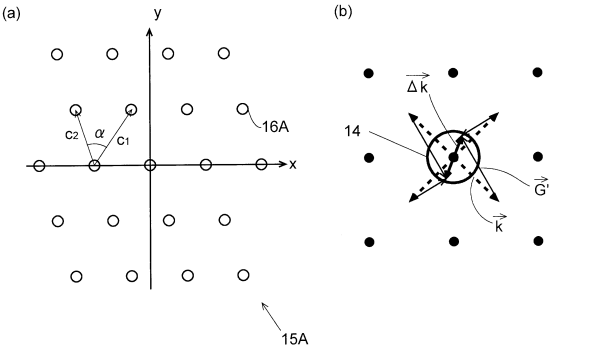
【図２】



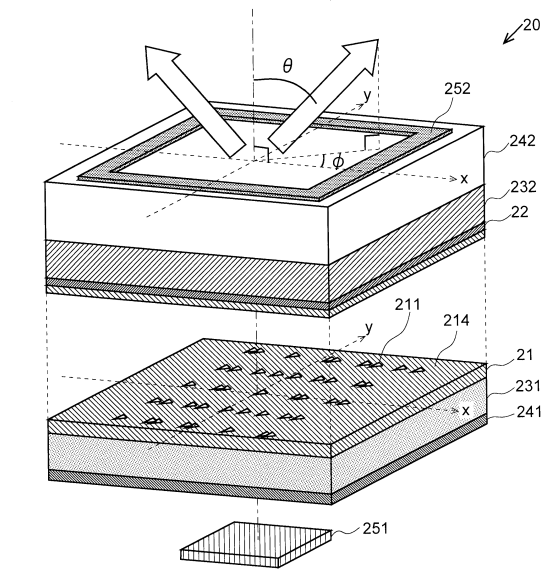
【図３】



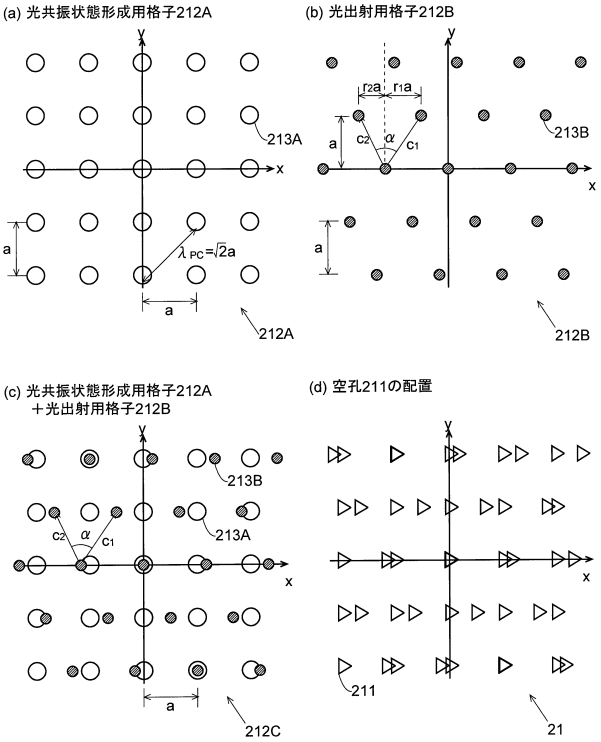
【図４】



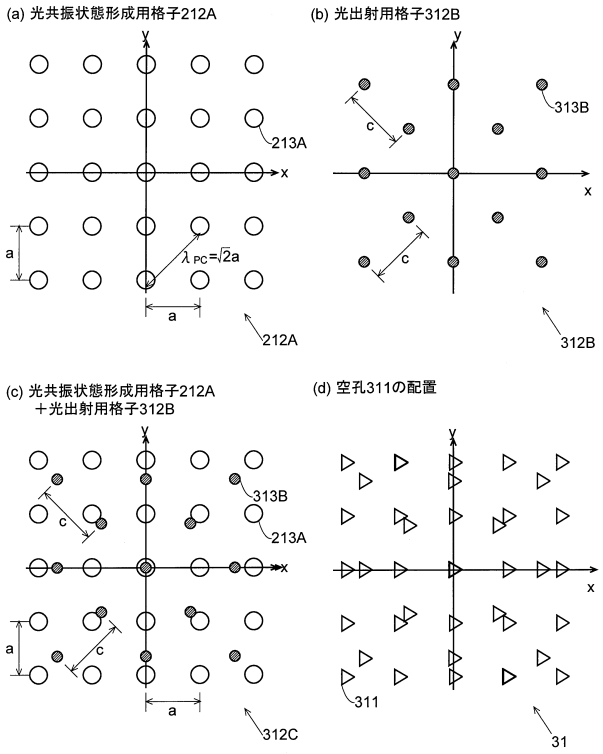
【図５】



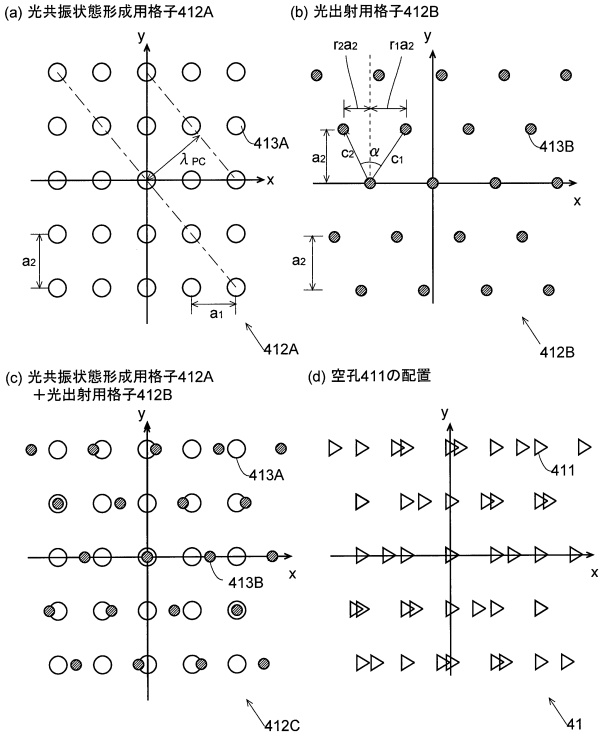
【図６】



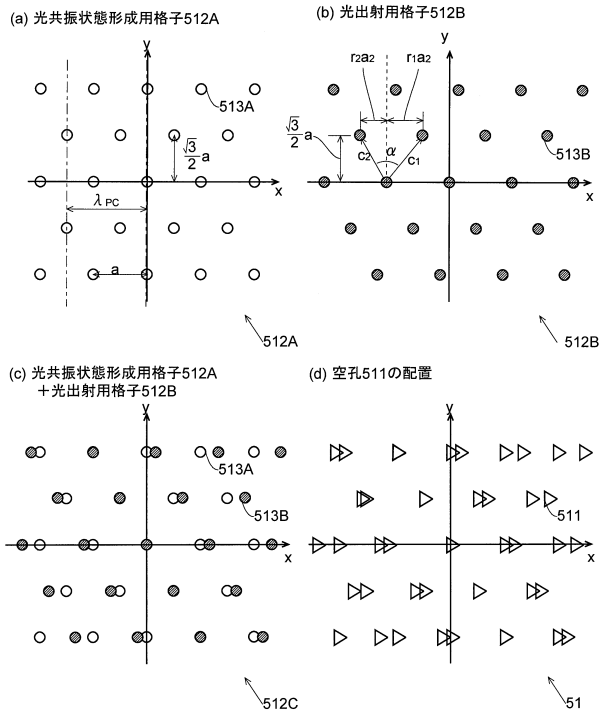
【図９】



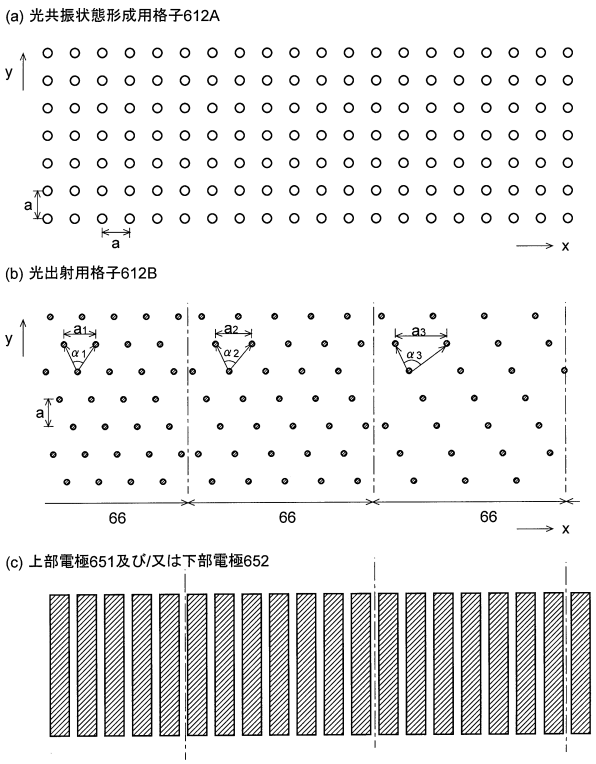
【図１０】



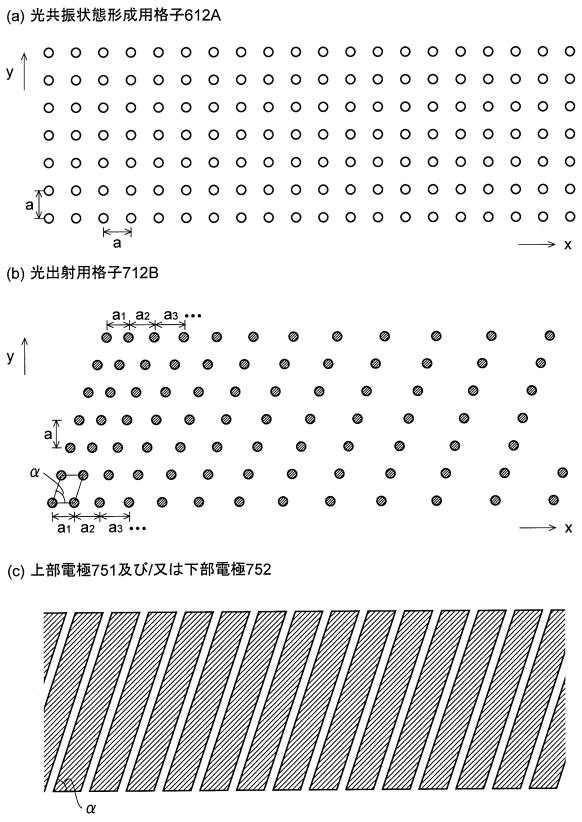
【図１１】



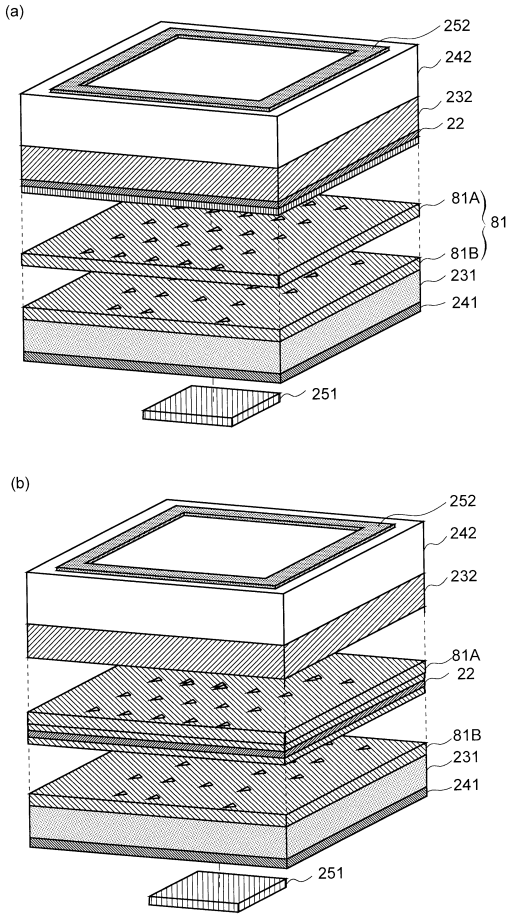
【図１２】



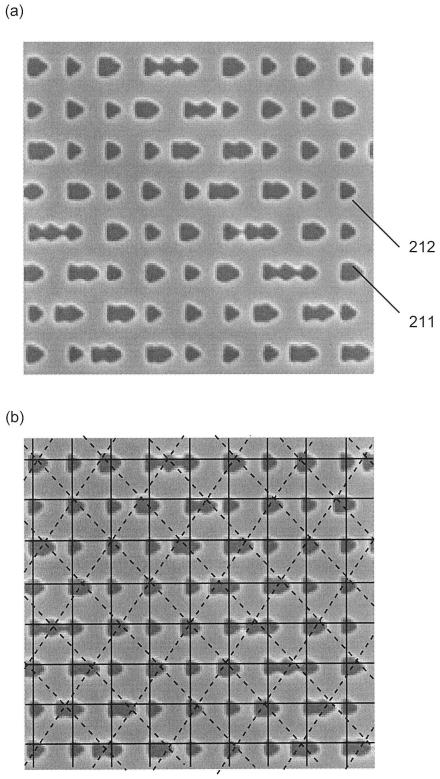
【図１３】


(a) 光共振状態形成用格子612A
y
a
a
x
(b) 光出射用格子712B
a1 a2 a3 •••
y
a
α
a1 a2 a3 •••
x
(c) 上部電極751及び/又は下部電極752
α

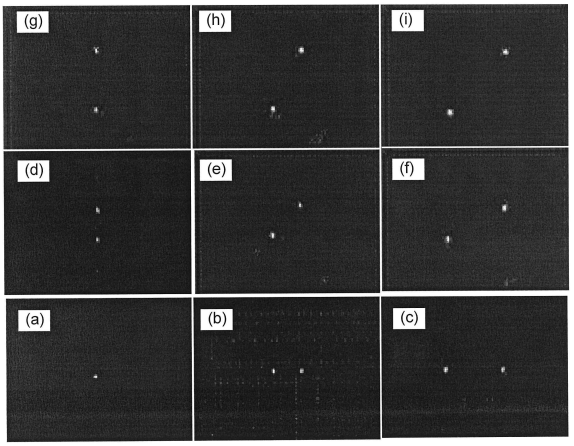
【図１４】


(a)
252
242
232
22
81A
81
81B
231
241
251
(b)
252
242
232
81A
22
81B
231
241
251

【図７】


(a)
212
211
(b)

【図８】


(g)
(h)
(i)
(d)
(e)
(f)
(a)
(b)
(c)

フロントページの続き

(72)発明者　信岡　俊之
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

審査官　吉野　三寛

(56)参考文献　特開２００７－２０８１２７（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－０７６９００（ＪＰ，Ａ）
面心長方格子を用いた２次元フォトニック結晶レーザ，電子情報通信学会技術研究報告．PN，フォトニックネットワーク 109(401)，pp．5-9
Yoshitaka Kurosaka et al.，"On-chip beam-steering photonic-crystal lasers"，Nature Photonics，英国，Nature Publishing Group，２０１０年　7月，Vol.4，No.7，pp.447-450

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｓ　　５／００－５／５０