(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7624742号
(P7624742)

(45)発行日　令和7年1月31日(2025.1.31)

(24)登録日　令和7年1月23日(2025.1.23)

(51)国際特許分類

		FI		
H01S	*5/11 (2021.01)*	H01S	5/11	
H01S	*5/185(2021.01)*	H01S	5/185	
H01S	*5/042(2006.01)*	H01S	5/042	612

請求項の数　11　（全29頁）

(21)出願番号　特願2022-512568(P2022-512568)
(86)(22)出願日　令和3年3月30日(2021.3.30)
(86)国際出願番号　PCT/JP2021/013620
(87)国際公開番号　WO2021/200994
(87)国際公開日　令和3年10月7日(2021.10.7)
審査請求日　令和6年1月23日(2024.1.23)
(31)優先権主張番号　特願2020-65047(P2020-65047)
(32)優先日　令和2年3月31日(2020.3.31)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)
（出願人による申告）平成２９年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、チーム型研究（ＣＲＥＳＴ）、「変調フォトニック結晶レーザーによる２次元ビーム走査技術の開発」委託研究、産業技術力強化法第１７条の適用を受ける特許出願

(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
(74)代理人　110001069
弁理士法人京都国際特許事務所
(72)発明者　野田 進
京都府京都市左京区吉田本町３６番地１
国立大学法人京都大学内
(72)発明者　吉田 昌宏
京都府京都市左京区吉田本町３６番地１
国立大学法人京都大学内
(72)発明者　デ ゾイサ メーナカ
京都府京都市左京区吉田本町３６番地１
国立大学法人京都大学内
(72)発明者　石崎 賢司

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　２次元フォトニック結晶レーザ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

活性層と、板状の母材に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が２次元状に周期的に配置された２次元フォトニック結晶層とを有する積層体を、第１電極及び第２電極で挟んで成る２次元フォトニック結晶レーザであって、

前記第１電極は複数の部分電極に分割されており、

前記第２電極は、導電体から成る枠状部を有し、該枠状部の内側の空間である窓部が前記複数の部分電極を包絡する領域に対向して配置されている枠状電極であり、

前記第２電極の前記積層体とは反対側又は前記積層体の前記第２電極側の表面に、前記窓部を覆うように設けられたレンズを備える

ことを特徴とする２次元フォトニック結晶レーザ。

【請求項２】

前記レンズが前記積層体の前記第２電極側の表面に、該積層体と一体に形成されてい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レーザ。

【請求項３】

前記複数の部分電極の各々から前記活性層に電流が注入される領域である部分電流注入領域が、該部分電極に隣接する部分電極から該活性層に電流が注入される部分電流注入領域の一部と重なるように、隣接する部分電極同士の間隔が設定されていることを特徴とする請求項１又は２に記載の２次元フォトニック結晶レーザ。

【請求項４】

前記レンズが該レンズの焦点距離の0.5～2倍の距離だけ前記２次元フォトニック結晶層から離間して配置されていることを特徴とする請求項１～３のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶レーザ。

【請求項５】

前記レンズが、表面の曲率及び焦点距離のいずれか一方又は双方が可変であることを特徴とする請求項１～４のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶レーザ。

【請求項６】

前記２次元フォトニック結晶層は、

前記異屈折率領域が2個の部分異屈折率領域を有し、

該２次元フォトニック結晶層内を伝播する光が該異屈折率領域によって、180°方向に回折される180°回折光の結合係数κ_{180}と、90°方向に回折される90°回折光の結合係数$-\kappa_{90}$の差の絶対値である$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が100$cm^{-1}$以下となるように、該2個の部分異屈折率領域の形状が設定されている

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レーザ。

【請求項７】

さらに、前記複数の部分電極同士の間に、電気的に絶縁性を有する材料製であってレーザビームを反射する反射部を備え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レーザ。

【請求項８】

活性層と、板状の母材に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が２次元状に配置された２次元フォトニック結晶層とを有する積層体を、第１電極及び第２電極で挟んで成る２次元フォトニック結晶レーザであって、

前記第１電極は複数の部分電極に分割されており、

前記第２電極は、導電体から成る枠状部を有し、該枠状部の内側の空間である窓部が前記複数の部分電極を包絡する領域に対向して配置されている枠状電極であり、

前記２次元フォトニック結晶層は、前記異屈折率領域が、２次元定在波を形成することによって波長λ_Lの共振状態を形成し且つ該波長λ_L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基本２次元格子の各格子点において所定の変調位相Ψで変調して配置されており、

前記変調位相Ψが、前記２次元フォトニック結晶層内における前記波長λ_Lの光の波数ベクトル$\vec{k}=(k_x, k_y)$、前記２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}、所定の角度θ、及び前記基本２次元格子の所定の基準線からの方位角φを用いて表される逆格子ベクトル$\vec{G'}=(g'_x, g'_y)=(k_x\pm|\vec{k}|(\sin\theta\cos\phi)/n_{eff}, k_y\pm|\vec{k}|(\sin\theta\sin\phi)/n_{eff})$と、前記各格子点の位置ベクトル$\vec{r}$とを用いて、$\Psi=\vec{r}\cdot\vec{G'}$で表され、該角度θが該２次元フォトニック結晶層内の位置により相違している

ことを特徴とする２次元フォトニック結晶レーザ。

【請求項９】

前記逆格子ベクトル$\vec{G'}$が、前記２次元フォトニック結晶層内の位置(x, y)から出射させようとするレーザビームの傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)により表される$\sin\theta_x(x)=\sin\theta(x, y)\cos\phi(x, y)$、及び$\sin\theta_y(y)=\sin\theta(x, y)\sin\phi(x, y)$を用いて、該位置の関数$\vec{G'}(x, y)=(g'_x(x), g'_y(y))=(k_x\pm|\vec{k}|\sin_x\theta(x)/n_{eff}, k_y\pm|\vec{k}|\sin_y\theta(y)/n_{eff})$で表され、

前記変調位相Ψが前記位置の関数

【数１】

$$\Psi(x,y)=\int G'(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

…(1)

で規定されたものであることを特徴とする請求項８に記載の２次元フォトニック結晶レー

ザ。
【請求項１０】
前記複数の部分電極の各々から前記活性層に電流が注入される領域である部分電流注入領域が、該部分電極に隣接する部分電極から該活性層に電流が注入される部分電流注入領域の一部と重なるように、隣接する部分電極同士の間隔が設定されていることを特徴とする請求項８又は９に記載の２次元フォトニック結晶レーザ。
【請求項１１】
さらに、前記複数の部分電極同士の間に、電気的に絶縁性を有する材料製であってレーザビームを反射する反射部を備えることを特徴とする請求項８～１０のいずれかに記載の２次元フォトニック結晶レーザ。
【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を用いて光を増幅する２次元フォトニック結晶レーザに関する。
【背景技術】
【０００２】
２次元フォトニック結晶レーザは、活性層及び２次元フォトニック結晶層、並びにそれらを挟むように設けられた１対の電極を備える。活性層は、電極からキャリア（正孔、電子）が注入されることによって、特定の発光波長帯の発光を生じさせるものである。２次元フォトニック結晶層は、板状の母材にそれとは屈折率が異なる異屈折率領域が周期的に２次元状に配置された構成を有している。異屈折率領域は、母材に形成された空孔（空気）、又は母材の材料とは異なる部材から成る。また一般に、一方の電極（「第１電極」とする）と活性層の間には半導体から成る第１クラッド層が、２次元フォトニック結晶層と他方の電極（「第２電極」とする）の間には半導体から成る第２クラッド層が、それぞれ設けられる。
【０００３】
このような２次元フォトニック結晶レーザでは、活性層で生じる光のうち異屈折率領域の配置の周期長に対応した所定波長の光のみが２次元フォトニック結晶層において増幅されてレーザ発振し、２次元フォトニック結晶層の表面からレーザビームが出射する。
【０００４】
特許文献１及び２には、レーザビームの出射方向を可変にした２次元フォトニック結晶レーザ（以下、「出射方向可変２次元フォトニック結晶レーザ」とする）が記載されている。このような出射方向可変２次元フォトニック結晶レーザは、レーザプリンタやレーザディスプレイ等においてレーザビームを走査することによって文字や図形を形成するために好適に用いることができる光源である。
【０００５】
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レーザ（以下、「第１の従来例」とする）では、第２電極が第２クラッド層の表面（２次元フォトニック結晶層とは反対側の面）に複数個に分割されて設けられており、分割された各電極（個々の電極を「部分電極」と呼ぶ）の間には空隙が設けられている。また、第２クラッド層の表面に対向してレンズが設けられている。第１電極は、第１クラッド層の表面（活性層とは反対側の面）の全体を覆うように設けられている。
【０００６】
第１の従来例によれば、複数個の部分電極のうちの1個又は隣接する複数個と第１電極の間に電流を流すことにより、活性層のうち一部の領域（以下、「電流注入領域」とする）に電流が注入され、電流注入領域において光が生じる。これにより、２次元フォトニック結晶層のうち電流注入領域に対応する領域においてレーザ発振し、２次元フォトニック結晶層から該層に垂直な方向にレーザビームが放出される。２次元フォトニック結晶層から放出されたレーザビームは、部分電極同士の間及びレンズを通過して外部に放出される

。ここで、レンズに進入する位置に依ってレーザビームが異なる角度で屈折するため、外部に放出されたレーザビームの進行方向は、レンズに進入する位置、さらにはその位置が定まる基となる電流注入領域の位置によって異なることとなる。そのため、電流を供給する部分電極を変更して電流注入領域の位置を変化させることにより、レーザビームの進行方向を変化させることができ、それによってレーザビームを走査することができる。

【０００７】

特許文献２及び３に記載の出射方向可変２次元フォトニック結晶レーザ（第２の従来例）では、２次元フォトニック結晶層において、異屈折率領域が正方格子や長方格子等の２次元格子の格子点からずれた位置に配置されている。各格子点における異屈折率領域の該格子点からの位置のずれは、変調位相というパラメータで規定される。一例では、異屈折率領域は各格子点において同じ距離であって異なる方位角の方向にずれており、この方位角の位相が変調位相に該当する。２次元フォトニック結晶層内は仮想的に複数の発振領域に分割されており、同じ発振領域内では隣接する格子点の間での方位角の位相差（変調位相の位相差）が同じ値を有し、異なる発振領域の間では該位相差が異なる値を有している。第２電極は、複数の発振領域の各々に対応して1個ずつ設けられた部分電極である。第１電極は第１クラッド層の表面の全体を覆うように設けられた透明電極であって、第１電極側からレーザビームが出射するようになっている。第２の従来例では、レンズは設けられていない。

【０００８】

第２の従来例によれば、複数個の部分電極のうちの1個と第１電極の間に電流を供給することにより、活性層のうちその1個の部分電極に対応する領域（電流注入領域）において光が生じ、該1個の部分電極に対応する２次元フォトニック結晶層の領域（発振領域）においてレーザ発振する。レーザビームは、２次元フォトニック結晶層に対して垂直な方向から、変調位相により定まる傾斜角だけ傾斜した方向に進行する。従って、電流を供給する部分電極を変更して発振領域を変化させることにより変調位相が変化し、レーザビームの進行方向を変化させることができ、それによってレーザビームを走査することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００９】

【文献】特開2005-277219号公報

【文献】国際公開WO2014/136607号

【文献】米国特許公開公報US2016/0248224号

【文献】特開2008-243962号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１０】

第１の従来例では、レーザビームが外部に放出されるのは部分電極同士の間のみであり、レーザビームの一部は部分電極によって遮られてしまう。また、第２の従来例では、レーザビームは透明電極を通過して外部に放出されるが、一般に透明電極の光の透過率は100%ではないため、レーザビームは透明電極によって減衰してしまう。

【００１１】

本発明が解決しようとする課題は、レーザビームを走査することができ、且つ電極により減衰されることなく該レーザビームを出射することができる出射方向可変２次元フォトニック結晶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】

【００１２】

上記課題を解決するために成された本発明の第１の態様のものは、活性層と、板状の母材に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が２次元状に周期的に配置された２次元フォトニック結晶層とを有する積層体を、第１電極及び第２電極で挟んで成る２次元フォトニ

ック結晶レーザであって、
前記第１電極は複数の部分電極に分割されており、
前記第２電極は、導電体から成る枠状部を有し、該枠状部の内側の空間である窓部が前記複数の部分電極を包絡する領域に対向して配置されている枠状電極であり、
前記第２電極の前記積層体とは反対側又は前記積層体の前記第２電極側の表面に、前記窓部を覆うように設けられたレンズを備える
ことを特徴とする。
【００１３】
第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザでは、第１電極を構成する複数の部分電極のうちの1個又は隣接する複数個（これらが存在する領域を「電流供給領域」と呼ぶ）と第２電極との間に電流を流すことにより、活性層のうち該電流供給領域に対応する領域である電流注入領域に電流が注入され、該電流注入領域において光が生じる。これにより、２次元フォトニック結晶層のうち電流注入領域に対応する領域においてレーザ発振し、２次元フォトニック結晶層から該層に垂直な方向にレーザビームが放出され、第２電極の窓部及びレンズを通過して２次元フォトニック結晶レーザの外部に出射する。ここで、レンズに進入する位置に依ってレーザビームが異なる角度で屈折するため、外部に放出されたレーザビームの進行方向は、レンズに進入する位置、さらにはその位置が定まる基となる電流供給領域の位置によって異なることとなる。そのため、電流を供給する部分電極を変更することで電流注入領域の位置を変化させることにより、レーザビームの進行方向も変化させることができ、それによってレーザビームを走査することができる。
【００１４】
レンズは、第２電極の積層体とは反対側に設けてもよいし、積層体の第２電極側の表面に設けてもよい。レンズを積層体の第２電極側の表面に設ける場合には、該レンズは積層体と一体に形成されていることが好ましい。これにより、２次元フォトニック結晶レーザのサイズを小さくすることができる。このような積層体と一体のレンズは、積層体の第２電極側の表面をエッチング等の手法で加工することにより作製することができる。
【００１５】
なお、活性層における電流注入領域は、第１電極における電流供給領域と同じ大きさにはならない。本発明では第２電極の窓部が前記複数の部分電極を包絡する領域に対向して配置されていることから、第１電極における電流供給領域よりも第２電極の枠状部の外形の方が大きくなるため、電流は第１電極から第２電極に向かって活性層の面内方向に拡がるように流れる。そのため、電流注入領域は電流供給領域よりも大きくなる。
【００１６】
第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザによれば、２次元フォトニック結晶層から放出されたレーザビームが第２電極の窓部、すなわち枠状部の内側の導電体が存在しない空間を通過するため、減衰することなくレーザビームを出射することができる。
【００１７】
第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて前記複数の部分電極の各々から前記活性層に電流が注入される領域である部分電流注入領域が、該部分電極に隣接する部分電極から該活性層に電流が注入される部分電流注入領域の一部と重なるように、隣接する部分電極同士の間隔が設定されていることが望ましい。これにより、複数に分割されていない1つの電流注入領域が活性層に形成され、この1つの電流注入領域からの発光が２次元フォトニック結晶層で増幅されることにより、コヒーレントなレーザビームを得ることができる。このように隣接する部分電極によってそれぞれ形成される部分電流注入領域同士が重なるようにすることは、シミュレーションを行うことで、第１電極（部分電極）と活性層の距離、活性層と第２電極の距離、部分電極間の距離、及び第２電極の面積等のパラメータを設定することにより実現することができる。
【００１８】
第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、前記レンズは該レンズの焦点距離の0.5～2倍の距離だけ前記２次元フォトニック結晶層から離間して配置されていること

が望ましい。このように、レンズの焦点距離に近い距離だけ２次元フォトニック結晶層から離間してレンズが配置されていることにより、レンズを通過したレーザビームの径が拡がることを抑えることができる。

【００１９】

第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、

前記２次元フォトニック結晶層は、

前記異屈折率領域が2個の部分異屈折率領域を有し、

該２次元フォトニック結晶層内を伝播する光が該異屈折率領域によって、180°方向に回折される180°回折光の結合係数κ_{180}と、90°方向に回折される90°回折光の結合係数$-\kappa_{90}$の差の絶対値（$|\kappa_{180}-(-\kappa_{90})|=|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$）が$100cm^{-1}$以下となるように、該2個の部分異屈折率領域の形状が設定されていることが望ましい。

【００２０】

ここで結合係数は回折光の強度を示すパラメータであって、正負いずれの数値も取り得る。κ_{180}は、1方向に導波する面内導波光とそれが異屈折率領域で反射されて180°進行方向が変化（180°回折）した面内導波光との相互作用を表す１次元結合係数（エルミート成分）である。κ_{90}は、１方向に導波する面内導波光とそれが異屈折率領域によって90°進行方向が変化した光との相互作用を表す２次元結合係数である。これらκ_{180}及びκ_{90}は、異屈折率領域の形状に基づいて求められる。κ_{180}と$-\kappa_{90}$の差の絶対値である$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が0に近くなるほど、180°回折光と90°回折光の干渉光の強度が弱くなり、それによって光が２次元フォトニック結晶層内に閉じ込められる効果が抑えられるため、２次元フォトニック結晶レーザの外部に出射するレーザビームの強度を高くすることができる。そのため、上記のように$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$は$100cm^{-1}$以下とすることが望ましい。

【００２１】

第１の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、さらに、前記複数の部分電極同士の間（隣接する部分電極の間の隙間）に、電気的に絶縁性を有する材料製であってレーザビームを反射する反射部を備えることが望ましい。これにより、２次元フォトニック結晶層から第１電極側に放出されたレーザビームが反射部及び部分電極で反射されて第２電極の窓部から出射するため、発光効率を高くすることができる。

【００２２】

本発明の第２の態様のものは、活性層と、板状の母材に該母材とは屈折率が異なる異屈折率領域が２次元状に配置された２次元フォトニック結晶層とを有する積層体を、第１電極及び第２電極で挟んで成る２次元フォトニック結晶レーザであって、

前記第１電極は複数の部分電極に分割されており、

前記第２電極は、導電体から成る枠状部を有し、該枠状部の内側の空間である窓部が前記複数の部分電極を包絡する領域に対向して配置されている枠状電極であり、

前記２次元フォトニック結晶層は、前記異屈折率領域が、２次元定在波を形成することによって所定の波長の共振状態を形成し且つ該波長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基本２次元格子の各格子点において所定の変調位相Ψで変調して配置されており、

前記変調位相Ψが、前記２次元フォトニック結晶層内における前記波長λ_Lの光の波数ベクトル$\vec{k}=(k_x, k_y)$、前記２次元フォトニック結晶層の有効屈折率n_{eff}、所定の角度θ、及び前記基本２次元格子の所定の基準線からの方位角φを用いて表される逆格子ベクトル$\vec{G'}=(g'_x, g'_y)=(k_x\pm|\vec{k}|(\sin\theta\cos\phi)/n_{eff}, k_y\pm|\vec{k}|(\sin\theta\sin\phi)/n_{eff})$と、前記各格子点の位置ベクトル$\vec{r}$とを用いて、$\Psi=\vec{r}\cdot\vec{G'}$で表され、該角度θが該２次元フォトニック結晶層内の位置により相違している

ことを特徴とする。

【００２３】

第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザでは、第１電極を構成する複数の部分電極のうちの1個又は隣接する複数個（これらが存在する領域を、第１の態様と同様に「電流供給領域」と呼ぶ。）と第２電極との間に電流を流すことにより、活性層のうち一部の領

域である電流注入領域に電流が注入され、該電流注入領域において光が生じる。これにより、２次元フォトニック結晶層のうち電流注入領域に対応する領域（「光増幅領域」と呼ぶ）において前記所定の波長の光によるレーザ発振が生じ、レーザビームが生成される。ここで前記所定の波長は、活性層で生じる光の波長範囲内に含まれていればよい。

【００２４】

こうして生成されたレーザビームは、光増幅領域における２次元フォトニック結晶層の変調位相に応じた傾斜角（２次元フォトニック結晶層に対する法線とレーザビームの進行方向の成す角度）で２次元フォトニック結晶層から放出され、第２電極の窓部を通過して２次元フォトニック結晶レーザの外部に出射する。この傾斜角は、光増幅領域内の各格子点における変調位相Ψにより定まる。そして、変調位相を規定する角度θが該２次元フォトニック結晶層内の位置により相違しているため、電流を注入する部分電極を変更することで電流注入領域の位置を変化させることにより、レーザビームの進行方向も変化させることができる。そのため、レーザビームを走査することができる。

【００２５】

ここまでは、変調位相Ψ=r↑・G'↑における逆格子ベクトルG'↑は２次元フォトニック結晶層内の位置に依存しないものとして説明したが、特許文献３に記載のように、逆格子ベクトルG'↑を２次元フォトニック結晶層内の位置に依存する関数G'(x, y)↑として規定してもよい。この場合には以下のように、２次元フォトニック結晶層内の位置(x, y)（厳密には２次元フォトニック結晶層の「面内の位置」）から出射させようとするレーザビームの傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)を用いてG'↑(x, y)を、さらには該位置(x, y)における変調位相Ψ(x, y)を規定することができる。すなわち、傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)から$\sin\theta_x(x)=\sin\theta(x,y)\cos\phi(x,y)$、及び$\sin\theta_y(y)=\sin\theta(x,y)\sin\phi(x,y)$で表される角度$\theta_x(x)$及び$\theta_y(y)$を規定すると、逆格子ベクトルG'(x, y)↑は$G'(x,y)\uparrow=(g'_x(x), g'_y(y))=(k_x\pm|k\uparrow|\sin\theta_x(x)/n_{eff}, k_y\pm|k\uparrow|\sin\theta_y(y)/n_{eff})$で表される。そして、変調位相Ψ(x, y)は

【数１】

$$\Psi(x,y)=\int G'(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

…(1)

で表される。この変調位相Ψ(x, y)は、位置(x, y)における傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)で規定されることとなる。

【００２６】

２次元フォトニック結晶層内の各異屈折率領域を、基本２次元格子の各格子点において(1)式で示した変調位相Ψ(x, y)で変調して配置することにより、光増幅領域内における２次元フォトニック結晶層の変調位相を規定する傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)に近い傾斜角及び方位角を有するレーザビームが得られる。特に、或る光増幅領域内で同じ傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)を用いて変調位相Ψ(x, y)を規定すれば、その光増幅領域からは該傾斜角θ(x, y)及び該方位角φ(x, y)を有するレーザビームが得られる。

【００２７】

第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザによれば、２次元フォトニック結晶層から放出されたレーザビームが第２電極の窓部、すなわち枠状部の内側の導電体が存在しない空間を通過するため、減衰することなくレーザビームを出射することができる。

【００２８】

第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザでは、各格子点において前記異屈折率領域が該格子点から同一の距離だけずれて配置されており、該ずれの方向と基準線との成す角度の相違により格子点毎の前記変調位相が設定されている、という構成を取ることができる。

【００２９】

あるいは、第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザでは、各格子点において前記異屈折率領域が該格子点から同一方向にずれて配置されており、該ずれの距離の相違により格子点毎の前記変調位相が設定されている、という構成を取ることもできる。ここで、或る方向に対して180°異なる方向は、前記或る方向と「同一方向」に該当するものとする。

【００３０】

さらに別の例として、第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザでは、前記異屈折率領域が各格子点に配置されており、各異屈折率領域の面積の相違により格子点毎の前記変調位相が設定されている、という構成を取ることもできる。

【００３１】

第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、第１の態様のものと同様に、前記複数の部分電極の各々から前記活性層に電流が注入される領域である部分電流注入領域が、該部分電極に隣接する部分電極から該活性層に電流が注入される部分電流注入領域の一部と重なるように、隣接する部分電極同士の間隔が設定されていることが望ましい。

【００３２】

また、第２の態様の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、第１の態様のものと同様に、さらに、前記複数の部分電極同士の間（隣接する部分電極の間の隙間）に、電気的に絶縁性を有する材料製であってレーザビームを反射する反射部を備えることが望ましい。

【発明の効果】

【００３３】

本発明によれば、レーザビームを走査することができ、且つ電極により減衰されることなく該レーザビームを出射することができる出射方向可変２次元フォトニック結晶レーザを得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【００３４】

【図１】本発明に係る２次元フォトニック結晶レーザの第１実施形態を示す概略構成図。

【図２】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザが有する２次元フォトニック結晶層、第１電極及び第２電極を示す斜視図。

【図３】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおける２次元フォトニック結晶層の一例を示す平面図。

【図４】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおける２次元フォトニック結晶層の別の一例を示す平面図。

【図５Ａ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、第１電極を構成する部分電極の形状及び配置の一例を示す平面図。

【図５Ｂ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、第１電極を構成する部分電極の形状及び配置の別の一例を示す平面図。

【図６Ａ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、隣接する複数の部分電極から活性層に電流を注入したときの部分電流注入領域及び電流注入領域の例を示す図。

【図６Ｂ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、電流を注入する部分電極を変更することによって電流注入領域が移動する例を示す図。

【図７Ａ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、隣接する複数の部分電極から活性層に電流を注入したときに生じるレーザビームの進行方向の例を示す図。

【図７Ｂ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、電流を注入する部分電極を変更することによってレーザビームが移動し、それによってレンズを通過したレーザビームの進行方向が変化することの例を示す図。

【図８】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、電流注入領域の移動の方向とレーザビームの移動（スキャン）の方向の関係を示す図。

【図９】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、隣接する複数の部分電極から活性層に電流を注入したときに複数の電流注入領域が形成される例を示す図。

【図１０Ａ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、部分電極の間隔を

定めるための計算の条件を説明するための図。
【図１０Ｂ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、部分電極からの深さdが複数の値を取る場合の各々について、部分電極の端部からの距離wと電流密度の比i_1/i_0の関係を計算で求めた結果を示すグラフ。
【図１０Ｃ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、部分電極からの深さdと電流密度の比i_1/i_0が$1/e^2$となるときの部分電極の端部からの距離w_eの関係を示すグラフ。
【図１１】２次元フォトニック結晶層内における光の干渉の状態を表す結合係数を求めるためのパラメータを示す図。
【図１２Ａ】第１部分異屈折率領域と第２部分異屈折率領域のx方向及びy方向に関する距離の相違による、180°回折光と90°回折光の干渉を表す結合係数の差を計算で求めた結果を示すグラフ。
【図１２Ｂ】第１部分異屈折率領域と第２部分異屈折率領域の充填率の比の相違による、180°回折光と90°回折光の干渉を表す結合係数の差を計算で求めた結果を示すグラフ。
【図１２Ｃ】第１部分異屈折率領域と第２部分異屈折率領域の扁平率の差の相違による、180°回折光と90°回折光の干渉を表す結合係数の差を計算で求めた結果を示すグラフ。
【図１３Ａ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの変形例を示す概略構成図。
【図１３Ｂ】第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの他の変形例を示す概略構成図。
【図１４】本発明に係る２次元フォトニック結晶レーザの第２実施形態を示す概略構成図。
【図１５Ａ】第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおける２次元フォトニック結晶層の一例を示す平面図。
【図１５Ｂ】図１５Ａに示した２次元フォトニック結晶層における異屈折率領域の重心の位置を示す平面図。
【図１６Ａ】第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、隣接する複数の部分電極から活性層に電流を注入したときに生じるレーザビームの進行方向の例を示す図。
【図１６Ｂ】第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザにおいて、電流を注入する部分電極を変更することによってレーザビームが移動し、レーザビームの進行方向が変化することの例を示す図。
【図１７】第２実施形態の変形例である、x方向に隣接する複数の格子点を有する同一のずれ方位角設定領域内において同じずれ方位角を有し、異なるずれ方位角設定領域同士では異なるずれ方位角を有する構成の例における異屈折率領域の重心の位置を示す平面図。
【図１８】第２実施形態の変形例である、x方向のずれの距離を変調位相により変調させた構成の例における異屈折率領域の重心の位置を示す平面図。
【図１９】第２実施形態の変形例である、異屈折率領域の平面形状の面積を変調位相により変調させた構成の例における２次元フォトニック結晶層を示す平面図。
【発明を実施するための形態】
【００３５】
図１～図１９を用いて、本発明に係る出射方向可変２次元フォトニック結晶レーザ（以下、単に「２次元フォトニック結晶レーザ」とする）の実施形態を説明する。なお、以下では便宜上、２次元フォトニック結晶レーザの各構成要素の相対的な位置関係を説明する際に「上」及び「下」との語を用いるが、これらの語は２次元フォトニック結晶レーザの向きを限定するものではない。
【００３６】
(a) 第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ
(a-1) 第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの構成
第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ１は、図１に示すように、後述の積層体１０を、第１電極１８１及び第２電極１８２で挟んだ構造を有している。また、第２電極１８２の積層体１０とは反対側にはレンズ１９が設けられている。
【００３７】

積層体１０は、図１の下側から順に、基板１１と、第１クラッド層１２１と、活性層１３と、キャリアブロック層１４と、２次元フォトニック結晶層１５と、第２クラッド層１２２と、コンタクト層１６とを積層したものである。第１電極１８１はコンタクト層１６の上面に、第２電極１８２は基板１１の下面に、それぞれ設けられている。

【００３８】

活性層１３は、正孔及び電子が注入されることによって特定の発光波長帯の発光を生じさせるものである。活性層１３には例えば、インジウム・ガリウム砒素（InGaAs）から成る薄膜とガリウム砒素（GaAs）から成る薄膜を交互に多数積層した多重量子井戸（Multiple-Quantum Well; MQW）を用いることができる。

【００３９】

２次元フォトニック結晶層１５は、図２及び図３に示すように、板状の母材１５１内に該母材１５１とは屈折率が異なる異屈折率領域１５２が２次元状に周期的に配置されたものである。異屈折率領域１５２は、典型的には母材１５１に空孔（屈折率　1）を形成したものである。空孔を形成する代わりに、母材１５１とは屈折率が異なる部材（異屈折率部材）を母材１５１に埋め込むことによって異屈折率領域１５２を形成してもよい。

【００４０】

本実施形態では、異屈折率領域１５２は母材１５１内に多数、正方格子状に配置されている。また、本実施形態では、1個の異屈折率領域１５２は、第１部分異屈折率領域１５２１と第２部分異屈折率領域１５２２という2個の部分異屈折率領域を組み合わせたものから成る。第１部分異屈折率領域１５２１は楕円形であって、第２部分異屈折率領域１５２２は円形である。第１部分異屈折率領域１５２１の楕円の長軸は、前記正方格子の最近接の格子点同士を結ぶ線に対して45°傾斜した方向を向くように配置されている。

【００４１】

図３では作図の都合上、異屈折率領域１５２が70個のみ描かれているが、実際には２次元フォトニック結晶層１５にはさらに多数の異屈折率領域１５２が設けられている。

【００４２】

なお、ここで挙げた異屈折率領域１５２の構成は一例であって、個々の異屈折率領域１５２は1個のみの空孔又は異屈折率部材から成るものであってもよいし、3個以上の空孔又は異屈折率部材から成るものであってもよい。また、異屈折率領域又は各部分異屈折率領域の形状も上記の例には限定されない。例えば、図４に示すように、正三角形の平面形状を有する1個の空孔から成る異屈折率領域１５２Ａを２次元状に周期的に配置することができる。正三角形のように非円形の平面形状を有する異屈折率領域を用いることにより、２次元フォトニック結晶内において光が干渉により消失することを抑えることができる。なお、図２及び図３に示した第１部分異屈折率領域１５２１と第２部分異屈折率領域１５２２から成る異屈折率領域１５２も、その全体の平面形状は非円形であるため、干渉による光の消失を抑えることができる。

【００４３】

通常、基板１１及び第１クラッド層１２１にはn型半導体から成るものを用い、キャリアブロック層１４、２次元フォトニック結晶層１５の母材１５１、第２クラッド層１２２及びコンタクト層１６にはp型半導体から成るものを用いる。これにより、積層体１０では、活性層１３を挟んで第１電極１８１側にp型半導体が配置され、第２電極１８２側にn型半導体が配置されたダイオードが形成され、第１電極１８１側から正孔が、第２電極１８２側から電子が、それぞれ活性層１３に注入されることとなる。具体例として、基板１１にはn型のGaAsを、第１クラッド層１２１にはn型のアルミニウム・ガリウム砒素（AlGaAs）を、キャリアブロック層１４及び第２クラッド層１２２にはいずれもp型のAlGaAsを、コンタクト層１６にはp型のGaAsを、それぞれ用いることができる。

【００４４】

なお、前述の例とは逆に、基板１１及び第１クラッド層１２１にp型半導体から成るものを用い、キャリアブロック層１４、母材１５１、第２クラッド層１２２及びコンタクト層１６にn型半導体から成るものを用いることも可能である。しかし、p型半導体よりもn

型半導体の方が安価であるため、材料のコストを抑えるために、前述の例のように、他の層よりも厚くする必要がある基板１１にn型半導体を用いた方が好ましい。

【００４５】

また、活性層１３と２次元フォトニック結晶層１５の位置は、図１に示したものとは互いに逆であってもよい。但し、２次元フォトニック結晶レーザ１の製造時に、基板１１の上に各層を順に作製してゆくことから、図１に示したように、空孔（異屈折率領域）を有する２次元フォトニック結晶層１５よりも活性層１３を基板１１側（先に作製する側）に設けた方が、空孔の存在による凹凸の影響を受けること無く活性層１３を精密に作製することができるため望ましい。

【００４６】

積層体１０を構成する各層の厚さは、活性層１３よりも第１電極１８１側にある各層（キャリアブロック層１４、２次元フォトニック結晶層１５、第２クラッド層１２２、コンタクト層１６）を合わせた厚さL_1よりも、活性層１３よりも第２電極１８２側にある各層（基板１１及び第１クラッド層１２１）を合わせた厚さL_2の方が十分に大きくなるように設定することが望ましい。その理由は、２次元フォトニック結晶レーザ１の動作の説明と合わせて後述する。

【００４７】

第１電極１８１は、図５Ａ、 図５Ｂに示すように、導電体から成る多数の部分電極１８１１に分割されている。部分電極１８１１は、図５Ａの例では一列に並ぶように配置されており、図５Ｂの例では２次元状に分布するように配置されている。部分電極１８１１の平面形状は、図５Ａの例では長方形、図５Ｂの例では正方形であるが、これらの形状には限定されない。各部分電極１８１１は、部分電極１８１１毎に設けられたスイッチ９１を介して直流電源９２の一方の電極（コンタクト層１６がp型半導体から成る場合には正極）に接続されている。スイッチ９１には、例えば電界効果トランジスタを用いることができる。なお、スイッチ９１を含む配線及び直流電源９２は、２次元フォトニック結晶レーザ１の構成要素ではない。

【００４８】

部分電極１８１１同士の間隔については、２次元フォトニック結晶レーザ１の動作の説明と合わせて後述する。

【００４９】

部分電極１８１１は、実際には、図５Ａ、 図５Ｂに示したものよりも多数設けられている。例えば、図５Ａに示した例では数百個、図５Ｂに示した例では同図の縦方向及び横方向にそれぞれ数百個ずつ、部分電極１８１１を並べて設けることができる。

【００５０】

コンタクト層１６の上面のうち部分電極１８１１が設けられていない部分である、部分電極１８１１同士の間及び該上面の端部には、電気的に絶縁性を有する材料から成りレーザビームを反射する反射層（反射部）１７が設けられている。なお、部分電極１８１１もレーザビームを反射する役割を有している。反射層１７は、２次元フォトニック結晶層１５から第１電極１８１側に放出されたレーザビームを反射させて第２電極１８２の窓部１８２２から出射させることにより、発光効率を高くすることを目的としている。

【００５１】

第２電極１８２は、図２に示すように、導電体から成る枠状部１８２１と、枠状部１８２１の内側の空間である窓部１８２２とを有する。窓部１８２２は、第１電極１８１の複数の部分電極１８１１を包絡する領域に対向して配置されている。第２電極１８２には、直流電源９２の他方の電極（基板１１がn型半導体から成る場合には負極）に接続されている。

【００５２】

レンズ１９は、本実施形態では、一方の面が凸面であって他方の面が平面である平凸レンズを用いている。平凸レンズの代わりに、両方の面が凸面であるレンズを用いてもよい。あるいは、レンズ１９として凹レンズを用いてもよい。レンズ１９は、２次元フォトニ

ック結晶層１５から、該レンズ１９の焦点距離fの0.5～2倍の距離L_{LP}だけ離間して配置されていることが望ましく、該レンズ１９の焦点距離fと等距離だけ離間して配置されていることがより望ましい。これにより、レンズ１９を通過したレーザビームの径が拡がることを抑えることができる。

【００５３】

また、上で例示したレンズ１９の代わりに、液体レンズ（electrowetting lens）や液晶レンズ（Liquid crystal lens）といった、電気的制御等により表面の曲率及び焦点距離のいずれか一方又は双方が可変であるレンズやプリズム（本願ではプリズムもレンズに含まれるものとする）を用いてもよい。この場合には、レンズの表面の曲率及び／又は焦点距離を変化させるための電気的制御等を行う制御部を用いる。

【００５４】

(a-2) 第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの動作

図６～図１０を用いて、第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ１の動作を説明する。

【００５５】

この２次元フォトニック結晶レーザ１を使用する際には、部分電極１８１１毎に設けられたスイッチ９１のうち、1個又は隣接する複数個の部分電極１８１１（これら1個又は隣接する複数個の部分電極１８１１を「部分電極群１８１１Ａ」とし、部分電極群１８１１Ａが存在する領域を「電流供給領域２１」とする。図６Ａ参照。）に接続された、1個又は該複数個のスイッチ９１ＡをONにする。図６Ａに示した例では、部分電極群１８１１Ａに含まれる4個の部分電極１８１１のスイッチ９１をONにしているが、この個数には限定されない。

【００５６】

これにより、これら1個又は部分電極群１８１１Ａを構成する複数個の部分電極１８１１と第２電極１８２の間に電流が流れ、各部分電極１８１１からは正孔が、第２電極１８２からは電子が、それぞれ積層体１０内に供給される。部分電極群１８１１Ａから電流を流す場合には、電流は、各部分電極１８１１から第２電極１８２に向かうに従って、活性層１３に平行な方向にわずかに拡がるように流れる。そのため、隣接する部分電極１８１１間の間隔が或る閾値よりも小さい場合には、各部分電極１８１１から活性層１３に電流が注入される領域である部分電流注入領域２２１は、隣接する部分電極１８１１から注入される電流の部分電流注入領域２２１の一部と重なる。その結果、活性層１３には一体となった電流注入領域２２が形成される（図６Ａ）。

【００５７】

活性層１３では、電流注入領域２２において、活性層１３の材料により定まる所定の波長範囲を有する光が生じる。この光のうち、２次元フォトニック結晶層１５における異屈折率領域１５２の周期に対応した波長の光は、２次元フォトニック結晶層１５のうち電流注入領域２２に対応する領域（光増幅領域）において増幅されてレーザ発振する。そして、レーザビームＬＢが２次元フォトニック結晶層１５に垂直な方向に放出され、第２電極１８２の窓部１８２２を通過してレンズ１９に進入する（図７Ａ）。レーザビームＬＢは、レンズ１９への進入位置に応じた方向に屈折し、２次元フォトニック結晶層１５に垂直な方向から傾斜した方向に向かって２次元フォトニック結晶レーザ１の外部に出射する。

【００５８】

２次元フォトニック結晶レーザ１の外部に出射するレーザビームＬＢの方向は、電流を注入する部分電極１８１１を変更することにより、以下のように変化する。例えば、図６Ｂに示すように、図６Ａに示した部分電極群１８１１Ａを構成する4個の部分電極１８１１のうち同図の左端の部分電極１８１１のスイッチ９１をOFFにすると共に、図６Ａではスイッチ９１がOFFであった右隣の部分電極１８１１のスイッチ９１を新たにONにする。これにより、電流供給領域２１は部分電極１８１１の1個分だけ右側に移動し、それに伴って活性層１３での電流注入領域２２及び光増幅領域も右側に移動する。すると、２次元フォトニック結晶層１５から放出されるレーザビームＬＢのレンズ１９への進入位置も右

側に移動する（図７Ｂ）。その結果、レーザビームＬＢは進入位置の相違に応じて、図７Ａの場合とは異なる方向に屈折し、異なる傾斜方向に向かって２次元フォトニック結晶レーザ１の外部に出射する。

【００５９】

以上のように、部分電極群１８１１Ａに含まれる部分電極１８１１を変更することで電流注入領域２２を移動させることにより、レンズ１９から２次元フォトニック結晶レーザ１の外部に出射するレーザビームＬＢの傾斜方向が変化するため、図８に示すようにレーザビームＬＢをスキャンすることができる。その際、レーザビームＬＢがレンズ１９に入射する手前で第２電極１８２の窓部１８２２を通過するため、レーザビームＬＢは第２電極１８２により減衰することなく出射することができる。

【００６０】

図８ではレーザビームＬＢが１次元状に移動する様子を示したが、図５Ｂに示したように部分電極１８１１を２次元状に並べれば、レーザビームＬＢを２次元状に移動させることができる。

【００６１】

前述のように電気的制御等により表面の曲率及び／又は焦点距離が可変であるレンズを用いた場合には、部分電極群１８１１Ａに含まれる部分電極１８１１を電気的に切り替えると共に、レンズの表面の曲率及び／又は焦点距離を変化させることによってもレーザビームＬＢをスキャンすることができる。一般的に、部分電極群１８１１Ａに含まれる部分電極１８１１を電気的に切り替える際の応答速度の方が、レンズの表面の曲率や焦点距離を変化させる際の応答速度よりも速い。この点を勘案して、例えば、一次元状に配置した部分電極１８１１に対して部分電極群１８１１Ａに含まれる部分電極１８１１を電気的に切り替える操作を行うことで１方向にビームを繰り返しレーザビームＬＢスキャンしつつ、レンズの表面の曲率及び／又は焦点距離を変化させることによって前記１方向とは異なる方向（例えば、該１方向に垂直な方向）にレーザビームＬＢをスキャンすることによって、レーザビームＬＢを２次元状にスキャンすることができる。

【００６２】

図６Ａ及び図６Ｂでは隣接する部分電極１８１１間の間隔が或る閾値よりも小さい場合について説明したが、隣接する部分電極１８１１間の間隔が或る閾値よりも大きい場合には、各部分電極１８１１から注入される電流の部分電流注入領域２２１同士が重ならず、活性層１３には分割された複数の電流注入領域２２が形成される（図９）。このように分割された電流注入領域２２が形成されると、２次元フォトニック結晶層１５において可干渉性の低い（インコヒーレントな）レーザ発振が生じてしまう。それに対して図６Ａ及びＢに示したように、隣接する部分電極１８１１間の間隔を一体の電流注入領域２２が形成されるように設定することにより、可干渉性の高い（コヒーレントな）レーザビームを得ることができる。

【００６３】

部分電極１８１１同士の間隔は、予備実験やシミュレーションを行うことにより適宜定めることができる。一例として、図１０Ａに示す条件において、以下のようにシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、部分電極１８１１同士の間隔（隙間）がw_pである場合に、1個の部分電極１８１１から第２電極１８２までの距離よりも十分に小さい深さ（活性層１３に垂直な方向の距離）dの位置において、該部分電極１８１１の端部からの垂線hと交差する位置B_0における電流密度i_0に対する、該位置B_0から活性層１３に平行且つ該部分電極１８１１の反対側に距離wだけ離れた位置B_1における電流密度i_1の比であるi_1/i_0を求めた。具体的には、部分電極１８１１と第２電極１８２の距離は(154+d)μmとし、dは3.5～12.5μmの範囲内で、wは0～65μmの範囲内で計算を行った。なお、部分電極１８１１の幅は30μmとしたが、この値が計算結果に与える影響は小さい。

【００６４】

計算結果を図１０Ｂに示す。距離dがいずれの値の場合にも、wが大きくなる、すなわち部分電極１８１１の端部から離れるに従って、電流密度の比i_1/i_0は小さくなる。このi_1/i

$_0$が或る値（この例では$1/e^2$と規定）よりも大きい範囲が、電流が拡がる範囲と規定される。そこで、各距離dに関して、$i_1/i_0=1/e^2$となるときの距離wの値w_eを求めた。その結果を図１０Ｃに示す。得られたデータを１次関数で近似すると、$w_e=3.819d+14.309$で表される。

【００６５】

この計算結果を用いて、活性層１３が部分電極１８１１から深さdの位置に存在するときには、部分電極１８１１同士の間隔w_pを$2w_e$以下とする。これにより、活性層１３の深さ位置では、2個の部分電極１８１１がそれぞれ形成する部分電流注入領域２２１が活性層１３に平行な方向に距離w_e以上に拡がるため、部分電流注入領域２２１同士が重なる。そのため、一体の電流注入領域２２を形成することができ、それによってコヒーレントなレーザビームを得ることができる。

【００６６】

部分電極１８１１の1個当たりの大きさは、それが小さいほど電流注入領域２２の位置を細かく設定することができ、それによってレーザビームの傾斜方向を精密に制御することができるため好ましい。例えば、図５Ａに示したように部分電極１８１１を１次元状に並べた場合には、電流注入領域２２に部分電極１８１１が10～50個含まれるように部分電極１８１１の1個当たりの大きさを設定することにより、1回のスイッチ９１のON/OFF操作によって電流注入領域２２の面積の2～10％分だけ、電流注入領域２２の位置が移動する。同様に、図５Ｂに示したように部分電極１８１１を２次元状に並べた場合には、長方形の電流注入領域２２の1辺あたりに部分電極１８１１が10～50個並ぶように部分電極１８１１の1個当たりの大きさを設定することができる。

【００６７】

電流注入領域２２の大きさ、及びそれを左右する、同時にONにするスイッチ９１の個数は、２次元フォトニック結晶レーザ１の用途に応じて必要な光出力が得られるように定める。例えば、LiDAR（Laser Imaging Detection and Ranging）等のセンシングの用途に用いる場合には、パルス光で1W～数十Wの光出力を要し、それに対応して電流注入領域２２の大きさを1辺が10μm～500μmの長方形（正方形を含む）の範囲内とすることが好ましい。また、レーザ加工等の用途に用いる場合には、百W～千Wのオーダーの光出力を要し、それに対応して電流注入領域２２の大きさを1辺が1mm～1cmの長方形の範囲内とすることが好ましい。

【００６８】

(a-3) 光出力を調整するための２次元フォトニック結晶層の設計

２次元フォトニック結晶レーザ１では、その用途に応じた光出力が得られるように、上記した電流注入領域２２の大きさ等の設計を行う。そのような設計の対象の1つとして、２次元フォトニック結晶層の構成が挙げられる。以下ではその設計の例を説明する。

【００６９】

従来より、２次元フォトニック結晶レーザでは、２次元フォトニック結晶層内を伝播する光が異屈折率領域によって回折されることにより生じる光の干渉を強くすることにより、２次元フォトニック結晶層内での光の強度が高くなる一方、この干渉が強すぎると光が２次元フォトニック結晶内に閉じ込められ易くなるため、２次元フォトニック結晶の外部に出射する光の出力が却って低下し得ることが知られている。そこで、特許文献４に記載の２次元フォトニック結晶レーザでは、主異屈折率領域（本実施形態の第１部分異屈折率領域１５２１に相当）と副異屈折率領域（同・第２部分異屈折率領域１５２２）という2個の空孔又は母材とは異なる屈折率を有する部材から成る1個の異屈折率領域を２次元状に周期的に配置した２次元フォトニック結晶層が用いられている。この２次元フォトニック結晶レーザでは、２次元フォトニック結晶層内を伝播する光のうち、主異屈折率領域によって180°方向に回折される回折光と、副異屈折率領域によって180°方向に回折される回折光との干渉光が、目的に応じて強められ又は弱められるように、主異屈折率領域及び副異屈折率領域の位置が設定されている。

【００７０】

本明細書では、2個の部分異屈折率領域（第１部分異屈折率領域１５２１及び第２部分異屈折率領域１５２２）によって180°方向に回折される回折光（180°回折光）と90°方向に回折される回折光（90°回折光）の干渉も考慮して、２次元フォトニック結晶層の設計を行う。具体的には、図１１に示すように、正方格子の格子点が最隣接で並ぶ2つの直交した方向のうちの一方をx方向、他方をy方向として、2個の部分異屈折率領域の間のx方向及びy方向に関する距離d_x, d_y、2個の部分異屈折率領域の充填率f_1, f_2（２次元フォトニック結晶層１５の全体に占める各部分異屈折率領域の体積の比）の比f_1/f_2、並びに2個の部分異屈折率領域の扁平率c_1, c_2（部分異屈折率領域の平面形状における最長の方向の長さをL_L、該方向に垂直な方向の長さをL_sとして、$c=1-(L_s/L_L)$）の差(c_1-c_2)、等のパラメータを設定する。これらのパラメータを適宜変更することにより、2個の部分異屈折率領域の各々における180°回折光の回折効率$|\kappa_{180}|$及び90°回折光の回折効率$|-\kappa_{90}|$が変化し、それに伴って、2個の部分異屈折率領域による180°回折光と90°回折光の干渉の強弱が変化することから、２次元フォトニック結晶レーザの外部に出射するレーザビームの強度も変化する。ここでκ_{180}及び$-\kappa_{90}$は結合係数と呼ばれる回折光の強度を表すパラメータであって、正負いずれの数値も取り得る。κ_{180}と$-\kappa_{90}$の差の絶対値である$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が0に近くなるほど、180°回折光と90°回折光の干渉光の強度が弱くなり、それによって光が２次元フォトニック結晶層内に閉じ込められる効果が抑えられる。

【００７１】

２次元フォトニック結晶レーザの外部に出射するレーザビームの強度を高くするためには、結合係数の差$|\kappa_{180}-(-\kappa_{90})|=|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が0に近い方が望ましい。そこで、図１１に示した２次元フォトニック結晶層１５に関して、(a)第１部分異屈折率領域１５２１と第２部分異屈折率領域１５２２のx方向の距離d_x（$d_x=d_y$とする）、(b)充填率の比f_1/f_2、(c)扁平率の差c_1-c_2がそれぞれ異なる複数の場合について、$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$を求める計算を行った。いずれの計算においても、第１部分異屈折率領域１５２１は真円（$c_1=0$）又はx方向に対して45°傾斜した方向に長軸を有する楕円（$c_1\neq0$）とし、第２部分異屈折率領域１５２２は真円（$c_2=0$）とした。d_xは(b), (c)では0.262aとし、f_1/f_2は(a), (c)では1.33とし、c_1は各計算において変化させた。なお、図１１に示すように異屈折率領域の形状が回転対称性を有しない場合には、２次元結合係数のうち、直線y=-xに対する反射（90°回折）を表すものと、直線y=xに対する反射（90°回折）を表すものが異なる値を取る場合があるが、このような場合は少なくとも一方の２次元結合係数とκ_{180}の差$|\kappa_{180}-(-\kappa_{90})|=|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が0に近いことが望ましく、両方の２次元結合係数が共にκ_{180}との差が0に近いことがより望ましい。計算においては、直線y=xに対する反射（90°回折）をκ_{90}とした。

【００７２】

計算結果を、(a)については図１２Ａに、(b)については図１２Ｂに、(c)については図１２Ｃに、それぞれ示す。(a)では、$d_x(=d_y)$が0.258a～0.266a、c_1が0.50～0.60の範囲内において、$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が100cm^{-1}以下の値に抑えられる。(b)では、計算を行ったf_1/f_2の全範囲（1.17～1.67）において、c_1を一定の範囲内に定める（例えば、$f_1/f_2=1.5$のときにはc_1を0.55～0.65の範囲内とする）ことにより、$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が100cm^{-1}以下の値に抑えられる。(c)においても、c_1を一定の範囲内に定める（例えば、$c_2=0$のときにはc_1を0.50～0.60の範囲内とする）ことにより、$|\kappa_{180}+\kappa_{90}|$が100cm^{-1}以下の値に抑えられる。以上の例のように計算を行うことで、第１部分異屈折率領域１５２１と第２部分異屈折率領域１５２２の距離、充填率、扁平率を設計することができる。

【００７３】

(a-4) 第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの変形例

図１３Ａ及び図１３Ｂを用いて、第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの変形例を説明する。

【００７４】

図１３Ａに示した２次元フォトニック結晶レーザ１Ａは、上記２次元フォトニック結晶レーザ１における積層体１０の代わりに、積層体１０Ａが設けられている。積層体１０Ａ

では、第２電極１８２側の表面の窓部１８２２に対向する位置にレンズ１９Ａが形成されている。第２電極１８２の反対側にはレンズは設けられていない。レンズ１９Ａは、基板１１Ａの表面をフレネルレンズの形状に加工したものである。フレネルレンズは、通常のレンズを同心円状の領域に分割し、一方の表面（本変形例では基板１１Ａの表面）における曲面の形状は維持しつつ、各同心円間の領域の厚みを所定値以下に薄くすることにより、該表面に鋸刃状の形状としたものである。ここまでに述べた点以外の２次元フォトニック結晶レーザ１Ａの構成は、上記２次元フォトニック結晶レーザ１の構成と同様である。

【００７５】

図１３Ｂに示した２次元フォトニック結晶レーザ１Ｂは、上記２次元フォトニック結晶レーザ１における積層体１０の代わりに、積層体１０Ｂが設けられている。積層体１０Ｂの第２電極１８２側の表面の窓部１８２２に対向する位置にはレンズ１９Ｂが形成されている。第２電極１８２の反対側にはレンズは設けられていない。レンズ１９Ｂは、基板１１Ｂの表面をレーザビームの波長の長さ以下の精度で加工し、透過光の位相を制御することが可能な微細構造（メタサーフェス, metasurface）を面内に適切に形成することによってレンズの機能を持たせたメタレンズ（metalens）と呼ばれるレンズである。メタレンズはほぼ平坦とみなすことができ、厚さを十分に薄くすることができる。２次元フォトニック結晶レーザ１Ｂのその他の構成は、上記２次元フォトニック結晶レーザ１の構成と同様である。

【００７６】

本変形例の２次元フォトニック結晶レーザ１Ａ及び１Ｂによれば、積層体１０とは別体のレンズ１９を設ける場合よりも、２次元フォトニック結晶レーザのサイズを小さくすることができる。

【００７７】

上記２次元フォトニック結晶レーザ１では部分電極１８１１同士の間及びコンタクト層１６の上面の端部にレーザビームを反射する反射層（反射部）１７を設けたが、その代わりに、２次元フォトニック結晶層１５と部分電極１８１１の間に、導電性を有する半導体材料からなる分布ブラッグ反射鏡を設けてもよい。なお、分布ブラッグ反射鏡と第２クラッド層１２２及びコンタクト層１６との位置関係は特に問わない。これにより、２次元フォトニック結晶層１５から第１電極１８１側に放出されたレーザビームを分布ブラッグ反射鏡で反射させて第２電極１８２の窓部１８２２から出射させ、発光効率を高くすることができる。分布ブラッグ反射鏡は、例えばドーピングしたGaAsから成る層と、ドーピングしたAlAsから成る層を交互に積層させた周期構造により構成することができる。

【００７８】

上述の点以外にも、当業者であれば、第１実施形態及びその変形例の２次元フォトニック結晶レーザを本発明の範囲内においてさらに変形することが可能である。

【００７９】

(b) 第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ

(b-1) 第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの構成

第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ２は、図１４に示すように、第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ１における２次元フォトニック結晶層１５とは異なる構成を有する２次元フォトニック結晶層３５を含む積層体３０を備える点、及びレンズ１９を有しない点で、第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ１の構成と相違する。これら2点以外については、第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ２は第１実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ１と共通の構成を有する。そのため、それら共通の構成については説明を省略し、以下では２次元フォトニック結晶層３５の構成を説明する。

【００８０】

２次元フォトニック結晶層３５は、図１５Ａに示すように、板状の母材３５１内に異屈折率領域３５２が以下のように配置されたものである。図１５Ａに示した例では、異屈折率領域３５２の平面形状は1個の正三角形から成るが、第２実施形態の異屈折率領域３５２の形状はこの例には限定されない。図１５Ａには、２次元フォトニック結晶層３５に実

際に設けられた異屈折率領域３５２を実線で示す他、基本２次元格子である正方格子を一点鎖線で示し、その正方格子の格子点に仮想的に異屈折率領域３５２Ｖの重心が配置された状態を破線で示す。また、図１５Ｂには、正方格子（一点鎖線）及び実際の異屈折率領域３５２の重心（黒丸）の位置を示す。

【００８１】

この２次元フォトニック結晶層３５では、格子点と実際の異屈折率領域３５２の重心の距離（位置ずれの大きさs）は全ての格子点で同一とし、以下のように、ずれの方向を変調した。正方格子の格子定数をaとすると、各格子点の位置ベクトルr↑は、直交座標系において整数m_x, m_yを用いてr↑=(m_xa, m_ya)と表される。また、x方向を基準線の方向とし、レーザビームの傾斜角の設計値をθ、基準線からの方位角φと規定する。この場合、波数ベクトルk↑はk↑=(π/a, π/a)であり、逆格子ベクトルG'=(g'$_x$, g'$_y$)は

【数２】

$$g'_x = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\sin\theta\cos\phi\right)\cdot\frac{2\pi}{a}$$
$$g'_y = \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\sin\theta\sin\phi\right)\cdot\frac{2\pi}{a}$$

…(2)

である。従って、この場合の各格子点の変調位相Ψ=r↑・G'↑は

【数３】

$$\Psi = 2\pi\left[\left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\sin\theta\cos\phi\right)\mathrm{m}_x + \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\sin\theta\sin\phi\right)\mathrm{m}_y\right]$$

…(3)

と表される。例えば、傾斜角θの設計値が36.2°、方位角φが0°の場合、変調位相、すなわちずれの方向と前記基準線との成す角度（以下、「ずれ方位角」とする）Ψは(3/4)πm_x+πm_yとなり、x方向に隣接する異屈折率領域３５２の間でのずれ方位角の差δΨは(3/4)πとなる（本段落のここまでの説明に関して、特許文献２又は３を参照）。このずれ方位角Ψを異なる値に変更すると、傾斜角θ（すなわち、出射方向）が異なるレーザビームが得られることとなる。

【００８２】

そこで、第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ２では、２次元フォトニック結晶層３５内の位置（位置ベクトルr↑=(m_xa, m_ya)）毎に、(3)式における傾斜角θの値が異なるようにずれ方位角Ψを設定する。例えば図１５Ｂに示すように、x方向に隣接する異屈折率領域３５２同士のずれ方位角Ψの差ΔΨ$_x$が、x方向に向かってδだけ増加するように、各位置におけるずれ方位角Ψを設定する。部分電極１８１１はx方向に並ぶように複数設ける。

【００８３】

(b-2) 第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの動作

第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザ２を使用する際には、第１実施形態の場合と同様に、部分電極１８１１毎に設けられたスイッチ９１のうち、1個又は部分電極群１８１１Ａを構成する複数個の部分電極１８１１のスイッチ９１ＡをONにすることにより、これら1個又は複数個の部分電極１８１１と第２電極１８２の間に電流を流し、活性層１３の一部である電流注入領域２２に電流を注入する。これにより、活性層１３では、電流注入領域２２において所定の波長範囲を有する光が生じ、この光のうち、２次元フォトニック結晶層１５における異屈折率領域１５２の周期に対応した波長の光が、２次元フォトニック結晶層３５のうち電流注入領域２２に対応する領域（光増幅領域）において増幅されてレーザ発振する。レーザビームＬＢは、２次元フォトニック結晶層３５の光増幅領

域におけるずれ方位角Ψを規定する角度θに応じた傾斜角だけ傾斜した方向に向かって、２次元フォトニック結晶レーザ２の外部に出射する（図１６Ａ）。図１５Ａ及びＢに示した例の２次元フォトニック結晶層３５では、1つの光増幅領域内において、ずれ方位角Ψを規定する角度θが位置によって相違することから、レーザビームＬＢの傾斜角は概ね光増幅領域内の角度θの平均値となる。

【００８４】

電流を注入する部分電極１８１１を変更すると、電流注入領域２２の位置が移動し、それに伴って２次元フォトニック結晶層３５において光が増幅される領域も移動する。これにより、光増幅領域内におけるずれ方位角Ψ及びそれを定める角度θの値の範囲が変化するため、レーザビームＬＢの傾斜角も変化する（図１６Ｂ）。これにより、２次元フォトニック結晶レーザ２の外部に出射するレーザビームＬＢの傾斜角が変化するため、レーザビームＬＢをスキャンすることができる。また、レーザビームＬＢは２次元フォトニック結晶レーザ２の外部に出射する際に、第２電極１８２の窓部１８２２を通過する。そのため、レーザビームＬＢは第２電極１８２により減衰することなく出射することができる

【００８５】

(b-3) 第２実施形態の２次元フォトニック結晶レーザの変形例

第２実施形態の変形例を説明する。例えば、図１５Ａ及びＢに示した例では、x方向に隣接する全ての格子点同士の間で、ずれ方位角Ψを規定する角度θを異なる値としていたが、図１７に示すように、２次元フォトニック結晶層３５をx方向に複数の格子点を有するずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３…に分け、同一のずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３内では角度θを同じ値とし、異なるずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３の間で角度θが異なる値となるようにしてもよい。

【００８６】

図１５Ａ及びＢに示した例では、基本２次元格子として正方格子を用いたが、長方格子状や三角格子状等の他の２次元格子をと基本２次元格子として用いてもよい。例えば、格子定数a_1, a_2の長方格子を基本２次元格子とする場合には、逆格子ベクトルG'=(g'x, g'y)は

【数４】

$$g'_x = \left(\frac{1}{a_1} \pm \sqrt{\frac{1}{a_1^2}+\frac{1}{a_2^2}}\frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\text{eff}}}\right)\cdot\pi$$

$$g'_y = \left(\frac{1}{a_2} \pm \sqrt{\frac{1}{a_1^2}+\frac{1}{a_2^2}}\frac{\sin\theta\sin\phi}{n_{\text{eff}}}\right)\cdot\pi$$

…(4)、

各格子点の変調位相Ψは

【数５】

$$\Psi = \pi\left[\left(1 \pm \sqrt{1+\frac{a_1^2}{a_2^2}}\frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\text{eff}}}\right)\mathrm{m}_x + \left(1 \pm \sqrt{1+\frac{a_2^2}{a_1^2}}\frac{\sin\theta\sin\phi}{n_{\text{eff}}}\right)\mathrm{m}_y\right]$$

…(5)

となる。

【００８７】

また、基本２次元格子が格子定数aの三角格子の場合には、格子点の位置ベクトルr↑は直交座標系において整数m_1, m_2を用いてr↑=(m_1a+(1/2)m_2a, ($3^{1/2}$/2)m_2a)と表され、逆格子ベクトルG'=(g'x, g'y)は

【数６】

$$g'_x = \left(1 \pm \frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{4\pi}{3a}$$
$$g'_y = \pm\frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\cdot\frac{4\pi}{3a}$$

…(6)

又は

【数７】

$$g'_x = \left(1 \pm 2\frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{2\pi}{3a}$$
$$g'_y = \left(\sqrt{3} \pm 2\frac{\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{2\pi}{3a}$$

…(7)

となる。各格子点の変調位相Ψ=は、逆格子ベクトルG'が(6)式で表される場合には

【数８】

$$\Psi = \left(1 \pm \frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{4\pi}{3}\left(m_1 + \frac{1}{2}m_2\right) \pm \frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\cdot\frac{2\sqrt{3}\pi}{3}m_2$$

…(8)

となり、逆格子ベクトルG'が(7)式で表される場合には

【数９】

$$\Psi = \left(1 \pm 2\frac{\sin\theta\cos\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{2\pi}{3}\left(m_1 + \frac{1}{2}m_2\right) + \left(\sqrt{3} \pm 2\frac{\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{\sqrt{3}\pi}{3}m_2$$

…(9)

となる。

【００８８】

図１５Ｂに示した例では、格子点と実際の異屈折率領域３５２の重心の距離sは全ての格子点で同一とし、ずれの方向（ずれ方位角）を変調したが、図１８に示すように、ずれの方向は全ての格子点で同一（x方向）とし、距離sを変調位相Ψにより$s=s_{max}\cos\Psi$となるように定めてもよい。この場合、｜s｜が0と最大値s_{max}の間で変調される。図１５Ｂに示した例と同様に、変調位相Ψは格子点によって、角度θを異なる値とすることによって異なる値とすることができる。これにより、活性層への電流注入領域の位置を移動させ、それによって光増幅領域の位置を移動させることで、出射するレーザビームの角度を変化させ、それによってレーザビームをスキャンすることができる。

【００８９】

あるいは、図１９に示すように、基本２次元格子の格子点に異屈折率領域３５２の重心を配置したうえで、各異屈折率領域３５２の平面形状の面積Sが変調位相Ψにより$S=S_0+S'\cos\Psi$となるように定めてもよい。この場合、面積Sが最小値(S_0-S')と最大値(S_0+S')の間で変調される。図１５Ｂに示した例と同様に、変調位相Ψは格子点によって、角度θを異なる値とすることによって異なる値とすることができる。これにより、活性層への電流注入領域の位置を移動させ、それによって光増幅領域の位置を移動させることで、出射するレーザビームをスキャンすることができる。

【００９０】

特許文献３に記載のように、２次元フォトニック結晶層内の位置に依存する逆格子ベク

トルG'(x, y)↑から求められる変調位相Ψ(x, y)を用いる場合には、具体的には以下のように変調位相Ψ(x, y)を求めることができる。例えば、基本２次元格子が格子定数aの正方格子である場合には、逆格子ベクトルG'(x, y)↑の各成分$g'_x(x)$及び$g'_y(y)$は

【数１０】

$$g'_x(x) = \pm\left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sin\theta_x(x)}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{2\pi}{a}$$
$$g'_y(y) = \pm\left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sin\theta_y(y)}{\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\right)\cdot\frac{2\pi}{a}$$

…(10)

で表される。ここで式(10)中の複数の複号において、正負の組み合わせは任意である。一例として、式(10)中の複号が全て正の場合に、式(1)を用いて変調位相Ψ(x, y)を計算すると、

【数１１】

$$\Psi(x,y) = \frac{2\pi}{a}\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{\cos\theta_x(x)}{\theta'_x(x)\cdot\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}} - \frac{\cos\theta_y(y)}{\theta'_y(y)\cdot\sqrt{2}n_{\mathrm{eff}}}\right)$$

…(11)

となる。ここで$\theta'_x(x)$、$\theta'_y(y)$はそれぞれ、$\theta_x(x)$、$\theta_y(y)$の1回微分である。複号の正負の組み合わせがこれ以外の場合も同様である。

【００９１】

このように求めた変調位相Ψ(x, y)を用いて、２次元フォトニック結晶内の各格子点において、該格子点の位置(x, y)に応じて、該格子点からの異屈折率領域の位置のずれの方向や大きさ、あるいは異屈折率領域の面積等を、図１５～図１９に示した例と同様に変調させればよい。

【００９２】

特に、図１７に示した例を応用して、ずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３…毎に異なる傾斜角θ(x, y)及び／又は方位角φ(x, y)を設定すると共に、同じずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３…内では同じ傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)を設定するとよい。これにより、それらずれ方位角設定領域２３１、２３２、２３３…のうちの1つが光増幅領域となるように電流を注入することにより、当該ずれ方位角設定領域において設定された傾斜角θ(x, y)及び方位角φ(x, y)を有するレーザビームを得ることができる。なお、図１７では格子点からの異屈折率領域の位置のずれの方向を変調させているが、ずれの大きさや異屈折率領域の面積等の他のパラメータを用いて変調させた場合も同様である。

【００９３】

基本２次元格子が長方格子や三角格子等の他の２次元格子である場合にも同様の計算により、２次元フォトニック結晶層内の位置に依存する逆格子ベクトルG'(x, y)↑から変調位相Ψ(x, y)を求めることができる。

【００９４】

２次元フォトニック結晶レーザ２においても２次元フォトニック結晶レーザ１と同様に、反射層１７の代わりに、２次元フォトニック結晶層１５と部分電極１８１１の間に分布ブラッグ反射鏡を設けてもよい。

【００９５】

当業者であれば、ここまでに述べた第２実施形態の変形例を組み合わせることによって、更なる変形を行うことができることが理解可能である。

【００９６】

本発明は上記第１実施形態、上記第２実施形態及び上記変形例には限定されず、さらな

る変形も可能である。

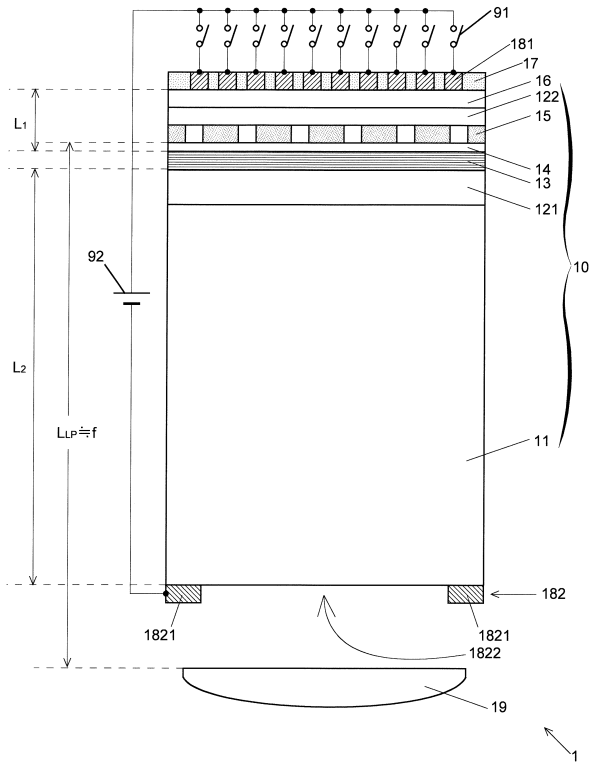
【符号の説明】

【００９７】

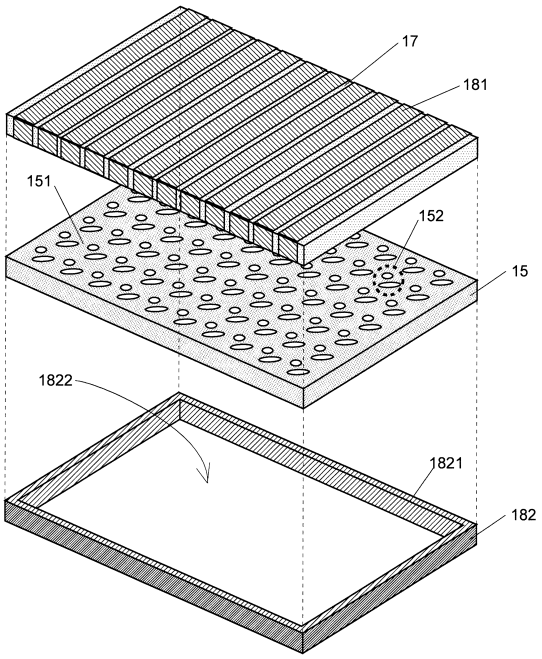
１、１Ａ、１Ｂ、２…２次元フォトニック結晶レーザ
１０、３０…積層体
１１、１１Ａ、１１Ｂ…基板
１２１…第１クラッド層
１２２…第２クラッド層
１３…活性層
１４…キャリアブロック層
１５、３５…２次元フォトニック結晶層
１５１、３５１…母材
１５２、１５２Ａ、３５２…異屈折率領域
１５２１…第１部分異屈折率領域
１５２２…第２部分異屈折率領域
１６…コンタクト層
１８１…第１電極
１８１１…部分電極
１８１１Ａ…部分電極群
１８２…第２電極
１８２１…枠状部
１８２２…窓部
１９、１９Ａ、１９Ｂ…レンズ
２１…電流供給領域
２２…電流注入領域
２２１…部分電流注入領域
２３１…方位角設定領域
３５２Ｖ…仮想的に配置された異屈折率領域
９１、９１Ａ…スイッチ
９２…直流電源

【図面】

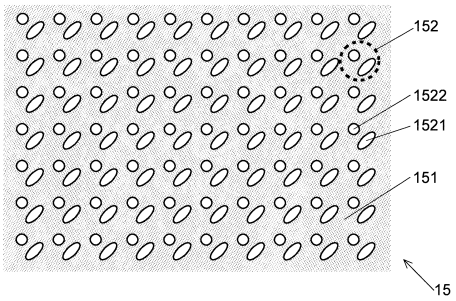
【図１】


91
181
17
16
122
15
14
13
121
10
92
L1
L2
LLP≒f
11
182
1821
1821
1822
19
1

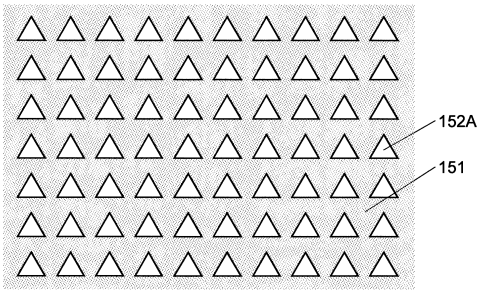
【図２】


17
181
151
152
15
1822
1821
182

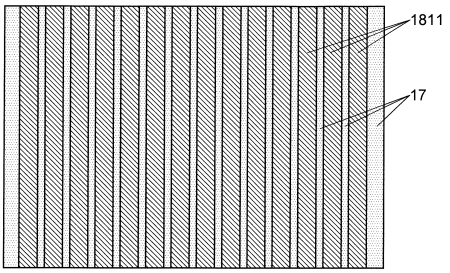
【図３】


152
1522
1521
151
15

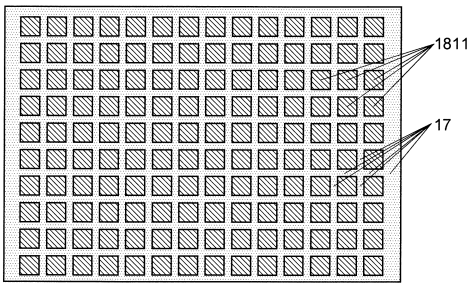
【図４】


152A
151

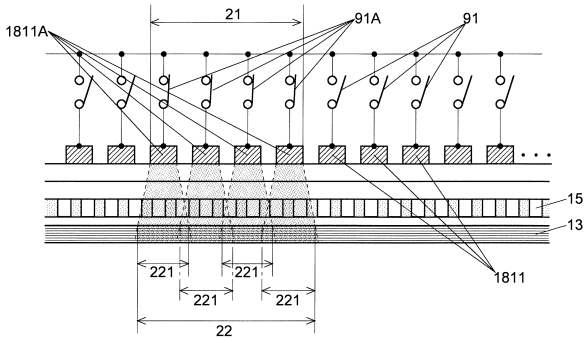
【図５Ａ】



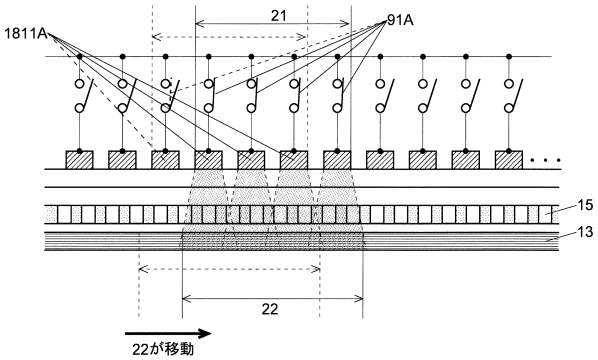
【図５Ｂ】



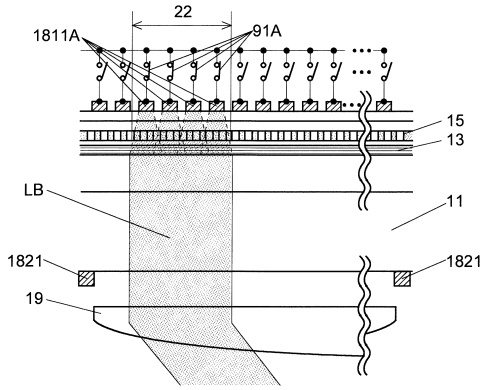
【図６Ａ】



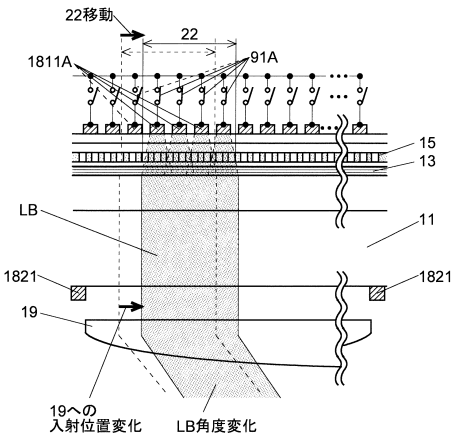
【図６Ｂ】



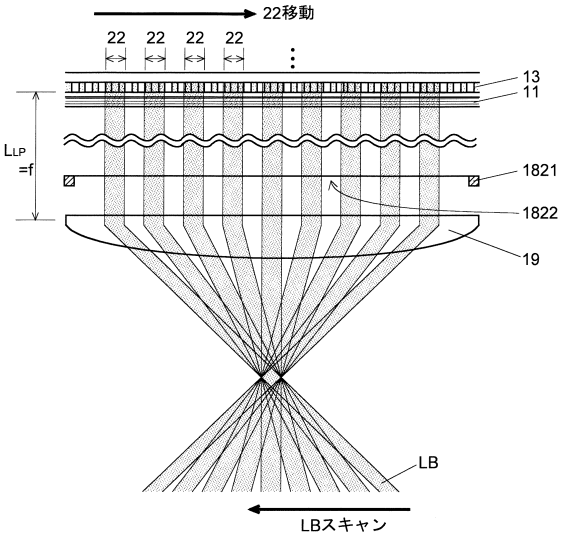
【図７Ａ】



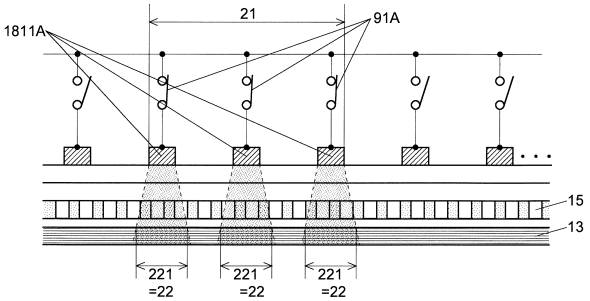
【図７Ｂ】



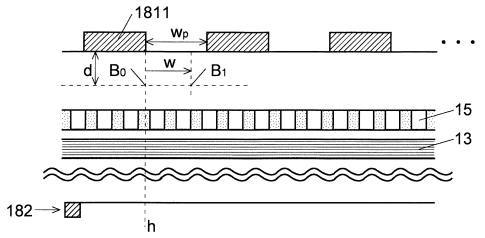
【図８】



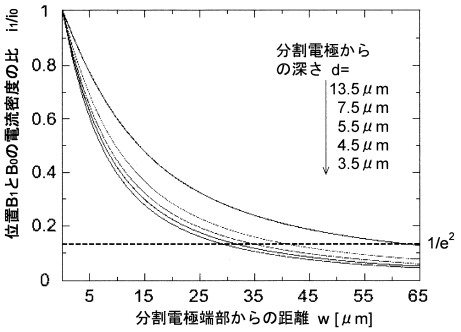
【図９】



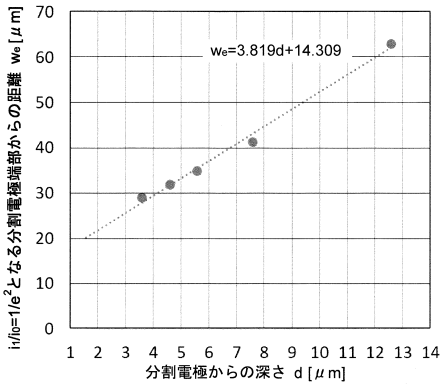
【図１０Ａ】



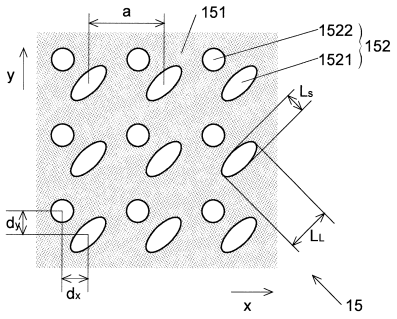
【図１０Ｂ】



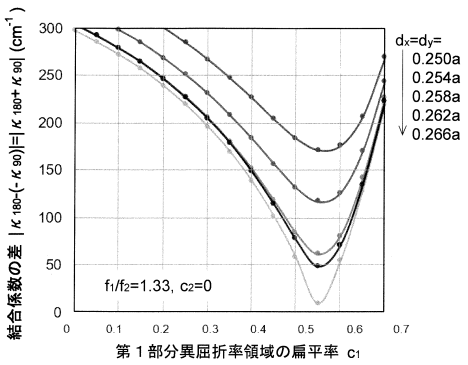
【図１０Ｃ】



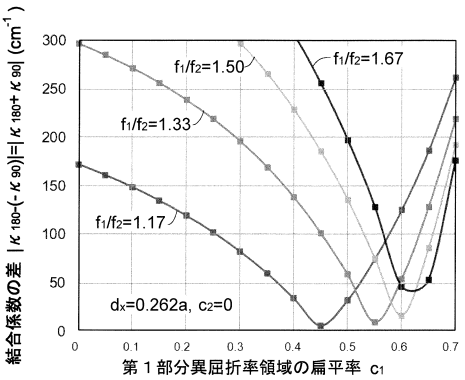
【図１１】



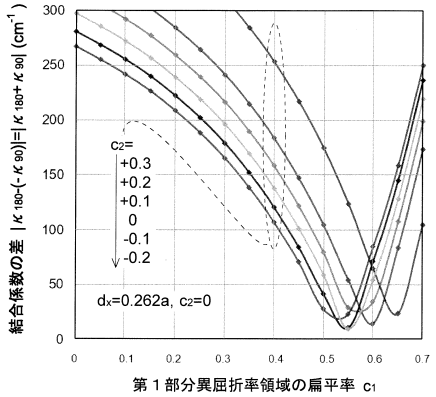
【図１２Ａ】



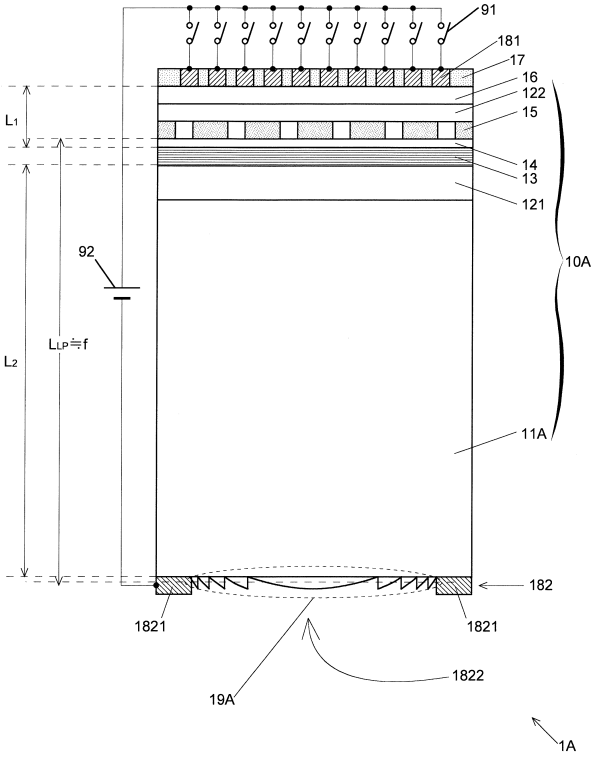
【図１２Ｂ】



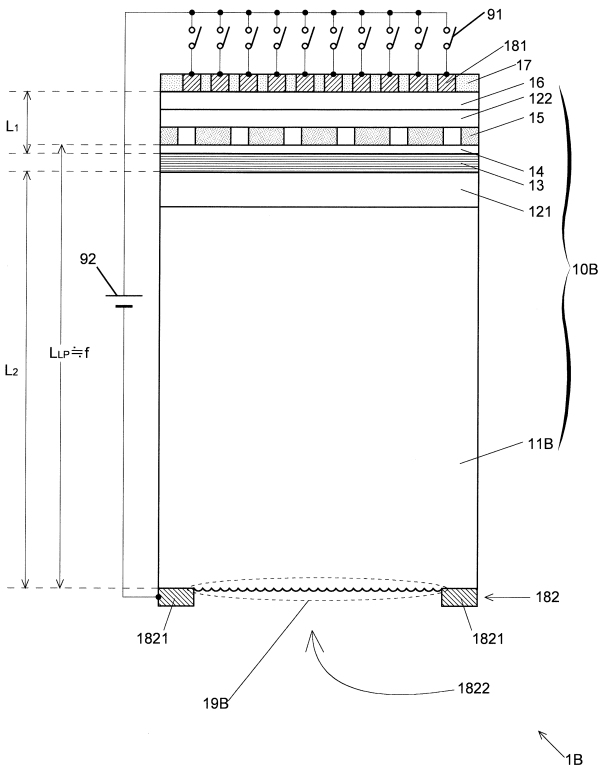
【図１２Ｃ】



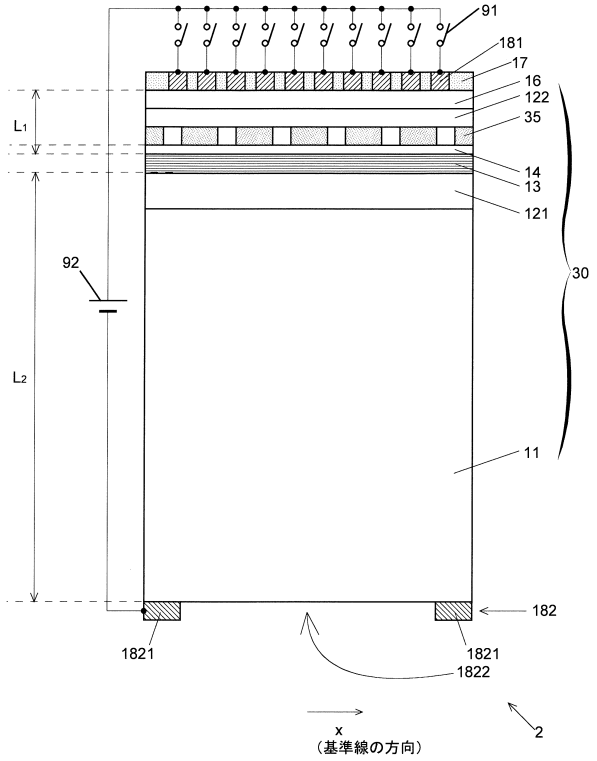
【図１３Ａ】



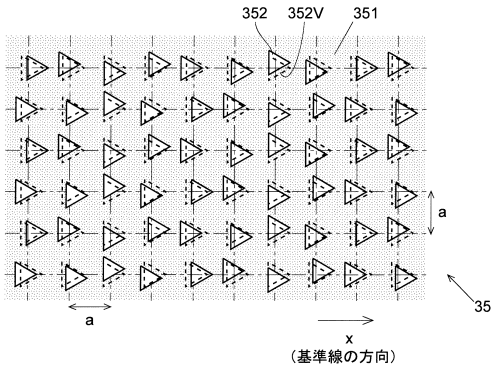
【図１３Ｂ】



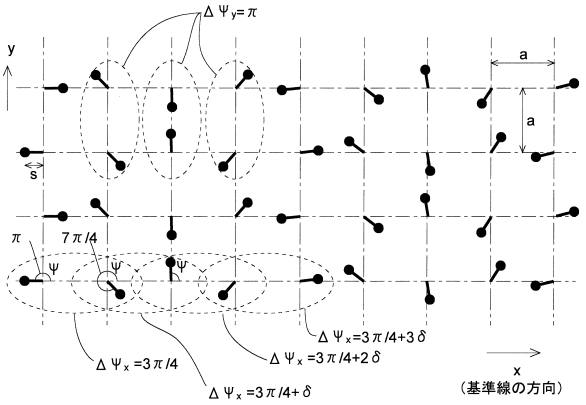
【図１４】



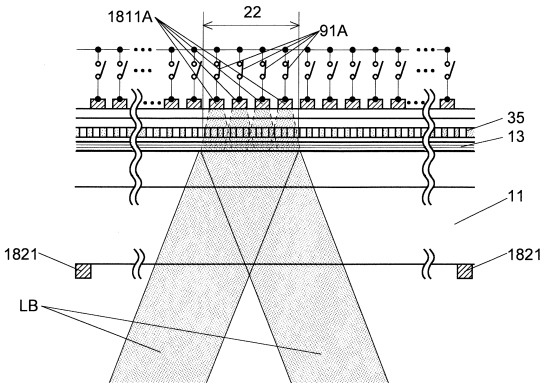
【図１５Ａ】



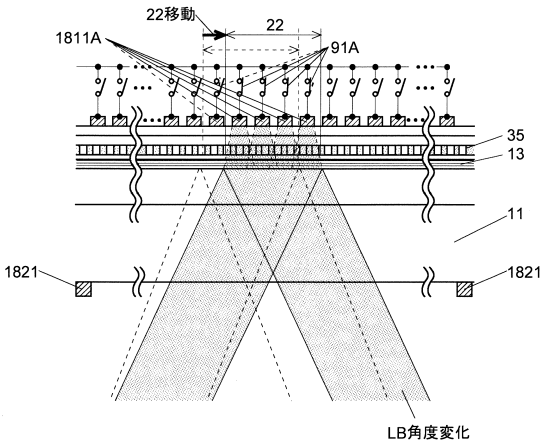
【図１５Ｂ】



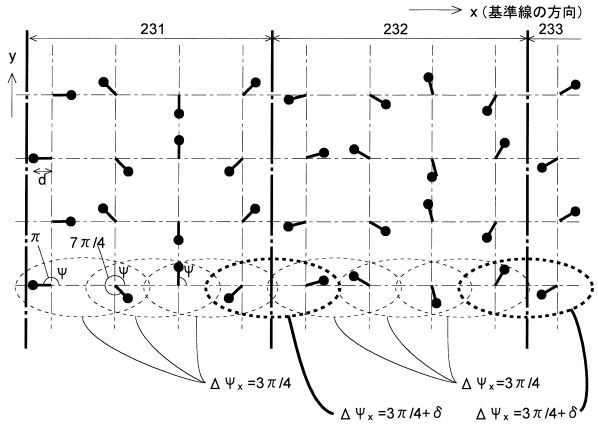
【図１６Ａ】



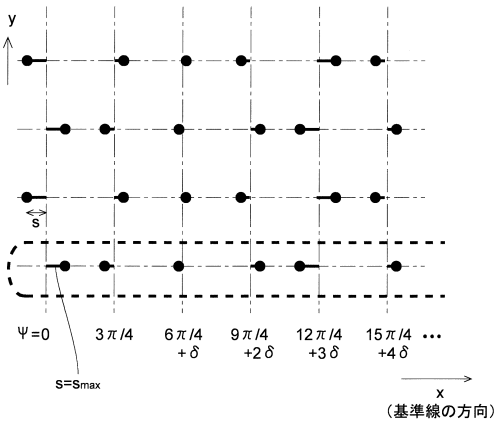
【図１６Ｂ】



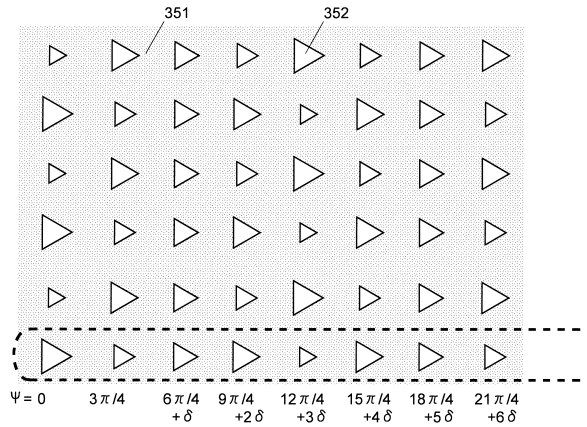
【図１７】


x（基準線の方向）
231
232
233
y
d
π
7π/4
ψ
ψ
ψ
Δψx=3π/4
Δψx=3π/4
Δψx=3π/4+δ
Δψx=3π/4+δ

【図１８】


y
s
Ψ=0
3π/4
6π/4 +δ
9π/4 +2δ
12π/4 +3δ
15π/4 +4δ
s=smax
x
（基準線の方向）

【図１９】


351
352
Ψ=0
3π/4
6π/4 +δ
9π/4 +2δ
12π/4 +3δ
15π/4 +4δ
18π/4 +5δ
21π/4 +6δ

フロントページの続き

京都府京都市左京区吉田本町３６番地１ 国立大学法人京都大学内

審査官 高椋 健司

(56)参考文献 国際公開第２０１４／１３６６０７（WO，Ａ１）
特開２００５－２７７２１９（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－０１３３０６（ＪＰ，Ａ）
特開２０１７－１２３４４５（ＪＰ，Ａ）
特開２０１４－０８２２５７（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０６０２６１１１（ＵＳ，Ａ）

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