

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6080941号
(P6080941)

(45) 発行日 平成29年2月15日 (2017.2.15)

(24) 登録日 平成29年1月27日 (2017.1.27)

(51) Int.Cl.		F I
H O 1 S	5/18	(2006.01)
H O 1 S	5/343	(2006.01)
H O 1 S	5/062	(2006.01)

H O 1 S	5/18
H O 1 S	5/343
H O 1 S	5/062

請求項の数 6 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2015-504246 (P2015-504246)	(73) 特許権者	503360115
(86) (22) 出願日	平成26年2月25日 (2014.2.25)		国立研究開発法人科学技術振興機構
(86) 国際出願番号	PCT/JP2014/054429		埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(87) 国際公開番号	W02014/136607	(74) 代理人	110001069
(87) 国際公開日	平成26年9月12日 (2014.9.12)		特許業務法人京都国際特許事務所
審査請求日	平成28年2月3日 (2016.2.3)	(72) 発明者	野田 進
(31) 優先権主張番号	特願2013-46564 (P2013-46564)		京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学
(32) 優先日	平成25年3月8日 (2013.3.8)		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)	(72) 発明者	沖野 剛士
			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
		(72) 発明者	北村 恭子
			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

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】

電流が注入されることにより波長 λ_L の光を生じさせる活性層と、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次元的に配置されることにより屈折率分布が形成されて成る2次元フォトニック結晶層とが積層された構成を有し、該2次元フォトニック結晶層の法線から傾斜角 θ の方向にレーザビームを発振するレーザであって、

該2次元フォトニック結晶層において各異屈折率領域が、2次元定在波を形成することによって前記波長 λ_L の光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変調して配置されており、

前記各格子点における変調位相 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 $\mathbf{k} \uparrow = (k_x, k_y)$ 、前記2次元フォトニック結晶層の有効屈折率 n_{eff} 、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 $\mathbf{G}' \uparrow = (g'_x, g'_y) = (k_x \pm |k \uparrow| (\sin \theta \cos \varphi) / n_{eff}, k_y \pm |k \uparrow| (\sin \theta \sin \varphi) / n_{eff})$ と、前記各格子点の位置ベクトル $\mathbf{r} \uparrow$ とを用いて、 $\Psi = \mathbf{r} \uparrow \cdot \mathbf{G}' \uparrow$ で表され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】

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、該ずれの方向を表す、基本2次元格子の所定の基準線との成す角度が前記変調位相 Ψ で変調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面発光レー

ザ。

【請求項 3】

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 d の絶対値がゼロと最大値 $d_{\max}$ の間で、変調位相 ψ で変調されていることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ。

【請求項 4】

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 S が最小値($S_0 - S'$)と最大値($S_0 + S'$)の間で、変調位相 ψ で変調されていることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ。

【請求項 5】

前記活性層中に電流を注入する電流注入位置を制御する電流注入位置制御手段を有し、前記電流注入位置からの発光が増幅される領域である、前記 2 次元フォトリック結晶層における変調領域毎に、各格子点の変調位相 ψ が異なることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ。

【請求項 6】

前記電流注入位置制御手段が、前記活性層及び前記 2 次元フォトリック結晶層を挟むように対をなす電極であって、該対の電極の一方又は両方が該活性層及び該 2 次元フォトリック結晶層に平行に 2 次元状に複数配置された電極と、該複数の電極のうち該活性層に電流を注入する電極を切り換える切替手段を備えることを特徴とする請求項 5 に記載の 2 次元フォトリ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 次元フォトリック結晶面発光レーザに関し、より詳しくは、レーザビームを結晶面の法線から傾斜した方向に出射する 2 次元フォトリ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】

特許文献 1 及び非特許文献 1 には、2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、レーザビームの出射方向を可変にしたもの（以下、「出射方向可変 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ」と呼ぶ）が記載されている。

【0004】

出射方向可変 2 次元フォトリック結晶面発光レーザを説明する前に、まず、一般的な（それ自体では光出射方向が結晶面の法線方向であって、可変ではない）2 次元フォトリック結晶面発光レーザについて説明する。一般的な 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、活性層と、板状の部材内に該部材とは屈折率が異なる領域（「異屈折率領域」と呼ぶ。典型的には空孔。）を周期的に配置した 2 次元フォトリック結晶層を有する。この 2 次元フォトリ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

10

20

30

40

50

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波長を有する光が定在波を形成することによって増幅される。このように増幅された光は２次元フォトリ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、設定された異屈折率領域の周期によっては、互いに隣接する２個の異屈折率領域によって２次元フォトリック結晶層の法線方向に散乱された２つの光の光路差が波長と一致すると共に、それら散乱光の位相が揃う。この条件を満たす場合に、２次元フォトリック結晶層に垂直な方向にレーザービームが出射される。

【０００５】

一方、特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトリック結晶面発光レーザーは、活性層と、異屈折率領域の周期が互いに異なる２層の２次元フォトリック結晶層を有する。これにより、２つの２次元フォトリック結晶層では、異屈折率領域の周期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増幅される。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、出射されるレーザービームは２次元フォトリ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ービームを、以下では「傾斜ビーム」と呼ぶ。２次元フォトリ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大きくなる。そして、少なくとも一方の２次元フォトリック結晶層における異屈折率領域の周期を、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（レーザー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。

【０００６】

また、非特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトリック結晶面発光レーザーは、活性層と、正方格子と斜方格子を重ね合わせた格子点に異屈折率領域が配置された１層の２次元フォトリック結晶層を有する。正方格子は、活性層で生成された光の共振状態を２次元フォトリック結晶層内において形成する役割を有し、斜方格子は共振状態の光を２次元フォトリック結晶層の法線から傾斜した方向に出射させる役割を有するとされている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００７】

【特許文献１】特開２００９-０７６９００号公報

【非特許文献】

【０００８】

【非特許文献１】信岡俊之、他３名「正方格子Ｍ点フォトリック結晶共振器を用いた２次元ビーム偏向制御」、第５９回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、公益社団法人応用物理学学会、２０１２年２月２９日発行、講演番号１６ａ-Ｅ５-２

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００９】

特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトリック結晶面発光レーザーでは、レーザービームが２次元フォトリ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次元フォトリック結晶を組み合わせたという制約があるため、傾斜角を大きくすることが難しい。

【００１０】

非特許文献１に記載の出射方向可変２次元フォトリック結晶面発光レーザーでは、正方格子によって形成された共振状態の光が、斜方格子によって様々な方向に散乱される。それにより、目的とする傾斜角を有する傾斜ビームの他に、その傾斜角とは異なる方向にも光が散乱されるため、光の損失が生じる。

【００１１】

本発明が解決しようとする課題は、傾斜角を大きくすることができると共に、光の損失を従来よりも少なくすることができる、傾斜ビームを出射する２次元フォトリック結晶面発光レーザー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に係る２次元フォトリック結晶面発光レーザは、電流が注入されることにより波長 λ_L の光を生じさせる活性層と、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次元的に配置されることにより屈折率分布が形成されて成る２次元フォトリック結晶層とが積層された構成を有し、該２次元フォトリック結晶層の法線から傾斜角 θ の方向にレーザビームを発振するレーザであって、

該２次元フォトリック結晶層において各異屈折率領域が、２次元定在波を形成することによって前記波長 λ_L の光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

10

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変調して配置されており、
前記各格子点における変調位相 Ψ が、前記２次元フォトリ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 $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$ 、前記２次元フォトリック結晶層の有効屈折率 n_{eff} 、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 $\mathbf{G}'=(g'_x, g'_y)=(k_x \pm |\mathbf{k}|(\sin \theta \cos \varphi)/n_{eff}, k_y \pm |\mathbf{k}|(\sin \theta \sin \varphi)/n_{eff})$ と、前記各格子点の位置ベクトル $\mathbf{r}$ とを用いて、 $\Psi=\mathbf{r} \cdot \mathbf{G}'$ で表されることを特徴とする。

【0013】

前記活性層には、波長 λ_L を含む波長範囲の光を生じさせるものが含まれる。

また、本発明に係る２次元フォトリック結晶面発光レーザは、上記活性層及び上記２次元フォトリック結晶層の他に、クラッド層やスペーサ層等を有していてもよい。

20

前記波長 λ_L は、真空中における波長で定義する。波長 λ_L の光は、２次元フォトリック結晶層内では波長（以下、「結晶層内波長 λ_{PC} 」とする）が $\lambda_{PC}=\lambda_L/n_{eff}$ となる。ここで、 n_{eff} は、上記各層が積層した構造において２次元フォトリック結晶層に分布する光の電界強度の割合、及び母材に対する異屈折率領域の充填率を考慮した有効屈折率である。

【0014】

以下、本発明における(1)基本２次元格子、(2)変調について説明する。

【0015】

(1)基本２次元格子

基本２次元格子、すなわち波長 λ_L の光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２次元格子は、従来より知られているものである。基本２次元格子の例の１つとして、格子定数 a が

30

$$a=2^{-1/2} \lambda_L / n_{eff} = 2^{-1/2} \lambda_{PC}$$

である正方格子が挙げられる。また、格子定数 a_1 及び a_2 が

$$(1/2) \times (a_1^{-2} + a_2^{-2})^{1/2} = 1 / \lambda_{PC}$$

の関係式を満たす長方格子（面心長方格子を含む）や、格子定数 a が

$$a=(2/3) \lambda_{PC}$$

である三角格子も、前記基本２次元格子の例として挙げられる。

【0016】

このような基本２次元格子が波長 λ_L の光を増幅し且つ該波長 λ_L の光を外部に出射させない理由を、上記の式 $a=2^{-1/2} \lambda_{PC}$ を満たす正方格子の場合を例に、図１を用いて説明する。

40

【0017】

２次元フォトリック結晶層内では、基本２次元格子の正方格子の格子点に異屈折率領域が配置されていると、結晶層内波長 λ_{PC} の光が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４個の格子点においてそれぞれ 180° 散乱された光 $L2$ との光路差が結晶層内波長 λ_{PC} に一致するため、干渉により増幅される（図１(a)。この図では、１個の格子点に散乱された光 $L2$ のみを示す。）。また、格子点において格子面内で散乱前の進行方向とは 90° 異なる方向に散乱

50

(90° 散乱)された光L3は、4個の格子点9 1 2においてそれぞれ格子面内で90° 散乱された光L4との光路差が結晶層内波長 λ_{PC} に一致するため、干渉により増幅される(図1(a))。このように、180° 散乱と90° 散乱の双方によって2次元定在波が形成され、光が増幅される。

【0018】

一方、2次元フォトリック結晶層内を伝播する結晶層内波長 λ_{PC} の光は、格子点9 1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、このような散乱光は、格子点9 1 1において散乱されるものと、格子点9 1 2において散乱されるものの光路差が $\lambda_{PC}/2$ になり(図1(b)の光L5と光L6)、両者の位相が π だけずれるため、打ち消し合う。そのため、光は2次元フォトリック結晶層の外部に出射されない。

10

【0019】

なお、ここでは基本2次元格子が正方格子の場合を例に説明したが、長方格子においても同様である。基本2次元格子が三角格子(六方格子)の場合には、干渉により増幅される光が、格子面内で散乱前の進行方向とは120°異なる方向に散乱(120°散乱)された光である点を除いて、正方格子の場合と同様である。

【0020】

(2)変調

上記のように、異屈折率領域は各格子点において変調して配置されている。本発明において「変調」とは、基本2次元格子の各格子点に同じ形態の異屈折率領域が配置された状態に対して、基本2次元格子の周期とは別個の空間的な周期(変調周期)で周期的変化が与えられていることをいう。この周期的変化は、例えば各格子点において異屈折率領域を該格子点から位置をずらして配置し、そのずれの方向又はノ及び大きさを変調周期で周期的に変化させることにより形成することができる。あるいは、この周期的変化は、異屈折率領域の面積を変調周期で周期的に変化させることにより形成することもできる。

20

【0021】

基本2次元格子の各格子点における変調は位相 Ψ (変調位相)で表すことができる。各格子点の変調位相 Ψ は、基本2次元格子の各格子点の位置ベクトル $\mathbf{r}_\uparrow$ と、逆格子ベクトル $\mathbf{G}'_\uparrow$ により定まる。この逆格子ベクトル $\mathbf{G}'_\uparrow$ は、ちょうど、非特許文献1における斜方格子の逆格子ベクトルに相当する。しかしながら、本発明では、この逆格子ベクトル $\mathbf{G}'_\uparrow$ に対応する格子は存在せず、その代わりに、基本2次元格子の各格子点において、異屈折率領域が変調して配置されている。本発明において、この各格子点における異屈折率領域の変調には、異屈折率領域の位置(各格子点からのずれ)、及び、異屈折率領域の面積の双方を含む。具体的には、以下のものである。

30

【0022】

(i)各格子点において、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、該ずれの方向を表す、基本2次元格子の所定の基準線との成す角度が変調位相 Ψ で変調されているもの。この場合、この角度の値が Ψ となり、 $0 \sim 2\pi$ の間で変動する。

(ii)各格子点において、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 d の絶対値がゼロと最大値 $d_{\max}$ の間で、変調位相 Ψ で変調されているもの。具体的には、 $d = d_{\max} \sin \Psi$ と表される。

40

(iii)異屈折率領域は各格子点に配置されており、各異屈折率領域の面積 S が最小値($S_0 - S'$)と最大値($S_0 + S'$)の間で、変調位相 Ψ で変調されているもの。具体的には、 $S = S_0 + S' \sin \Psi$ と表される。

【0023】

前記基本2次元格子が格子定数 a の正方格子である場合には、各格子点の変調位相 Ψ は以下のように求められる。まず、格子点の位置ベクトル $\mathbf{r}_\uparrow$ は、直交座標系において整数 m_x 、 m_y を用いて $\mathbf{r}_\uparrow = (m_x a, m_y a)$ と表される。この場合、波数ベクトル $\mathbf{k}_\uparrow$ は $\mathbf{k}_\uparrow = (\pi/a, \pi/a)$ であり、逆格子ベクトル $\mathbf{G}' = (g'_x, g'_y)$ は

【数 1】

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

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

... (1)

である。従って、この場合の各格子点の変調位相 $\Psi = \mathbf{r} \uparrow \cdot \mathbf{G}' \uparrow$ は

【数 2】

10

$$\Psi = 2\pi \left[\left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2n_{\text{eff}}}} \sin \theta \cos \phi \right) m_x + \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2n_{\text{eff}}}} \sin \theta \sin \phi \right) m_y \right]$$

... (2)

である。

【0 0 2 4】

同様に、基本 2 次元格子が格子定数 a_1, a_2 の長方格子の場合には、格子点の位置ベクトル $\mathbf{r} \uparrow$ は直交座標系において整数 m_x, m_y を用いて $\mathbf{r} \uparrow = (m_x a_1, m_y a_2)$ と表される。逆格子ベクトル $\mathbf{G}' = (g'_x, g'_y)$ は

20

【数 3】

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

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

... (3)、

各格子点の変調位相 $\Psi = \mathbf{r} \uparrow \cdot \mathbf{G}' \uparrow$ は

30

【数 4】

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

... (4)

となる。

【0 0 2 5】

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 $\mathbf{r} \uparrow$ は直交座標系において整数 m_1, m_2 を用いて $\mathbf{r} \uparrow = (m_1 a + (1/2)m_2 a, (3^{1/2}/2)m_2 a)$ と表される。逆格子ベクトルは

40

【数 5】

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

$$g'_y = \pm \frac{\sin \theta \sin \phi}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{4\pi}{3a}$$

... (5)

50

または

【数 6】

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

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

... (6)

のいずれかの組み合わせを用いることができる。各格子点の変調位相 $\Psi = \mathbf{r} \uparrow \cdot \mathbf{G}' \uparrow$ は、 $\mathbf{G} \uparrow$ が前者の場合には

10

【数 7】

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

... (7)、

後者の場合には

【数 8】

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

20

... (8)

となる。

【0 0 2 6】

(3) 本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザの動作

本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザの動作を説明する。活性層に電流が注入されると、波長 λ_L の光が生じ、該光が 2 次元フォトリック結晶層において基本 2 次元格子の周期性によって定在波が形成される。それにより、位相が揃った波長 λ_L の光が増幅される。このように増幅された光は、変調位相 Ψ で変調された屈折率分布により、逆格子ベクトル $\mathbf{G}' \uparrow$ を回折ベクトルとする光の回折が生じ、光が 2 次元フォトリック結晶層の法線に対して傾斜して出射される。この出射光は、波長及び位相が揃ったレーザビームとなる。

30

【0 0 2 7】

本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザでは上述のように、複数の格子構造を重ねるのではなく、1つの基本 2 次元格子の格子点からずれた位置に異屈折率領域を配置する。そのため、特許文献 1 に記載のレーザとは異なり、2 次元フォトリ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 次元フォトリック結晶を組み合わせるという制約が無い。同様の理由により、本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザでは、非特許文献 1 に記載のレーザとは異なり、正方格子（本発明の基本 2 次元格子に相当）に重ねた斜方格子による不要な散乱が生じることも無い。

40

【0 0 2 8】

本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、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、該ずれの方向を表す、基本 2 次元格子の所定の基準線との成す角度が前記変調位相 Ψ で変調されている、という構成を取ることができる。このようにずれの方向に変調を与えることにより、円偏光を有する出射光が得られる。

また、本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、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 d の絶対値

50

がゼロと最大値 $d_{\max}$ の間で、変調位相 ψ で変調されている、という構成を取ることもできる。このように異屈折率領域を同一方向にずらすことにより、当該ずれの方向に垂直な方向の直線偏光を有する出射光が得られる。

【0029】

本発明に係る2次元フォトリ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（電流注入位置）を制御する電流注入位置制御手段を有し、

前記電流注入位置からの発光が増幅される領域である、前記2次元フォトリック結晶層における変調領域毎に、各格子点の変調位相 ψ が異なるように形成されている

ことにより、出射方向可変2次元フォトリック結晶面発光レーザが得られる。すなわち、この出射方向可変2次元フォトリ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（異屈折率領域とは異なる）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次元フォトリック結晶層の一部分に導入される。そして、光が導入された2次元フォトリック結晶層の位置における変調位相 ψ 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。

【0030】

前記出射方向可変2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、前記電流注入位置制御手段には、前記活性層及び前記2次元フォトリック結晶層を挟むように対をなす電極であって、該対の電極の一方又は両方が該活性層及び該2次元フォトリック結晶層に平行に1次元状又は2次元状に複数配置された電極と、該複数の電極のうち該活性層に電流を注入する電極を切り換える切替手段を備えるものを用いることができる。特に、2次元状に複数配置された電極を用いることにより、1次元状の場合よりも変調領域を多く設けることが可能になり、より多数の傾斜角 θ 及び方位角 ϕ の組み合わせを設定することができる。

【発明の効果】

【0031】

本発明により、傾斜角を大きくすることができると共に、光の損失が従来よりも少ない、傾斜ビームを出射する2次元フォトリック結晶面発光レーザが得られる。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】(a)基本2次元格子が波長 λ_L の光を増幅し、且つ(b)該波長 λ_L の光を外部に出射させない理由を説明するための図。

【図2】本発明に係る2次元フォトリック結晶面発光レーザの第1実施例を示す斜視図。

【図3】第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける2次元フォトリック結晶層を示す上面図(a)、及び基本2次元格子である正方格子と空孔の重心を示す部分拡大図(b)。

【図4】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 36.2° である第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける2次元フォトリック結晶層を示す顕微鏡写真(a)、及び得られた傾斜ビームの遠視野像(b)。

【図5】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° 及び 40° である第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける2次元フォトリック結晶層を示す顕微鏡写真(a-1)及び(a-2)、並びに、得られた傾斜ビームの遠視野像(b-1)及び(b-2)。

【図6】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° である第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザにより得られた発振スペクトル。

【図7】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° であって、方位角の設計値が 60° 及び 90° である第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける2次元フォトリック結晶層を示す顕微鏡写真(a-1)及び(a-2)、並びに、得られた傾斜ビームの遠視野像(b-1)及び(b-2)。

【図8】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° であって、方位角の設計値が 60° である第1実施例の2次元フォトリック結晶面発光レーザから得られた傾斜ビームの偏光特

性を測定した結果を示すグラフ。

【図 9】図 8 の例と同じ 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、1/4波長板を通過した後に偏光板を通過した傾斜ビームの遠視野像。

【図 10】第 2 実施例である出射方向可変 2 次元フォトリック結晶面発光レーザを示す縦断面図(a)及び 2 次元フォトリック結晶層の平面図(b)。

【図 11】第 2 実施例の変形例である、2 次元状に配置された下部電極を有する出射方向可変 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおける下部電極の平面図(a)及び 2 次元フォトリック結晶層の平面図(b)。

【図 12】第 3 実施例の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおける 2 次元フォトリック結晶層を示す上面図(a)、及び基本 2 次元格子である正方格子と空孔の重心を示す部分拡大図(b)。

10

【図 13】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° 、方位角 φ の設計値が 0° である第 3 実施例の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおける 2 次元フォトリック結晶層を示す顕微鏡写真(a-1) ~ (a-3)、及び得られた傾斜ビームの遠視野像(b-1) ~ (b-3)。

【図 14】図 13 (b-1) ~ (b-3) に示した傾斜ビームの偏光特性を測定した結果を示すグラフ。

【図 15】波長 $\lambda_L=987.4\text{nm}$ 、傾斜角 θ の設計値が 30° であって、方位角の設計値が異なる 3 つの、第 3 実施例の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザから得られた傾斜ビームの遠視野像。

【図 16】第 4 実施例の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおける 2 次元フォトリック結晶層を示す上面図。

20

【発明を実施するための形態】

【0033】

本発明に係る 2 次元フォトリック結晶面発光レーザの実施例を、図 2 ~ 図 16 を用いて説明する。

【0034】

[実施例 1]

図 2 は、第 1 実施例の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ（以下、「フォトリック結晶レーザ」とする）10 の斜視図である。このフォトリック結晶レーザ 10 は、下部電極 151 と、下部基板 141 と、第 1 クラッド層 131 と、2 次元フォトリック結晶層 11 と、活性層 12 と、第 2 クラッド層 132 と、上部基板 142 と、上部電極 152 とを、この順に積層したものである。本実施例のフォトリック結晶レーザ 10 では、レーザビームは、上部電極 152 の中央部に設けられた窓（空洞）1521 を通って、2 次元フォトリック結晶層 11 の法線から出射角 θ だけ傾斜した方向に出射される。上部電極 152 には、窓 1521 を有するものの代わりに、ITO（インジウム錫酸化物）等から成る透明電極を用いてもよい。なお、2 次元フォトリック結晶層 11 と、活性層 12 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リ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。また、活性層と 2 次元フォトリック結晶の間には、スペーサ等の部材が挿入されていてもよい。

30

40

【0035】

本実施例では、下部基板 141 には p 型半導体のガリウムヒ素（GaAs）を、上部基板 142 には n 型 GaAs を、第 1 クラッド層 131 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 132 には n 型 AlGaAs を、それぞれ用いた。活性層 12 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。下部電極 151 及び上部電極 152 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、従来のフォトリ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。

【0036】

50

2次元フォトリック結晶層11は、板状の母材（スラブ）114内に空孔（異屈折率領域）111を後述のように配置したものである。本実施例では、母材114の材料にはp型GaAsを用いた。空孔111の形状は、本実施例では正三角形である（図3）が、円形などの他の形状を用いてもよい。なお、母材114の材料は上記のものには限られず、従来のフォトリ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111の代わりに、母材114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。

【0037】

10

図3を用いて、母材114内での空孔111の配置を説明する。図3(a)は2次元フォトリック結晶層11の上面図である。この図には、2次元フォトリック結晶層11に実際に設けられた空孔111を実線で示した他、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空孔111Vの重心が配置された状態を破線で示す。また、図3(b)に、(a)を拡大したうえで、正方格子（一点鎖線）及び空孔111の重心（黒丸）のみを示す。

【0038】

本実施例では、格子点と空孔111Vの重心の距離（位置ずれの距離d）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。

x方向を基準線方向とし、傾斜ビームの設計値を傾斜角 $\theta=36.2^\circ$ 、方位角 $\varphi=0^\circ$ とした。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、(2)式に複号（「 $\pm$ 」）があるため4つの値が得られるが、そのうちここでは

20

$$\Psi \equiv \Psi_{\theta=36.2^\circ} = (3/4)\pi m_x + \pi m_y$$

を用いた。この場合、x方向に隣接する2個の格子点同士でのずれ方位角 Ψ の差（以下、「 $\delta\Psi_x$ 」とする）は、 $(3/4)\pi$ 、すなわち 135° である。また、y方向に隣接する2個の格子点同士でのずれ方位角 Ψ の差（以下、「 $\delta\Psi_y$ 」とする）は π 、すなわち 180° である。また、有効屈折率は $n_{\text{eff}}=3.4$ とした。

【0039】

そこで、隣接する格子点間でx方向に 135° ずつ、y方向に 180° ずつずれ方位角 Ψ を変化させた、有効屈折率 $n_{\text{eff}}=3.4$ であって、格子定数 $a=208\text{nm}$ の正方格子を基本2次元格子とする2次元フォトリック結晶層11を有するフォトリック結晶レーザを実際に作製した。格子点からの位置ずれの距離dは $0.1a$ とした。作製した2次元フォトリック結晶層11の電子顕微鏡写真を図4(a)に示す。このフォトリック結晶レーザに電流を注入したところ、波長 987.4nm のレーザビームが観測された。このレーザビームは、図4(b)に遠視野像を示すように、2次元フォトリック結晶層11の法線に対して実測値で 36.1° の傾斜角 θ を有する傾斜ビーム19であり、傾斜ビーム19は2本（傾斜ビームのスポット19Sが2個）観測された。傾斜角 θ の実測値と設計値の差は 0.01° であり、ほぼ設計通りの傾斜ビームが得られた。

30

【0040】

また、この例と格子定数が同じ $a=208\text{nm}$ であって、設計値を(i) $\theta=30^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ 、(ii) $\theta=40^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ とした例についても、同様の実験を行った。これらの例における $\delta\Psi_x$ は、(i)では 0.792π 、(ii)では 0.733π である。 $\delta\Psi_y$ は、(i)、(ii)共に π である。作製した2次元フォトリック結晶層11の顕微鏡写真を(i)図5(a-1)、及び(ii)図5(a-2)に、それぞれ示す。また、フォトリック結晶レーザに電流を注入することで得られた傾斜ビームの遠視野像を(i)図5(b-1)、及び(ii)図5(b-2)に、それぞれ示す。いずれの実験においても、設計値に近い傾斜角 θ を有する傾斜ビームが得られた。傾斜角 θ の実測値は、(i)では 29.5° 、(ii) 39.2° であった。また、(i)のフォトリック結晶レーザで得られたレーザ光の発振スペクトルを図6に示す。発振波長 λ_L が 987.4nm であることが確認できる。

40

【0041】

さらに、傾斜角の設計値を $\theta=30^\circ$ とし、方位角 φ の設計値を(i) 60° 、(ii) 90° とした

50

例につき、作製した２次元フォトリック結晶層 11 の顕微鏡写真を(i)図 7(a-1)、及び(i)図 7(a-2)に、フォトリック結晶レーザに電流を注入することで得られた傾斜ビームの遠視野像を(i)図 7(b-1)、及び(ii)図 7(b-2)に、それぞれ示す。いずれも、傾斜角 θ の実測値が 29.5° であって、方位角 φ の実測値が設計値通りである傾斜ビームが得られた。

【0042】

傾斜角 θ 及び方位角 φ の設計値が $\theta=30^\circ$ 、 $\varphi=60^\circ$ である上記(図 7(a-1)、(b-1))のフォトリック結晶レーザにおいて、観測した傾斜ビームの偏光方向を図 8 のグラフに示す。このグラフは方向に依存しない強度の光を検出していることを示しており、ビームが円偏光又は無偏光(電界の振動方向が異なる様々な光が混合したもの)であることを意味している。そこで、ビームを、1/4波長板を通過させたうえで偏光板を通過させる実験を行った。ここで1/4波長板は、円偏光を直線偏光に変換する機能を有する。この実験の結果、図 9 に示すように、偏光板の向きを変えてゆくと、特定の向きにおいて2個のレーザスポットのうち的一方が消失し(図 9(a))、そこから更に偏光板を 90° 回転させると、他方のレーザスポットが消失した。これは、本実施例で得られた傾斜ビームは無偏光ではなく円偏光を有することを意味する。レーザスポットが消失する理由は、傾斜ビームの円偏光が1/4波長板によって直線偏光に変換され、その直線偏光が特定の向きの偏光板により遮蔽されることにある。また、レーザスポットが消失するときの偏光板の向きが2本のレーザビームの間で 90° 異なることは、一方のレーザビームが右回りの円偏光を有し、他方のレーザビームが左回りの円偏光を有することを意味する。このように一方のレーザビームが遮蔽されることを利用して、本発明のフォトリック結晶レーザと、1/4波長板及び偏光板を組み合わせたものを用いて、傾斜ビームを1本のみ出射するレーザ光源が得られる。

【0043】

[実施例 2]

次に、第 2 実施例として、出射方向可変 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ(以下、「出射方向可変フォトリック結晶レーザ」とする)20の実施例を説明する。図 10(a)は、第 2 実施例の出射方向可変フォトリック結晶レーザ 20 の縦断面図である。ここでは、第 1 実施例のフォトリック結晶レーザ 10 と同様の構成要素には、第 1 実施例と同じ符号を付し、詳細な説明を省略する。出射方向可変フォトリック結晶レーザ 20 は、下部電極 251 と、下部基板 141 と、第 1 クラッド層 131 と、2 次元フォトリック結晶層 21 と、活性層 12 と、第 2 クラッド層 132 と、上部基板 142 と、上部電極 252 とを、この順に積層したものである。上部電極 252 は、本実施例では上部基板 142 の全体を覆う透明電極を用いている。

【0044】

出射方向可変フォトリック結晶レーザ 20 は、仮想的に複数の領域(「変調領域」と呼ぶ。これは、異屈折率領域とは異なるものである。)A、B、C...に分かれている。各変調領域では、それに対応して互いに独立に下部電極 251 A、251 B、251 C...が設けられている(図 10(a))と共に、2 次元フォトリック結晶層 21 が変調領域毎に異なる構造を有している(図 10(b))。また、出射方向可変フォトリック結晶レーザ 20 には、電流を注入する下部電極 251 A、251 B、251 C を切り替える電流注入位置制御部 29 が設けられている。その他の構成要素は、全ての変調領域において同じ構成を有している。下部電極及び変調領域は共に 1 次元状に並んでいる。

【0045】

各変調領域 A、B、C...における 2 次元フォトリック結晶層 21 内の 2 次元フォトリック結晶構造 21 A、21 B、21 C...はいずれも、格子定数 a の正方格子の格子点からずれた方位角 ψ の方向にずれた位置に空孔 111 が配置されており、ずれた方位角 ψ のみが 2 次元フォトリック結晶構造毎に異なっている。ここでは、各変調領域 A、B、C...におけるずれた方位角 ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C ...は、 $\delta\psi_x$ が 2 次元フォトリック結晶構造毎に異なる値 $\delta\psi_{xA}$ 、 $\delta\psi_{xB}$ 、 $\delta\psi_{xC}$ となるように設定し、 $\delta\psi_y$ は全ての 2 次元フォトリック結晶構造において π とした。

【 0 0 4 6 】

本実施例の出射方向可変フォトニック結晶レーザ 2 0 では、下部電極 2 5 1 A、2 5 1 B、2 5 1 C ... のうちの 1 個と上部電極 2 5 2 の間に電流を流す。ここで、電流を流す下部電極を切り替えることにより、以下のように、レーザビームの出射方向を変化させることができる。

【 0 0 4 7 】

まず、下部電極 2 5 1 A と上部電極 2 5 2 の間に電流を流す場合を例に説明する。このように電流を流すと、活性層 1 2 のうち、下部電極 2 5 1 A の直上付近の部分において、波長 λ_L の光が生じる。この光は、当該部分の直上にある 2 次元フォトニック結晶構造 2 1 A において増幅される。そして、2 次元フォトニック結晶構造 2 1 A におけるずれ方位角 ψ_A に対応した傾斜角 θ_A で傾斜ビームが出射される。

10

【 0 0 4 8 】

そして、電流を流す下部電極を、下部電極 2 5 1 A から下部電極 2 5 1 B に切り替えると、今度は 2 次元フォトニック結晶構造 2 1 B において増幅され、2 次元フォトニック結晶構造 2 1 B におけるずれ方位角 ψ_B に対応した、前記傾斜角 θ_A とは異なる傾斜角 θ_B で傾斜ビームが出射される。さらに、下部電極 2 5 1 C 等の他の下部電極に切り替えても同様に傾斜角 θ が変化する。このように、電流を流す下部電極を切り替えることにより、異なる傾斜角で傾斜ビームを出射させることができる。

【 0 0 4 9 】

図 1 1 に、出射方向可変フォトニック結晶レーザの変形例を示す。この変形例では、図 1 1 (a) に示すように、下部電極 2 5 1 X Y (X : A、B、C ...、Y : A、B、C ...) が 2 次元状に配置されている。これら下部電極 2 5 1 X Y に対応して、2 次元フォトニック結晶層 2 1 には、図 1 1 (b) に示すように、2 次元フォトニック結晶構造 X Y (X : A、B、C ...、Y : A、B、C ...) が 2 次元状に配置されている。各 2 次元フォトニック結晶構造 X Y においては、 $\delta \psi_x$ が互いに異なる値 $\delta \psi_{xxy}$ (X : A、B、C ...、Y : A、B、C ...) となるように設定されている。この出射方向可変フォトニック結晶レーザでは、電流を流す下部電極 2 5 1 X Y を切り換えることにより、異なる傾斜角で傾斜ビームを出射させることができる。そして、下部電極 2 5 1 X Y 及び 2 次元フォトニック結晶構造 X Y が 2 次元状に配置されているため、1 次元状配置の場合よりも多数の傾斜角 θ 及び方位角 ϕ の組み合わせを設定することができる。

20

30

【 0 0 5 0 】

なお、ここまでは上部電極を 1 個、下部電極を 1 次元状又は 2 次元状に多数配置した例を示したが、下部電極を 1 個、上部電極を 1 次元状又は 2 次元状に多数配置してもよいし、下部電極と上部電極の双方を 1 次元状又は 2 次元状に多数配置してもよい。

【 0 0 5 1 】

[実施例 3]

第 3 実施例では、フォトニック結晶層の基本 2 次元格子の各格子点において、空孔（異屈折率領域）が格子点から同一方向にずれ、そのずれの距離が変調されている例を示す。以下では、フォトニック結晶層以外の構成は第 1 実施例と同様であるため説明を省略し、フォトニック結晶層の構成について説明する。

40

【 0 0 5 2 】

図 1 2 (a) に示すように、本実施例における基本 2 次元格子は、第 1 実施例と同様の正方格子である。異屈折率領域である空孔 1 1 1 は、基本 2 次元格子の格子点からずれた位置に配置されている。ずれの方向は、図 1 2 (b) に示すように、いずれの空孔 1 1 1 においても基準方向である x 方向である。ずれの距離 d は、変調位相 Ψ により $d = d_{\max} \cos \Psi$ 、すなわち $|d|$ が 0 と最大値 $d_{\max}$ の間で変調されるように定められている。本実施例では、変調位相 Ψ は、x 方向で隣接する格子点の間における差 $\delta \psi_x$ が $3\pi/4$ になるように設定した。この $\delta \psi_x$ の値は、第 1 実施例で示した $\delta \psi_x$ の値の一例と同じであることから、この出射方向可変フォトニック結晶レーザは、第 1 実施例における当該一例と同様に、傾斜角 $\theta = 36.2^\circ$ の傾斜ビームを出射する。なお、ここで示した変調位相 Ψ （及び隣接格子点間の変

50

調位相の差 $\delta \Psi_x$ 、 $\delta \Psi_y$ は一例であり、上述の式(2)を用いて、傾斜角 θ 及び方位角 φ の設計値に応じて設定すればよい。

【 0 0 5 3 】

以下に、有効屈折率 n_{eff} が3.4であって、格子定数 $a=206\text{nm}$ の正方格子を基本 2 次元格子とする 2 次元フォトニック結晶層を有する第 3 実施例のフォトニック結晶レーザを作製した例を示す。ここでは、レーザビームの傾斜角 θ 及び x 方向からの方位角 φ の設計値が $\theta=30^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ であって、空孔のずれの方向が(1) x 方向、(2) y 方向、(3) x 方向から 135° の方向である3つのフォトニック結晶レーザを作製した。 $\delta \Psi_x$ 及び $\delta \Psi_y$ の値は、(1)では $\delta \Psi_x=0.792\pi$ 、 $\delta \Psi_y=0$ 、(2)では $\delta \Psi_x=0$ 、 $\delta \Psi_y=0.792\pi$ 、(3)では $\delta \Psi_x=0.792\pi$ 、 $\delta \Psi_y=0.792\pi$ である。なお、フォトニック結晶層に形成する空孔の平面形状は、本実施例では円形とした。これらフォトニック結晶レーザにおけるフォトニック結晶層の電子顕微鏡写真を図 1 3 (a-1) ~ (a-3) に、得られた傾斜ビームの遠視野像を図 1 3 (b-1) ~ (b-3) に、それぞれ示す。いずれの例においても、設計通りに $\theta=30^\circ$ 、方位角 $\varphi=0^\circ$ の傾斜ビームが得られた。

10

【 0 0 5 4 】

これら3つのフォトニック結晶レーザにつき、観測した傾斜ビームの偏光方向を図 1 4 のグラフに示す。これらのグラフから、(1)空孔のずれが x 方向のときには y 方向の直線偏光、(2)空孔のずれが y 方向のときには x 方向の直線偏光、(3)空孔のずれが x 方向から 135° 方向であるときには、 x 方向から 45° 方向の直線偏光、がそれぞれ得られることがわかる。すなわち、空孔のずれの方向とは 90° 異なる方向の直線偏光が得られる、といえる。

20

【 0 0 5 5 】

次に、空孔のずれの方向が x 方向、レーザビームの傾斜角 θ の設計値が $\theta=30^\circ$ であって、 x 方向からの方位角 φ の設計値が(1) 0° 、(2) 45° 、(3) 90° である3つのフォトニック結晶レーザを作製した。 $\delta \Psi_x$ の値は、(1)では 0.792π 、(2)では 0.853π 、(3)では π である。 $\delta \Psi_y$ の値はいずれの例においても 0° である。有効屈折率が3.4であり、基本 2 次元格子が格子定数 $a=206\text{nm}$ の正方格子である点は上記の例と同じである。これらフォトニック結晶レーザにより得られた傾斜ビームの遠視野像を図 1 5 (1) ~ (3) に示す。いずれの例においても、設計通りの傾斜角 θ 及び方位角 φ で傾斜ビームが得られた。

【 0 0 5 6 】

[実施例 4]

第 4 実施例では、空孔（異屈折率領域）は重心と格子点が一致するように各格子点に配置され、各空孔の面積が変調されている例を示す。この例においても、フォトニック結晶層以外の構成は第 1 実施例と同様であるため説明を省略し、フォトニック結晶層の構成について説明する。

30

【 0 0 5 7 】

図 1 6 に示すように、本実施例における基本 2 次元格子は、第 1 実施例と同様の正方格子である。各空孔 1 1 1 の面積 S は、 $S=S_0+S'\cos\Psi$ 、すなわち最小値(S_0-S')と最大値(S_0+S')の間で変調されるように定められている。本実施例では、変調位相 Ψ は、第 3 実施例と同様に、 x 方向で隣接する格子点の間における差 $\delta \Psi_x$ が $3\pi/4$ になるように設定した。また、 $S'=(1/2)S_0$ とした。このような構成により、本実施例の出射方向可変フォトニック結晶レーザは、第 3 実施例（及び第 1 実施例における一例）と同様に、傾斜角 $\theta=36.2^\circ$ の傾斜ビームを出射する。

40

【 0 0 5 8 】

ここまでの各実施例では、基本 2 次元格子が正方格子である場合の例を示したが、これらの例に倣って、長方格子の場合には上式(4)、三角格子の場合には上式(7)又は(8)に示した変調位相 Ψ による変調を与えればよい。

【符号の説明】

【 0 0 5 9 】

1 0 ... フォトニック結晶レーザ

1 1、2 1 ... 2 次元フォトニック結晶層

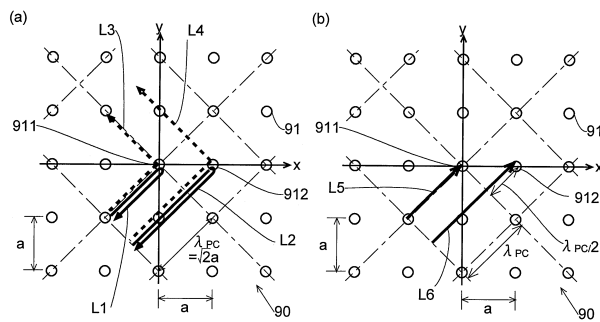
50

- 1 1 1 ... 空孔
 1 1 1 V ... 仮想的な空孔
 1 1 4 ... 母材
 1 2 ... 活性層
 1 3 1 ... 第 1 クラッド層
 1 3 2 ... 第 2 クラッド層
 1 4 1 ... 下部基板
 1 4 2 ... 上部基板
 1 5 1、2 5 1 A、2 5 1 B、2 5 1 C、2 5 1 X Y (X = A、B、C ...、Y = A、B、C ...) ... 下部電極
 1 5 2、2 5 2 ... 上部電極
 1 5 2 1 ... 上部電極の窓
 1 9 ... 傾斜ビーム
 1 9 S ... 傾斜ビームのスポット
 2 0 ... 出射方向可変フォトニック結晶レーザ
 2 1 A、2 1 B、2 1 C、2 1 X Y (X = A、B、C ...、Y = A、B、C ...) ... 2 次元フ
 ォトニック結晶構造
 2 9 ... 電流注入位置制御部
 9 0 ... 基本 2 次元格子
 9 1、9 1 1、9 1 2 ... 基本 2 次元格子の格子点

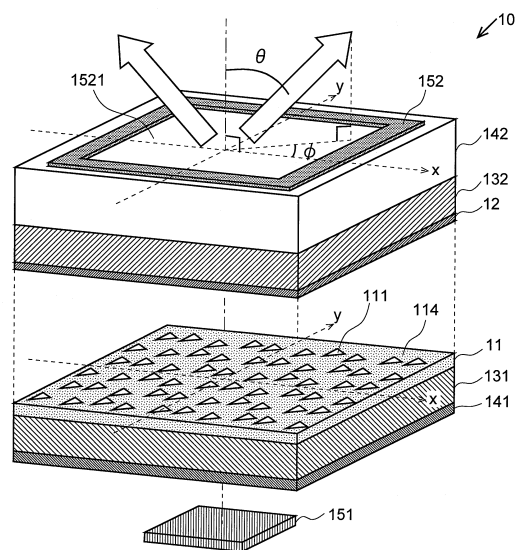
10

20

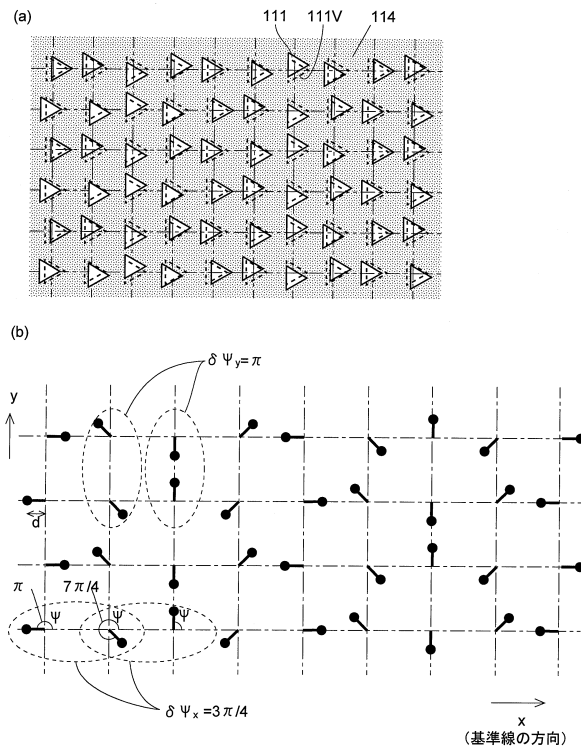
【図 1】



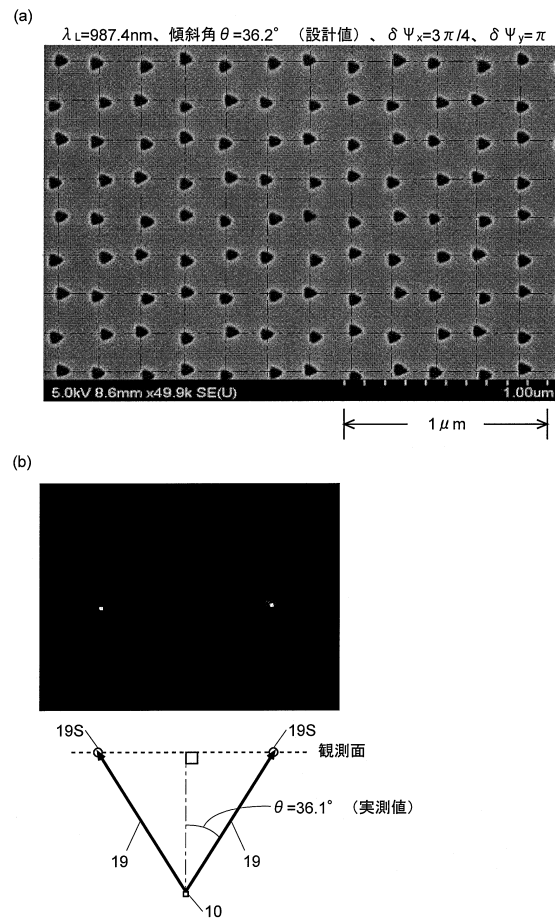
【図 2】



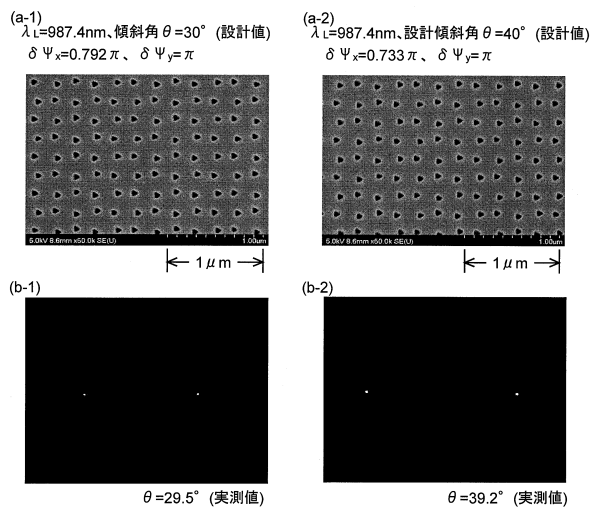
【図 3】



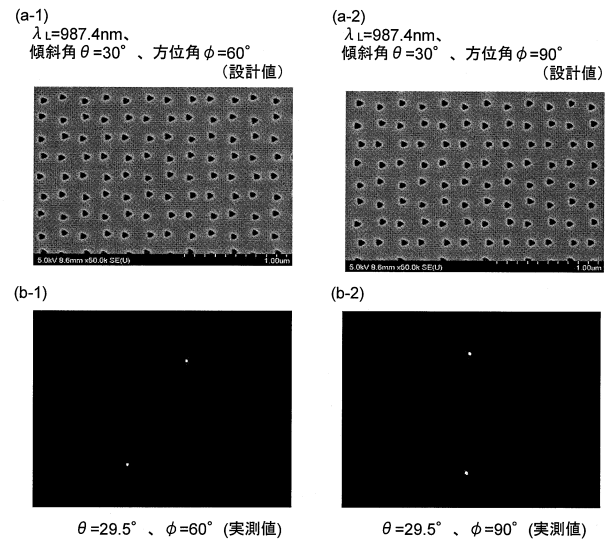
【図 4】



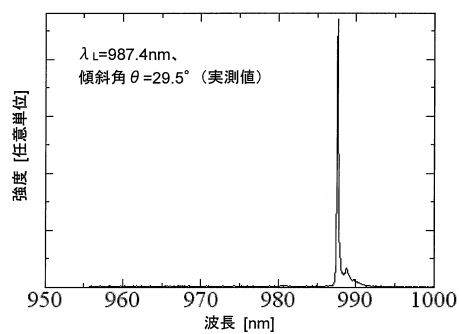
【図 5】



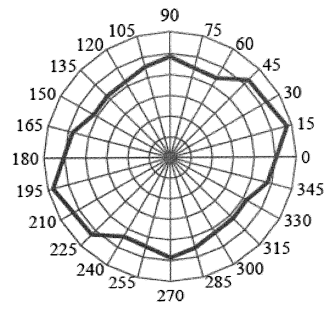
【図 7】



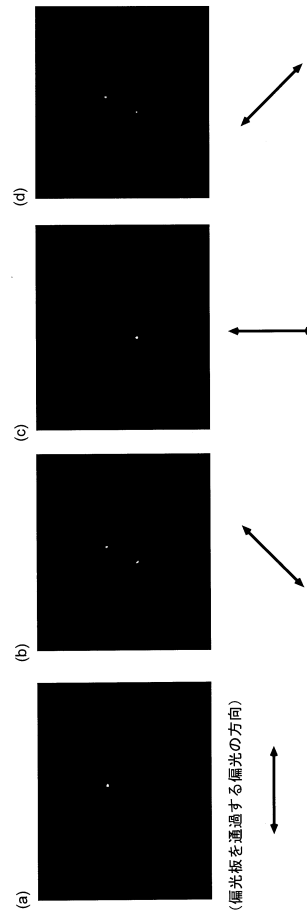
【図 6】



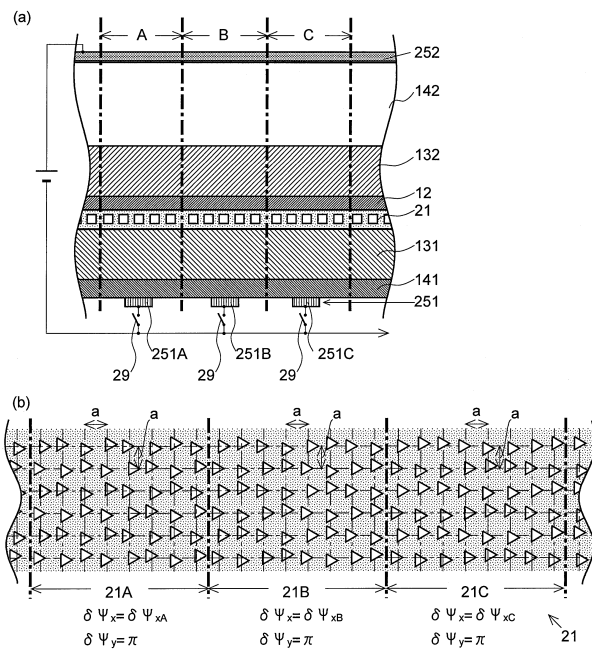
【図 8】



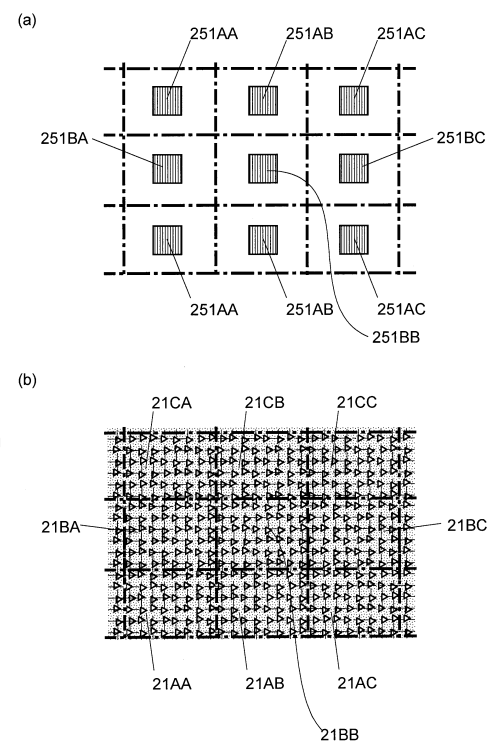
【図 9】



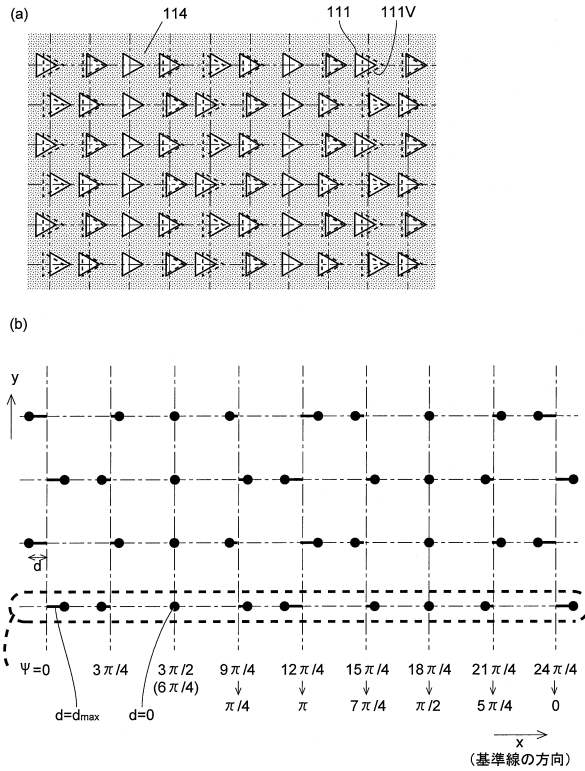
【図 10】



【図 11】

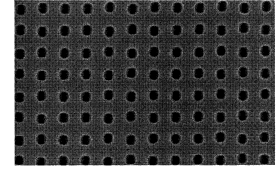
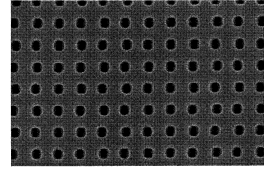


【図 1 2】

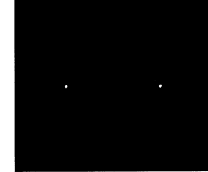


【図 1 3】

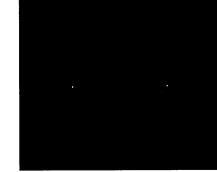
(a-1) 空孔のずれ : x方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ (a-2) 空孔のずれ : y方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$



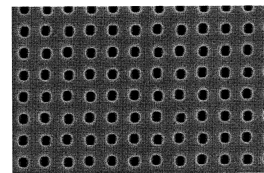
(b-1) x方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$



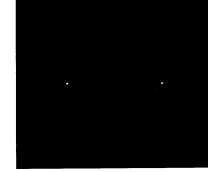
(b-2) y方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$



(a-3) 空孔のずれ : x方向から 135° の方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$

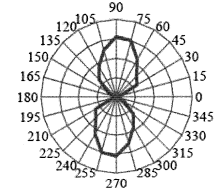


(b-3) x方向から 135° の方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$

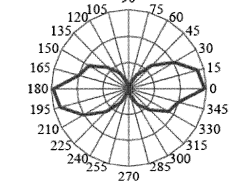


【図 1 4】

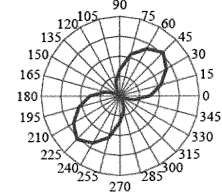
(1) 空孔のずれ : x方向



(2) 空孔のずれ : y方向

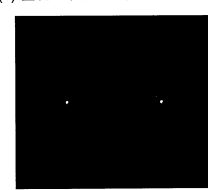


(3) 空孔のずれ : x方向から 135° の方向

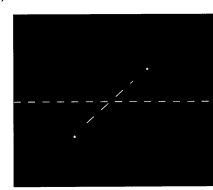


【図 1 5】

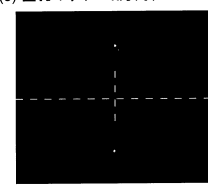
(1) 空孔のずれ : x方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$



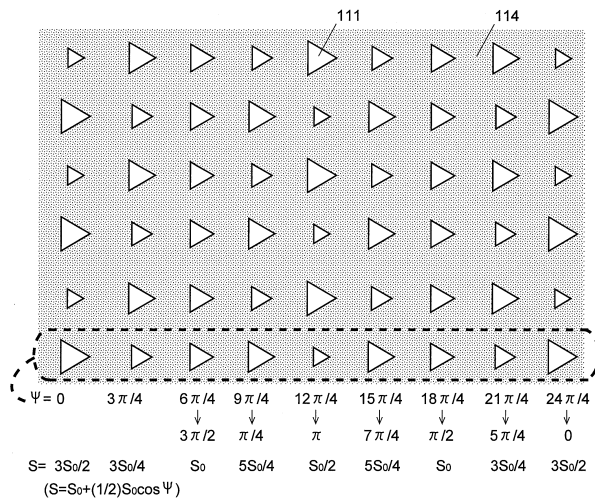
(2) 空孔のずれ : x方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=45^\circ$



(3) 空孔のずれ : x方向、 $\theta=30^\circ$ 、 $\phi=90^\circ$



【図 16】



フロントページの続き

(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

(72)発明者 梁 永

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

審査官 佐藤 宙子

(56)参考文献 特開 2013 - 41948 (JP, A)

特開 2008 - 288558 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 5/00 - 5/50

JSTPlus (JDreamIII)