

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年9月7日(07.09.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/159606 A1

(51) 国際特許分類:
H01S 5/183 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2018/007246

(22) 国際出願日: 2018年2月27日(27.02.2018)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2017-035887 2017年2月28日(28.02.2017) JP

(71) 出願人: 国立大学法人京都大学 (KYOTO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町3番地1 Kyoto (JP). 国立大学法人京都工芸繊維大学 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION

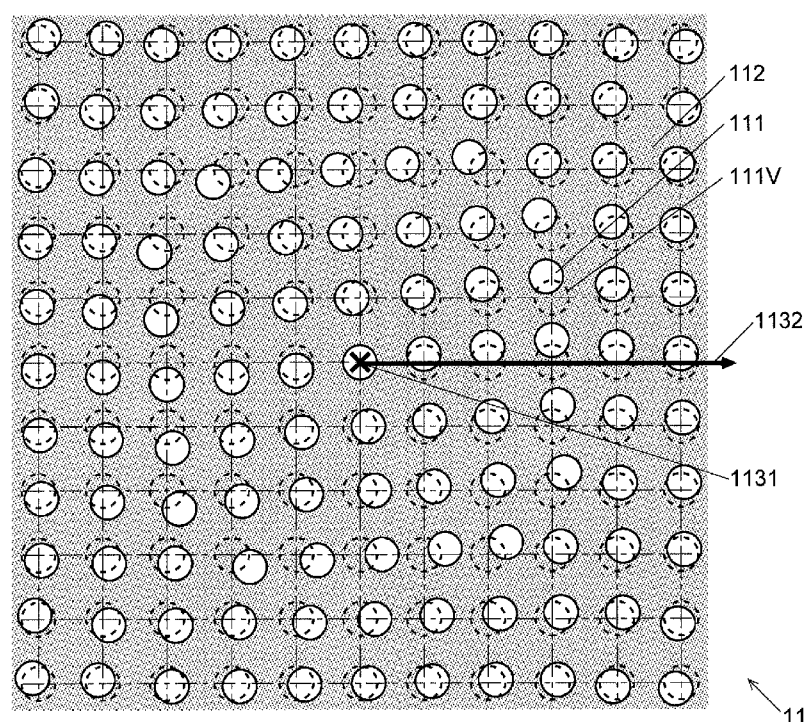
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 Kyoto (JP).

(72) 発明者: 野田 進 (NODA, Susumu); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 北村 恭子 (KITAMURA, Kyoko); 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 国立大学法人京都工芸繊維大学内 Kyoto (JP). 米 雅子 (YONE, Masako); 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 国立大学法人京都工芸繊維大学内 Kyoto (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人京都国際特許事務所 (KYOTO INTERNATIONAL PATENT LAW

(54) Title: PHOTONIC CRYSTAL LASER

(54) 発明の名称: フォトニック結晶レーザ



(57) **Abstract:** A photonic crystal laser 10 is a laser having a configuration in which a light emitting layer (active layer 12) for producing light including light of a wavelength λ_L , and a two-dimensional photonic crystal layer 11 are laminated, the two-dimensional photonic crystal layer 11 having a refractive index distribution formed by two-dimensionally arranging, on a plate-like substrate 112, different refractive index regions (holes 111) having refractive indexes different from that of the substrate 112. In the two-dimensional photonic crystal layer

OFFICE); 〒6008091 京都府京都市下京区東
洞院通四条下ル元恵王子町 3 7 番地 豊
元四条烏丸ビル Kyoto (JP).

SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

11, the different refractive index regions are arranged at positions displaced from the lattice points of a fundamental two-dimensional lattice having a periodicity which is determined such that a resonant state of the light of the wavelength λ_L is formed by forming a two-dimensional standing wave, and such that the light of the wavelength λ_L is not externally emitted. A position displacement vector $\Delta r \uparrow$ which indicates the displacements of the positions of the different refractive index regions in the respective lattice points from the lattice points is expressed by $\Delta r \uparrow = d \cdot \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \psi_0) \cdot (\cos(L(\varphi + \varphi_0)) \text{ and } \sin(L(\varphi + \varphi_0)))$, using: an inverse lattice vector $G' \uparrow = \pm(k_x \pm |k \uparrow|(\sin\theta \cos\varphi)/n_{\text{eff}}, k_y \pm |k \uparrow|(\sin\theta \sin\varphi)/n_{\text{eff}})$ expressed by a wave number vector $k \uparrow = (k_x, k_y)$ of the light of the wavelength λ_L in the two-dimensional photonic crystal layer 11, an effective refractive index n_{eff} of the two-dimensional photonic crystal layer, an azimuth angle φ from a predetermined reference line extending in a predetermined direction from a predetermined origin of the fundamental two-dimensional lattice, an arbitrary constant φ_0 , and an expanding angle θ of a laser beam; a position vector $r \uparrow$ of each of the lattice points; arbitrary constants d and ψ_0 ; and an integer L other than 0.

(57) 要約: フォトニック結晶レーザ 10 は、波長 λ_L の光を含む光を生じさせる発光層 (活性層 12) と、板状の母材 11 に、それとは屈折率が異なる異屈折率領域 (空孔 111) 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 11 とが積層された構成を有するレーザであって、2 次元フォトニック結晶層 11 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からずれた位置に配置されており、前記各格子点における異屈折率領域の位置の、該格子点からのずれを表す位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ が、2 次元フォトニック結晶層 11 内における前記波長 λ_L の光の波数ベクトル $k \uparrow = (k_x, k_y)$ 、前記 2 次元フォトニック結晶層の有効屈折率 n_{eff} 、前記基本 2 次元格子の所定の原点から所定の方向に延びる所定の基準線からの方位角 φ 、任意の定数 φ_0 、及びレーザビームの拡がり角 θ を用いて表される逆格子ベクトル $G' \uparrow = \pm(k_x \pm |k \uparrow|(\sin\theta \cos\varphi)/n_{\text{eff}}, k_y \pm |k \uparrow|(\sin\theta \sin\varphi)/n_{\text{eff}})$ 、前記各格子点の位置ベクトル $r \uparrow$ 、任意の定数 d 及び ψ_0 、並びに 0 を除く整数 L を用いて、 $\Delta r \uparrow = d \cdot \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \psi_0) \cdot (\cos(L(\varphi + \varphi_0)), \sin(L(\varphi + \varphi_0)))$ で表される。

明 細 書

発明の名称： フォトニック結晶レーザ

技術分野

[0001] 本発明は、集積回路等を作製する際の微細な加工や、微小な試料の検出に用いるスポット径の小さいレーザを生成するのに適したフォトニック結晶レーザに関する。

背景技術

[0002] 微細な加工や微小な試料の検出に用いる光源では、それら加工や検出の精度を高めるために、レーザビームをできるだけ小さい点に集光することが求められている。しかし、単に集光レンズでレーザビームを集光するだけでは、レーザビームのスポット径の大きさは、レーザの波長及び集光レンズの開口径により決定される回折限界値以下にすることはできない。

[0003] 特許文献1には、スポット径を小さくすることに適したレーザビームを生成するものであって、活性層とフォトニック結晶を有するレーザ（フォトニック結晶レーザ）が記載されている。フォトニック結晶レーザでは、活性層に電流が注入されることによって生成される光のうち、フォトニック結晶の屈折率の周期に応じた特定の波長の光のみが干渉により選択的に増幅され、レーザ発振する。このフォトニック結晶における屈折率の周期は、一般に、光の波長と同程度となっている。特許文献1に記載のフォトニック結晶レーザでは、フォトニック結晶は、板状の母材内に、該母材とは屈折率が異なる領域である異屈折率領域が環状に、該環の周方向に周期的に並ぶように配置されている。各異屈折率領域は、その中心を通り前記環の径方向に延びる軸に関して非対称な形状を有している。このようなフォトニック結晶を有することにより、特許文献1に記載のフォトニック結晶レーザは、図15(a)に示すように、断面81が環状であって環の径方向（同図中に矢印で示す方向）に偏光したレーザビームを発振する。以下、このようなレーザビームを「径偏光環状レーザビーム」と呼ぶ。

[0004] このような径偏光環状レーザビームを集光することにより、焦点の近傍で光軸方向の電界が生成され、ビーム径が回折限界値よりも小さいレーザビームが得られる。従来、小さなビーム径は光軸方向に1波長程度のごく狭い（短い）領域においてしか得られなかったが、径偏光環状レーザビームを用いることにより10波長以上の長い領域において得ることができる。

[0005] また、図15(b)に示すように、径偏光環状レーザビームをレンズ83で集光すると、レーザビームの環状部分が屈折する際に径偏光の電界に、レーザビームに平行な方向（z方向）の成分が生じる。このような成分を有する偏光を用いると、例えばラマン散乱測定において、レーザビームに垂直な偏光を用いた場合には生じなかった散乱を観測することができる、という利点がある（非特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：国際公開W02011/108510号

特許文献2：国際公開W02014/136607号

特許文献3：特開2014-197665号公報

非特許文献

[0007] 非特許文献1：「Z偏光素子」、[online]、2005年、ナノフォトン株式会社、[2017年2月13日検索]、インターネット<URL：<http://www.nanophoton.jp/products/zpol/index.html>>

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 特許文献1に記載のフォトニック結晶レーザでは、板状の母材内に異屈折率領域が環状に並んで配置されたフォトニック結晶を用いているため、活性層で生成された光は、母材のうち、当該環状の部分においてのみ増幅される。そのため、特許文献1に記載のフォトニック結晶レーザでは、出力を大きくすることが難しい。また、このフォトニック結晶レーザでは、共振器長が

長くなるため、異屈折率領域が配置された環状の部分のうちの一部でのみレーザー発振が生じて均一性が損なわれてしまい、完全な径偏光環状レーザービームを得ることができないことがある。

[0009] 本発明が解決しようとする課題は、従来よりも出力が大きく且つより完全な径偏光環状レーザービーム等の、種々の偏光を有する環状レーザービームを得ることができる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

[0010] 最近、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次元格子（正方格子、三角格子等）状に配置された2次元フォトニック結晶を有するフォトニック結晶レーザが提案されている。このフォトニック結晶レーザにおいて、異屈折率領域を、活性層で生じる所定の波長に対応して定まる所定の周期を有する2次元格子の格子点から特定の1方向にずれた位置に配置し、そのずれの大きさを格子点の位置に応じて周期的に変化させておくことにより、該1方向に垂直な方向の直線偏光を有し、母材の面の法線に対して傾斜した方向に出射するレーザービームが得られることが明らかになった（特許文献2）。但し、このフォトニック結晶レーザで得られるレーザービームの断面は環状ではなく、偏光は前述の通り直線偏光であって、径偏光ではない。本発明者は、このフォトニック結晶レーザにおいて、異屈折率領域を格子点から特定の1方向にずらして配置する代わりに、格子点毎に異なる方向に（2次元的に）ずらすことにより、径偏光等の様々な形態の偏光を有するレーザービームが得られることを見出した。また、格子点からのずれの大きさを、格子点の位置に応じて周期的に変化させるのに加えてさらに変化させておくことにより、環状のレーザービームが得られることを見出した。これらの知見により、本発明が完成した。

[0011] すなわち、本発明に係るフォトニック結晶レーザは、

波長 λ_L の光を含む光を生じさせる発光層と、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に定められる周期性を持つ基本2次元格子の各格子点からずれた位置に配置されており、

前記各格子点における異屈折率領域の位置の、該格子点からのずれの大きさが、前記基本2次元格子の所定の原点から径方向及び周方向に向かってそれぞれ所定の周期で変化する変調を有し、該格子点からのずれの方向が、該原点と該格子点を結ぶ直線方向によって異なることを特徴とする。

[0012] 前記所定の原点は、任意の値を1つずつ定めればよい。また、前記径方向に向かって変化する変調の所定の周期と、前記周方向に向かって変化する変調の所定の周期はそれぞれ、任意の値を1つずつ定めればよい。

[0013] 本発明に係るフォトリック結晶レーザは、以下のように表すこともできる。すなわち、本発明に係るフォトリック結晶レーザは、

波長 λ_L の光を含む光を生じさせる発光層と、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に定められる周期性を持つ基本2次元格子の各格子点からずれた位置に配置されており、

前記各格子点における異屈折率領域の位置の、該格子点からのずれを表す位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ 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 $k \uparrow = (k_x, k_y)$ 、前記2次元フォトリック結晶層の有効屈折率 n_{eff} 、前記基本2次元格子の所定の原点から所定の方向に延びる所定の基準線からの方位角 ϕ 、任意の定数 ϕ_0 、及びレーザビームの拡がり角 θ を用

いて表される逆格子ベクトル $\mathbf{G}' \uparrow = \pm(k_x \pm |k \uparrow|(\sin \theta \cos \phi)/n_{\text{eff}}, k_y \pm |k \uparrow|(\sin \theta \sin \phi)/n_{\text{eff}})$ 、前記各格子点の位置ベクトル $\mathbf{r} \uparrow$ 、任意の定数 d 及び ϕ_0 、並びに 0 を除く整数 L を用いて、

$$\Delta \mathbf{r} \uparrow = d \cdot \sin(\pm \mathbf{G}' \uparrow \cdot \mathbf{r} \uparrow + \phi_0) \cdot (\cos(L(\phi + \phi_0)), \sin(L(\phi + \phi_0))) \quad \dots (1)$$

で表されることを特徴とする。

[0014] (1) 式中の $\sin(\pm \mathbf{G}' \uparrow \cdot \mathbf{r} \uparrow + \phi_0)$ は、前述の基本 2 次元格子の所定の原点から径方向に向かって所定の周期で変化する変調を表している。また、(1) 式中の ϕ_0 は前記所定の角度に該当する。

[0015] 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 次元フォトニック結晶層内では波長が λ_L/n_{eff} となる。有効屈折率 n_{eff} は、上記各層が積層した構造において 2 次元フォトニ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屈折率である。なお、本発明に係るフォトニック結晶レーザは、上記発光層及び上記 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を有していてもよい。

[0016] 上記本発明に係るフォトニック結晶レーザにおいて、径偏光環状レーザビームを出射するためには、(1) 式中の L の値を $+1$ 、 ϕ_0 の値を 90° とする。

[0017] 一方、(1) 式中の L の値を $+1$ 、 ϕ_0 を 0° とすれば、レーザビームの断面において環の周方向に偏光した方位偏光環状レーザビームが得られる。さらに、径偏光及び方位偏光以外にも、 L の値を適宜設定することにより、環の周方向に $(360/L)^\circ$ 回転する毎に同方向となる偏光を有する環状レーザビームが得られる。このような様々な偏光を有する環状レーザビームは、それを集光して形成される集光場により微小な物体を保持する光ピンセットとして用いたり、集光場により高密度にデータを記録する光記録装置の光源として用いたり、高分解能で観察が可能な顕微鏡の光源として用いたり、光造形等の用途に用いることができる。

[0018] 本発明では、基本 2 次元格子は次段落以降で説明するように、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構造を有してい

る。これにより、波長は所定値 λ_L であるものの所定の偏光を有しないレーザービームや断面が環状ではないレーザービームがフォトニック結晶レーザーから出射することを防止する。それと共に、異屈折率領域が格子点から、前記基本2次元格子の所定の原点から径方向に向かって所定の周期で変化する変調を有する大きさで、該原点と該格子点を結ぶ直線と所定の角度を成す方向（各格子点から位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ で表される位置）にずれていることにより、径偏光環状レーザービームが出射する。以下、(a)異屈折率領域の格子点からの位置ずれ、及び(b)基本2次元格子について詳細に説明する。

[0019] (a)異屈折率領域の格子点からの位置ずれ

特許文献2のフォトニック結晶レーザーでは、位置ベクトル $r \uparrow$ で位置が表される基本2次元格子の各格子点において、格子点から $d \sin(G' \uparrow \cdot r \uparrow)$ の距離だけ1方向にずれた位置に異屈折率領域を配置している。ここで距離 $d \sin(G' \uparrow \cdot r \uparrow)$ は、基本2次元格子の所定の原点から径方向に向かって所定の周期で変化する変調を表している。但し、周方向には所定の周期の変化を有しない。また、距離 $d \sin(G' \uparrow \cdot r \uparrow)$ に含まれる角度 θ は、特許文献2では母材の法線に対するレーザービームの傾斜角を表し、角度 ϕ はレーザービームの方位角を示している。これにより、特許文献2のフォトニック結晶レーザーでは、前記1方向に垂直な方向の直線偏光を有し、母材の面の法線に対して傾斜角 θ で傾斜したレーザービームが、方位角 ϕ の方向に出射する。一方、特許文献2のフォトニック結晶レーザーでは、上記のように異屈折率領域が格子点から1方向にずれており、ずれの方が原点と格子点を結ぶ直線と所定の角度を成すという構成は取っていない。

[0020] それに対して、本発明に係るフォトニック結晶レーザーでは、各格子点における該格子点からの異屈折率領域のずれの大きさは、基本2次元格子の所定の原点から径方向に向かって所定の周期で変化すると共に、周方向に向かっても所定の周期（径方向の周期と同じである必要はない）で変化する。これにより、得られるレーザービームの断面の形状は環状となる。(1)式でいうと、位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ が、ずれの大きさを表す因子 $d \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0)$

にずれの方向を表すベクトル($\cos(L(\phi+\phi_0))$, $\sin(L(\phi+\phi_0))$)を乗じたものであって、原点からの距離を表す $|r \uparrow|$ 及び周方向の変化を表す方位角 ϕ をそれぞれ変化させていくと、ずれの大きさを表す因子 $d \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0)$ は周期的に変化する。一方、位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ に含まれる角度 θ は格子点に依らない定数であり、前述の基本2次元格子の所定の原点から径方向及び周方向に向かってそれぞれ所定の周期で変化する変調においても対応する定数が規定できる。これにより、生成されるレーザビームは、傾斜角 θ を有する直線を母材の面の法線の周りに回転させて成る円錐面状の形状となる。この形状のレーザビームの断面は環状である。なお、この環状のレーザビームは、フォトリソ結晶レーザから離れるに従って角度 θ で広がってゆき、径が大きくなるが、 θ を十分に小さい値に設定することにより、この広がりを抑えることができる。

[0021] また、各格子点における該格子点からの異屈折率領域のずれの方向が、該原点と該格子点を結ぶ直線の方角によって異なることにより、得られるレーザビームの環内での位置によって方向が異なる偏光が得られる。(1)式でいうと、位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ におけるずれの方向を表すベクトル($\cos(L(\phi+\phi_0))$, $\sin(L(\phi+\phi_0))$)が $(360/L)^\circ$ の周期を有することにより、レーザビームの断面において、環の周方向に $(360/L)^\circ$ の周期で直線偏光の方向が1回転する偏光が得られる。例えば $L=\pm 1$ の場合には、環の周方向に 360° （つまり1周）進む毎に偏光が1回転する。ここで $L=+1$ の場合において $\phi_0=90^\circ$ とすると、直線偏光の方向が環の周方向の位置に依らずに径方向となり、径偏光のレーザビームが得られる。また、 $L=+1$ の場合において $\phi_0=0$ とすると、直線偏光の方向が環の周方向の位置に依らずに周方向となり、方位偏光の環状レーザビームが得られる。

[0022] 以上のように、本発明に係るフォトリソ結晶レーザでは、断面が環状であって、環の周方向に $(360/L)^\circ$ の周期で直線偏光の方向が1回転する偏光を有するレーザビームが得られる。そして、 $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合に径偏光環状レーザビームが得られ、 $L=+1$ 、 $\phi_0=0$ の場合に方位偏光環状レーザビームが得

られる。

[0023] なお、特許文献3には、フォトニック結晶レーザにおいて、共振状態形成用格子点に摂動が加えられていることが記載されている。しかし、特許文献3における摂動は、異屈折率領域（空孔）の平面形状の大きさや深さを異屈折率領域毎に異なるものとしたり、共振状態形成用の格子に別の格子である摂動状態形成用格子を重畳するものであって、異屈折率領域の位置を格子点からずらすことは記載されていない。また、特許文献3には、断面形状が環状であるレーザビームが得られることも、偏光に関することも記載されていない。

[0024] (b)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

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

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

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

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

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

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。

[0025] 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 $a=2^{-1/2} \lambda_{\text{PC}}$ を満たす正方格子の場合を例に、図1を用いて説明する。

[0026] 2次元フォトニック結晶層内では、基本2次元格子90の正方格子の格子点91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911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912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 9 1 2 に散乱された光 L2 のみを示す。)。
また、格子点 9 1 1 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 (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。

[0027] 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 180° 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。

[0028] 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。

[0029] 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 $G'_{\uparrow} (= (g'_x, g'_y))$ とする) は、

[数 1]

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

… (2)

である。また、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、逆格子ベクトル $G' = (g'_x, g'_y)$ は、

[数2]

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

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

…(3)

である。一方、基本2次元格子が格子定数aの三角格子の場合には、逆格子ベクトル $G'=(g'_x, g'_y)$ は、

[数3]

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

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

…(4)

又は、

[数4]

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

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

…(5)

のいずれかの組み合わせを用いることができる。これら各基本単位格子における逆格子ベクトル G' を(1)式に代入することにより、当該基本単位格子の各格子点における位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ を求めることができる。

[0030] ここまで、本発明に係るフォトニック結晶レーザの構成を説明したが、この構成によれば、異屈折率領域が2次元的に配置されていることにより、異屈折率領域が環状の範囲内にのみ配置された従来のフォトニック結晶レーザよりも光を増幅することができる範囲を広くすることができるため、出力を高くすることができる。また、異屈折率領域が2次元的に配置されていることにより、局所的なレーザ発振が生じ難くなり、より完全な径偏光環状レー

ザビームを得ることができる。

[0031] 本発明に係るフォトニック結晶レーザにおいて、発光層は、典型的には従来のレーザで広く用いられている、電流が注入されることにより発光する活性層であるが、波長 λ_L の光を含む光を生じさせるものであれば、このような活性層には限定されない。

[0032] 前記異屈折率領域には、母材に空孔を設けることにより形成することができる。あるいは、母材に該母材とは異なる屈折率を有する部材を埋め込むことにより形成してもよい。異屈折率領域の平面形状は、円形や三角形その他の多角形等の種々の形状を取り得るが、レーザビームの断面を環の周方向により一様に近くするために、対称性が良いという点で円形とすることが望ましい。対称性が良いという点では、円形の代わりに、六角形以上の多角形としてもよい。

発明の効果

[0033] 本発明により、従来よりも出力が大きく且つより完全な径偏光環状レーザビーム等の、種々の偏光を有する環状レーザビームを得ることができるフォトニック結晶レーザが実現する。

図面の簡単な説明

[0034] [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]本発明に係るフォトニック結晶レーザの一実施形態を示す概略構成図。

[図3]本実施形態の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を示す上面図。

[図4]本実施形態のフォトニック結晶レーザの次元フォトニック結晶層における基本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。

[図5]傾斜角 θ 及び方位角 ϕ の値が同じであって、空孔のずれの方向が異なる3つの例について、2次元フォトニック結晶層の上面図（上段図）及び偏光の方向を測定した結果（下段図）を示す図。

[図6]傾斜角 θ 及び空孔のずれの方向が同じであって、方位角 ϕ の値が異なる

3つの例について、レーザビームのスポットを示す写真。

[図7]本実施形態のフォトニック結晶レーザにおいて径方向環状レーザビームが得られることを説明する図。

[図8]周方向環状レーザビームが得られることを説明する図。

[図9] $L=2$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合における環状レーザビームの偏光の方向を示す図。

[図10](a) $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 及び(a) $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合につき、本実施形態のフォトニック結晶レーザにより得られたレーザビームの断面を撮影した写真。

[図11] $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合につき、偏光素子を通過したレーザビームの断面を、偏光素子の向きが異なる複数の例について撮影した写真及びその説明の図。

[図12] $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合につき、偏光素子を通過したレーザビームの断面を、偏光素子の向きが異なる複数の例について撮影した写真及びその説明の図。

[図13] $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ であって拡がり角 θ が異なる2つの例につき、本実施形態のフォトニック結晶レーザにより得られたレーザビームの断面を撮影した写真。

[図14]本実施形態のフォトニック結晶レーザにつき、作製した2次元フォトニック結晶層の一例を示すSEM写真。

[図15]径偏光環状レーザビームにつき、ビームに垂直な断面(a)及び平行な1断面(b)を模式的に示す図。

発明を実施するための形態

[0035] 図2～図14を用いて、本発明に係るフォトニック結晶レーザの実施形態を説明する。

[0036] 図2は、本実施形態のフォトニック結晶レーザ10の斜視図である。このフォトニック結晶レーザ10は、下部電極151と、下部基板141と、下部クラッド層131と、2次元フォトニック結晶層11と、活性層（発光層）12と、上部クラッド層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。但し、２次元フォトニック結晶層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。なお、図２では２次元フォトニック結晶層１１の構成を示すために２次元フォトニック結晶層１１と活性層１２を離して示しているが、実際には両者は接している。同様に、下部基板１４１と下部電極１５１も接している。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。また、２次元フォトニック結晶層１１と活性層１２の間には、スペーサ等の部材が挿入されていてもよい。

[0037] まず、２次元フォトニック結晶層１１以外の各層の構成を説明する。活性層１２は、前記発光層に相当するものであり、下部電極１５１と上部電極１５２の間に電流を流すことで電荷が注入されると、該活性層１２の材料に応じた所定の波長範囲内にある波長の光を発する。活性層１２には、例えばインジウム・ガリウムヒ素／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ることができる。この活性層１２は、960～990nmの範囲内の波長の光を発光する。下部クラッド層１３１及び下部基板１４１にはp型半導体を用い、上部クラッド層１３２及び上部基板１４２にはn型半導体を用いる。例えば、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、下部クラッド層１３１にはp型半導体のアルミニウム・ガリウムヒ素（AlGaAs）を、上部クラッド層１３２にはn型AlGaAsを、それぞれ用いることができる。なお、下部クラッド層１３１及び下部基板１４１にn型半導体を用い、上部クラッド層１３２及び上部基板１４２にp型半導体を用いてもよい。

[0038] 上部電極１５２には、本実施形態では金等の金属から成る膜の中央部に窓（空洞）１５２１が設けられたものを用いる。フォトニック結晶レーザ１０で生成されるレーザビームは、窓１５２１を通過してフォトニック結晶レーザ１０の外に出射する。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。下部

電極 1 5 1 は、本実施形態では上部電極 1 5 2 の窓 1 5 2 1 よりも面積が小さい金等の金属製の膜を用いる。下部電極 1 5 1 の形状は、本実施形態では円形としたが、特に問わない。

[0039] 次に、2次元フォトリック結晶層 1 1 の構成を説明する。2次元フォトリック結晶層 1 1 は、図 3 に示すように、板状の母材（スラブ） 1 1 2 内に空孔（異屈折率領域） 1 1 1 を後述のように配置したものである。本実施例では、母材 1 1 2 の材料には p 型 GaAs を用いた。空孔 1 1 1 の形状は、本実施形態では円形とした。

[0040] 図 3 及び図 4 を用いて、母材 1 1 2 内での空孔 1 1 1 の配置を説明する。本実施形態では、基本 2 次元格子を正方格子とする。図 3 は 2 次元フォトリック結晶層 1 1 の上面図である。この図には、2次元フォトリック結晶層 1 1 に実際に設けられた空孔 1 1 1 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 1 1 1 V の重心が配置された状態を破線で示す。また、後述のように空孔 1 1 1 の位置を定める際の基準となる原点 1 1 3 1 を×印で示し、該原点から 1 方向に延びる直線である基準線 1 1 3 2 を矢印付きの実線で示す。原点 1 1 3 1 は、基本 2 次元格子の格子点のうち任意の 1 点とし、基準線 1 1 3 2 は、正方格子の互いに直交する格子線のうちの一方と平行な線とした。図 4 には、正方格子（一点鎖線）、空孔 1 1 1 の重心 1 1 1 G（黒丸）、原点 1 1 3 1 及び基準線 1 1 3 2 のみを示す。

[0041] 基本 2 次元格子の格子定数 a は、活性層 1 2 が発光する 960～990nm の波長範囲内から、レーザ発振させる波長 λ_L を選択したうえで、 $a=2^{-1/2} \lambda_L / n_{\text{eff}}$ となるように定めればよい。ここで、2次元フォトリック結晶層 1 1 内において空孔 1 1 1 が占める体積の割合（フィリングファクター）と母材 1 1 2 の材料の屈折率に基づいて定めればよい。本実施形態では、2次元フォトリック結晶層 1 1 の有効屈折率 n_{eff} は 3.4 とした。

[0042] 本実施形態では、径偏光環状レーザビームを得るために、上記(1)式において $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ とする。また、レーザビームの拡がり角 θ は任意の値（例え

ば $\theta=1^\circ$) とする。各格子点における方位角 ϕ は、基準線 1 1 3 2 に対して、原点 1 1 3 1 と該格子点を結ぶ直線が成す角度で表す (図 4)。

[0043] 格子点毎の逆格子ベクトル $G' \uparrow$ は、基本 2 次元格子が正方格子であることから、(2) 式に有効屈折率 n_{eff} 及び該格子点における方位角 ϕ の値を代入したものとなる。そして、格子点毎の位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ は、(1) 式に $L=1$ 及び $\phi_0=90^\circ$ 、並びに格子点毎の位置ベクトル $r \uparrow$ 及び逆格子ベクトル $G' \uparrow$ を代入したものとなる。なお、(1) 式中の d の値は任意である。

[0044] (1) 式より、位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ の方向は、一般にベクトル $(\cos(L(\phi + \phi_0)), \sin(L(\phi + \phi_0)))$ 、本実施形態ではベクトル $(\cos(\phi + \pi/2), \sin(\phi + \pi/2))$ で定まる。従って、本実施形態では、各格子点において基準線 1 1 3 2 の方向から $(\phi + \pi/2)$ ラジアン、すなわち $(\phi + 90^\circ)$ 回転させた方向にずれた位置に空孔 1 1 1 の重心 1 1 1 G が配置される (図 3 (b))。例えば、基準線 1 1 3 2 上の格子点 ($\phi=0^\circ$) では該基準線 1 1 3 2 に垂直な方向に、基準線 1 1 3 2 に直交する線 1 1 3 3 上の格子点 ($\phi=90^\circ$) では基準線 1 1 3 2 に平行な方向に、基準線 1 1 3 2 と $\phi=45^\circ$ の角度で交差する線 1 1 3 4 上の格子点では該線 1 1 3 4 に直交する $\phi=135^\circ$ の方向に、それぞれ格子点からずれた位置に空孔 1 1 1 の重心 1 1 1 G が配置される。これらのずれの方向はいずれも、原点と格子点を結ぶ直線に対して垂直な方向である。

[0045] 一方、空孔 1 1 1 の重心 1 1 1 G の、格子点からのずれの距離は $d \sin(G' \uparrow \cdot r \uparrow)$ で定まる。 $G' \uparrow$ 及び $r \uparrow$ がそれぞれ、格子点毎に異なるベクトルであることから、格子点からのずれの距離も格子点毎に異なる値となる。

[0046] 各格子点において空孔 1 1 1 が該格子点から上記のようにずれた位置に配置されていることにより、フォトニック結晶レーザ 10 で生成されるレーザビームは、径偏光環状レーザビームとなる。以下、その理由を説明する。

[0047] (a) レーザビームが径偏光になる理由

まず、本実施形態とは異なり、全ての格子点において空孔 1 1 1 を同じ方向にずらした場合について検討する。図 5 の上段図には、全ての格子点において、空孔 1 1 1 のずれの方向を表すベクトル $(\cos(L(\phi + \phi_0)), \sin(L(\phi + \phi_0)))$ 、

ϕ_0)))を格子点毎の方位角 ϕ に依存しない

ベクトルに置き換え、ずれの大きさを表す因子 $d \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0)$ 中の θ を 30° 、 ϕ を 0° 、 ϕ_0 を 0° とした場合の例を示す。空孔 1 1 1 のずれの方向は、図 5 (a)ではy方向、(b)ではx方向に対して $+45^\circ$ の方向、(c)ではx方向とした。これらの例はいずれも、特許文献 2 に記載の例と同じである。その結果、空孔 1 1 1 のずれの方向に対して、(a)ではx方向、(b)ではy方向に対して $+45^\circ$ の方向、(c)ではy方向の直線偏光を有するレーザビームが得られ、いずれの例においても空孔 1 1 1 のずれの方向に対して $+90^\circ$ の方向となる（図 5 の下段図）。

[0048] 次に、本実施形態及び上記図 5 の例とは異なり、格子点から空孔 1 1 1 をずらす方向を全ての格子点において同じ（ここではx方向とする）としたうえで、ずれの大きさを表す因子 $d \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0)$ 中の角度 ϕ が異なる（角度 θ は同じ）場合について、得られたレーザビームを 2 次元フォトリック結晶層に平行な断面で撮影した結果を図 6 に示す。因子 $d \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0)$ 中の方位角 ϕ が (a) 0° 、(b) 45° 、(c) 90° の場合のいずれにおいても、2 次元フォトリック結晶層の法線に対する傾斜角が角度 θ 、方位角が ϕ であるレーザビームが出射していることがわかる。

[0049] これら図 5 及び図 6 の結果を組み合わせると、以下のことがいえる。方位角 ϕ が 0° （図 6 (a)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向がy方向（ 90° 、図 5 (a)）であれば、図 7 に示すように、2 次元フォトリック結晶層に平行な断面におけるレーザビームのスポット 2 0 1 は、方位角 ϕ が 0° である方向に現れ、その偏光はx方向（ 0° ）になる。同様に、方位角 ϕ が 45° （図 6 (b)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向がx方向に対して 135° の方向（図 5 (b)）である場合には、前記断面におけるレーザビームのスポット 2 0 2 は、方位角 ϕ が 45° である方向に現れ、その偏光はx方向に対して 45° の方向になる。また、方位角 ϕ が 90° （図 6 (c)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向がx方向（ 180° 、図 5 (c)）である場合には、前記断面におけるレーザビームのスポット 2 0 3 は、方位角 ϕ が 90° である方向に現れ、その偏光はy方向（ 90° ）になる。

いずれスポットにおいても、偏光は原点とスポットを結ぶ方向と同じ方向となる。

[0050] 従って、これらのレーザビームのスポットを、方位角 ϕ が 0° から 360° の範囲内で集めると、断面が環状のレーザビームが形成される（図 7 の破線）。また、空孔 1 1 1 が格子点からずれる方向を、原点とスポットを結ぶ方向に対して 90° の方向とすることにより、各スポットにおける偏光の方向は、原点とスポットを結ぶ方向と同じ方向、すなわち径方向となる。つまり、これらの条件を組み合わせることにより、径偏光環状レーザビームが得られる。本実施形態のフォトリソ結晶レーザ 1 0 は、格子点毎に (1) 式及び (2) 式における方位角 ϕ の値を 0° から 360° の範囲内で変化させ、且つ、位置ずれベクトル Δr の方向を規定するベクトル $(\cos(\phi + \pi/2), \sin(\phi + \pi/2))$ により原点とスポットを結ぶ方向に対して 90° の方向に格子点から空孔 1 1 1 をずらすことにより、上記の条件を満たし、径偏光環状レーザビームを得ることができる。

[0051] 同様に、図 8 に示すように、方位角 ϕ が 0° （図 6 (a)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向が x 方向（図 5 (c)）であれば、レーザビームのスポット 2 0 1 A は、方位角 ϕ が 0° の方向に現れ、偏光が y 偏光 (90°) になり、方位角 ϕ が 45° （図 6 (b)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向が x 方向に対して 45° の方向（図 5 (b)）であれば、レーザビームのスポット 2 0 2 A は、方位角 ϕ が 45° の方向に現れ、偏光が x 方向に対して 135° となり、方位角 ϕ が 90° （図 6 (c)）であって空孔 1 1 1 のずれの方向が y 方向（図 5 (a)）であれば、レーザビームのスポット 2 0 3 A は、方位角 ϕ が 90° の方向に現れ、x 偏光 (180°) になる。従って、 0° から 360° の範囲内で方位角 ϕ が異なるレーザビームのスポットを集めると、断面が環状のレーザビームが形成される（図 8 の破線）。また、偏光の方向は環の周方向となる。従って、この例で得られるレーザビームは、方位偏光環状レーザビームである。ここで挙げた条件は、(1) 式において $L=+1$ 、 $\phi_0=0^\circ$ とした場合に対応する。

[0052] また、L の値を +1（上記実施形態）及び 0（本発明の範囲外）以外の整数と

した場合にも、 L の値に対応した偏光を有する環状レーザービームが得られる。図9に、 $L=+2$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合について、偏光の方向を矢印で示す。 $\phi=0^\circ$ であって空孔111のずれの方向が y 方向(90°)である場合、得られるスポット201Bでは、偏光は図7と同様に x 方向であり、この方向は径方向である。それに対して、 ϕ の値が増加するに従って、偏光の方向は 2ϕ 回転する。例えば、 $\phi=30^\circ$ であって空孔111のずれの方向が x 方向に対して 120° である場合、得られるスポット202Bでは、偏光は x 方向に対して 2ϕ 、すなわち 60° 回転している。従って、 ϕ が 180° 増加する毎に、偏光の方向は 360° 回転して $\phi=0^\circ$ のときと同じ方向となる。そして、 ϕ が 360° 増加するまでに、偏光は2回、回転することとなる。同様に、 L が+3以上である場合には、 ϕ が $(360/L)^\circ$ 増加する毎に、偏光の方向は 360° 回転して $\phi=0^\circ$ のときと同じ方向となり、 ϕ が 360° 増加するまでに、偏光は L 回、回転する。一方、 L が負の値を有する場合には、 ϕ が増加するに従って、偏光の方向は、 L が正の値を有する場合とは逆方向に回転する。

[0053] 図10に、(a) $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ (すなわち、径偏光環状レーザービームを得る条件)、及び(b) $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ として作製したフォトリソ結晶レーザー10で得られたレーザービームの断面の写真を示す。拡がり角 θ はいずれも $=1^\circ$ とした。いずれの場合にも、環状の断面を有するレーザービームが得られている。なお、(a)の条件では、断面の環の外側にも発光(サイドローブ)が出現したため、図10(a)ではサイドローブを遮蔽した写真を示している。(b)ではサイドローブは出現しなかった。

[0054] 図10(a)及び(b)に示した $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 及び $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合のレーザービームについてそれぞれ、偏光素子を通過させ、偏光素子の向きを変えながら撮影を行った。その結果を、 $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合については図11に、 $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合については図12に、それぞれ示す。図11及び図12にはそれぞれ、左側に、偏光素子の向きが異なる4つの写真を示した。各図の右側には、4つの写真のそれぞれに対応して、偏光素子を通過することが可能な偏光の方向を白抜き矢印で示し、レーザービームの環状の断面の各位置に

において設計 (L 及び ϕ_0 の値) から想定される偏光の方向を黒矢印で示した。また、偏光素子を通過することが可能な偏光の方向と、想定される偏光の方向が一致している部分を破線で囲んで示した。図 1 1 及び図 1 2 のいずれの場合にも、左側の写真で光が現れている部分の位置と、右側の図で破線で囲んだ部分の位置が一致している。この結果から、設計通りの偏光を有する環状レーザビームが得られているといえる。

[0055] 図 1 3 (a) 及び (b) に、 $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ の場合について、拡がり角 θ が異なる 2 つのフォトニック結晶レーザ 1 0 で得られたレーザビームの断面の写真を示す。拡がり角 θ は、(a) では 1° 、(b) では 8° となるように設定した。フィリングファクター (FF) は、(a) では 12.0%、(b) では 14.0% とした。その他のパラメータは (a) と (b) で共通であり、格子定数 a は 206 nm とし、下部電極 1 5 1 の直径や各層の厚みも両者共通とした。図 1 3 の (a) と (b) は同じ縮尺で表示しており、拡がり角 θ が小さい (a) の方が輪の径も小さいことがわかる。

[0056] 図 1 4 に、本実施形態のフォトニック結晶レーザ 1 0 につき、作製した 2 次元フォトニック結晶層 1 1 の一例を SEM 写真で示す。この例では、 $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ とした。各空孔 1 1 1 は、正方格子の格子点からずれた位置に配置されており、ずれの方向及び大きさが空孔 1 1 1 毎に異なっている。

[0057] 本発明は上記実施形態には限定されない。例えば、上記実施形態では空孔 (異屈折率領域) 1 1 1 の形状を円形としたが、正三角形その他の三角形、あるいは三角形を含む多角形、楕円形等の種々の形状とすることができる。また、異屈折率領域には、空孔 1 1 1 の代わりに、母材 1 1 2 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。さらには、基本 2 次元格子は正方格子には限定されず、三角格子や長方格子等を用いてもよい。三角格子や長方格子を用いる場合には、(3)～(5) 式のいずれかに示された逆格子ベクトル $G' \uparrow$ を (1) 式に代入して求めた位置ずれベクトル $\Delta r \uparrow$ を用いて異屈折率領域の位置を設定すればよい。

産業上の利用可能性

[0058] 本発明に係るフォトニック結晶レーザは、所望の偏光分布を有する環状レーザビームが得られるうえに、大面積での共振が可能であること及びTEモードと呼ばれる発振モードを有することから大出力化が可能である。これらの優れた特長により、本発明に係るフォトニック結晶レーザは、高解像度顕微鏡、各種測定器・分析器、レーザ加工機、OCT診断装置等の多くの機器に好適に用いることができる。

符号の説明

[0059] 1 0…フォトニック結晶レーザ
1 1…2次元フォトニック結晶層
1 1 1、1 1 1 V…空孔（異屈折率領域）
1 1 1 G…重心
1 1 2…母材
1 1 3 1…原点
1 1 3 2…基準線
1 1 3 3…基準線に直交する線
1 1 3 4…基準線と角度45°で交差する線
1 2…活性層（発光層）
1 3 1…下部クラッド層
1 3 2…上部クラッド層
1 4 1…下部基板
1 4 2…上部基板
1 5 1…下部電極
1 5 2…上部電極
1 5 2 1…上部電極の窓
2 0 1、2 0 1 A、2 0 1 B、2 0 2、2 0 2 A、2 0 2 B、2 0 3、2 0 3 A…レーザビームのスポット
8 1…径偏光環状レーザビームの断面

8 3 … レンズ

9 0 … 基本 2 次元格子

9 1、9 1 1、9 1 2 … 格子点

請求の範囲

[請求項1]

波長 λ_L の光を含む光を生じさせる発光層と、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に定められる周期性を持つ基本2次元格子の各格子点からずれた位置に配置されており、

前記各格子点における異屈折率領域の位置の、該格子点からのずれの大きさが、前記基本2次元格子の所定の原点から径方向及び周方向に向かってそれぞれ所定の周期で変化する変調を有し、該格子点からのずれの方向が、該原点と該格子点を結ぶ直線の方角によって異なることを特徴とするフォトリック結晶レーザ。

[請求項2]

波長 λ_L の光を含む光を生じさせる発光層と、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に定められる周期性を持つ基本2次元格子の各格子点からずれた位置に配置されており、

前記各格子点における異屈折率領域の位置の、該格子点からのずれを表す位置ずれベクトル $\Delta \mathbf{r}$ 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} 、前記基本2次元格子の所定の原点から所定の方向に延びる所定の基準線からの方位角 ϕ 、任意の定数 ϕ_0 、及びレーザビームの拡がり角 θ を用いて表される逆格子ベクトル

ル $G' \uparrow = \pm(k_x \pm |k \uparrow|(\sin \theta \cos \phi)/n_{\text{eff}}, k_y \pm |k \uparrow|(\sin \theta \sin \phi)/n_{\text{eff}})$

、前記各格子点の位置ベクトル $r \uparrow$ 、任意の定数 d 及び ϕ_0 、並びに 0 を除く整数 L を用いて、

$$\Delta r \uparrow = d \cdot \sin(\pm G' \uparrow \cdot r \uparrow + \phi_0) \cdot (\cos(L(\phi + \phi_0)), \sin(L(\phi + \phi_0)))$$

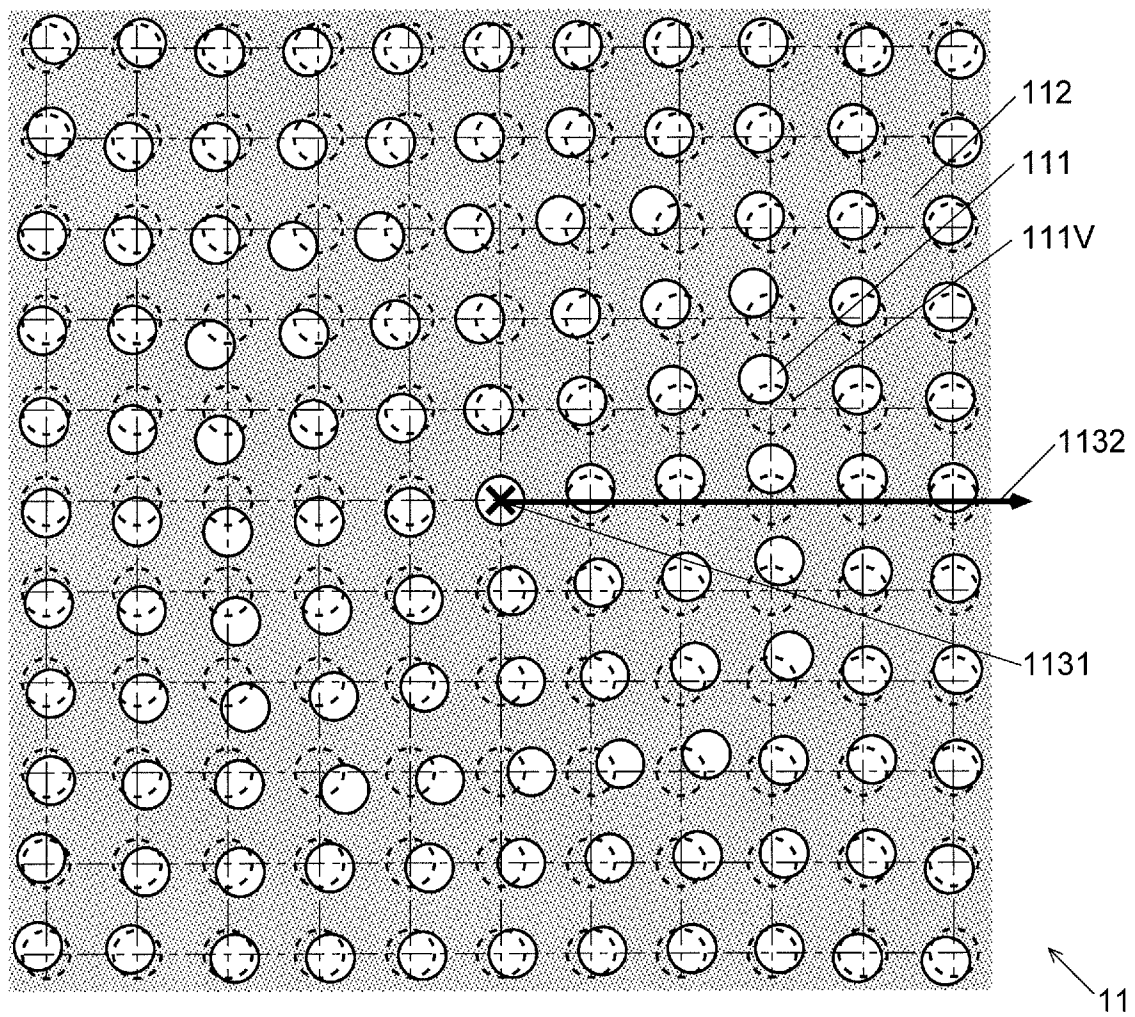
で表されることを特徴とするフォトリック結晶レーザ。

[請求項3] 前記 L の値が $+1$ 、前記 ϕ_0 の値が 90° であることを特徴とする請求項 2 に記載のフォトリック結晶レーザ。

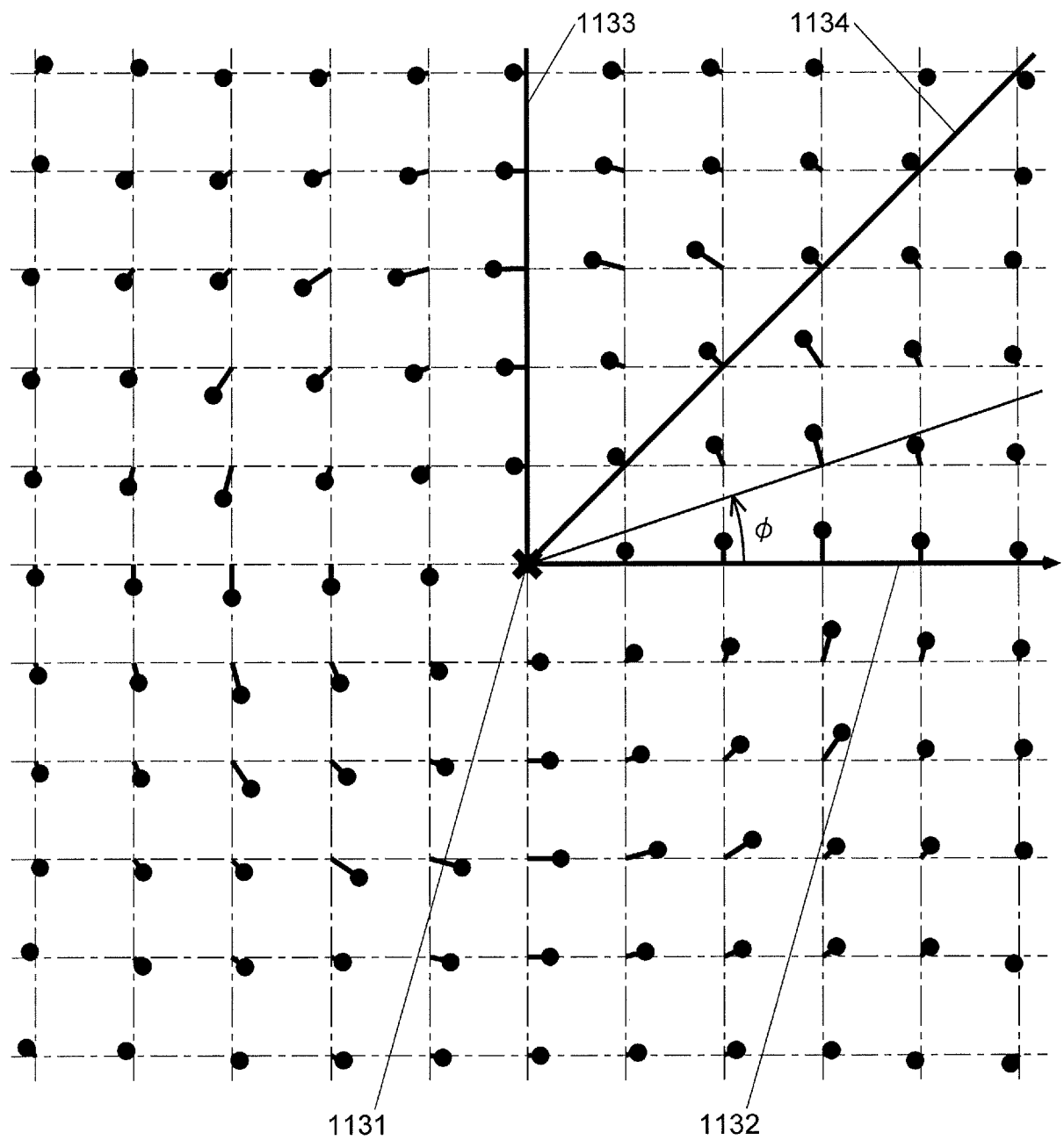
[請求項4] 前記異屈折率領域の平面形状が円形、楕円形又は三角形以上の多角形であることを特徴とする請求項 1～3 のいずれかに記載のフォトリック結晶レーザ。

[請求項5] 前記異屈折率領域の平面形状が円形又は六角形以上の多角形であることを特徴とする請求項 4 に記載のフォトリック結晶レーザ。

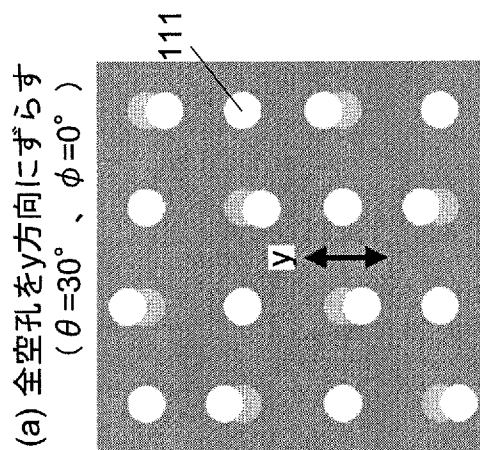
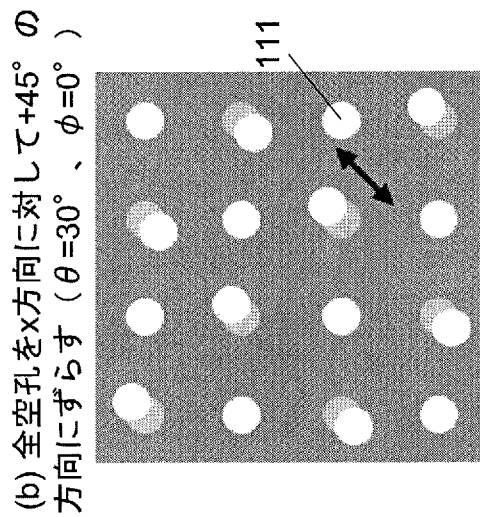
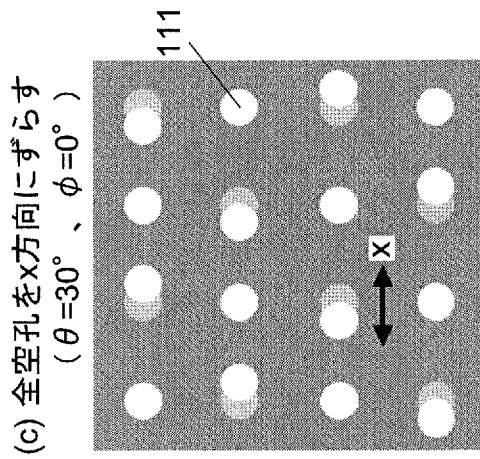
[図3]



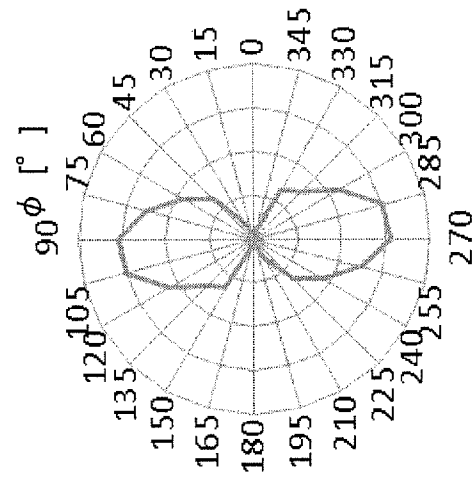
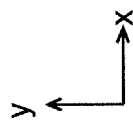
[図4]



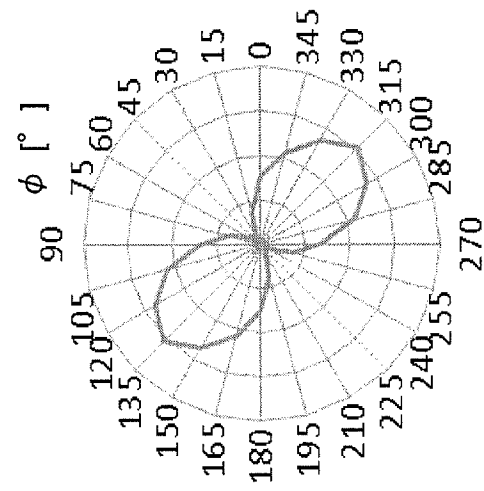
[図5]



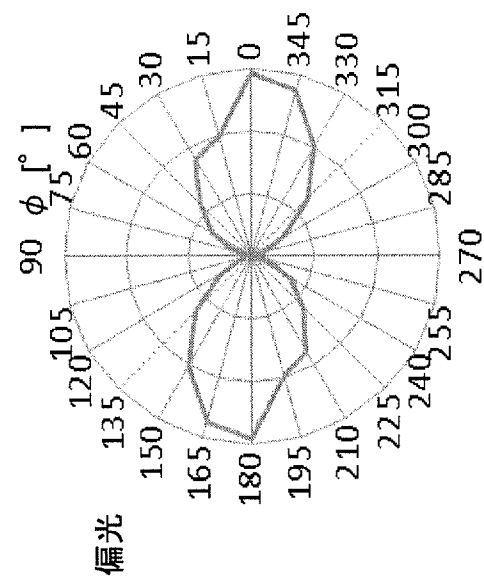
空孔の配置



y方向の直線偏光



y方向に対して $+45^\circ$ の直線偏光



x方向の直線偏光

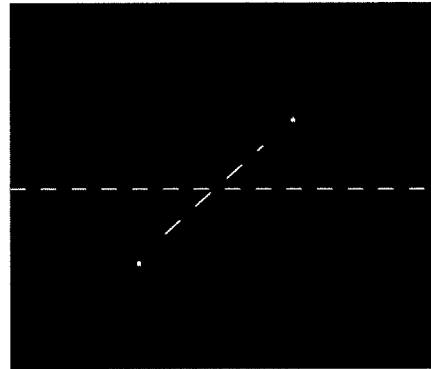
偏光

[図6]

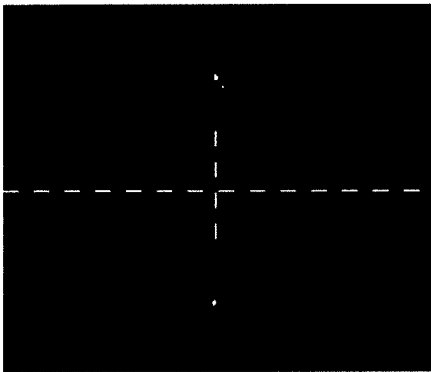
(a) $\theta = 30^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$
全空孔をx方向にずらす



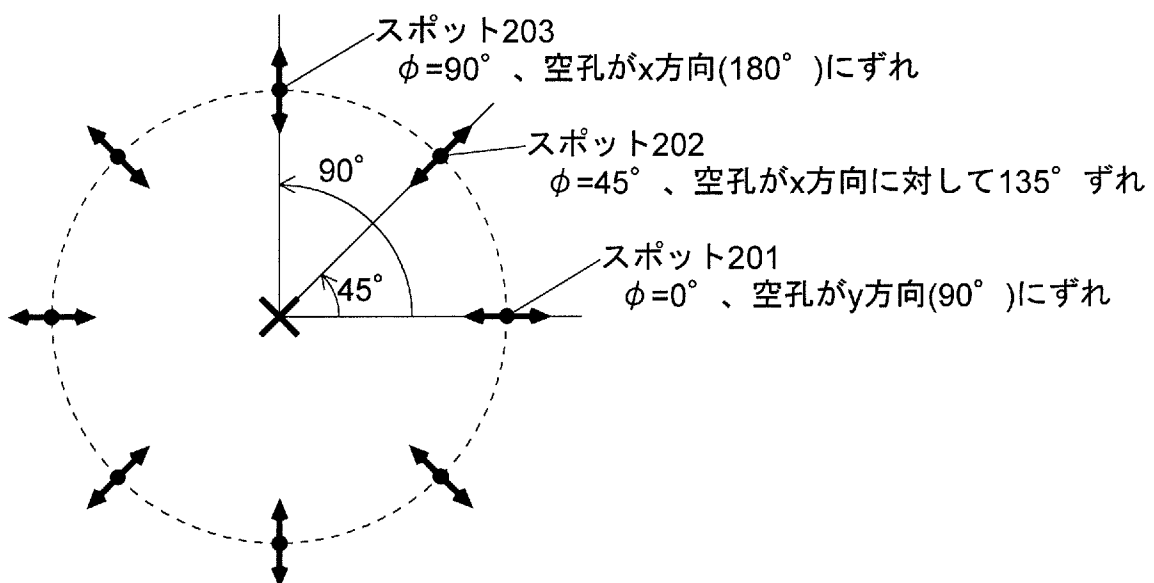
(b) $\theta = 30^\circ$ 、 $\phi = 45^\circ$
全空孔をx方向にずらす



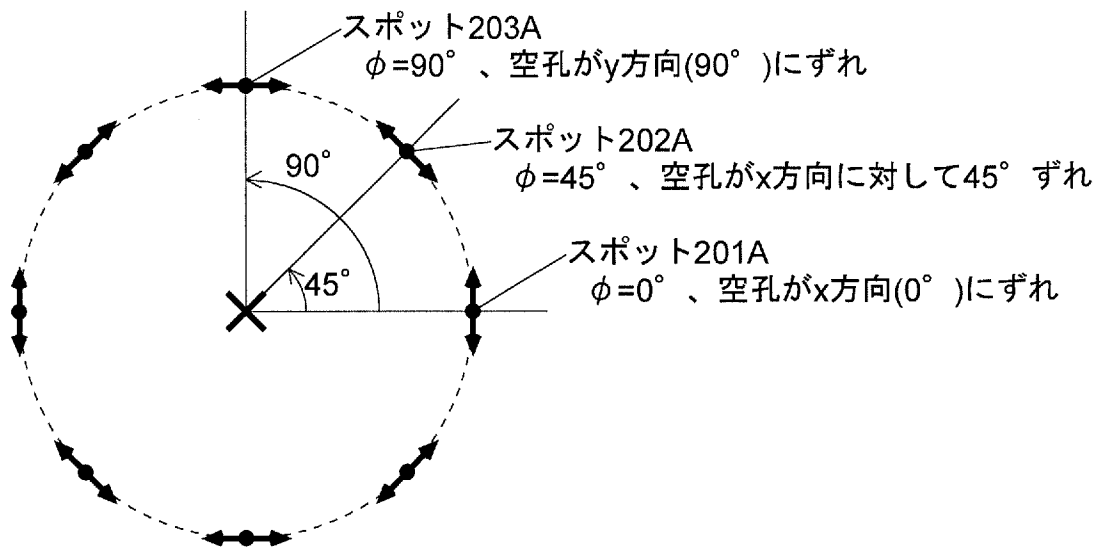
(c) $\theta = 30^\circ$ 、 $\phi = 90^\circ$
全空孔をx方向にずらす



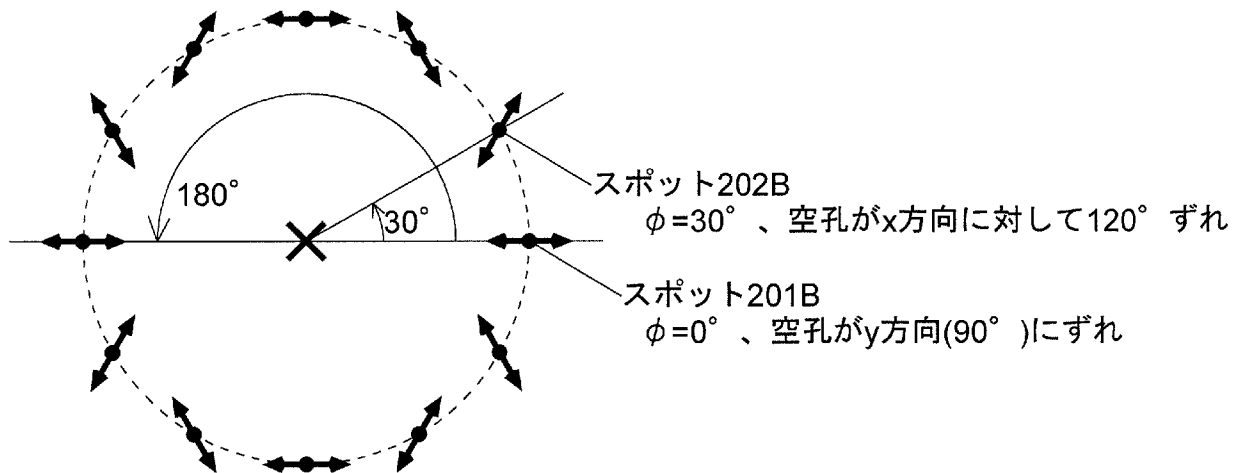
[図7]



[図8]



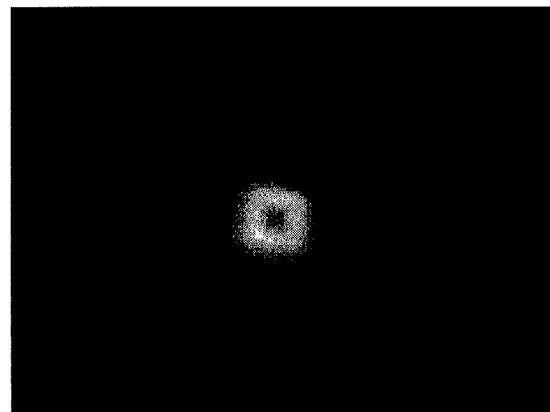
[図9]



[図10]

(a) $L=+1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ (径偏光環状)(b) $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 

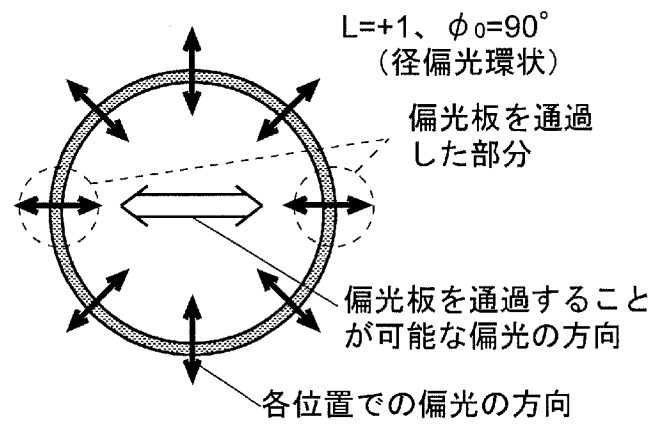
※サイドローブを遮蔽



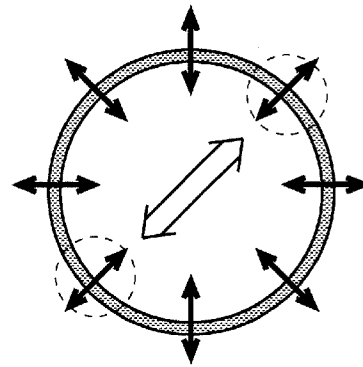
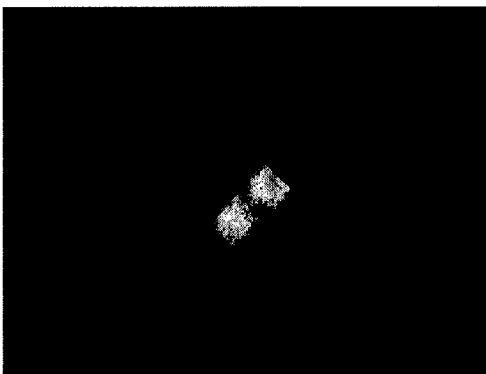
※サイドローブ無し

[図11]

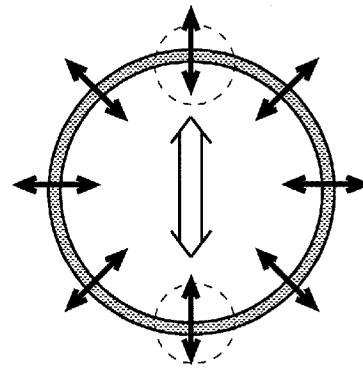
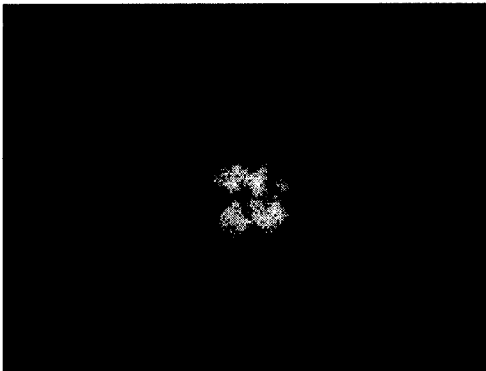
(a)



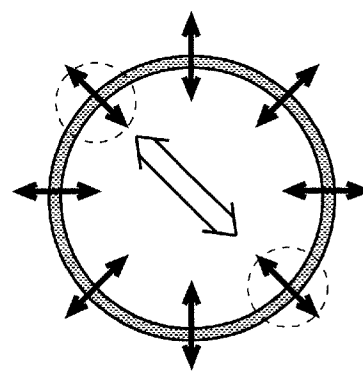
(b)



(c)



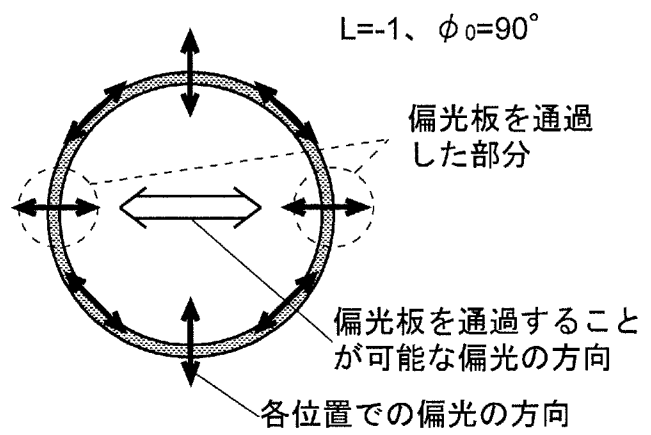
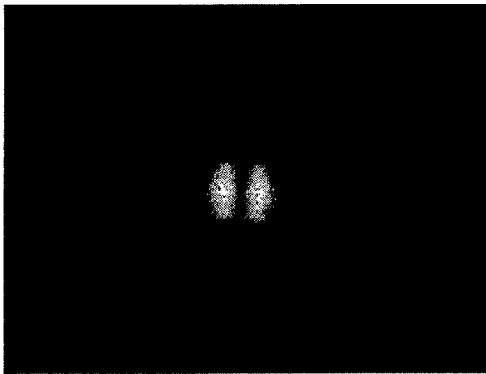
(d)



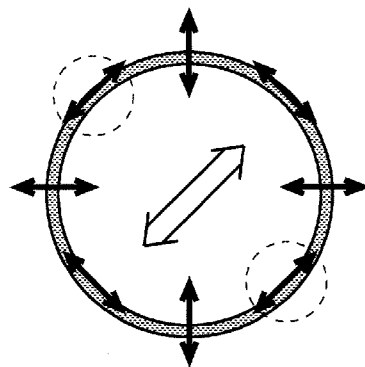
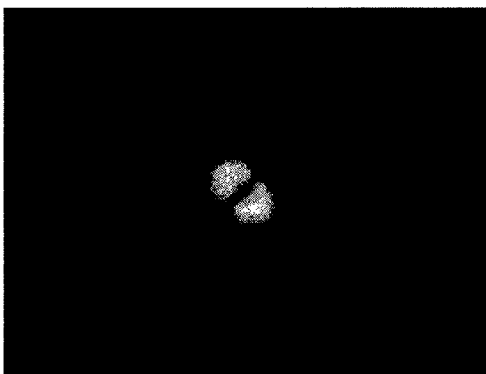
※サイドローブを遮蔽

[図12]

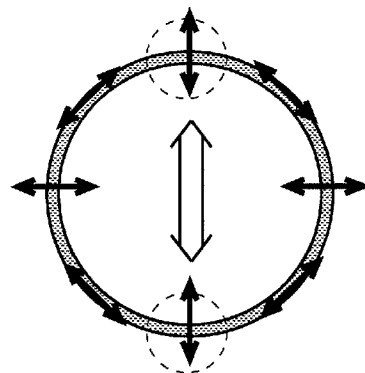
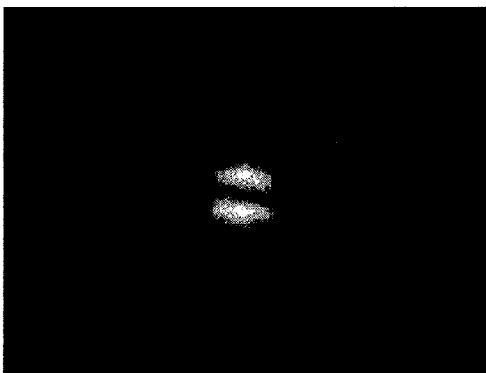
(a)



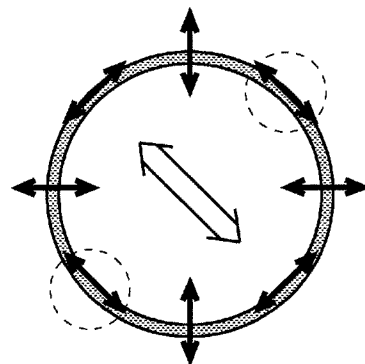
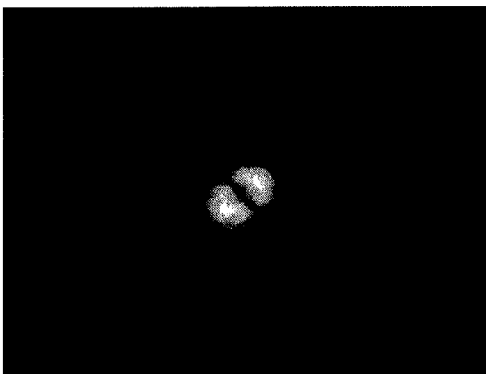
(b)



(c)

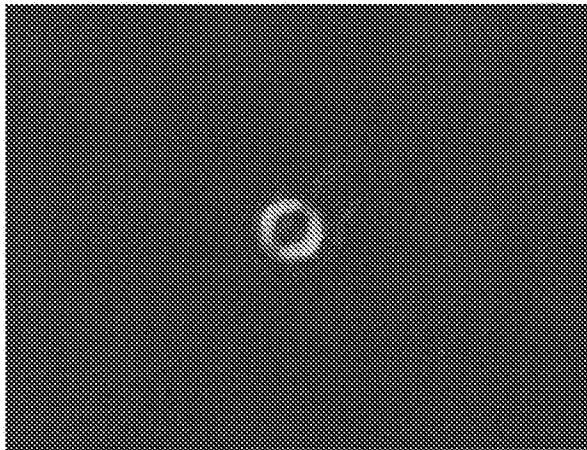


(d)

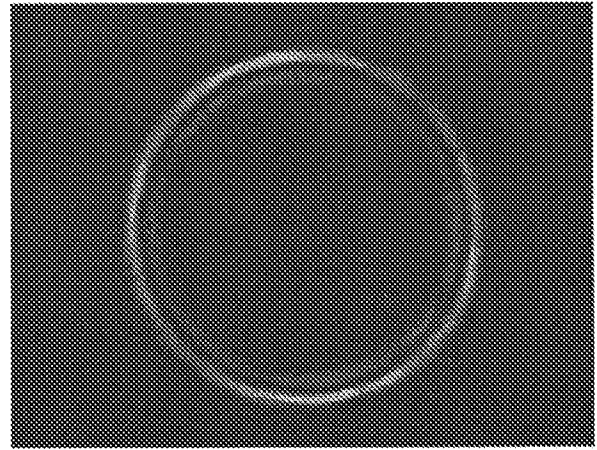


※サイドローブ無し

[図13]

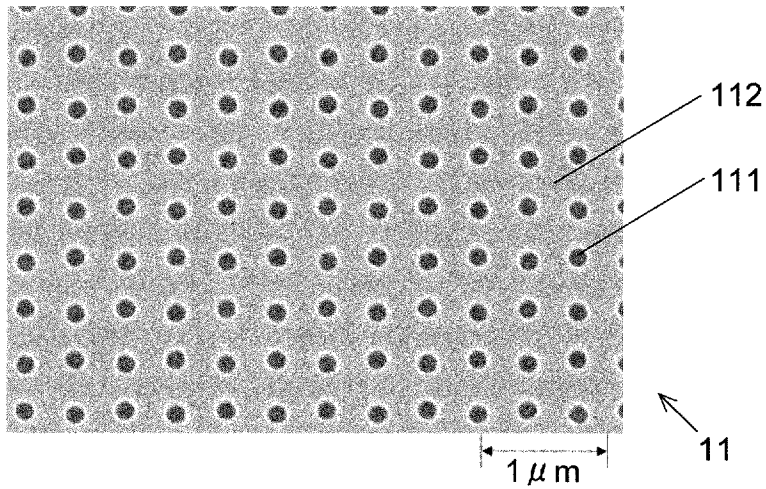
(a) $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 、 $\theta=1^\circ$ 

FF 12.0%

(b) $L=-1$ 、 $\phi_0=90^\circ$ 、 $\theta=8^\circ$ 

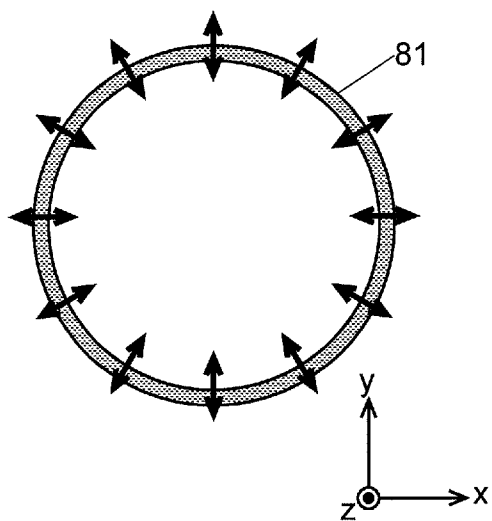
FF 14.0%

[図14]

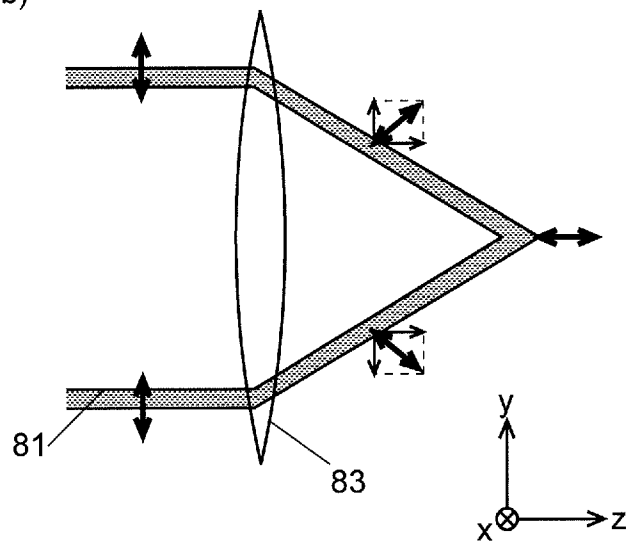


[図15]

(a)



(b)



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/007246

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H01S5/183 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. H01S5/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2018

Registered utility model specifications of Japan 1996-2018

Published registered utility model applications of Japan 1994-2018

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2016/148075 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K. K.) 22 September 2016, paragraphs [0021]-[0148], fig. 1-51 & US 2018/0109075 A1, paragraphs [0071]-[0241], fig. 1-51 & DE 112016001195 T5	1-5
A	JP 2014-197665 A (ROHM CO., LTD.) 16 October 2014, paragraphs [0027]-[0436], fig. 1-114 & US 2014/0348195 A1, paragraphs [0237]-[0641], fig. 1-114	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 April 2018 (26.04.2018)

Date of mailing of the international search report

16 May 2018 (16.05.2018)

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office

3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,

Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/007246

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2014/136962 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K. K.) 12 September 2014, paragraphs [0015]-[0115], fig. 1-34 & US 2016/0020580 A1, paragraphs [0048]-[0147], fig. 1-34 & DE 112014001143 T5	1-5
A	WO 2014/136955 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K. K.) 12 September 2014, paragraphs [0015]-[0116], fig. 1-33 & US 2016/0036201 A1, paragraphs [0048]-[0149], fig. 1-33 & DE 112014001152 T5 & JP 6276750 B2	1-5
A	WO 2014/136607 A1 (KYOTO UNIVERSITY) 12 September 2014, paragraphs [0034]-[0058], fig. 2-16 & US 2016/0261093 A1, paragraphs [0059]-[0084], fig. 2-16 & EP 2966737 A1 & CN 105191029 A & JP 6080941 B2	1-5
A	JP 2013-211542 A (KYOTO UNIVERSITY) 10 October 2013, paragraphs [0035]-[0068], fig. 5-14 & US 2013/0243026 A1, paragraphs [0067]-[0102], fig. 5-14	1-5
A	WO 2007/119273 A1 (KYOTO UNIVERSITY) 25 October 2007, paragraphs [0043]-[0054], fig. 4-13 & US 2009/0285255 A1, paragraphs [0084]-[0100], fig. 4-13 & EP 1998420 A1 & JP 2007-258262 A	1-5
A	JP 2007-258261 A (KYOTO UNIVERSITY) 04 October 2007, paragraphs [0022]-[0030], fig. 4-10 & US 2007/0217466 A1, paragraphs [0079]-[0094], fig. 4-10	1-5
A	WO 2007/108218 A1 (KYOTO UNIVERSITY) 27 September 2007, paragraphs [0027]-[0036], fig. 5-11 & US 2009/0135871 A1, paragraphs [0088]-[0099], fig. 5-11 & EP 1998419 A1 & JP 2007-258260 A	1-5
A	US 2007/0030873 A1 (FINISAR CORPORATION) 08 February 2007, paragraphs [0022]-[0047], fig. 1-5 & GB 2428887 A	1-5

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01S5/183(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01S5/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2018年
日本国実用新案登録公報	1996-2018年
日本国登録実用新案公報	1994-2018年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2016/148075 A1（浜松ホトニクス株式会社）2016.09.22, 段落[0021]-[0148], 図 1-51 & US 2018/0109075 A1 段落[0071]-[0241], 図 1-51 & DE 112016001195 T5	1-5
A	JP 2014-197665 A（ローム株式会社）2014.10.16, 段落[0027]-[0436], 図 1-114 & US 2014/0348195 A1 段落[0237]-[0641], 図 1-114	1-5

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

26.04.2018

国際調査報告の発送日

15.05.2018

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

大和田 有軌

2 K

3004

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2014/136962 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2014. 09. 12, 段落[0015]-[0115], 図 1-34 & US 2016/0020580 A1 段落[0048]-[0147], 図 1-34 & DE 112014001143 T5	1-5
A	WO 2014/136955 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2014. 09. 12, 段落[0015]-[0116], 図 1-33 & US 2016/0036201 A1 段落[0048]-[0149], 図 1-33 & DE 112014001152 T5 & JP 6276750 B2	1-5
A	WO 2014/136607 A1 (国立大学法人京都大学) 2014. 09. 12, 段落[0034]-[0058], 図 2-16 & US 2016/0261093 A1 段落[0059]-[0084], 図 2-16 & EP 2966737 A1 & CN 105191029 A & JP 6080941 B2	1-5
A	JP 2013-211542 A (国立大学法人京都大学) 2013. 10. 10, 段落[0035]-[0068], 図 5-14 & US 2013/0243026 A1 段落[0067]-[0102], 図 5-14	1-5
A	WO 2007/119273 A1 (国立大学法人京都大学) 2007. 10. 25, 段落[0043]-[0054], 図 4-13 & US 2009/0285255 A1 段落[0084]-[0100], 図 4-13 & EP 1998420 A1 & JP 2007-258262 A	1-5
A	JP 2007-258261 A (国立大学法人京都大学) 2007. 10. 04, 段落[0022]-[0030], 図 4-10 & US 2007/0217466 A1 段落[0079]-[0094], 図 4-10	1-5
A	WO 2007/108218 A1 (国立大学法人京都大学) 2007. 09. 27, 段落[0027]-[0036], 図 5-11 & US 2009/0135871 A1 段落[0088]-[0099], 図 5-11 & EP 1998419 A1 & JP 2007-258260 A	1-5
A	US 2007/0030873 A1 (FINISAR CORPORATION) 2007. 02. 08, 段落[0022]-[0047], 図 1-5 & GB 2428887 A	1-5