

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7316285号
(P7316285)

(45)発行日 令和5年7月27日(2023.7.27)

(24)登録日 令和5年7月19日(2023.7.19)

(51)国際特許分類 F I
H 0 1 S 5/11 (2021.01) H 0 1 S 5/11

請求項の数 6 (全37頁)

(21)出願番号	特願2020-539515(P2020-539515)	(73)特許権者	000236436
(86)(22)出願日	令和1年8月27日(2019.8.27)		浜松ホトニクス株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2019/033568		静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6 番地の
(87)国際公開番号	WO2020/045453		1
(87)国際公開日	令和2年3月5日(2020.3.5)	(74)代理人	100088155
審査請求日	令和4年3月30日(2022.3.30)		弁理士 長谷川 芳樹
(31)優先権主張番号	特願2018-158242(P2018-158242)	(74)代理人	100113435
(32)優先日	平成30年8月27日(2018.8.27)		弁理士 黒木 義樹
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)	(74)代理人	100140442
			弁理士 柴山 健一
		(72)発明者	廣瀬 和義
			静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6 番地の
			1 浜松ホトニクス株式会社内
		(72)発明者	瀧口 優
			静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6 番地の
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 発光装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板の主面の法線方向、または、前記法線方向と交差する傾斜方向、または、前記法線方向および前記傾斜方向の双方に沿って光像を形成する光を出力する発光装置であって、
発光部と、

前記基板上に設けられた位相変調層であって、前記発光部と光学的に結合された位相変調層と、
を備え、

前記位相変調層は、基本層と、前記法線方向に垂直な面上において二次元状に分布するよう前記基本層内に設けられた複数の異屈折率領域であって前記基本層の屈折率とは異なる屈折率を有する複数の異屈折率領域と、を含み、

前記面上に仮想的な正方格子が設定された状態において、前記複数の異屈折率領域は、前記複数の異屈折率領域それぞれの重心が対応する格子点から所定距離だけ離れた状態で配置され、かつ、前記仮想的な正方格子における各格子点周りの回転角度であって前記複数の異屈折率領域それぞれの前記重心と前記対応する格子点とを結ぶ線分の、前記仮想的な正方格子に対する回転角度は、前記光像を形成するための位相分布に従って設定され、

前記仮想的な正方格子の格子間隔 a と前記発光部の発光波長 λ は、前記位相変調層の波数空間に相当する逆格子空間における対称点のうち M 点での発振条件を満たすように設定され、

前記位相変調層の前記逆格子空間に形成される 4 方向の第 1 面内波数ベクトルのうち、

少なくとも1つの第1面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さい、
発光装置。

【請求項2】

基板の主面の法線方向、または、前記法線方向と交差する傾斜方向、または、前記法線方向および前記傾斜方向の双方に沿って光像を形成する光を出力する発光装置であって、
発光部と、

前記基板上に設けられた位相変調層であって、前記発光部と光学的に結合された位相変調層と、

を備え、

前記位相変調層は、基本層と、前記法線方向に垂直な面上において二次元状に分布するよう前記基本層内に設けられた複数の異屈折率領域であって前記基本層の屈折率とは異なる屈折率を有する複数の異屈折率領域と、を含み、

前記面上に仮想的な正方格子が設定された状態において、前記複数の異屈折率領域は、前記複数の異屈折率領域それぞれの重心が対応する格子点を通るとともに前記仮想的な正方格子に傾斜した直線上に位置するように配置され、かつ、前記複数の異屈折率領域それぞれの前記重心と前記対応する格子点との前記直線に沿った距離は、前記光像を形成するための位相分布に従って設定され、

前記仮想的な正方格子の格子間隔 a と前記発光部の発光波長 λ は、前記位相変調層の波数空間に相当する逆格子空間における対称点のうちM点での発振条件を満たすように設定され、

前記位相変調層の前記逆格子空間に形成される4方向の第1面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの第1面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さい、
発光装置。

【請求項3】

前記位相分布は、前記光像を形成するための第1位相分布と前記光像の形成とは無関係の第2位相分布とが重畳された位相分布であり、

前記第2位相分布は、前記位相変調層の前記逆格子空間に形成される前記第1位相分布の4方向の第2面内波数ベクトルであって前記光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含み、それぞれ含む4方向の第2面内波数ベクトルに対して、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルを加算するための位相分布であり、

前記4方向の第2面内波数ベクトルに前記回折ベクトルを加算することにより得られる4方向の第3面内波数ベクトルであって前記4方向の第1面内波数ベクトルに相当する4方向の第3面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの第3面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さく設定される、請求項1または2に記載の発光装置。

【請求項4】

前記位相分布は、前記光像を形成するための第1位相分布と前記光像の形成とは無関係の第2位相分布とが重畳された位相分布であり、

前記第2位相分布は、前記光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含むことなく前記位相変調層の前記逆格子空間に形成される前記第1位相分布の4方向の第2面内波数ベクトルに対して、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルを加算するための位相分布であり、

前記4方向の第2面内波数ベクトルに前記回折ベクトルを加算することにより得られる4方向の第3面内波数ベクトルであって前記4方向の第1面内波数ベクトルに相当する4方向の第3面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの第3面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ から前記波数広がり差し引いた値よりも小さい、請求項1または2に記載の発光装置。

【請求項5】

前記第2位相分布は、第1位相値と前記第1位相値とは異なる第2位相値とが互いに直交する2方向それぞれに沿って交互に配列された分布である、請求項3または4に記載の発光装置。

10

20

30

40

50

【請求項 6】

前記第 2 位相分布は、第 1 位相値と前記第 1 位相値とは異なる第 2 位相値とが π ずつ変化する分布である、請求項 5 に記載の発光装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、発光装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

二次元状に配列された複数の発光点から出力される光の位相分布および強度分布を制御することにより任意の光像を形成する半導体発光素子が研究されている。このような半導体発光素子の構造の 1 つとして、活性層と光学的に結合された位相変調層を有する構造がある。位相変調層は、基本層と、基本層の屈折率とは異なる屈折率をそれぞれ有する複数の異屈折率領域と、を有する。また、位相変調層の厚み方向に垂直な面上に設定された仮想的な正方格子において、各異屈折率領域の重心位置が、光像を形成するための位相分布にしたがって、対応する格子点からずれている。このような半導体発光素子は、S-iPM (Static-integrable Phase Modulating) レーザと呼ばれ、位相変調層が設けられた基板の主面の法線方向および該法線方向と交差する傾斜方向に出力される光により、2 次元的な任意形状の光像が形成される。非特許文献 1 には、S-iPM レーザに関する技術が記載されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【文献】Yoshitaka Kurosaka et al., "Phase-modulating lasers toward on-chip integration", Scientific Reports, 6:30138 (2016).

Y. Kurosaka et al., "Effects of non-lasing band in two-dimensional photonic-crystal lasers clarified using omnidirectional band structure," Opt. Express 20, 21773-21783 (2012).

Y. Liang et al., "Three-dimensional coupled-wave analysis for square-lattice photonic crystal surface emitting lasers with transverse-electric polarization: finite-size effects," Optics Express 20, 15945-15961 (2012).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

発明者らは、上述の従来技術について検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、通常、上述の S-iPM レーザからは、所望の出力光像である信号光の他に、0 次光が出力される。この 0 次光は、位相変調されない回折波の成分であって、従来の Γ 点発振（位相変調層の逆格子空間における Γ 点での発振動作）の場合、基板の主面の法線方向（すなわち発光面に垂直な方向）に出力される点状の光であり、S-iPM レーザにおいて用途によっては望ましくない。特に 0 次光とその他の信号光との間に強度ムラが生じる場合もある。また、所望の出力光像を得る際に 0 次光がノイズ光となる場合、光像から 0 次光を取り除いた方が望ましい場合もある。

【0005】

本発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、S-iPM レーザからの出力光に含まれる 0 次光を取り除くことができる発光装置を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本実施形態に係る発光装置は、一例として、基板の主面の法線方向、該法線方向と交差する傾斜方向、または、該法線方向および該傾斜方向の双方に沿って光像を形成する光を

出力する装置であって、その一態様として、発光部と、基板上に設けられた位相変調層であって、該発光部と光学的に結合された位相変調層と、を備える。位相変調層は、基本層と、法線方向に垂直な面上において二次元状に分布するよう該基本層内に設けられた複数の異屈折率領域であって該基本層の屈折率とは異なる屈折率を有する複数の異屈折率領域と、を含む。ここで、上記面上に仮想的な正方格子が設定された状態で、各異屈折率領域は、該各異屈折率領域の重心が対応する格子点から所定距離だけ離れ、かつ、仮想的な正方格子における各格子点周りの回転角度（各異屈折率領域の重心と対応する格子点とを結ぶ線分の、仮想的な正方格子に対する回転角度）は、光像を形成するための位相分布に従って設定されている。仮想的な正方格子の格子間隔 a と発光部の発光波長 λ は、位相変調層の波数空間に相当する逆格子空間における対称点のうち M 点での発振条件を満たす。更に、位相変調層の逆格子空間に形成される 4 方向の第 1 面内波数ベクトルのうち、少なくとも 1 つの第 1 面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さい。

【発明の効果】

【0007】

本実施形態に係る発光装置によれば、S-iPMレーザの出力に含まれる 0 次光をライトライン内から取り除き、信号光をライトライン内に出力することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図 1】図 1 は、本開示の一実施形態に係る発光装置として、半導体発光素子 1 A の構成を示す斜視図である。

【図 2】図 2 は、半導体発光素子 1 A の積層構造を示す断面図である。

【図 3】図 3 は、半導体発光素子 1 A の積層構造を示す断面図である。

【図 4】図 4 は、位相変調層 15 A の平面図である。

【図 5】図 5 は、位相変調層 15 A の単位構成領域 R における異屈折率領域 15 b の位置関係を示す図である。

【図 6】図 6 は、位相変調層の特定領域内にのみ図 4 の屈折率略周期構造を適用した例を示す平面図である。

【図 7】図 7 は、半導体発光素子 1 A の出力ビームパターンが結像して得られる光像と、位相変調層 15 A における回転角度分布 $\phi(x, y)$ との関係を示すための図である。

【図 8】図 8 は、球面座標 $(r, \theta_{\text{tilt}}, \theta_{\text{rot}})$ から XYZ 直交座標系における座標 (ξ, η, ζ) への座標変換を説明するための図である。

【図 9】図 9 (a) および図 9 (b) は、各異屈折率領域 15 b の配置を決める際に、一般的な離散フーリエ変換（或いは高速フーリエ変換）を用いて計算する場合の留意点を説明するための図である。

【図 10】図 10 は、 Γ 点で発振する PCSEL のフォトニック結晶層に関する逆格子空間を示す平面図である。

【図 11】図 11 は、図 10 に示された逆格子空間を立体的に見た斜視図である。

【図 12】図 12 は、 M 点で発振する PCSEL のフォトニック結晶層に関する逆格子空間を示す平面図である。

【図 13】図 13 は、 Γ 点で発振する S-iPMレーザの位相変調層に関する逆格子空間を示す平面図である。

【図 14】図 14 は、図 13 に示された逆格子空間を立体的に見た斜視図である。

【図 15】図 15 は、 M 点で発振する S-iPMレーザの位相変調層に関する逆格子空間を示す平面図である。

【図 16】図 16 は、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に対して或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトル V を加える操作を説明するための概念図である。

【図 17】図 17 は、ライトライン LL の周辺構造を模式的に説明するための図である。

【図 18】図 18 は、回転角度分布 $\phi_2(x, y)$ の一例を概念的に示す図である。

【図 19】図 19 は、位相変調層 15 A の回転角度分布 $\phi(x, y)$ の例を示す図である。

【図 20】図 20 は、図 19 に示された部分 S を拡大して示す図である。

【図 2 1】図 2 1 は、図 1 9 に示された回転角度分布 $\phi(x, y)$ を有する半導体発光素子 1 A から出力されるビームパターン（光像）を示す。

【図 2 2】図 2 2 は、図 2 1 に示されたビームパターンの模式図である。

【図 2 3】図 2 3 (a) は、ビームパターンの模式図であり、図 2 3 (b) は、ビームパターンの位相分布を示す図である。

【図 2 4】図 2 4 (a) は、ビームパターンの模式図であり、図 2 4 (b) は、ビームパターンの位相分布を示す図である。

【図 2 5】図 2 5 (a) は、ビームパターンの模式図であり、図 2 5 (b) は、ビームパターンの位相分布を示す図である。

【図 2 6】図 2 6 は、4 方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ から波数広がり Δk を除いたものに対して回折ベクトル V を加える操作を説明するための概念図である。

【図 2 7】図 2 7 は、第 2 変形例に係る位相変調層 1 5 B の平面図である。

【図 2 8】図 2 8 は、位相変調層 1 5 B における単位構成領域 R における異屈折率領域 1 5 b の位置関係を示す図である。

【図 2 9】図 2 9 (a) ~ 図 2 9 (g) は、異屈折率領域 1 5 b の X-Y 平面内の形状の例を示す平面図である。

【図 3 0】図 3 0 (a) ~ 図 3 0 (k) は、異屈折率領域 1 5 b の X-Y 平面内の形状の例を示す平面図である。

【図 3 1】図 3 1 (a) ~ 図 3 1 (k) は、異屈折率領域 1 5 b の X-Y 平面内の形状の別の例を示す平面図である。

【図 3 2】図 3 2 は、異屈折率領域の X-Y 平面内の形状の別の例を示す平面図である。

【図 3 3】図 3 3 は、第 4 変形例による発光装置 1 B の構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

〔本願発明の実施形態の説明〕

最初に本願発明の実施形態の内容それぞれを個別に列挙して説明する。

【0010】

(1) 本実施形態に係る発光装置は、基板の主面の法線方向、該法線方向と交差する傾斜方向、または、該法線方向および該傾斜方向の双方に沿って光像を形成する光を出力する装置であって、その一態様として、発光部と、基板上に設けられた位相変調層であって、該発光部と光学的に結合された位相変調層と、を備える。位相変調層は、基本層と、法線方向に垂直な面上において二次元状に分布するよう該基本層内に設けられた複数の異屈折率領域であって該基本層の屈折率とは異なる屈折率を有する複数の異屈折率領域と、を含む。ここで、上記面上に仮想的な正方格子が設定された状態で、各異屈折率領域は、該各異屈折率領域の重心が対応する格子点から所定距離だけ離れ、かつ、仮想的な正方格子における各格子点周りの回転角度（各異屈折率領域の重心と対応する格子点とを結ぶ線分の、仮想的な正方格子に対する回転角度）は、光像を形成するための位相分布に従って設定されている。仮想的な正方格子の格子間隔 a と発光部の発光波長 λ は、位相変調層の波数空間に相当する逆格子空間における対称点（大きさが最小になるように選ばれた基本逆格子ベクトルを用いた波数ベクトルで表現される点）のうち M 点での発振条件を満たす。更に、位相変調層の逆格子空間に形成される 4 方向の第 1 面内波数ベクトルのうち、少なくとも 1 つの第 1 面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さい。

【0011】

一例として、位相分布は、光像を形成するための第 1 位相分布と該光像の形成とは無関係の第 2 位相分布とが重畳された位相分布であり、第 2 位相分布は、相変調層の逆格子空間に形成される第 1 位相分布の 4 方向の第 2 面内波数ベクトルに対して、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルを加算（ベクトル和）するための位相分布である。このとき、4 方向の第 2 面内波数ベクトルに回折ベクトルを加算することにより得られる 4 方向の第 3 面内波数ベクトル（上記 4 方向の第 1 面内波数ベクトルに相当する面内波数ベクトル）のうち、少なくとも 1 つの第 3 面内波数ベクトルの大きさが、 $2\pi/\lambda$ よりも小

10

20

30

40

50

さく設定され得る。

【0012】

上述の態様に係る発光装置では、複数の異屈折率領域それぞれが、各重心が、仮想的な正方格子の対応する格子点から離れるとともに光像を形成する位相分布に従って設定された該対応する格子点周りの回転角度を有するように、配置される。このような構造によれば、S-iPMレーザとして、基板の主面の法線方向、または該法線方向と交差する傾斜方向、またはその双方に沿って任意形状の光像を形成する光を出力することができる。また、当該発光装置では、仮想的な正方格子の格子間隔 a と発光部の発光波長 λ とが、M点発振の条件を満たす。通常、M点発振の定在波状態においては位相変調層内を伝搬する光が全反射してしまい、信号光および0次光の双方の出力が抑制される。しかしながら、本態様に係る発光装置では、位相変調層の逆格子空間（波数空間に相当）上において、定在波は、位相分布に従った位相変調を受け、4方向の面内波数ベクトル（第1面内波数ベクトルであってそれぞれが光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含んでもよい）を形成する。この面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さくなっている。S-iPMレーザでは、例えば位相分布を調整することにより、このような面内波数ベクトルの調整が可能である。そして、少なくとも1つの面内波数ベクトルの大きさが $2\pi/\lambda$ よりも小さい場合、その面内波数ベクトルは基板の主面の法線方向の成分を有する。更に、空気との界面で全反射を生じないので、結果的に信号光の一部が位相変調層から出力されることとなる。但し、M点発振の条件を満たす場合、0次光は空気との界面で全反射され、位相変調層からライトライン内には出力されない。すなわち、本態様に係る発光装置によれば、S-iPMレーザの出力に含まれる0次光をライトライン内から取り除き、信号光のみを出力することができる。

【0013】

(2) 本実施態様の一態様として、位相変調層は、上述の態様と同様に、基本層と複数の異屈折率領域を含む。加えて、法線方向に垂直な面上に仮想的な正方格子が設定された状態において、各異屈折率領域は、該各異屈折率領域の重心が対応する格子点を通るとともに仮想的な正方格子に傾斜した直線上に位置するように配置され、かつ、各異屈折率領域の重心と対応する格子点との上記直線に沿った距離は、光像を形成するための位相分布に従って設定されている。仮想的な正方格子の格子間隔 a と発光部の発光波長 λ は、位相変調層の波数空間に相当する逆格子空間における対称点（大きさが最小になるように選ばれた基本逆格子ベクトルを用いた波数ベクトルで表現される点）のうちM点での発振条件を満たすように設定されている。更に、位相変調層の逆格子空間に形成される4方向の面内波数ベクトル（第1面内波数ベクトル）であってそれぞれが光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含む4方向の面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの面内波数ベクトルの大きさが $2\pi/\lambda$ よりも小さいことで規定される。

【0014】

上述の態様に係る発光装置では、各異屈折率領域の重心が仮想的な正方格子の対応する格子点を通り該正方格子に対して傾斜する直線上に配置されている。そして、各異屈折率領域の重心と、対応する格子点との距離（上記直線に沿った距離）は光像を形成するための位相分布に従って設定されている。このような構造によれば、各異屈折率領域の重心が対応する格子点周りの回転角度を有する上述の態様（構造）と同様に、S-iPMレーザとして、基板の主面の法線方向および／または該法線方向と交差する傾斜方向に沿って任意形状の光像を形成するための光を出力することができる。また、この態様に係る発光装置においても、仮想的な正方格子の格子間隔 a と発光部の発光波長 λ とがM点発振の条件を満たすとともに、位相変調層の逆格子空間において、定在波は、位相分布に従った位相変調を受け、4方向の面内波数ベクトル（第1面内波数ベクトルであってそれぞれが光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含んでもよい）を形成する。この4方向の面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さくなっている。したがって、S-iPMレーザからの出力光に含まれる0次光をライトライン内から取り除き、信号光のみを出力することができる。

【0015】

(3) 本実施形態の一態様として、上述の位相分布は、光像を形成するための第1位相分布と該光像の形成とは無関係の第2位相分布とが重畳された位相分布であり、また、第2位相分布は、位相変調層の逆格子空間に形成される第1位相分布の4方向の第2面内波数ベクトルであって光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含み、それぞれ含む4方向の面内波数ベクトルに対し、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルを加算（ベクトル和）するための位相分布であってもよい。この場合、4方向の第2面内波数ベクトルに回折ベクトルを加算することにより得られる、上述の4方向の第1面内波数ベクトルに相当する4方向の第3面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの第3面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ よりも小さく設定される。この態様により、逆格子空間に形成される波数ベクトルであって上記波数広がりを含み、それぞれ含む4方向の面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが、 $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さい構成を容易に実現することができる。

10

【0016】

(4) 本実施形態の一態様として、位相分布は、光像を形成するための第1位相分布と該光像の形成とは無関係の第2位相分布とが重畳された位相分布であり、また、第2位相分布は、光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりを含むことなく位相変調層の逆格子空間に形成される第1位相分布の4方向の第2面内波数ベクトルに対し、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルを加算（ベクトル和）するための位相分布であってもよい。この場合、4方向の第2面内波数ベクトルに回折ベクトルを加算することにより得られる、上述の4方向の第1面内波数ベクトルに相当する4方向の第3面内波数ベクトルのうち、少なくとも1つの第3面内波数ベクトルの大きさは、 $2\pi/\lambda$ から光像を形成する出力光の角度広がりに対応した波数広がりより小さく設定される。この態様により、逆格子空間に形成される波数ベクトルであって上記波数広がりを含まない4方向の面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが、 $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さい構成を容易に実現することができる。

20

【0017】

(5) 本実施形態の一態様として、上記第2位相分布は、第1位相値と該第1位相値とは異なる第2位相値とが互いに直交する2方向それぞれに沿って交互に配列された分布（市松模様に配列された分布）であってもよい。このような位相分布により、上述した回折ベクトルを容易に実現することができる。更に、本実施形態の一態様として、第2位相分布は、第1位相値と該第1位相値とは異なる第2位相値とが π ずつ変化する分布であってもよい。

30

【0018】

以上、この[本願発明の実施形態の説明]の欄に列挙された各態様は、残りの全ての態様のそれぞれに対して、または、これら残りの態様の全ての組み合わせに対して適用可能である。

【0019】

[本願発明の実施形態の詳細]

以下、本開示の実施形態に係る発光装置の具体的な構造を、添付図面を参照しながら詳細に説明する。なお、本開示はこれらの例示に限定されるものではなく、請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内での全ての変更が含まれることが意図される。また、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

40

【0020】

図1は、本開示の一実施形態に係る発光装置として、半導体発光素子1Aの構成を示す斜視図である。図2は、半導体発光素子1Aの積層構造を示す断面図である。なお、半導体発光素子1Aの中心を通り半導体発光素子1Aの厚み方向に延びる軸をZ軸とするXY-Z直交座標系を定義する。半導体発光素子1Aは、XY面内方向において定在波を形成し、位相制御された平面波をZ軸方向に出力するS-iPMレーザであって、後述するよう

50

に、半導体基板 10 の主面 10 a の法線方向（すなわち Z 軸方向）、該法線方向と交差する傾斜方向、または、法線方向と傾斜方向の双方に沿って二次元的な任意形状の光像を形成する光を出力する。

【0021】

図 1 および図 2 に示されたように、半導体発光素子 1 A は、半導体基板 10 上に設けられた発光部としての活性層 12 と、活性層 12 を挟む一对のクラッド層 11 および 13 と、クラッド層 13 上に設けられたコンタクト層 14 と、を備える。これらの半導体基板 10 および各層 11 ~ 14 は、例えば GaAs 系半導体、InP 系半導体、窒化物系半導体等の化合物半導体によって構成される。クラッド層 11 およびクラッド層 13 の各エネルギーバンドギャップは、活性層 12 のエネルギーバンドギャップよりも大きい。半導体基板 10 および各層 11 ~ 14 の厚み方向は、Z 軸方向と一致する。

10

【0022】

半導体発光素子 1 A は、活性層 12 と光学的に結合された位相変調層 15 A を更に備える。本実施形態において、位相変調層 15 A は、活性層 12 とクラッド層 13 との間に設けられている。必要に応じて、活性層 12 とクラッド層 13 との間、および、活性層 12 とクラッド層 11 との間のうち少なくとも一方に、光ガイド層が設けられてもよい。位相変調層 15 A の厚み方向は、Z 軸方向と一致する。なお、光ガイド層は、キャリアを活性層 12 に効率的に閉じ込めるためのキャリア障壁層を含んでもよい。

【0023】

図 3 に示されたように、位相変調層 15 A は、クラッド層 11 と活性層 12 との間に設けられてもよい。

20

【0024】

位相変調層 15 A は、基本層 15 a と、複数の異屈折率領域 15 b と、を含む。基本層 15 a は、第 1 屈折率媒質からなる。各異屈折率領域 15 b は、第 1 屈折率媒質の屈折率とは異なる屈折率を有する第 2 屈折率媒質からなり、基本層 15 a 内に存在する。複数の異屈折率領域 15 b の二次元配置は、略周期構造を含んでいる。モードの等価屈折率を n とした場合、位相変調層 15 A が選択する波長 λ_0 ($= (\sqrt{2}) a \times n$ 、 a は格子間隔) は、活性層 12 の発光波長範囲内に含まれている。位相変調層 15 A は、活性層 12 の発光波長のうちの波長 λ_0 近傍のバンド端波長の光を、選択的に外部に出力することができる。位相変調層 15 A 内に入射したレーザ光は、位相変調層 15 A 内において異屈折率領域 15 b の配置に対応した所定のモードを形成し、所望のパターンを有するレーザビームとして、半導体発光素子 1 A の表面から外部に出射される。

30

【0025】

半導体発光素子 1 A は、コンタクト層 14 上に設けられた電極 16 と、半導体基板 10 の裏面 10 b 上に設けられた電極 17 と、を更に備える。電極 16 は、コンタクト層 14 とオーミック接触を成している。電極 17 は、半導体基板 10 とオーミック接触を成している。更に、電極 17 は、開口 17 a を有する。電極 16 は、コンタクト層 14 の中央領域に設けられている。コンタクト層 14 上における電極 16 以外の部分は、保護膜 18 (図 2 を参照) によって覆われている。なお、電極 16 と接触していないコンタクト層 14 は、取り除かれてもよい。半導体基板 10 の裏面 10 b のうち電極 17 以外の部分 (開口 17 a 内を含む) は、反射防止膜 19 によって覆われている。開口 17 a 以外の領域にある反射防止膜 19 は、取り除かれてもよい。

40

【0026】

電極 16 と電極 17 との間に駆動電流が供給されると、活性層 12 内において電子と正孔の再結合が生じ、活性層 12 内に光が放出される。活性層 12 内での発光に寄与する電子および正孔、並びに発生した光は、クラッド層 11 およびクラッド層 13 の間に効率的に閉じ込められる。

【0027】

活性層 12 から出力された光は、位相変調層 15 A の内部に入り、位相変調層 15 A の内部の格子構造に対応した所定のモードを形成する。位相変調層 15 A から出力されたレ

50

ーザ光は、直接に、裏面10bから開口17aを通して半導体発光素子1Aの外部へ出力されるか、または、電極16において反射された後、裏面10bから開口17aを通して半導体発光素子1Aの外部へ出力される。このとき、レーザ光に含まれる信号光は、主面10aの法線方向、または該法線方向と交差する傾斜方向、またはその双方の双方に沿って出力される。出力光のうち所望の光像を形成するのは信号光である。信号光は、主に、1次光および-1次光である。後述するように、本実施形態の位相変調層15Aからは、0次光は出力されない。

【0028】

或る例では、半導体基板10は、GaAs基板である、クラッド層11、活性層12、クラッド層13、コンタクト層14、および位相変調層15Aは、それぞれIII族元素およびV族元素により構成される化合物半導体層である。具体的に、クラッド層11は、AlGaAs層である。活性層12は、多重量子井戸構造（障壁層：AlGaAs／井戸層：InGaAs）を有する。位相変調層15Aにおいて、基本層15aは、GaAsであり、異屈折率領域15bは、空孔である。クラッド層13は、AlGaAs層である。コンタクト層14は、GaAs層である。

【0029】

上述の構成において、半導体基板10の厚みは、50μm～300μmであり、一例では150μmである。素子を分離することが可能なのであれば半導体基板は上記範囲より厚くてもよい。逆に、別途支持基板を有する構造では、必ずしも半導体基板は必要ではない。クラッド層11の厚みは、500nm～10000nmであり、一例では2000nmである。活性層12の厚みは、100nm～300nmであり、一例では175nmである。位相変調層15Aの厚みは、100nm～500nmであり、一例では280nmである。クラッド層13の厚みは、500nm～10000nmであり、一例では2000nmである。コンタクト層14の厚みは、50nm～500nmであり、一例では150nmである。

【0030】

AlGaAsにおいては、Alの組成比を変更することで、容易にエネルギーバンドギャップと屈折率を変えることができる。Al_xGa_{1-x}Asにおいて、相対的に原子半径の小さなAlの組成比xを減少（増加）させると、該Al組成比と正の相関にあるエネルギーバンドギャップは小さく（大きく）なる。GaAsに原子半径の大きなInを混入させたInGaAsの場合、エネルギーバンドギャップは小さくなる。すなわち、クラッド層11、13におけるAl組成比は、活性層12における障壁層（AlGaAs）のAl組成比よりも大きい。クラッド層11、13のAl組成比は例えば0.2～1.0に設定され、一例では0.4である。活性層12における障壁層のAl組成比は、例えば0～0.3に設定され、一例では0.15である。

【0031】

別の例では、半導体基板10は、InP基板である。クラッド層11、活性層12、位相変調層15A、クラッド層13、およびコンタクト層14は、例えばInP系化合物半導体からなる。具体的に、クラッド層11は、InP層である。活性層12は、多重量子井戸構造（障壁層：GaInAsP／井戸層：GaInAsP）を有する。位相変調層15Aにおいて、基本層15aは、GaInAsPまたはInPであり、異屈折率領域15bは、空孔である。クラッド層13は、InP層である。コンタクト層14は、GaInAsP、GaInAsまたはInPである。

【0032】

更に別の例では、半導体基板10は、InP基板である。クラッド層11、活性層12、位相変調層15A、クラッド層13、およびコンタクト層14は、例えばInP系化合物半導体からなる。具体的に、クラッド層11は、InP層である。活性層12は、多重量子井戸構造（障壁層：AlGaInAs／井戸層：AlGaInAs）を有する。位相変調層15Aにおいて、基本層15aは、AlGaInAsまたはInPであり、異屈折率領域15bは、空孔である。クラッド層13は、InP層である。コンタクト層14は

10

20

30

40

50

、GaInAsまたはInP層である。この材料系や上述の「別の例」で述べたGaInAsP／InPを用いた材料系は、 $1.3/1.55\mu\text{m}$ 帯の光通信波長に適用可能であるととともに、 $1.4\mu\text{m}$ より長波長のアイセーフ波長の光が出力され得る。

【0033】

また、更に別の例では、半導体基板10は、GaN基板である。クラッド層11、活性層12、位相変調層15A、クラッド層13、およびコンタクト層14は、例えば窒化物系化合物半導体からなる。具体的に、クラッド層11は、AlGaN層である。活性層12は、多重量子井戸構造（障壁層：InGaN／井戸層：InGaN）を有する。位相変調層15Aにおいて、基本層15aは、GaNであり、異屈折率領域15bは、空孔である。クラッド層13は、AlGaN層であり、コンタクト層14はGaN層である。

10

【0034】

クラッド層11には半導体基板10と同じ導電型が付与される。クラッド層13およびコンタクト層14には半導体基板10とは逆の導電型が付与される。一例では、半導体基板10およびクラッド層11はn型であり、クラッド層13およびコンタクト層14はp型である。位相変調層15Aは、活性層12とクラッド層11との間に設けられる場合、半導体基板10と同じ導電型を有し、活性層12とクラッド層13との間に設けられる場合には半導体基板10とは逆の導電型を有する。なお、不純物濃度は例えば $1\times 10^{16}\sim 1\times 10^{21}/\text{cm}^3$ である。活性層12は、いずれの不純物も意図的に添加されていない真性（i型）であり、その不純物濃度は $1\times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下である。なお、位相変調層15Aの不純物濃度については、不純物準位を介した光吸収による損失の影響を抑制する必要がある場合等には、真性（i型）としてもよい。

20

【0035】

上述の例では、異屈折率領域15bが空孔となっているが、異屈折率領域15bは、基本層15aの屈折率とは異なる屈折率を有する半導体が空孔内に埋め込まれることにより構成されてもよい。その場合、例えば基本層15aの空孔がエッチングにより形成された後、有機金属気相成長法、スパッタ法またはエピタキシャル法を用いて上記の半導体が空孔内に埋め込まれてもよい。例えば、基本層15aがGaAsからなる場合、異屈折率領域15bは、AlGaAsからなってもよい。また、基本層15aの空孔内に半導体が埋め込まれることにより異屈折率領域15bが形成された後、更に、その上に異屈折率領域15bと同一の半導体が堆積されてもよい。なお、異屈折率領域15bが空孔である場合、該空孔にアルゴン、窒素等の不活性ガス、または、水素、空気等のガスが封入されてもよい。

30

【0036】

反射防止膜19は、例えば、シリコン窒化物（例えばSiN）、シリコン酸化物（例えばSiO₂）等の誘電体単層膜、または、誘電体多層膜からなる。誘電体多層膜としては、例えば、酸化チタン（TiO₂）、二酸化シリコン（SiO₂）、一酸化シリコン（SiO）、酸化ニオブ（Nb₂O₅）、五酸化タンタル（Ta₂O₅）、フッ化マグネシウム（MgF₂）、酸化チタン（TiO₂）、酸化アルミニウム（Al₂O₃）、酸化セリウム（CeO₂）、酸化インジウム（In₂O₃）、酸化ジルコニウム（ZrO₂）等の誘電体層群から選択される2種類以上の誘電体層が積層された膜が適用可能である。例えば、膜厚は、波長λの光に対する光学膜厚で、λ／4程度である。また、保護膜18は、例えばシリコン窒化物（例えばSiN）、シリコン酸化物（例えばSiO₂）等の絶縁膜である。半導体基板10およびコンタクト層14がGaAs系半導体からなる場合、電極16は、Cr、Ti、およびPtのうち少なくとも1つと、Auとを含む材料により構成されることができ、例えばCr層およびAu層の積層構造を有する。電極17は、AuGeおよびNiのうち少なくとも1つと、Auとを含む材料により構成されることができ、例えばAuGe層およびAu層の積層構造を有する。なお、電極16、17の材料は、オーミック接合が実現できればよく、列挙された材料には限定されない。

40

【0037】

なお、電極形状を変形し、コンタクト層14の表面からレーザ光を出力することもでき

50

る。すなわち、電極 17 の開口 17a が設けられず、コンタクト層 14 の表面において電極 16 が開口している場合、レーザビームはコンタクト層 14 の表面から外部に出力される。この場合、反射防止膜は、電極 16 の開口内および周辺に設けられる。

【0038】

図 4 は、位相変調層 15A の平面図である。位相変調層 15A は、基本層 15a と、複数の異屈折率領域 15b と、を含む。基本層 15a は、第 1 屈折率媒質からなる。複数の異屈折率領域 15b は、第 1 屈折率媒質の屈折率とは異なる屈折率を有する第 2 屈折率媒質からなる。ここで、 $X-Y$ 平面に一致する位相変調層 15A の一方の面上に仮想的な正方格子が設定される。正方格子の一边は X 軸と平行であり、他辺は Y 軸と平行である。このとき、正方格子の格子点 O を中心とする正方形の単位構成領域 $R(x, y)$ が、 X 軸に沿った複数列 ($x = 0, 1, 2, 3, \dots$) および Y 軸に沿った複数列 ($y = 0, 1, 2, \dots$) にわたって二次元状に設定され得る。それぞれの単位構成領域 R の XY 座標をそれぞれの単位構成領域 R の重心位置で与えられることとすると、この重心位置は仮想的な正方格子の格子点 O に一致する。複数の異屈折率領域 15b は、各単位構成領域 R 内に例えば 1 つずつ設けられる。異屈折率領域 15b の平面形状は、例えば円形状である。格子点 O は、異屈折率領域 15b の外部に位置してもよいし、異屈折率領域 15b の内部に含まれていてもよい。

【0039】

1 つの単位構成領域 R 内に占める異屈折率領域 15b の面積 S の比率は、フィリングファクタ (FF) と称される。正方格子の格子間隔を a とすると、異屈折率領域 15b のフィリングファクタ FF は S/a^2 として与えられる。 S は $X-Y$ 平面における異屈折率領域 15b の面積であり、例えば異屈折率領域 15b の形状が真円形状の場合には、真円の直径 d を用いて $S = \pi (d/2)^2$ として与えられる。また、異屈折率領域 15b の形状が正方形の場合には、正方形の一边の長さ L を用いて $S = L^2$ として与えられる。

【0040】

図 5 は、位相変調層 15A の一部（単位構成領域 R ）を拡大して示す図である。図 5 に示されたように、異屈折率領域 15b のそれぞれは重心 G を有し、単位構成領域 R における重心 G の位置は、格子点 O で直交する s 軸および t 軸によって与えられる。ここで、互いに直交する s 軸および t 軸で規定される単位構成領域 $R(x, y)$ において、格子点 $O(x, y)$ から重心 G に向かうベクトルと s 軸との成す角度を $\phi(x, y)$ とする。なお、 x は X 軸に沿った x 番目の格子点の位置、 y は Y 軸に沿った y 番目の格子点の位置を示す。回転角度 ϕ が 0° である場合、格子点 $O(x, y)$ と重心 G とを結ぶベクトルの向きは X 軸の正方向と一致する。また、格子点 $O(x, y)$ と重心 G とを結ぶベクトルの長さを $r(x, y)$ とする。一例では、 $r(x, y)$ は x, y によらず（位相変調層 15A 全体にわたって）一定である。

【0041】

図 4 に示されたように、格子点 $O(x, y)$ と重心 G （対応する異屈折率領域 15b の重心）とを結ぶベクトルの向き、すなわち異屈折率領域 15b の重心 G の格子点周りの回転角度 ϕ は、所望の光像に対応し位相パターンに従って格子点 $O(x, y)$ ごとに個別に設定される。位相パターンすなわち回転角度分布 $\phi(x, y)$ は、 x, y の値で決まる位置ごとに特定の値を有するが、必ずしも特定の関数で表わされるとは限らない。すなわち、回転角度分布 $\phi(x, y)$ は、所望の光像を逆フーリエ変換して得られる複素振幅分布から抽出された位相分布から決定される。なお、所望の光像から複素振幅分布を求める際には、ホログラム生成の計算時に一般的に用いられる Gerchberg-Saxton (GS) 法のような繰り返しアルゴリズムを適用することによって、ビームパターンの再現性が向上する。

【0042】

図 6 は、位相変調層の特定領域内にのみ図 4 の屈折率略周期構造が適用された例を示す平面図である。図 6 に示された例では、正方形の内側領域 R_{IN} の内部に、目的となるビームパターンを出力するための略周期構造（例：図 4 の構造）が形成されている。一方、内側領域 R_{IN} を囲む外側領域 R_{OUT} には、正方格子の格子点位置に、重心位置が一致

する真円形の異屈折率領域が配置されている。例えば、外側領域 R O U T におけるフィリングファクター F F は、12% に設定される。また、内側領域 R I N の内部も、外側領域 R O U T 内においても、仮想的に設定される正方格子の格子間隔は同一 ($=a$) である。この構造の場合、外側領域 R O U T 内にも光が分布することにより、内側領域 R I N の周辺部において光強度が急激に変化することで生じる高周波ノイズ（いわゆる窓関数ノイズ）の発生を抑制することが出来るという利点がある。また、面内方向への光漏れを抑制することができ、閾値電流の低減が期待できる。

【0043】

図7は、半導体発光素子1Aの出力ビームパターンである光像と、位相変調層15Aにおける回転角度分布 $\phi(x, y)$ との関係を示すための図である。なお、出力ビームパターンの中心Qは半導体基板10の主面10aに対して垂直な軸線上に位置するとは限らないが、垂直な軸線上に配置させることもできる。ここでは説明のため、直交するKx軸およびKy軸で与えられる波数空間の中心Qが主面10aに対して垂直な軸線上にあるものとする。図7には、中心Qを原点とする4つの象限が示されている。図7では例として第1象限および第3象限に光像が得られる場合を示したが、第2象限および第4象限或いは全ての象限に像を得ることも可能である。本実施形態では、図7に示されたように、原点に関して点対称な光像が得られる。図7は、例として、第3象限に文字「A」が、第1象限に文字「A」を180度回転したパターンが、それぞれ得られる場合について示している。なお、回転対称な光像（例えば、十字、丸、二重丸など）である場合には、重なって一つの光像として観察される。

【0044】

半導体発光素子1Aの出力ビームパターンの光像は、スポット、直線、十字架、線画、格子パターン、写真、縞状パターン、CG（コンピュータグラフィクス）、および文字のうち少なくとも1つを含んでいる。ここで、所望の光像を得るためには、以下の手順によって位相変調層15Aの異屈折率領域15bの回転角度分布 $\phi(x, y)$ を決定する。

【0045】

本実施形態においては、以下の手順によって回転角度分布 $\phi(x, y)$ を決定することにより、所望の光像を得ることができる。まず、第1の前提条件として、法線方向に一致するZ軸と、複数の異屈折率領域15bを含む位相変調層15Aの一方の面に一致した、互いに直交するX軸およびY軸を含むX-Y平面と、により規定されるXYZ直交座標系において、該X-Y平面上に、それぞれが正形状を有するM1（1以上の整数）×N1（1以上の整数）個の単位構成領域Rにより構成される仮想的な正方格子が設定される。

【0046】

第2の前提条件として、XYZ直交座標系における座標 (ξ, η, ζ) は、図8に示されたように、動径の長さrと、Z軸からの傾き角 θ_{tilt} と、X-Y平面上で特定されるX軸からの回転角 θ_{rot} と、で規定される球面座標 $(r, \theta_{\text{rot}}, \theta_{\text{tilt}})$ に対して、以下の式(1)～式(3)で示された関係を満たしているものとする。なお、図8は、球面座標 $(r, \theta_{\text{rot}}, \theta_{\text{tilt}})$ からXYZ直交座標系における座標 (ξ, η, ζ) への座標変換を説明するための図であり、座標 (ξ, η, ζ) により、実空間であるXYZ直交座標系において設定される所定平面上の設計上の光像が表現される。半導体発光素子から出力される光像に相当するビームパターンを角度 θ_{tilt} および θ_{rot} で規定される方向に向かう輝点の集合とすると、角度 θ_{tilt} および θ_{rot} は、以下の式(4)で規定される規格化波数であってX軸に対応したKx軸上の座標値 k_x と、以下の式(5)で規定される規格化波数であってY軸に対応するとともにKx軸に直交するKy軸上の座標値 k_y に換算されるものとする。規格化波数は、仮想的な正方格子の格子間隔に相当する波数 $2\pi/a$ を1.0として規格化された波数を意味する。このとき、Kx軸およびKy軸により規定される波数空間において、光像に相当するビームパターンを含む特定の波数範囲が、それぞれが正形状のM2（1以上の整数）×N2（1以上の整数）個の画像領域FRで構成される。なお、整数M2は、整数M1と一致する必要はない。同様に、整数N2は、整数N1と一致する必要もない。また、式(4)および式(5)は、例えば、上記非特許文献2に開示されている。

【数 1】

$$\xi = r \sin \theta_{\text{tilt}} \cos \theta_{\text{rot}} \quad \dots (1)$$

【数 2】

$$\eta = r \sin \theta_{\text{tilt}} \sin \theta_{\text{rot}} \quad \dots (2)$$

【数 3】

$$\zeta = r \cos \theta_{\text{tilt}} \quad \dots (3)$$

10

【数 4】

$$k_x = \frac{a}{\lambda} \sin \theta_{\text{tilt}} \cos \theta_{\text{rot}} \quad \dots (4)$$

【数 5】

$$k_y = \frac{a}{\lambda} \sin \theta_{\text{tilt}} \sin \theta_{\text{rot}} \quad \dots (5)$$

20

a : 仮想的な正方格子の格子定数

λ : 発振波長

【0047】

第3の前提条件として、波数空間において、 K_x 軸方向の座標成分 k_x (0 以上 $M2-1$ 以下の整数) と K_y 軸方向の座標成分 k_y (0 以上 $N2-1$ 以下の整数) とで特定される画像領域 $FR(k_x, k_y)$ それぞれを、 X 軸方向の座標成分 x (0 以上 $M1-1$ 以下の整数) と Y 軸方向の座標成分 y (0 以上 $N1-1$ 以下の整数) とで特定される $X-Y$ 平面上の単位構成領域 $R(x, y)$ に二次元逆離散フーリエ変換することで得られる複素振幅 $F(x, y)$ が、 j を虚数単位として、以下の式 (6) で与えられる。また、この複素振幅 $F(x, y)$ は、振幅項を $A(x, y)$ とするとともに位相項を $P(x, y)$ とするとき、以下の式 (7) により規定される。更に、第4の前提条件として、単位構成領域 $R(x, y)$ が、 X 軸および Y 軸にそれぞれ平行であって単位構成領域 $R(x, y)$ の中心となる格子点 $O(x, y)$ において直交する s 軸および t 軸で規定される。

30

【数 6】

$$F(x, y) = \sum_{k_x=0}^{M2-1} \sum_{k_y=0}^{N2-1} FR(k_x, k_y) \exp \left[j2\pi \left(\frac{k_x}{M2} x + \frac{k_y}{N2} y \right) \right] \quad \dots (6)$$

40

【数 7】

$$F(x, y) = A(x, y) \times \exp[jP(x, y)] \quad \dots (7)$$

【0048】

上記第1～第4の前提条件の下、位相変調層 15A は、以下の第1および第2条件を満たすよう構成される。すなわち、第1条件は、単位構成領域 $R(x, y)$ 内において、重心 G が、格子点 $O(x, y)$ から離れた状態で配置されていることである。また、第2条件は、格子点 $O(x, y)$ から対応する重心 G までの線分長 $r_2(x, y)$ が $M1$ 個 $\times$ $N1$ 個の単位構成領域 R それぞれにおいて共通の値に設定された状態で、格子点 $O(x, y)$

50

と対応する重心Gとを結ぶ線分と、s軸と、の成す角度 $\phi(x, y)$ が、

$$\phi(x, y) = C \times P(x, y) + B$$

C：比例定数であって例えば $180^\circ / \pi$

B：任意の定数であって例えば0

なる関係を満たすように、対応する異屈折率領域15bが単位構成領域R(x, y)内に配置されることである。

【0049】

逆フーリエ変換で得られた複素振幅分布から強度（振幅）分布と位相分布を得る方法として、例えば強度分布 $I(x, y)$ については、MathWorks社の数値解析ソフトウェア「MATLAB」のabs関数を用いることにより計算することができ、位相分布 $P(x, y)$ については、MATLABのangle関数を用いることにより計算することができる。

【0050】

ここで、光像の逆フーリエ変換結果から回転角度分布 $\phi(x, y)$ を求め、各異屈折率領域15bの配置を決める際に、一般的な離散フーリエ変換（或いは高速フーリエ変換）を用いて計算する場合の留意点を述べる。逆フーリエ変換前の光像を図9(a)のようにA1, A2, A3, およびA4といった4つの象限に分割すると、得られるビームパターンは図9(b)のようになる。つまり、図9(b)に示されたビームパターンの第1象限には、図9(a)の第1象限のパターンを180度回転したパターンと図9(a)の第3象限のパターンとが重畳されたパターンが現れる。図9(b)に示されたビームパターンの第2象限には、図9(a)の第2象限のパターンを180度回転したパターンと図9(a)の第4象限のパターンとが重畳されたパターンが現れる。図9(b)に示されたビームパターンの第3象限には、図9(a)の第3象限のパターンを180度回転したパターンと図9(a)の第1象限のパターンとが重畳されたパターンが現れる。図9(b)に示されたビームパターンの第4象限には、図9(a)の第4象限のパターンを180度回転したパターンと図9(a)の第2象限のパターンとが重畳されたパターンが現れる。

【0051】

したがって、逆フーリエ変換前の光像（元の光像）として第1象限のみに値を有する光像を用いた場合には、得られるビームパターンの第3象限に元の光像の第1象限のパターンが現れ、得られるビームパターンの第1象限に元の光像の第1象限のパターンを180度回転したパターンが現れる。

【0052】

このように、半導体発光素子1Aにおいては、波面が位相変調されていることによって所望のビームパターンが得られる。このビームパターンは、一対の単峰ビーム（スポット）であるばかりでなく、前述したように、文字形状、2以上の同一形状スポット群、或いは、位相、強度分布が空間的に不均一であるベクトルビームなどとすることも可能である。

【0053】

なお、基本層15aの屈折率は3.0～3.5、各異屈折率領域15bの屈折率は1.0～3.4であることが好ましい。また、基本層15aの孔内の各異屈折率領域15bの平均半径は、940nm帯の場合、例えば20nm～90nmである。各異屈折率領域15bの大きさが変化することによって回折強度が変化する。この回折効率、異屈折率領域15bの形状をフーリエ変換した際の係数で表される光結合係数に比例する。光結合係数については、例えば上記非特許文献3に記載されている。

【0054】

次に、本実施形態の位相変調層15Aの特徴について詳細に説明する。本実施形態では、仮想的な正方格子の格子間隔aと活性層12の発光波長 λ とがM点発振の条件を満たす。更に、位相変調層15Aにおいて逆格子空間（波数空間）を考えると、回転角度分布 $\phi(x, y)$ による位相変調を受け、光像を形成する光の角度広がりに対応した波数広がり、をそれぞれ含む定在波を示す4方向の面内波数ベクトルが形成される。そして、該面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが、 $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さい

。以下、これらの点に関して詳細に説明する。

【0055】

まず、比較のため逆格子空間における Γ 点で発振するフォトニック結晶レーザ（PCSEL）について説明する。PCSELは、活性層と、複数の異屈折率領域が二次元状に周期的に配列されたフォトニック結晶層を有する。PCSELは、フォトニック結晶層の厚み方向に垂直な面内において、異屈折率領域の配列周期に対応した発振波長の定在波を形成しつつ、半導体基板の主面の法線方向に沿ってレーザ光を出力する半導体素子である。また、 Γ 点発振のためには、仮想的な正方格子の格子間隔 a 、活性層12の発光波長 λ 、およびモードの等価屈折率 n が条件： $\lambda = na$ を満たすとよい。

【0056】

図10は、 Γ 点で発振するPCSELのフォトニック結晶層に関する逆格子空間（波数空間）を示す平面図である。この図は、複数の異屈折率領域が正方格子の格子点上に位置する場合を示し、図中の点Pは逆格子点を表す。また、図中の矢印B1は、基本逆格子ベクトルを表し、矢印B2それぞれは、基本逆格子ベクトルB1の2倍の逆格子ベクトルを表す。また、矢印K1、K2、K3、およびK4は、4つの面内波数ベクトルを表す。4つの面内波数ベクトルK1、K2、K3、およびK4は、90°および180°の回折を経て互いに結合し、定在波状態を形成している。ここで、逆格子空間において互いに直交する $\Gamma-X$ 軸および $\Gamma-Y$ 軸を定義する。 $\Gamma-X$ 軸は、正方格子の一辺と平行であり、 $\Gamma-Y$ 軸は、正方格子の他辺と平行である。面内波数ベクトルとは、波数ベクトルを $\Gamma-X \cdot \Gamma-Y$ 平面内に投影したベクトルである。すなわち、面内波数ベクトルK1は、 $\Gamma-X$ 軸正方向を向き、面内波数ベクトルK2は、 $\Gamma-Y$ 軸正方向を向き、面内波数ベクトルK3は、 $\Gamma-X$ 軸負方向を向き、面内波数ベクトルK4は、 $\Gamma-Y$ 軸負方向を向く。図10から明らかなように、 Γ 点で発振するPCSELにおいては、面内波数ベクトルK1～K4の大きさ（すなわち面内方向の定在波の大きさ）は、基本逆格子ベクトルB1の大きさと等しい。なお、面内波数ベクトルK1～K4の大きさ k は、以下の式（8）で与えられる。

【数8】

$$k = |\mathbf{B1}| = \frac{2\pi}{a} \quad \dots (8)$$

【0057】

図11は、図10に示された逆格子空間を立体的に見た斜視図である。図11には、 $\Gamma-X$ 軸および $\Gamma-Y$ 軸の方向と直交するZ軸が示されている。このZ軸は、図1に示されたZ軸と同一である。図11に示されたように、 Γ 点で発振するPCSELでは、回折によって面内方向の波数が0となり、面垂直方向（Z軸方向）への回折が生じる（図中の矢印K5）。したがって、レーザ光は基本的にZ軸方向に出力される。

【0058】

次に、M点で発振するPCSELについて説明する。M点発振のためには、仮想的な正方格子の格子間隔 a 、活性層12の発光波長 λ 、およびモードの等価屈折率 n が条件： $\lambda = (\sqrt{2}) n \times a$ を満たすとよい。図12は、M点で発振するPCSELのフォトニック結晶層に関する逆格子空間（波数空間）を示す平面図である。この図12もまた、複数の異屈折率領域が正方格子の格子点上に位置する場合を示し、図12中の点Pは逆格子点を表す。また、図12中の矢印B1は、図10と同様の基本逆格子ベクトルを表し、矢印K6、K7、K8、およびK9は、4つの面内波数ベクトルを表す。ここで、逆格子空間において互いに直交する $\Gamma-M1$ 軸および $\Gamma-M2$ 軸を定義する。 $\Gamma-M1$ 軸は、正方格子の一方の対角方向と平行であり、 $\Gamma-M2$ 軸は、正方格子の他方の対角方向と平行である。面内波数ベクトルとは、波数ベクトルを $\Gamma-M1 \cdot \Gamma-M2$ 平面内に投影したベクトルである。すなわち、面内波数ベクトルK6は、 $\Gamma-M1$ 軸正方向を向き、面内波数ベクトルK7は、 $\Gamma-M2$ 軸正方向を向き、面内波数ベクトルK8は、 $\Gamma-M1$ 軸負方向を向き

、面内波数ベクトル K_9 は、 $\Gamma-M$ 2 軸負方向を向く。図 12 から明らかなように、M 点で発振する PCSEL において、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ の大きさ（すなわち面内方向の定在波の大きさ）は、基本逆格子ベクトル B_1 の大きさよりも小さい。なお、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ の大きさ k は、以下の式（9）で与えられる。

【数 9】

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2\pi}{a} \dots (9)$$

回折は、波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に逆格子ベクトル（大きさは $2m\pi/a$ 、 m ：整数）のベクトル和の方向に生じる。ただし、M 点で発振する PCSEL では、回折によって面内方向の波数が 0 となり得ず、面垂直方向（Z 軸方向）への回折は生じない。したがって、面垂直方向にレーザ光は出力されないため、通常、PCSEL において M 点発振は用いられない。

【0059】

次に、 Γ 点で発振する S-iPM レーザについて説明する。なお、 Γ 点発振の条件は上述の PCSEL の場合と同様である。図 13 は、 Γ 点で発振する S-iPM レーザの位相変調層に関する逆格子空間を示す平面図である。基本逆格子ベクトル B_1 は Γ 点発振の PCSEL と同様（図 10 を参照）であるが、面内波数ベクトル $K_1 \sim K_4$ は、回転角度分布 $\phi(x, y)$ による位相変調を受け、光像の広がり角に対応した波数広がり SP をそれぞれ有する。波数広がり SP は、 Γ 点発振の PCSEL における各面内波数ベクトル $K_1 \sim K_4$ の先端を中心とし、 x 軸方向および y 軸方向の辺の長さがそれぞれ $2\Delta k_{x_{\max}}$ 、 $2\Delta k_{y_{\max}}$ の矩形領域として表現できる。このような波数広がり SP によって、各面内波数ベクトル $K_1 \sim K_4$ は $(K_{ix} + \Delta k_x, K_{iy} + \Delta k_y)$ の矩形の範囲に広がる（ $i = 1 \sim 4$ 、 K_{ix} はベクトル K_i の x 方向成分、 K_{iy} はベクトル K_i の y 方向成分）。ここで、 $-\Delta k_{x_{\max}} \leq \Delta k_x \leq \Delta k_{x_{\max}}$ 、 $-\Delta k_{y_{\max}} \leq \Delta k_y \leq \Delta k_{y_{\max}}$ となる。なお、 $\Delta k_{x_{\max}}$ および $\Delta k_{y_{\max}}$ の大きさは、光像の広がり角に応じて定まる。言い換えると、 $\Delta k_{x_{\max}}$ および $\Delta k_{y_{\max}}$ の大きさは、半導体発光素子 1A に表示させようとする光像に依存する。

【0060】

図 14 は、図 13 に示された逆格子空間を立体的に見た斜視図である。図 14 には、 $\Gamma-X$ 軸に沿った方向および $\Gamma-Y$ 軸に沿った方向それぞれと直交する Z 軸が示されている。この Z 軸は、図 1 に示された Z 軸と同一である。図 14 に示されたように、 Γ 点で発振する S-iPM レーザの場合、面垂直方向（Z 軸方向）への 0 次光のみでなく、Z 軸方向に対して傾斜した方向への 1 次光および -1 次光を含む 2 次元的な広がりを持つ光像（ビームパターン）LM が出力される。

【0061】

次に、M 点で発振する S-iPM レーザについて説明する。なお、M 点発振の条件は上述の PCSEL の場合と同様である。図 15 は、M 点で発振する S-iPM レーザの位相変調層に関する逆格子空間を示す平面図である。基本逆格子ベクトル B_1 は、M 点発振の PCSEL と同様（図 12 を参照）であるが、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は、回転角度分布 $\phi(x, y)$ による波数広がり SP をそれぞれ有する。なお、波数広がり SP の形状および大きさは、上述の Γ 点発振の場合と同様である。S-iPM レーザにおいても、M 点発振の場合には面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ の大きさ（すなわち面内方向の定在波の大きさ）は基本逆格子ベクトル B_1 の大きさよりも小さい（回折によって面内方向の波数が 0 となり得ず、面垂直方向（Z 軸方向）への回折は生じない）。したがって、面垂直方向（Z 軸方向）への 0 次光、並びに Z 軸方向に対して傾斜した方向への 1 次光および -1 次光の双方が出力されない。

【0062】

ここで、本実施形態においては、M 点で発振する S-iPM レーザにおいて次のような

工夫を位相変調層 15 A に施すことにより、0 次光を出力しないまま、1 次光および -1 次光の一部を出力する。具体的には、図 16 に示されたように、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に対して、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトル V を加算することにより、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも 1 つ（図では面内波数ベクトル K_8 ）の大きさを、 $2\pi/\lambda$ よりも小さくする。換言すれば、回折ベクトル V が加算された後の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも 1 つ（面内波数ベクトル K_8 ）は、半径 $2\pi/\lambda$ の円状領域（ライトライン） LL 内に収まる。なお、図 16 において破線で示される面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は回折ベクトル V の加算前を表し、実線で示される面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は回折ベクトル V の加算後を表す。ライトライン LL は全反射条件に対応しており、ライトライン LL 内に収まる大きさの波数ベクトルは面垂直方向（ Z 軸方向）の成分を有することとなる。一例では、回折ベクトル V の方向は、 $\Gamma-M_1$ 軸または $\Gamma-M_2$ 軸に沿っており、その大きさは $2\pi/(\sqrt{2})a - \pi/\lambda$ から $2\pi/(\sqrt{2})a + \pi/\lambda$ の範囲内（一例として、 $2\pi/(\sqrt{2})a$ ）となる。

10

【数 0063】

面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも 1 つをライトライン LL 内に収めるための回折ベクトル V の大きさおよび向きについて検討する。以下の式 (10) ~ (13) は、回折ベクトル V が加えられる前の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ をそれぞれ示す。

【数 10】

$$K_6 = \left(\frac{\pi}{a} + \Delta k_x, \frac{\pi}{a} + \Delta k_y \right) \dots (10)$$

20

【数 11】

$$K_7 = \left(-\frac{\pi}{a} + \Delta k_x, \frac{\pi}{a} + \Delta k_y \right) \dots (11)$$

【数 12】

$$K_8 = \left(-\frac{\pi}{a} + \Delta k_x, -\frac{\pi}{a} + \Delta k_y \right) \dots (12)$$

30

【数 13】

$$K_9 = \left(\frac{\pi}{a} + \Delta k_x, -\frac{\pi}{a} + \Delta k_y \right) \dots (13)$$

なお、波数ベクトルの広がり Δk_x および Δk_y は、以下の式 (14) および式 (15) をそれぞれ満たし、面内波数ベクトルの x 軸方向の広がり の最大値 $\Delta k_{x_{max}}$ および y 軸方向の広がり の最大値 $\Delta k_{y_{max}}$ は、設計上の光像を形成する光の角度広がりにより規定される。

40

【数 14】

$$-\Delta k_{x_{max}} \leq \Delta k_x \leq \Delta k_{x_{max}} \dots (14)$$

【数 15】

$$-\Delta k_{y_{max}} \leq \Delta k_y \leq \Delta k_{y_{max}} \dots (15)$$

ここで、回折ベクトル V を以下の式 (16) のように表すとき、回折ベクトル V が加えら

50

れた後の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は、以下の式 (17) ～ (20) となる。

【数 16】

$$\mathbf{V} = (V_x, V_y) \quad \dots (16)$$

【数 17】

$$\mathbf{K}_6 = \left(\frac{\pi}{a} + \Delta k_x + V_x, \frac{\pi}{a} + \Delta k_y + V_y \right) \quad \dots (17)$$

10

【数 18】

$$\mathbf{K}_7 = \left(-\frac{\pi}{a} + \Delta k_x + V_x, \frac{\pi}{a} + \Delta k_y + V_y \right) \quad \dots (18)$$

【数 19】

$$\mathbf{K}_8 = \left(-\frac{\pi}{a} + \Delta k_x + V_x, -\frac{\pi}{a} + \Delta k_y + V_y \right) \quad \dots (19)$$

20

【数 20】

$$\mathbf{K}_9 = \left(\frac{\pi}{a} + \Delta k_x + V_x, -\frac{\pi}{a} + \Delta k_y + V_y \right) \quad \dots (20)$$

上記式 (17) ～ (20) において波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のいずれかがライトライン L 内に収まることを考慮すると、以下の式 (21) の関係が成り立つ。

【数 21】

$$\left(\pm \frac{\pi}{a} + \Delta k_x + V_x \right)^2 + \left(\pm \frac{\pi}{a} + \Delta k_y + V_y \right)^2 < \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \quad \dots (21)$$

30

すなわち、上記式 (21) を満たす回折ベクトル $\mathbf{V}$ を加えることにより、波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のいずれかがライトライン L 内に収まり、1次光および-1次光の一部が出力される。

【0064】

なお、ライトライン L の大きさ (半径) を $2\pi/\lambda$ としたのは次の理由による。図 17 は、ライトライン L の周辺構造を模式的に説明するための図であって、 Z 軸方向に垂直な方向から見たデバイスと空気との境界を示している。真空中の光の波数ベクトルの大きさは $2\pi/\lambda$ となるが、図 17 のようにデバイス媒質中を光が伝搬するとき、屈折率 n の媒質内の波数ベクトル K_a の大きさは $2\pi n/\lambda$ となる。このとき、デバイスと空気の境界を光が伝搬するためには、境界に平行な波数成分が連続している必要がある (波数保存則)。図 17 で波数ベクトル K_a と Z 軸とが角度 θ をなす場合、面内に投影した波数ベクトル (すなわち面内波数ベクトル) K_b の長さは $(2\pi n/\lambda) \sin \theta$ となる。一方で、一般に媒質の屈折率 $n > 1$ の関係から、媒質内の面内波数ベクトル K_b が $2\pi/\lambda$ より大きくなる角度では波数保存則が成立しなくなる。このとき、光は全反射し、空気側に取り出すことが出来ない。この全反射条件に対応する波数ベクトルの大きさがライトライン L の大きさとなり、 $2\pi/\lambda$ となる。

40

【0065】

面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に回折ベクトル $\mathbf{V}$ を加算する具体的な方式の一例として、

50

所望の光像を形成するための位相分布である回転角度分布 $\phi_1(x, y)$ （第1位相分布）に対し、光像とは無関係の回転角度分布 $\phi_2(x, y)$ （第2位相分布）を重畳する方式が考えられる。この場合、位相変調層15Aの回転角度分布 $\phi(x, y)$ は、

$$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y)$$

として表される。 $\phi_1(x, y)$ は、上述のように光像を逆フーリエ変換したときの複素振幅の位相に相当する。また、 $\phi_2(x, y)$ は、上記式(21)を満たす回折ベクトル V を加えるための回転角度分布である。図18は、回転角度分布 $\phi_2(x, y)$ の一例を概念的に示す図である。図18に示されたように、この例では、第1の位相値 ϕ_A と、第1位相値 ϕ_A とは異なる値の第2位相値 ϕ_B とが、市松模様に配列されている。すなわち、第1位相値 ϕ_A とは異なる値の第2位相値 ϕ_B とが、直交する2方向それぞれに沿って交互に配列されている。一例では、位相値 ϕ_A は0 (rad)であり、位相値 ϕ_B は π (rad)である。つまり、第1位相値 ϕ_A と第2位相値 ϕ_B とが π ずつ変化する。このような位相値の配列によって、 $\Gamma-M1$ 軸または $\Gamma-M2$ 軸に沿った回折ベクトル V を好適に実現することができる。第1位相値 ϕ_A と第2位相値 ϕ_B とが上述のように市松模様に配列された場合、 $V = (\pm\pi/a, \pm\pi/a)$ のように、該回折ベクトル V は図15の波数ベクトル $K6 \sim K9$ と丁度相殺される。また、位相値 ϕ_A 、 ϕ_B の配列方向を 45° から変化させることにより、回折ベクトル V の向きを任意の向きに調整することができる。

【0066】

なお、上述の構造において、活性層12および位相変調層15Aを含む構成であれば、材料系、膜厚、層の構成は様々に変更され得る。ここで、仮想的な正方格子からの摂動が0の場合のいわゆる正方格子フォトリソニック結晶レーザに関してはスケール則が成り立つ。すなわち、波長が定数 α 倍となった場合、正方格子構造全体を α 倍することによって同様の定在波状態を得ることが出来る。同様に、本実施形態においても、波長に応じたスケール則によって位相変調層15Aの構造を決定することが可能である。したがって、青色、緑色、赤色などの光を発光する活性層12を用い、波長に応じたスケール則を適用することで、可視光を出力する半導体発光素子1Aを実現することも可能である。

【0067】

半導体発光素子1Aを製造する際、各化合物半導体層の成長には、有機金属気相成長(MOCVD)法若しくは分子線エピタキシー法(MBE)が適用される。AlGaAsを用いた半導体発光素子1Aの製造においては、AlGaAsの成長温度は $500^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$ であって、実験では $550 \sim 700^\circ\text{C}$ が採用された。成長時におけるAl原料としてTMA(トリメチルアルミニウム)、ガリウム原料としてTMG(トリメチルガリウム)およびTEG(トリエチルガリウム)、As原料としては AsH_3 (アルシン)、n型不純物用の原料として Si_2H_6 (ジシラン)、p型不純物用の原料としてDEZn(ジエチル亜鉛)が用いられる。GaAsの成長においては、TMGとアルシンが用いられるが、TMAは用いられない。InGaAsは、TMGとTMI(トリメチルインジウム)とアルシンを用いて製造される。絶縁膜の形成は、その構成物質を原料としてターゲットをスパッタするか、またはPCVD(プラズマCVD)法により形成されればよい。

【0068】

すなわち、上述の半導体発光素子1Aは、まず、n型の半導体基板10としてのGaAs基板上に、n型のクラッド層11としてのAlGaAs層、活性層12としてのInGaAs/AlGaAs多重量子井戸構造、位相変調層15Aの基本層15aとしてのGaAs層を、MOCVD(有機金属気相成長)法を用いて順次、エピタキシャル成長する。

【0069】

次に、基本層15aに別のレジストが塗布される。レジスト上に電子ビーム描画装置で2次元微細パターンが描画された後、描画されたレジストを現像することでレジスト上に2次元微細パターンが形成される。その後、レジストをマスクとして、ドライエッチングにより2次元微細パターンが基本層15a上に転写され、基本層15aに孔(穴)が形成される。その後、レジストが除去される。なお、レジスト形成前にPCVD法で基本層15a上にSiN層や SiO_2 層を形成しておき、その上にレジストマスクが形成されてもよ

い。続いて、反応性イオンエッチング（RIE）を使ってSiN層やSiO₂層に微細パターンが転写された後、レジストを除去してからドライエッチングが行われてもよい。この場合、ドライエッチングの耐性を高めることができる。これらの孔を異屈折率領域15bとするか、或いは、これらの孔の中に、異屈折率領域15bとなる化合物半導体（AlGaAs）を孔の深さ以上に再成長させる。孔を異屈折率領域15bとする場合、孔内に、空気、窒素、水素またはアルゴン等の気体が封入されてもよい。次に、クラッド層13としてのAlGaAs層、コンタクト層14としてのGaAs層が順次MOCVDで形成され、電極16、17が蒸着法またはスパッタ法により形成される。また、必要に応じて、保護膜18および反射防止膜19がスパッタやPCVD法等により形成される。

【0070】

なお、位相変調層15Aを活性層12とクラッド層11との間に設ける場合には、活性層12の形成前に、クラッド層11上に位相変調層15Aが形成されればよい。

【0071】

以上に説明した、本実施形態による半導体発光素子1Aによって得られる効果について説明する。この半導体発光素子1Aでは、複数の異屈折率領域15bの各重心Gが、仮想的な正方格子の対応する格子点Oから離れて配置されるとともに、該格子点O周りに光像に対応した回転角度を有する。このような構造によれば、S-iPMレーザとして、半導体基板10の主面10aの法線方向（Z軸方向）、または該法線方向と交差する傾斜方向、またはその双方に沿って任意形状の光像を形成するための光を出力することができる。また、この半導体発光素子1Aでは、仮想的な正方格子の格子間隔aと活性層12の発光波長λとが、M点発振の条件を満たす。通常、M点発振の定在波状態においては位相変調層15A内を伝搬する光が全反射してしまい、信号光（1次光および-1次光）と0次光との双方の出力が抑制される。しかしながら、本実施形態の半導体発光素子1Aでは、位相変調層15Aの逆格子空間に形成される面内波数ベクトルであって回転角度分布φ（x，y）による波数広がりΔkをそれぞれ含む4方向の面内波数ベクトルK₆～K₉のうち、少なくとも1つの大きさが2π/λ（ライトラインLL）よりも小さくなっている。S-iPMレーザでは、例えば回転角度分布φ（x，y）を工夫することにより、このような面内波数ベクトルK₆～K₉の調整が可能である。そして、少なくとも1つの面内波数ベクトルの大きさが2π/λよりも小さい場合、その面内波数ベクトルはZ軸方向の成分を有するので、結果的に信号光の一部が位相変調層15Aから出力されることとなる。但し、0次光は依然としてM点の定在波を形成する4つの波数ベクトル（±π/a、±π/a）のどれか1つと一致する方向で面内に閉じ込められるため、位相変調層15Aからライトライン内に出力されない。すなわち、本実施形態の半導体発光素子1Aによれば、S-iPMレーザの出力に含まれる0次光をライトライン内から取り除き、信号光のみをライトライン内に出力することができる。

【0072】

また、本実施形態のように、回転角度分布φ（x，y）は、光像に応じた回転角度分布φ₁（x，y）と光像とは無関係の回転角度分布φ₂（x，y）とが重畳されてなってもよい。その場合、回転角度分布φ₂（x，y）は、位相変調層15Aの逆格子空間上において、回転角度分布φ₁（x，y）による4方向の面内波数ベクトルK₆～K₉に対して或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトルVを加算するための回転角度分布であってもよい。そして、4方向の面内波数ベクトルK₆～K₉に回折ベクトルVが加算された結果、4方向の面内波数ベクトルK₆～K₉のうち少なくとも1つの大きさが2π/λよりも小さくなってもよい。これにより、逆格子空間において回転角度分布φ（x，y）による波数広がりΔk_x、Δk_yをそれぞれ含む4方向の面内波数ベクトルK₆～K₉のうち少なくとも1つの大きさが2π/λ（ライトライン）よりも小さい構成を容易に実現することができる。

【0073】

また、本実施形態のように、回転角度分布φ₂（x，y）は、互いに値が異なる位相値φ_A、φ_Bが市松模様に配列されたパターンであってもよい。このような回転角度分布φ₂（

10

20

30

40

50

x, y) により、上述した回折ベクトル V を容易に実現することができる。

【0074】

図19は、位相変調層15Aの回転角度分布 $\phi(x, y)$ の例を示す図である。また、図20は、図19に示された部分Sを拡大して示す図である。図19および図20において、回転角度の大きさは色の濃淡で表されており、濃い領域ほど回転角度が大きい（すなわち位相角が大きい）ことを示している。図20を参照すると、互いに値が異なる位相値が市松模様に配列されたパターンが重畳されていることがわかる。図21は、図19に示された回転角度分布 $\phi(x, y)$ を有する半導体発光素子1Aから出力されるビームパターン（光像）を示す。また、図22は、図21に示されたビームパターンの模式図である。図21および図22の中心はZ軸に対応する。図21および図22から明らかなように、半導体発光素子1Aは、Z軸に対して傾斜した第1方向に出力される第1光像部分LM1を含む1次光と、Z軸に関して第1方向と対称である第2方向に出力され、Z軸に関して第1光像部分LM1と回転対称である第2光像部分LM2を含む-1次光とを出力するが、Z軸上を進む0次光は出力しない。

【0075】

本実施形態では、Z軸を含み、Z軸に関して対称なパターンを出力することもできる。このとき0次光がないため、Z軸上でもパターンの強度ムラを生じない。このようなビームパターンの設計例として、 5×5 の多点、メッシュ、および1次元パターンがある。これらのビームパターンの模式図および位相分布を図23、図24、および図25に示されている。このようなビームパターンは、例えば物体検知や3次元計測などに応用することができ、アイセーフ波長等を用いることで、目に安全な光源を提供することもできる。

【0076】

（第1変形例）

上述の実施形態では、光像の角度広がりに基づく波数広がり、波数空間の或る点を中心とする半径 Δk の円に含まれる場合、次のように簡略に考えることもできる。4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に回折ベクトル V を加算することにより、4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つの大きさを $2\pi/\lambda$ （ライトラインLL）よりも小さくする。これは、4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ から波数広がり Δk を除いたもの（すなわちM点発振の正方格子PCSELにおける4方向の面内波数ベクトル、図12を参照）に対して回折ベクトル V を加算することにより、4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つの大きさを、 $2\pi/\lambda$ から波数広がり Δk を差し引いた値 $\{(2\pi/\lambda) - \Delta k\}$ より小さくすると考えてもよい。

【0077】

図26は、上記の操作を概念的に示す図である。同図に示されるように、波数広がり Δk を除いた面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に対して回折ベクトル V を加えることにより、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つの大きさを $\{(2\pi/\lambda) - \Delta k\}$ よりも小さくする。図中において、領域LL2は半径が $\{(2\pi/\lambda) - \Delta k\}$ の円状の領域である。なお、図26において破線で示される面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は回折ベクトル V の加算前を表し、実線で示される面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ は回折ベクトル V の加算後を表す。領域LL2は全反射条件からビームパターンの波数広がり Δk の効果を引いた領域に対応しており、領域LL2内に収まる大きさの波数ベクトルは面垂直方向（Z軸方向）にも伝搬することとなる。

【0078】

本変形例において、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つを領域LL2内に収めるための回折ベクトル V の大きさおよび向きを説明する。以下の式(22)～(25)は、回折ベクトル V が加算される前の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ をそれぞれ示す。

【数22】

$$K_6 = \left(\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a} \right) \cdots (22)$$

10

20

30

40

50

【数 2 3】

$$\mathbf{K7} = \left(-\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a} \right) \dots (23)$$

【数 2 4】

$$\mathbf{K8} = \left(-\frac{\pi}{a}, -\frac{\pi}{a} \right) \dots (24)$$

10

【数 2 5】

$$\mathbf{K9} = \left(\frac{\pi}{a}, -\frac{\pi}{a} \right) \dots (25)$$

ここで、回折ベクトル $\mathbf{V}$ を上述の式 (16) のように表すとき、回折ベクトル $\mathbf{V}$ が加算された後の面内波数ベクトル $\mathbf{K6} \sim \mathbf{K9}$ は、以下の式 (26) ～ (29) となる。

【数 2 6】

$$\mathbf{K6} = \left(\frac{\pi}{a} + V_x, \frac{\pi}{a} + V_y \right) \dots (26)$$

20

【数 2 7】

$$\mathbf{K7} = \left(-\frac{\pi}{a} + V_x, \frac{\pi}{a} + V_y \right) \dots (27)$$

【数 2 8】

$$\mathbf{K8} = \left(-\frac{\pi}{a} + V_x, -\frac{\pi}{a} + V_y \right) \dots (28)$$

30

【数 2 9】

$$\mathbf{K9} = \left(\frac{\pi}{a} + V_x, -\frac{\pi}{a} + V_y \right) \dots (29)$$

上記式 (26) ～ (29) において面内波数ベクトル $\mathbf{K6} \sim \mathbf{K9}$ のいずれかが領域 $LL2$ 内に収まることを考慮すると、以下の式 (30) の関係が成り立つ。

【数 3 0】

$$\left(\pm \frac{\pi}{a} + V_x \right)^2 + \left(\pm \frac{\pi}{a} + V_y \right)^2 < \left(\frac{2\pi}{\lambda} - \Delta k \right)^2 \dots (30)$$

40

すなわち、上記式 (30) を満たす回折ベクトル $\mathbf{V}$ を加えることにより、波数広がり Δk を除いた面内波数ベクトル $\mathbf{K6} \sim \mathbf{K9}$ のいずれかが領域 $LL2$ 内に収まる。このような場合であっても、0 次光を出力しないまま、1 次光および 1 次光の一部を出力することができる。

【0079】

(第2変形例)

50

図 27 は、上記実施形態の第 2 変形例に係る位相変調層 15B の平面図である。また、図 28 は、位相変調層 15B における異屈折率領域 15b の位置関係を示す図である。図 27 および図 28 に示されるように、本変形例の各異屈折率領域 15b の重心 G は、直線 D 上に配置されている。直線 D は、単位構成領域 R (x, y) の対応する格子点 O (x, y) を通り、正方格子の各辺に対して傾斜する直線である。なお、各単位構成領域 R は、図 28 に示されたように、X 軸に平行な s 軸および Y 軸に平行な t 軸で規定される領域である。換言すれば、各単位構成領域 R に設定される直線 D は、X 軸および Y 軸の双方に対して傾斜する直線である。正方格子の一边 (X 軸) に対する直線 D の傾斜角は θ である。傾斜角 θ は、位相変調層 15B 内において一定である。傾斜角 θ は、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 45^\circ$ である。または、傾斜角 θ は、 $180^\circ < \theta < 270^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 225^\circ$ である。傾斜角 θ が $0^\circ < \theta < 90^\circ$ または $180^\circ < \theta < 270^\circ$ を満たす場合、直線 D は、X 軸および Y 軸によって規定される座標平面の第 1 象限から第 3 象限にわたって延びる。或いは、傾斜角 θ は、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 135^\circ$ である。或いは、傾斜角 θ は、 $270^\circ < \theta < 360^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 315^\circ$ である。傾斜角 θ が $90^\circ < \theta < 180^\circ$ または $270^\circ < \theta < 360^\circ$ を満たす場合、直線 D は、X 軸および Y 軸によって規定される座標平面の第 2 象限から第 4 象限にわたって延びる。このように、傾斜角 θ は、 0° 、 90° 、 180° および 270° を除く角度である。ここで、格子点 O (x, y) と重心 G との距離を r (x, y) とする。x は X 軸における x 番目の格子点の位置、y は Y 軸における y 番目の格子点の位置を示す。距離 r (x, y) が正の値である場合、重心 G は第 1 象限 (または第 2 象限) に位置する。距離 r (x, y) が負の値である場合、重心 G は第 3 象限 (または第 4 象限) に位置する。距離 r (x, y) が 0 である場合、格子点 O と重心 G とは互いに一致する。傾斜角度は 45° 、 135° 、 225° 、 275° が好適となり、これらの角度では、M 点の定在波を形成する 4 つの波数ベクトル (例えば、面内波数ベクトル ($\pm \pi/a$ 、 $\pm \pi/a$)) の中の 2 つだけを位相変調し、その他の 2 つは位相変調しないため、安定した定在波を形成することができる。なお、傾斜角 θ は各単位構成領域 R (x, y) で同じ角度を取る事ができる。

【0080】

図 27 に示された、各異屈折率領域 15b の重心 G と、各単位構成領域 R の対応する格子点 O との距離 r (x, y) は、所望の光像に応じた位相パターンに従って異屈折率領域 15b ごとに個別に設定される。位相パターンすなわち距離 r (x, y) の分布は、x, y の値で決まる位置毎に特定の値を有するが、必ずしも特定の関数で表わされるとは限らない。距離 r (x, y) の分布は、所望の光像を逆フーリエ変換して得られる複素振幅分布のうち位相分布を抽出したものから決定される。すなわち、図 28 に示された、単位構成領域 R (x, y) において、位相 P (x, y) が P_0 である場合には距離 r (x, y) が 0 と設定される。位相 P (x, y) が $\pi + P_0$ である場合には距離 r (x, y) が最大値 R_0 に設定される。位相 P (x, y) が $-\pi + P_0$ である場合には距離 r (x, y) が最小値 $-R_0$ に設定される。そして、その中間の位相 P (x, y) に対しては、 r (x, y) = $\{P$ (x, y) $- P_0\} \times R_0 / \pi$ となるように距離 r (x, y) が設定される。なお、位相 P (x, y) の範囲は、 $\pi + P_0$ から $-\pi + P_0$ の中間の値となるように設定される。ここで、初期位相 P_0 は任意に設定することができる。仮想的な正方格子の格子間隔を a とすると、 r (x, y) の最大値 R_0 は例えば、以下の式 (31) で示される範囲内である。

$$0 \leq R_0 \leq \frac{a}{\sqrt{2}} \quad \dots (31)$$

なお、所望の光像から複素振幅分布を求める際には、ホログラム生成の計算時に一般的に用いられる Gerchberg-Saxton (GS) 法のような繰り返しアルゴリズムを適用することによって、ビームパターンの再現性が向上する。

【0081】

本変形例においては、位相変調層15Bの異屈折率領域15bの距離 $r(x, y)$ の分布を決定することにより、所望の光像を得ることができる。上記実施形態と同様の第1～第4の前提条件の下、位相変調層15Bは、以下の条件を満たすよう構成される。すなわち、格子点 $O(x, y)$ から対応する異屈折率領域15bの重心 G までの距離 $r(x, y)$ が、

$$r(x, y) = C \times (P(x, y) - P_0)$$

C ：比例定数で例えば R_0/π

P_0 ：任意の定数であって例えば0

なる関係を満たすように、該対応する異屈折率領域15bが単位構成領域 $R(x, y)$ 内に配置される。すなわち、距離 $r(x, y)$ は、単位構成領域 $R(x, y)$ において、位相 $P(x, y)$ が P_0 である場合には0に設定され、位相 $P(x, y)$ が $\pi + P_0$ である場合には最大値 R_0 に設定され、位相 $P(x, y)$ が $-\pi + P_0$ である場合には最小値 $-R_0$ に設定される。なお、位相 $P(x, y)$ の範囲は、 $\pi + P_0$ から $-\pi + P_0$ の中間の値となるように設定される。所望の光像を得たい場合、該光像を逆フーリエ変換して、その複素振幅の位相 $P(x, y)$ に応じた距離 $r(x, y)$ の分布を、複数の異屈折率領域15bに与えるとよい。位相 $P(x, y)$ と距離 $r(x, y)$ とは、互いに比例してもよい。

【0082】

上記実施形態と同様に、逆フーリエ変換で得られた複素振幅分布から強度分布と位相分布を得る方法として、例えば強度分布 $I(x, y)$ については、MathWorks社の数値解析ソフトウェア「MATLAB」の`abs`関数を用いることにより計算することができ、位相分布 $P(x, y)$ については、MATLABの`angle`関数を用いることにより計算することができる。なお、光像の逆フーリエ変換結果から位相分布 $P(x, y)$ を求め、各異屈折率領域15bの距離 $r(x, y)$ を決める際に、一般的な離散フーリエ変換（或いは高速フーリエ変換）を用いて計算する場合の留意点は、前述した実施形態と同様である。

【0083】

本変形例においても、上述の実施形態と同様に、仮想的な正方格子の格子間隔 a と活性層12の発光波長 λ とがM点発振の条件を満たす。更に、位相変調層15Bにおいて逆格子空間を考えると、距離 $r(x, y)$ の分布による波数広がり Δk をそれぞれ含む4方向の面内波数ベクトルのうち少なくとも1つの大きさが、 $2\pi/\lambda$ （ライトライン）よりも小さい。

【0084】

詳述すると、本変形例においては、M点で発振するSPMレーザにおいて次のような工夫を位相変調層15Bに施すことにより、0次光をライトライン内に出力しないまま、1次光および-1次光の一部が出力される。具体的には、図16に示されたように、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ に対して、或る一定の大きさおよび向きを有する回折ベクトル V を加算することにより、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つの大きさを、 $2\pi/\lambda$ よりも小さくする。換言すれば、回折ベクトル V が加えられた後の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つは、半径 $2\pi/\lambda$ の円状領域（ライトライン） LL 内に収まる。すなわち、上述の式(21)を満たす回折ベクトル V を加えることにより、面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のいずれかがライトライン LL 内に収まり、1次光および-1次光の一部が出力される。

【0085】

或いは、前述した第1変形例の図26に示されたように、4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ から波数広がり Δk を除いたもの（すなわちM点発振の正方格子PCSELにおける4方向の面内波数ベクトル、図12を参照）に対して回折ベクトル V を加えることにより、4方向の面内波数ベクトル $K_6 \sim K_9$ のうち少なくとも1つの大きさを、 $2\pi/\lambda$ から波数広がり Δk を差し引いた値 $\{(2\pi/\lambda) - \Delta k\}$ よりも小さくしてもよい。すなわち、上述の式(30)を満たす回折ベクトル V を加えることにより、面内波数ベクトル

K 6 ~ K 9 のいずれかが領域 L L 2 内に収まり、1 次光および - 1 次光の一部が出力される。

【0086】

面内波数ベクトル K 6 ~ K 9 に回折ベクトル V を加える具体的な方式の一例として、光像に応じた位相分布である距離分布 $r_1(x, y)$ (第 1 の位相分布) に対し、光像とは無関係の距離分布 $r_2(x, y)$ (第 2 の位相分布) を重畳する方式が考えられる。この場合、位相変調層 15 B の距離分布 $r(x, y)$ は、

$$r(x, y) = r_1(x, y) + r_2(x, y)$$

として表される。 $r_1(x, y)$ は、前に述べたように光像を逆フーリエ変換したときの複素振幅の位相に相当する。また、 $r_2(x, y)$ は、上記式 (30) を満たす回折ベクトル V を加えるための距離分布である。なお、距離分布 $r_2(x, y)$ の具体例は、図 18 と同様である。なお、距離分布 $r(x, y)$ が $-R_0$ から R_0 の範囲を超える場合、この範囲内の値となるように $2R_0$ を加減算して換算すればよい。

【0087】

本変形例では、仮想的な正方格子の格子点 O を通り該正方格子に対して傾斜する直線 D 上に、各異屈折率領域 15 b の重心 G が配置されている。そして、各異屈折率領域 15 b の重心 G と、対応する格子点 O との距離 $r(x, y)$ は光像に応じて個別に設定されている。このような構造によれば、各異屈折率領域 15 b の重心 G が各格子点 O 周りに光像に応じた回転角度を有する上記実施形態と同様に、S - i P M レーザとして、Z 軸方向、または Z 軸方向に対して傾斜した方向、またはその双方に任意形状の光像を出力することができる。また、本変形例においても、仮想的な正方格子の格子間隔 a と活性層 12 の発光波長 λ とが M 点発振の条件を満たすとともに、位相変調層 15 B の逆格子空間上において、距離 $r(x, y)$ の分布によって定在波を形成する平面波が位相変調され、光像の角度広がりによる波数広がり Δk をそれぞれ含む 4 方向の面内波数ベクトル K 6 ~ K 9 のうち少なくとも 1 つの大きさが $2\pi/\lambda$ (ライトライン) よりも小さくなっている。または、4 方向の面内波数ベクトル K 6 ~ K 9 から波数広がり Δk を除いたものに対して回折ベクトル V を加えることにより、少なくとも 1 つの面内波数ベクトルの大きさが、 $2\pi/\lambda$ から波数広がり Δk を差し引いた値 $\{(2\pi/\lambda) - \Delta k\}$ より小さくなっている。従って、S - i P M レーザの出力に含まれる 0 次光をライトライン内から取り除き、信号光のみを出力することができる。

【0088】

(第 3 変形例)

図 29 および図 30 は、異屈折率領域 15 b の X - Y 平面内の形状の例を示す平面図である。上記実施形態および各変形例では X - Y 平面内における異屈折率領域 15 b の形状が円形である例が示されている。しかしながら、異屈折率領域 15 b は円形以外の形状を有してもよい。例えば、X - Y 平面内における異屈折率領域 15 b の形状は、鏡像対称性 (線対称性) を有してもよい。ここで、鏡像対称性 (線対称性) とは、X - Y 平面に沿った或る直線を挟んで、該直線の一方側に位置する異屈折率領域 15 b の平面形状と、該直線他方側に位置する異屈折率領域 15 b の平面形状とが、互いに鏡像対称 (線対称) となり得ることをいう。鏡像対称性 (線対称性) を有する形状としては、例えば図 29 (a) に示された真円、図 29 (b) に示された正方形、図 29 (c) に示された正六角形、図 29 (d) に示された正八角形、図 29 (e) に示された正 16 角形、図 29 (f) に示された長方形、および図 29 (g) に示された楕円、などが挙げられる。このように、X - Y 平面内における異屈折率領域 15 b の形状が鏡像対称性 (線対称性) を有する。この場合、位相変調層の仮想的な正方格子の単位構成領域 R それぞれにおいて、シンプルな形状であるため、格子点 O から対応する異屈折率領域 15 b の重心 G の方向と位置を高精度に定めることができるので、高い精度でのパターンニングが可能となる。

【0089】

また、X - Y 平面内における異屈折率領域 15 b の形状は、 180° の回転対称性を有さない形状であってもよい。このような形状としては、例えば図 30 (a) に示された正

三角形、図30(b)に示された直角二等辺三角形、図30(c)に示された2つの円または楕円の一部分が重なる形状、図30(d)に示された楕円の長軸に沿った一方の端部近傍の短軸方向の寸法が他方の端部近傍の短軸方向の寸法よりも小さくなるように変形した形状(卵形)、図30(e)に示された楕円の長軸に沿った一方の端部を長軸方向に沿って突き出る尖った端部に変形した形状(涙形)、図30(f)に示された二等辺三角形、図30(g)に示された矩形の一边が三角形状に凹みその対向する一边が三角形状に尖った形状(矢印形)、図30(h)に示された台形、図30(i)に示された五角形、図30(j)に示された2つの矩形の一部分同士が重なる形状、および図30(k)に示された2つの矩形の一部分同士が重なり且つ鏡像対称性を有さない形状、等が挙げられる。このように、 $X-Y$ 平面内における異屈折率領域15bの形状が 180° の回転対称性を有さないことにより、より高い光出力を得ることができる。

10

【0090】

図31および図32は、 $X-Y$ 平面内の異屈折率領域の形状の別の例を示す平面図である。この例では、複数の異屈折率領域15bとは別の複数の異屈折率領域15cが更に設けられる。各異屈折率領域15cは、基本層15aの第1屈折率媒質とは屈折率の異なる第2屈折率媒質からなる。異屈折率領域15cは、異屈折率領域15bと同様に、空孔であってもよく、空孔に化合物半導体が埋め込まれて構成されてもよい。異屈折率領域15cは、異屈折率領域15bにそれぞれ一対一に対応して設けられる。そして、異屈折率領域15bおよび15cを合わせた重心Gは、仮想的な正方格子を構成する単位構成領域Rの格子点Oを横切る直線D上に位置している。なお、いずれの異屈折率領域15b、15cも仮想的な正方格子を構成する単位構成領域Rの範囲内に含まれる。単位構成領域Rは、仮想的な正方格子の格子点間を2等分する直線で囲まれる領域となる。

20

【0091】

異屈折率領域15cの平面形状は例えば円形であるが、異屈折率領域15bと同様に、様々な形状を有し得る。図31(a)~図31(k)には、異屈折率領域15b、15cの $X-Y$ 平面内における形状および相対関係の例が示されている。図31(a)および図31(b)は、異屈折率領域15b、15cが同じ形状の図形を有する形態を示す。図31(c)および図31(d)は、異屈折率領域15b、15cが同じ形状の図形を有し、互いの一部分同士が重なる形態を示す。図31(e)は、異屈折率領域15b、15cが同じ形状の図形を有し、回転した形態を示す。図31(f)は、異屈折率領域15b、15cが互いに異なる形状の図形を有する形態を示す。図31(g)は、異屈折率領域15b、15cが互いに異なる形状の図形を有し、異屈折率領域15b、15cが離間した形態を示す。

30

【0092】

また、図31(h)~図31(k)に示されたように、異屈折率領域15bは、互いに離間した2つの領域15b1、15b2を含んで構成されてもよい。このとき、領域15b1、15b2を合わせた重心が単一の異屈折率領域15bの重心に相当すると考えられる。また、この場合、図31(h)および図31(k)に示されるように、領域15b1、15b2および異屈折率領域15cは、互いに同じ形状の図形を有してもよい。または、図31(i)および図31(j)に示されるように、領域15b1、15b2および異屈折率領域15cのうち2つの図形が他と異なってもよい。

40

【0093】

異屈折率領域の $X-Y$ 平面内の形状は、各格子点間で互いに同一であってもよい。すなわち、異屈折率領域が全ての格子点において同一図形を有しており、並進操作、または並進操作および回転操作により、格子点間で互いに重ね合わせることが可能であってもよい。その場合、形状のばらつきに起因する位相角のばらつきを抑制することができ、精度良くビームパターンを出射することができる。または、異屈折率領域の $X-Y$ 平面内の形状は格子点間で必ずしも同一でなくともよく、例えば図32に示されたように、隣り合う格子点間で形状が互いに異なってもよい。

【0094】

50

(第4変形例)

図33は、第4変形例に係る発光装置1Bの構成を示す図である。この発光装置1Bは、支持基板6と、支持基板6上に一次元または二次元状に配列された複数の半導体発光素子1Aと、複数の半導体発光素子1Aを個別に駆動する駆動回路4とを備えている。各半導体発光素子1Aの構成は、上記実施形態と同様である。但し、複数の半導体発光素子1Aには、赤色波長域の光像を出力するレーザ素子と、青色波長域の光像を出力するレーザ素子と、緑色波長域の光像を出力するレーザ素子とが含まれても良い。赤色波長域の光像を出力するレーザ素子は、例えばGaAs系半導体によって構成される。青色波長域の光像を出力するレーザ素子、および緑色波長域の光像を出力するレーザ素子は、例えば窒化物系半導体によって構成される。駆動回路4は、支持基板6の裏面または内部に設けられ、各半導体発光素子1Aを個別に駆動する。駆動回路4は、制御回路7からの指示により、個々の半導体発光素子1Aに駆動電流を供給する。

【0095】

本変形例のように、個別に駆動される複数の半導体発光素子1Aを設け、各半導体発光素子1Aから所望の光像を取り出すことによって、予め複数のパターンに対応した半導体発光素子を並べたモジュールについて、適宜必要な素子を駆動することによってヘッドアップディスプレイなどを好適に実現することができる。また、複数の半導体発光素子1Aに、赤色波長域の光像を出力するレーザ素子と、青色波長域の光像を出力するレーザ素子と、緑色波長域の光像を出力するレーザ素子とが含まれることにより、カラーヘッドアップディスプレイなどを好適に実現することができる。

【0096】

本開示の発光装置は、上述の実施形態に限られるものではなく、他に様々な変形が可能である。例えば、上記実施形態ではGaAs系、InP系、および窒化物系（特にGaN系）の化合物半導体からなるレーザ素子を例示したが、本発明は、これら以外の様々な半導体材料からなるレーザ素子に適用できる。

【0097】

また、上記実施形態では位相変調層と共通の半導体基板上に設けられた活性層を発光部とする例を説明したが、本発明においては、発光部は半導体基板から分離して設けられてもよい。発光部が位相変調層と光学的に結合され、位相変調層に光を供給するものであれば、そのような構成であっても上記実施形態と同様の効果を好適に奏することができる。

【符号の説明】

【0098】

1A…半導体発光素子（発光装置）、1B…発光装置、4…駆動回路、6…支持基板、7…制御回路、10…半導体基板、10a…主面、10b…裏面、11, 13…クラッド層、12…活性層、14…コンタクト層、15A, 15B…位相変調層、15a…基本層、15b, 15c…異屈折率領域、16, 17…電極、17a…開口、18…保護膜、19…反射防止膜、B1…基本逆格子ベクトル、FR…画像領域、G…重心、K1~K9…面内波数ベクトル、Ka…波数ベクトル、Kb…面内波数ベクトル、LL…ライトライン、LL2…円状領域、LM1, LM2…光像部分、O…格子点、P…逆格子点、R…単位構成領域、RIN…内側領域、ROUT…外側領域、V…回折ベクトル、 ϕ_A , ϕ_B …位相値。

10

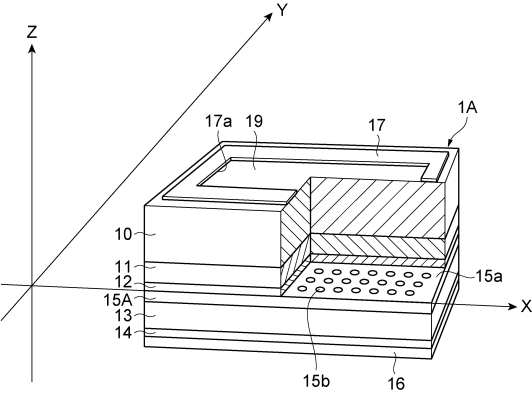
20

30

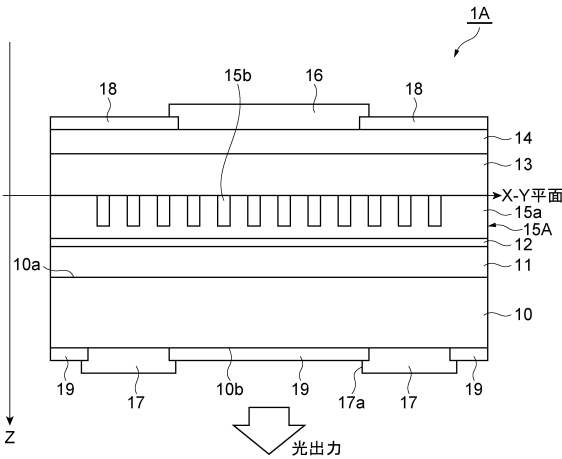
40

50

【図面】
【図 1】



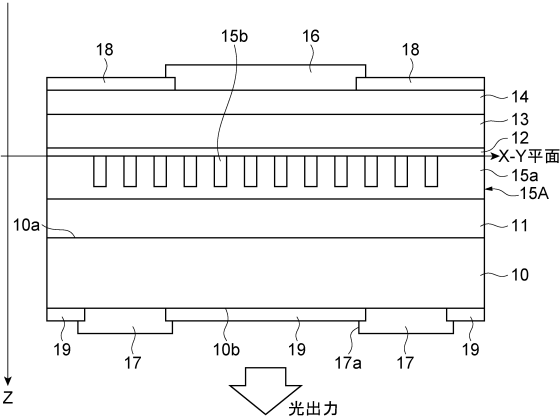
【図 2】



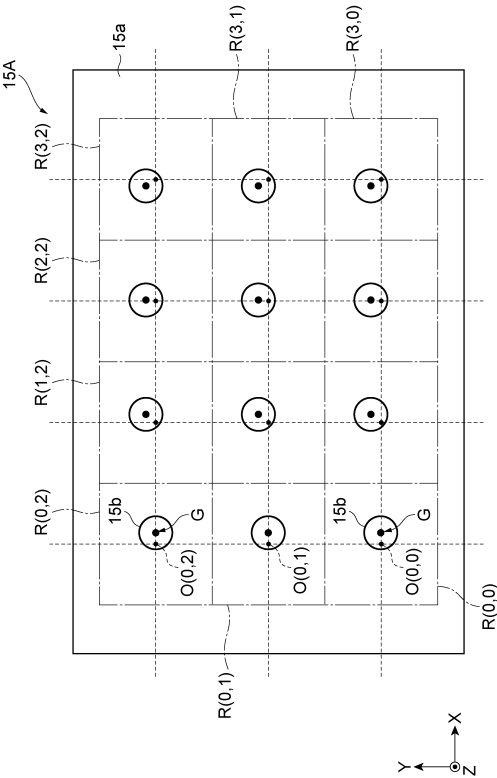
10

20

【図 3】



【図 4】

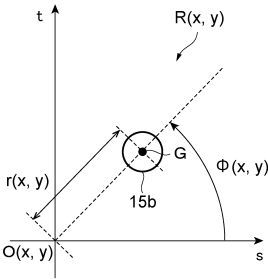


30

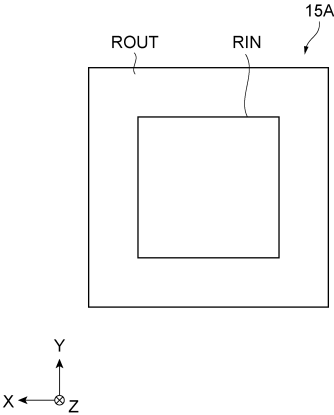
40

50

【図 5】



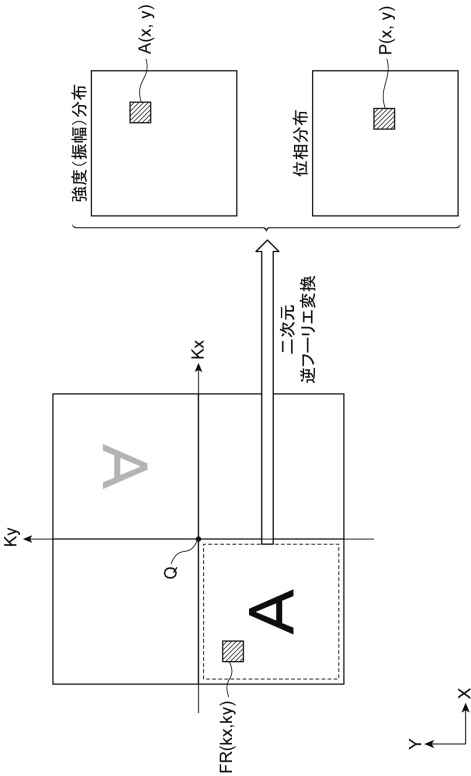
【図 6】



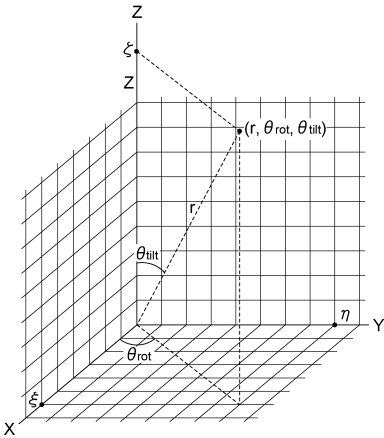
10

20

【図 7】



【図 8】

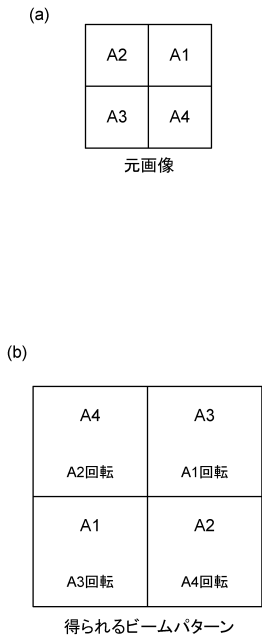


30

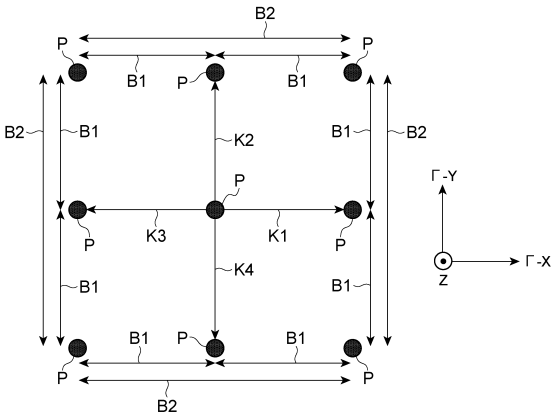
40

50

【図 9】



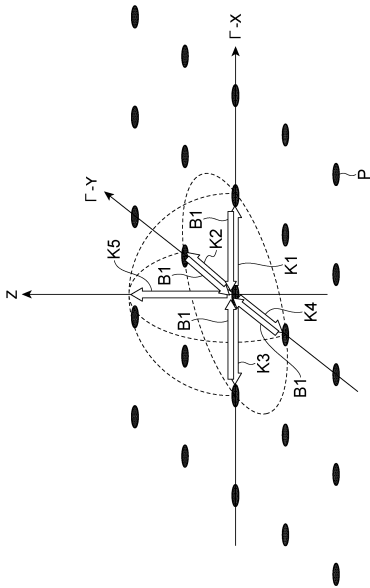
【図 1 0】



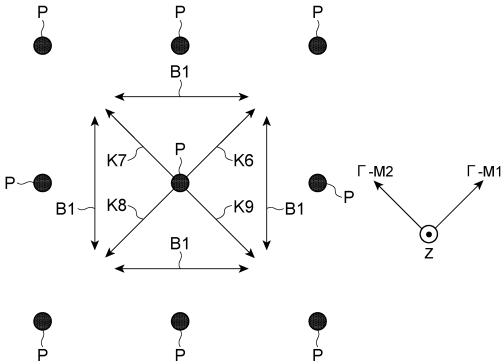
10

20

【図 1 1】



【図 1 2】

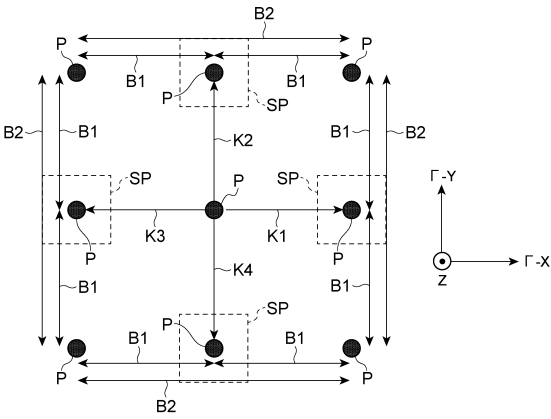


30

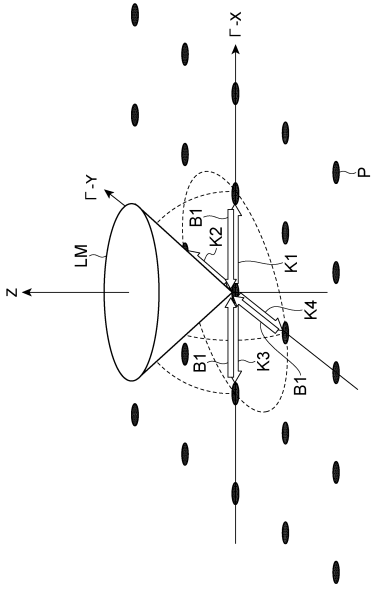
40

50

【図 1 3】



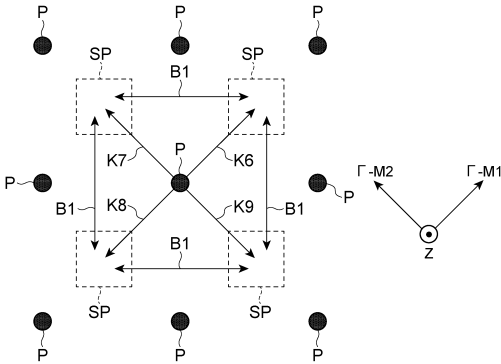
【図 1 4】



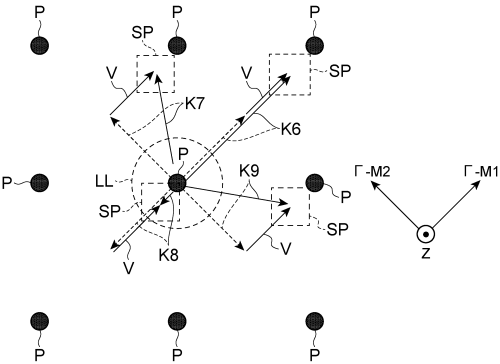
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】

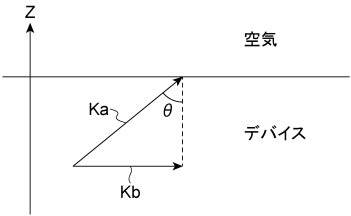


30

40

50

【図 1 7】



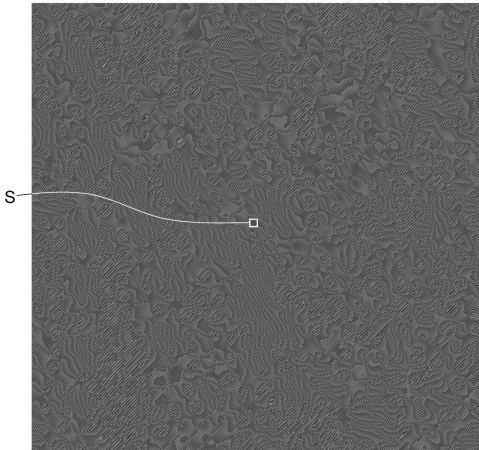
【図 1 8】

ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B
ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A
ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B
ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A
ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B
ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A

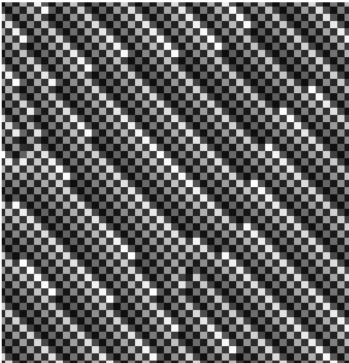
10

20

【図 1 9】



【図 2 0】

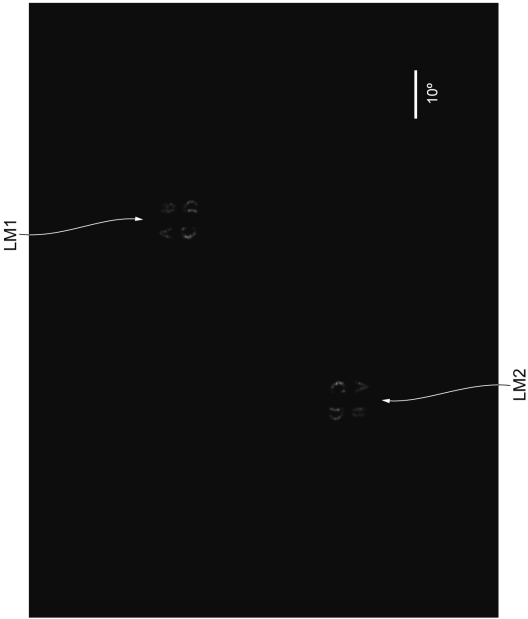


30

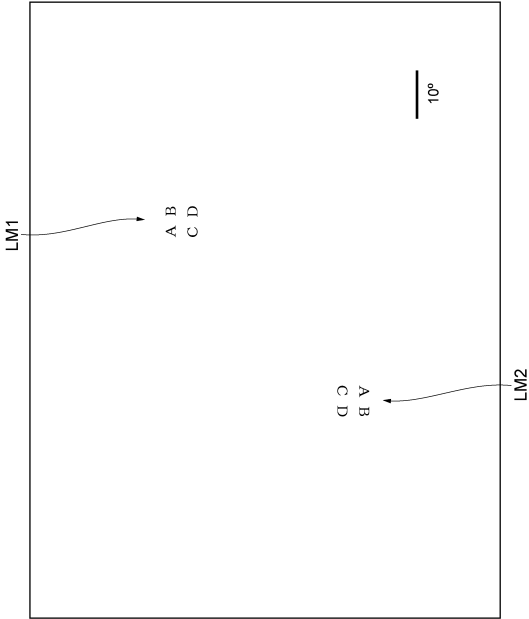
40

50

【図 2 1】



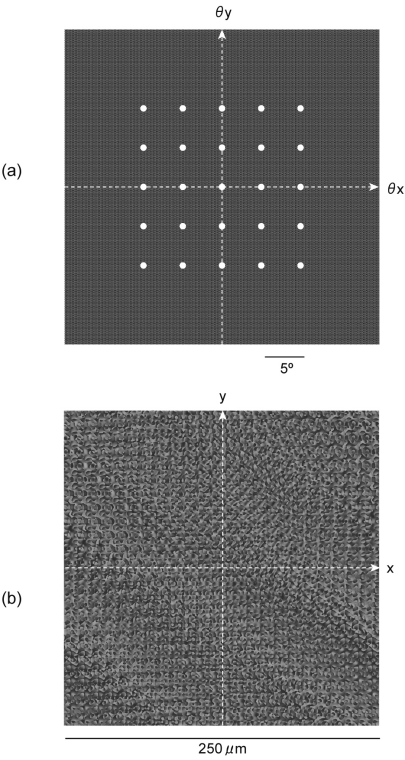
【図 2 2】



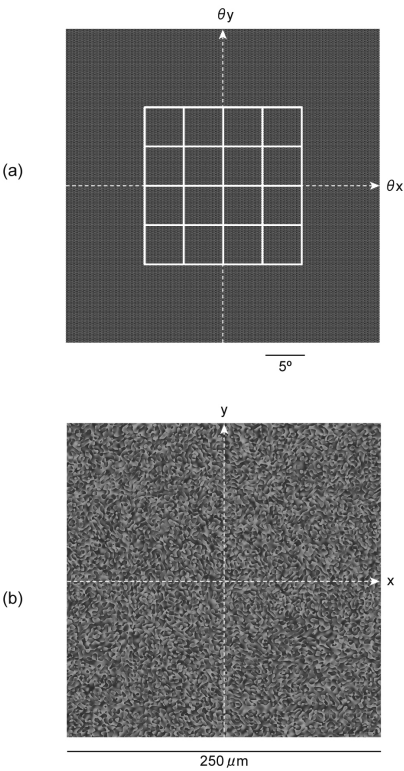
10

20

【図 2 3】



【図 2 4】

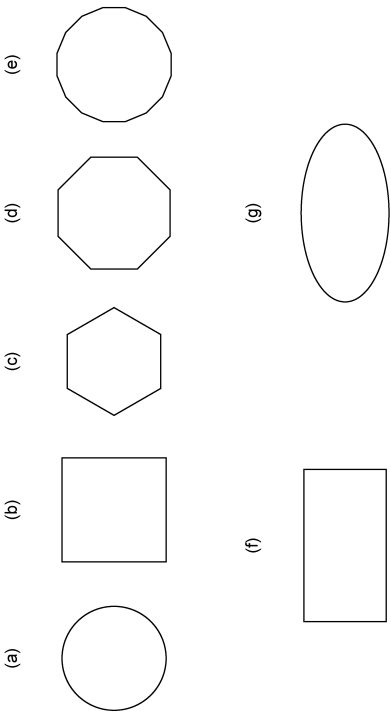


30

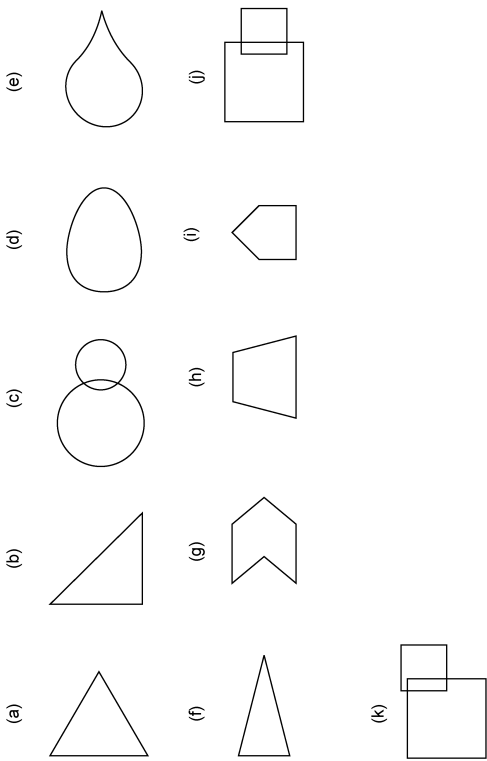
40

50

【図 29】



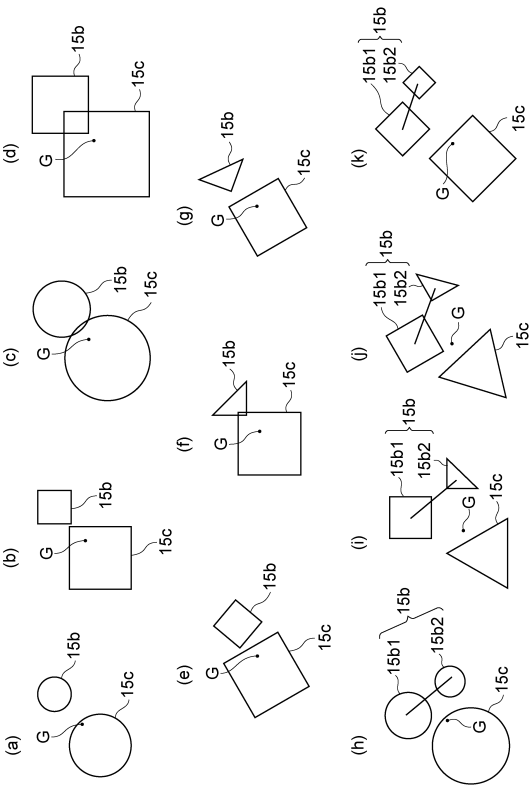
【図 30】



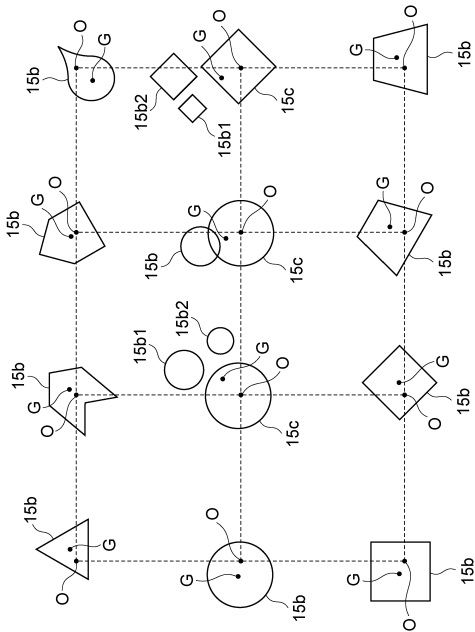
10

20

【図 31】



【図 32】

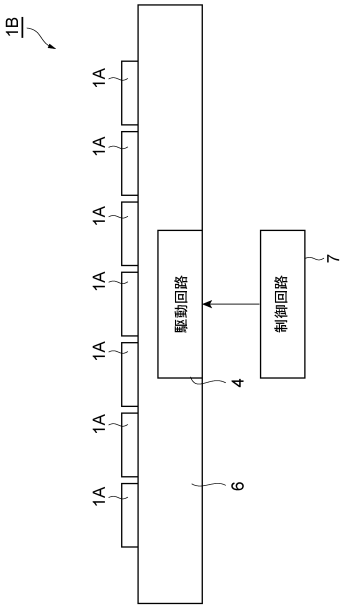


30

40

50

【図 33】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

1 浜松ホトニクス株式会社内

(72)発明者 杉山 貴浩

静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内

(72)発明者 黒坂 剛孝

静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内

審査官 百瀬 正之

(56)参考文献 特開2018-026463 (JP, A)

特開2014-197665 (JP, A)

特開2014-236127 (JP, A)

特開2008-098379 (JP, A)

米国特許出願公開第2011/0044365 (US, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H01S 5/00-5/50

IEEE Xplore

nature. Com

Scitation

Optica