

(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
2019年6月13日(13.06.2019)



(10) 国際公開番号
WO 2019/111786 A1

(51) 国際特許分類:
H01S 5/18 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2018/043813

(22) 国際出願日: 2018年11月28日(28.11.2018)

(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 2017-236201 2017年12月8日(08.12.2017) JP

(71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社 (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) [JP/JP];
〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6番地の1 Shizuoka (JP).

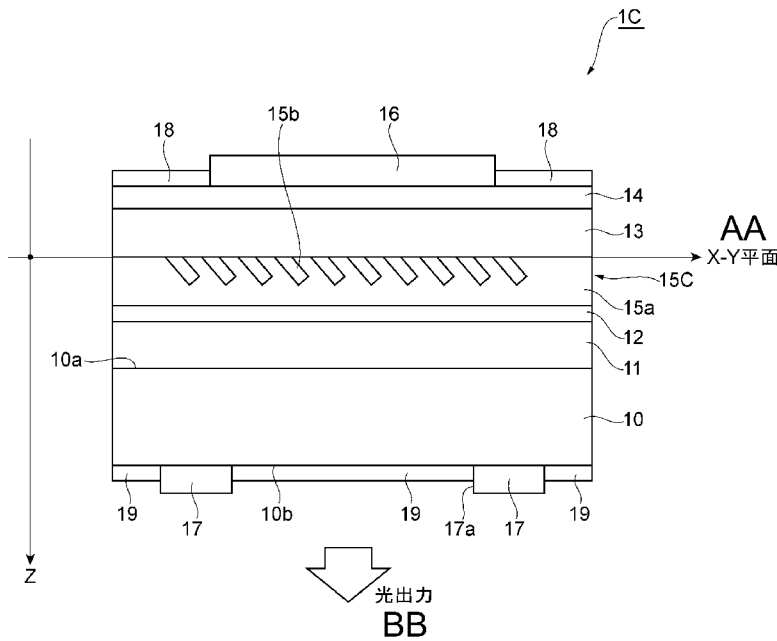
(72) 発明者: 廣瀬 和義 (HIROSE Kazuyoshi);
〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 黒坂 剛孝 (KUROSAKA Yoshitaka); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 瀧口 優 (TAKIGUCHI Yuu); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1 1 2 6番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 杉山 貴浩 (SUGIYAMA Takahiro); 〒4358558 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 Shizuoka (JP).

(74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外 (HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二

(54) Title: LIGHT-EMITTING DEVICE AND PRODUCTION METHOD FOR SAME

(54) 発明の名称: 発光装置およびその製造方法

[図25]



AA X-Y plane
BB Output light

(57) Abstract: The present embodiment relates to a light-emitting device that comprises a structure that can reduce one power of ± 1 order light relative to the other power. The light-emitting device comprises a substrate, a light-emitting part, and a phase modulation layer that includes a base layer and a plurality of different-refractive-index regions. Each of the plurality of different-refractive-index regions has a three-dimensional shape that is defined by a first surface that faces the substrate, a second surface that is positioned on the opposite side of the first surface from the substrate, and a side



WO 2019/111786 A1

丁目1番1号丸の内 M Y P L A Z A
(明治安田生命ビル) 9階 創英国際特
許法律事務所 Tokyo (JP).

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

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

surface. The first surface, the second surface, and/or the side surface of the three-dimensional shape includes a portion that is inclined relative to a principal plane.

(57) 要約: 本実施形態は、±1次光のうち一方のパワーを他方のパワーに対して低減可能な構造を備えた発光装置等に関する。当該発光装置は、基板と、発光部と、基本層および複数の異屈折率領域を含む位相変調層と、を備える。複数の異屈折率領域のそれぞれは、基板に対面する第1面、第1面に対して基板とは反対側に位置する第2面、および、側面により規定される立体形状を有する。該立体形状において、第1面、第2面、および側面の少なくとも何れかは、主面に対して傾斜した部分を含む。

明 細 書

発明の名称：発光装置およびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、発光装置およびその製造方法に関するものである。

背景技術

[0002] 特許文献1には、発光装置としての半導体発光素子に関する技術が記載されている。この半導体発光素子は、活性層と、該活性層を挟む一对のクラッド層と、該活性層に光学的に結合した位相変調層と、を備える。位相変調層は、基本層と、それぞれが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。位相変調層の厚み方向をZ軸方向とするXYZ直交座標系が設定され、更に、該位相変調層の設計面に相当するX-Y平面内において格子間隔aの仮想的な正方格子が設定された場合、異屈折率領域それぞれは、各重心位置が仮想的な正方格子における格子点（異屈折率領域の何れかに対応付けられた格子点）から距離rだけずれるように配置されている。距離rは $0 < r \leq 0.3a$ を満たす。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第2016/148075号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 発明者らは、従来の発光装置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、光の位相スペクトルおよび強度スペクトルを制御することにより任意の光像を出力する発光装置が研究されている。このような発光装置の構造の1つとして、基板上に設けられた位相変調層を含む構造がある。位相変調層は、基本層と、それぞれが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。この位相変調層の厚さ方向に直交した面（設計面）上において仮想的な正方格子が設定された場合、各重心位

置それぞれが出力されるべき光像に応じて仮想的な正方格子の対応する格子点の位置からずれるよう、異屈折率領域それぞれが配置されている。このような発光装置は、S-iPM (Static-integrable Phase Modulating) レーザと呼ばれ、基板の主面に垂直な方向に対して傾斜した方向に任意形状の光像を出力する。

[0005] このような発光装置からは、1次光と、1次光とは逆向きに変調された-1次光とが出力される。1次光は、基板の主面に垂直な方向（法線方向）に対して傾斜した第1方向に所望の出力光像を形成する。-1次光は、基板の主面と交差するとともに該主面の法線方向に延びる軸線に関して上記第1方向と対称である第2方向に、上記出力光像とは回転対称である光像を形成する。しかしながら、用途によっては、1次光および-1次光のうち何れか一方の光が不要な場合がある。そのような場合、1次光および-1次光のうち不要な光を、必要な光に対して減光することが望ましい。

[0006] 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、1次光および-1次光のうち一方の光を、他方の光に対して減光することができる発光装置およびその製造方法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

[0007] 本発明に係る発光装置は、基板の主面の法線方向および該法線方向に対して傾斜した傾斜方向の少なくとも何れかの方向に光像を形成するための光を出力する発光装置であって、上述の課題を解決するための構造を備える。すなわち、当該発光装置は、主面を有する基板と、基板上に設けられた発光部と、発光部と光学的に結合された状態で基板上に設けられた位相変調層と、を備える。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有する複数の異屈折率領域と、を含む。法線方向に直交する位相変調層の設計面上において、複数の異屈折率領域は、光像を形成するための配置パターンに従って、基本層中における所定位置に配置されている。特に、複数の異屈折率領域のそれぞれは、主面に対面した第1面、該第1面に対して主面とは反対側に位置する第2面、および、第1面と前記第2面とを連絡する側面に

より規定される立体形状を有し、この立体形状において、第1面、第2面、および側面の少なくとも何れかは、主面に対して傾斜した部分を含む。なお、本明細書において、「主面に対して傾斜した面またはその一部」とは、主面との位置関係において、主面に対して平行な状態および主面に対して垂直な状態の双方が除外された、位置関係を満たす面またはその一部を意味する。

[0008] また、本発明に係る発光装置の製造方法は、上述の構造を有する発光装置の製造方法であって、一例として、基板上に基本層を設ける第1工程と、ドライエッチングにより、複数の異屈折率領域となるべき複数の空孔または凹部 (depression) を、基本層に形成する第2工程と、を含む。特に、第2工程において、ドライエッチングは、法線方向に対して傾斜した方向から基本層にエッチング反応ガスを当てる。この製造方法によれば、複数の空孔または凹部の側面が、主面に対して傾斜する。したがって、複数の異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部が主面または該主面の法線方向に対して傾斜した構成が容易に実現され得る。

発明の効果

[0009] 本発明に係る発光装置およびその製造方法によれば、1次光および-1次光のうち一方の光を、他方の光に対して減光することができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]は、本発明の第1実施形態に係る発光装置として、半導体発光素子の構成を示す斜視図である。

[図2]は、半導体発光素子の積層構造を模式的に示す図である。

[図3]は、位相変調層がクラッド層11と活性層12との間に設けられる場合を示す図である。

[図4]は、位相変調層の平面図である。

[図5]は、位相変調層における異屈折率領域の位置関係を示す図である。

[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]は、半導体発光素子の出力ビームパターンが結像して得られる光像と、位相変調層における位相分布との関係を説明するための図である。

[図8]は、球面座標からXYZ直交座標系における座標への座標変換を説明するための図である。

[図9]は、光像のフーリエ変換結果から位相角分布を求め、異屈折率領域の配置を決める際の留意点を説明するための図である。

[図10]は、半導体発光素子の製造方法における各工程を示す図である。

[図11]は、半導体発光素子から出力されるビームパターン（光像）の例を示す図と、半導体発光素子の発光面と交差し発光面に垂直な軸線を含む断面における光強度分布を示すグラフである。

[図12]は、図11(a)に示されたビームパターンに対応する位相分布を示す図と、図12(a)の部分拡大図である。

[図13]は、各方向の進行波のビームパターンの例を概念的に示す図である。この例では、X軸およびY軸に対する直線Dの傾斜角を 45° としている。

[図14]は、位相変調層の面内を進む進行波が散乱あるいは反射する様子を示す図である。

[図15]は、第2実施形態に係る発光装置として、半導体発光素子の断面構造を示す図である。

[図16]は、位相変調層がクラッド層11と活性層12との間に設けられる場合を示す図である。

[図17]は、半導体発光素子を表面側から見た平面図である。

[図18]は、異屈折率領域のX-Y平面内の形状の例を示す平面図である。

[図19]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20]は、異屈折率領域のX-Y平面内の形状の例を示す平面図である。

[図21]は、異屈折率領域のX-Y平面内の形状の例を示す平面図である。

[図22]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。
。

[図23]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。

[図24]は、異屈折率領域のZ軸に沿った断面形状の変形例を示す図である。

[図25]は、第3変形例として、半導体発光素子の断面構造を模式的に示す図である。

[図26]は、第3変形例の位相変調層の製造方法を説明するための図である。

[図27]は、第4変形例として、半導体発光素子の断面構造を模式的に示す図である。

[図28]は、第4変形例の位相変調層の製造方法を説明するための図である。

[図29]は、第5変形例に係る発光装置の構成を示す図である。

[図30]は、半導体発光素子がGaAs系化合物半導体からなる場合（発光波長940nm帯）の層構造を示す表である。

[図31]は、図30に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

[図32]は、半導体発光素子がInP系化合物半導体からなる場合（発光波長1300nm帯）の層構造を示す表である。

[図33]は、図32に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

[図34]は、半導体発光素子が窒化物系化合物半導体からなる場合（発光波長405nm帯）の層構造を示す表である。

[図35]は、図34に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

[図36]は、6層のスラブ型導波路によって導波路構造を近似する場合を説明するための断面図および屈折率分布である。

[図37]は、5層のスラブ型導波路によって導波路構造を近似する場合を説明するための断面図および屈折率分布である。

[図38]は、6層のスラブ型導波路において、光導波路層に関する3層スラブ構造を示す断面図および屈折率分布である。

[図39]は、6層のスラブ型導波路において、コンタクト層に関する3層スラブ構造を示す断面図および屈折率分布である。

[図40]は、5層のスラブ型導波路において、光導波路層に関する3層スラブ構造を示す断面図および屈折率分布である。

[図41]は、5層のスラブ型導波路において、コンタクト層に関する3層スラブ構造を示す断面図および屈折率分布である。

[図42]は、クラッド層11、光導波路層31、およびクラッド層13からなる3層スラブ構造を示す断面図とその屈折率分布である。

[図43]は、半導体発光素子がGaAs系化合物半導体からなる場合の5層スラブ構造の例を示す表である。

[図44]は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層11の屈折率 n_{clad} を示す表と、下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[図45]は、式(1)および式(2)によって示される光導波路層の規格化導波路幅 V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図46]は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層11の屈折率 n_{clad} を示す表と、上限値の計算結果を示す表である。

[図47]は、式(5)および式(6)によって示されるコンタクト層の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図48]は、図43に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

[図49]は、半導体発光素子がInP系化合物半導体からなる場合の6層スラブ構造の例を示す表である。

[図50]は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層11の屈折率 n_{clad} を示す表と、下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[図51]は、式(1)および式(2)によって示される光導波路層の規格化導

波路幅 V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図52]は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表と、上限値の計算結果を示す表である。

[図53]は、式 (5) および式 (6) によって示されるコンタクト層の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図54]は、図 4 9 に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

[図55]は、半導体発光素子が窒化物系化合物半導体からなる場合の 6 層スラブ構造の例を示す表である。

[図56]は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表と、下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[図57]は、式 (1) および式 (2) によって示される光導波路層の規格化導波路幅 V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図58]は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表と、上限値の計算結果を示す表である。

[図59]は、式 (5) および式 (6) によって示されるコンタクト層の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係を示すグラフである。

[図60]は、図 5 5 に示された層構造を備える半導体発光素子の屈折率分布およびモード分布である。

発明を実施するための形態

[0011] [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をそれぞれ個別に列挙して説明する。

[0012] (1) 本実施形態に係る発光装置は、主面の法線方向および該法線方向に対して傾斜した傾斜方向の少なくとも何れかの方向に光像を形成する光を出力する発光装置であって、1次光および-1次光のうち一方の光を、他方の

光に対して減光するための構造を備える。すなわち、当該発光装置は、その一態様として、主面を有する基板と、基板上に設けられた発光部と、発光部と光学的に結合された状態で基板上に設けられた位相変調層と、を備える。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有する複数の異屈折率領域と、を含む。法線方向に直交する位相変調層の設計面上において、複数の異屈折率領域は、光像を形成するための配置パターンに従って、基本層中における所定位置に配置されている。

[0013] 特に、当該発光装置において、複数の異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部は、主面に対して傾斜している。具体的には、複数の異屈折率領域のそれぞれは、主面に対面した第1面、該第1面に対して主面とは反対側に位置する第2面、および、第1面と前記第2面とを連絡する側面により規定される立体形状を有する。この場合、複数の異屈折率領域それぞれの立体形状において、第1面、第2面、および側面の少なくとも何れかは、主面に対して傾斜した部分を含む。この傾斜部分は、対象面の全体であってもよく、また、一部領域であってもよい。なお、「主面に対して傾斜した部分（面全体または面の一部）」には、主面または法線方向に対して直交する部分、および、主面および該主面の法線方向に平行な部分の何れも含まれない。換言すれば、主面を基準とした場合、該主面に対して平行な部分および該主面に対して垂直な部分の双方が、「主面に対して傾斜した部分」から除外される。

[0014] 上述のように、各異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部が、主面および該主面の法線方向に対して傾斜している場合、主面と平行な面（進行面）に沿って位相変調層内を進む光は、界面の少なくとも一部において該進行面と交差する方向に散乱あるいは反射される。このとき、進行面上において互いに逆向きに進む2つの光（1次光および-1次光）には、互いに異なる向きへの散乱の大きさに差が生じるか、あるいは、互いに異なる向きへの反射の大きさに差が生じる。すなわち、1次光（または-1次光）は基板に向けて強く散乱（あるいは反射）され、-1次光（または1次光）

は基板とは反対側に向けて強く散乱（あるいは反射）される。1次光を主要成分として含む光と-1次光を主要成分として含む光とでは、装置外部へ出力されるまでの光路が異なるので、光路が長くなる方の光は、光路が短くなる方の光と比較してより減衰する。故に、当該発光装置によれば、1次光および-1次光のうち一方の光を、他方の光に対して減光することができる。なお、1次光と-1次光には、上記のように位相変調層内の進行面（主面に対して平行な面）上において互いに逆向きに進む光に起因する成分と、単一方向に進む光に起因する成分（位相変調方式（異屈折率領域の位置の決定方法）や位相変調量（異屈折率領域のシフト量）が少ないこと等によって、理想的な位相分布と実際の光波に対して生じる位相分布との差によって生じる）の2つが考えられる。ただし、本明細書では、前者の成分（互いに逆向きに進む光成分の一方）を抑制するものとする。

[0015] （2）本実施形態の一態様として、複数の異屈折率領域それぞれは、前記基本層と、前記基本層に接触している1またはそれ以上の層（例えば、クラッド層や活性層など）と、により規定される密閉空間であってもよい。なお、異屈折率領域となるべき密閉空間には、アルゴンなどの不活性ガス、窒素、水素または空気が封入されていてもよい。位相変調層の設計面上において、複数の異屈折率領域それぞれは、該設計面上の第1方向に沿った幅が第1方向と交差する第2方向に沿って徐々に減少していく平面形状を有するのが好ましい。この場合、位相変調層上に別の半導体層（例えばクラッド層）を再成長させる際に、該半導体層と異屈折率領域との界面が、基板の主面に対して傾斜する。したがって、複数の異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部が主面に対して傾斜している構成を、容易に実現できる。また、本実施形態の一態様として、複数の異屈折率領域それぞれが密閉空間である場合において、第1面の少なくとも一部は、第2面に対して傾斜していてもよい。このような第1面と第2面との位置関係が満たされた状態で、側面は、主面に対して傾斜した部分（傾斜部）を含んでもよい。

[0016] （3）複数の異屈折率領域の配置の一例としては、例えば、位相変調層の

厚さ方向（法線方向に一致）に垂直な面（位相変調層の設計面）上に仮想的な正方格子が設定された場合に、複数の異屈折率領域それぞれの重心位置が、仮想的な正方格子の対応する格子点を通る直線であって正方格子に対して傾斜する直線上に配置される。この時、異屈折率領域それぞれの重心と対応する格子点との距離が光像に応じて個別に設定される。このような構造によれば、上記特許文献1に記載された構造（各異屈折率領域の重心が各格子点周りに光像に応じた回転角度を有する構造）と同様に、基板の主面の法線方向に対して傾斜した傾斜方向に、任意形状の光像を形成する光が出力され得る。

[0017] より具体的には、本実施形態の一態様として、位相変調層の設計面上において、複数の異屈折率領域それぞれは、仮想的な正方格子の何れかの格子点に1対1対応するよう、配置される。ただし、全ての格子点に対して対応する異屈折率領域が割り当てられる必要はない。そのため、本明細書では、仮想的な正方格子を構成する格子点のうち何れかの異屈折率領域が対応付けられている格子点を、「有効格子点」と記す。このように規定される複数の有効格子点において、任意の特定格子点と該特定格子点に対応付けられた特定異屈折率領域の重心とを結ぶ線分は、特定格子点に対して最短距離で隣接する複数の周辺格子点と該複数の周辺格子点にそれぞれ対応付けられた複数の周辺異屈折率領域の重心とを結ぶ線分それぞれに対して平行であるのが好ましい。

[0018] 更には、本実施形態の一態様として、複数の有効格子点において、任意の特定格子点と該特定格子点に対応付けられた特定異屈折率領域の重心とを結ぶ線分は、特定格子点を除く残りの有効格子点と該残りの有効格子点にそれぞれ対応付けられた残りの異屈折率領域とを結ぶ線分それぞれに対して平行であってもよい。この場合、異屈折率領域それぞれの重心配置の設計を容易に行うことができる。また、傾斜角度（格子点を始点とする線分のうち正方格子に平行な線分の何れかと該格子点を通る上記直線とのなす角度）は、 0° 、 90° 、 180° および 270° を除く角度であってもよい。更に、傾

斜角度は、 45° 、 135° 、 225° または 315° であってもよい。このような角度設定により、正方格子に沿って進む4つの基本波（正方格子に沿ったX軸およびY軸を設定した場合、X軸正方向に進む光、X軸負方向に進む光、Y軸正方向に進む光、およびY軸負方向に進む光）が、光像に均等に寄与することができる。なお、上記傾斜角度が 0° 、 90° 、 180° 、または 270° のとき、上記直線は正方格子のX軸またはY軸に対応する。例えば傾斜角度が 0° または 180° で上記直線がX軸に沿う場合、4つの基本波のうちY軸方向にて対向する2つの進行波は位相変調を受けないため、信号光へ寄与しない。また、上記傾斜角度が 90° または 270° で上記直線がY軸に沿う場合、X軸方向にて対向する2つの進行波が信号光へ寄与しない。このため、傾斜角度が 0° 、 90° 、 180° 、または 270° である場合、信号光の生成効率が低下してしまう。

[0019] (4) 本実施形態の一態様として、発光部は、基板上に設けられた活性層であるのが好ましい。この場合、発光部と位相変調層とが容易に光結合できる。

[0020] (5) 本実施形態に係る発光装置の製造方法は、上述のような構造を備えた発光装置を製造する。具体的に、当該製造方法は、その一態様として、基板上に基本層を設ける第1工程と、ドライエッチングにより、複数の異屈折率領域となるべき複数の空孔または凹部を、基本層に形成する第2工程と、を含む。特に、第2工程において、ドライエッチングは、基板の主面の法線方向に対して傾斜した方向から基本層にエッチング反応ガスを当てる。この製造方法によれば、複数の空孔または凹部の側面が、基板の主面の法線方向に対して傾斜する。したがって、複数の異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部が主面または該主面の法線方向に対して傾斜した構成が容易に実現され得る。

[0021] (6) また、本実施形態に係る発光装置の製造方法は、その一態様として、基板上に基本層を設ける第1工程と、ドライエッチングにより、複数の異屈折率領域となるべき複数の空孔または凹部を、基本層に形成する第2工程

と、基本層に形成された複数の空孔または凹部の開口部分を塞ぐ蓋層を、該基本層上に形成する第3工程と、を含んでもよい。この場合、第3工程において、蓋層を形成するための原料ガスは、基板の主面の法線方向に対して傾斜した方向から基本層に当てられるのが好ましい。この製造方法によれば、第3工程において、複数の空孔または凹部の開口部分を覆う蓋層の面が、基板の主面に対して傾斜する。したがって、複数の異屈折率領域とその周囲の層との界面の少なくとも一部が主面または該主面の法線方向に対して傾斜している構成が、容易に実現され得る。

[0022] (7) 本実施形態の一態様として、複数の空孔または凹部を形成するためのエッチング反応ガスが供給される方向は、原料ガスが供給される方向と異なってもよい。

[0023] 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。

[0024] [本願発明の実施形態の詳細]

以下、本実施形態に係る発光装置およびその製造方法の具体的な構造を、添付図面を参照しながら詳細に説明する。なお、本発明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符号を付して重複する説明を省略する。

[0025] 以下、添付図面を参照しながら本発明による発光装置およびその製造方法の実施の形態を詳細に説明する。なお、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。

[0026] (第1実施形態)

図1は、本発明の第1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。なお、半導体発光素子1Aの中心を通り半導体発光素子1Aの厚さ方向に延びる軸をZ軸とするXYZ直交座標系を定義する。半導体発光素子1Aは、X-Y平面に沿った定在波を形成し、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、後述するように、半導体基板10の主面10aに垂直な方向（すなわちZ軸方向）またはこれに対して傾斜する方向、或いはその両方に二次元的な任意形状の光像を出力する。

[0027] 図2は、半導体発光素子1Aの積層構造を模式的に示す図である。図1および図2に示されたように、半導体発光素子1Aは、半導体基板10の主面10a上に設けられた発光部としての活性層12と、主面10a上に設けられて活性層12を挟む一对のクラッド層11、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、もしくは窒化物系半導体といった化合物半導体からなる。クラッド層11のエネルギーバンドギャップ、およびクラッド層13の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の厚さ方向は、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。

[0028] 半導体発光素子1Aは、活性層12と光学的に結合された位相変調層15Aを更に備える。本実施形態において、位相変調層15A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、クラッド層11とクラッド層13の間に、光ガイド層が設けられてもよい。位相変調層15Aの厚さ方向は、Z軸方向と一致する。

[0029] 図3に示されたように、位相変調層15Aは、クラッド層11と活性層12との間に設けられてもよい。必要に応じて、クラッド層11とクラッド層13の間に、光ガイド層が設けられてもよい。

[0030] 図2に示されたように、位相変調層15Aは、基本層15aと、該基本層15a内に存在する複数の異屈折率領域15bと、を含む。基本層15aは、第1屈折率媒質からなり、複数の異屈折率領域15bそれぞれは、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。本実

施形態の異屈折率領域 15 b は、基本層 15 a 内に設けられた凹部で規定される。凹部内には、アルゴン、窒素、水素といった不活性ガスまたは空気が封入されてもよい。なお、異屈折率領域 15 b は、基本層 15 a 内に設けられた空孔であってもよい。また、複数の異屈折率領域 15 b は、略周期構造を含んでいる。位相変調層 15 A の実効屈折率を n とした場合、位相変調層 15 A が選択する波長 λ_0 ($= a \times n$ 、 a は格子間隔) は、活性層 12 の発光波長範囲に含まれている。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 を選択して、外部に出力することができる。位相変調層 15 A 内に入力された光は、位相変調層 15 A 内において異屈折率領域 15 b の配置に応じ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ービームとして、半導体発光素子 1 A の裏面から外部に出力される。

[0031] 各異屈折率領域 15 b は、基本層 15 a との屈折率界面、およびクラッド層 13 との屈折率界面を有する。そして、各異屈折率領域 15 b とその周囲の層との屈折率界面の少なくとも一部（各異屈折率領域 15 b の立体形状を規定する面の少なくとも一部）は、主面 10 a（ $X-Y$ 平面に平行な面）および主面 10 a の法線方向（ Z 軸方向）に対して傾斜している。

[0032] 本実施形態では、各異屈折率領域 15 b の底面（主面 10 a に対面した第 1 面）および側面が、基本層 15 a との屈折率界面を構成している。各異屈折率領域 15 b の上面（第 1 面に対して主面 10 a とは反対側に位置する第 2 面）は、クラッド層 13 との屈折率界面を成している。各異屈折率領域 15 b の底面は、位相変調層 15 A の厚さ方向と垂直である（ $X-Y$ 平面に対して平行）。また、各異屈折率領域 15 b の側面は、主面 10 a に垂直な方向（ Z 軸方向）に沿っている。一方、各異屈折率領域 15 b の上面（すなわち、クラッド層 13 との屈折率界面）の一部または全体は、主面 10 a（ $X-Y$ 平面に対して平行）および主面 10 a に垂直な方向（ Z 軸方向）に対して傾斜している。上面の傾斜方向は、複数の異屈折率領域 15 b において互いに揃っている。このような上面の形状は、クラッド層 13 の一部が異屈折率領域 15 b の凹部内に入り込むか、または、異屈折率領域 15 b の一部が

クラッド層 13 に入り込むことにより実現される。

- [0033] 半導体発光素子 1A 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 10b 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 とオーミック接触しており、電極 17 は半導体基板 10 とオーミック接触している。更に、電極 17 は開口 17a 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 10b のうち電極 17 以外の部分 (開口 17a 内を含む) は、反射防止膜 19 によって覆われている。開口 17a 以外の領域にある反射防止膜 19 は取り除かれてもよい。
- [0034] 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 内で光が発生する。こ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。
- [0035] 活性層 12 から出力された光は、位相変調層 15A の内部に入り、位相変調層 15A 内に形成された格子構造に応じた所定のモードを形成する。位相変調層 15A から出力されたレーザ光は、直接に、裏面 10b から開口 17a を通って半導体発光素子 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のちに、裏面 10b から開口 17a を通って半導体発光素子 1A の外部へ出力される。このとき、レーザ光に含まれる 0 次光は、主面 10a に垂直な方向 (法線方向) へ出力される。これに対し、レーザ光に含まれる信号光 (1 次光および -1 次光) は、主面 10a に垂直な方向およびこれに対して傾斜した方向を含む二次元的な任意方向へ出力される。所望の光像を形成するのは信号光である。
- [0036] 一例として、半導体基板 10 は GaAs 基板であり、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

。具体的には、例えば、クラッド層11はAlGaAsからなる。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からなり、異屈折率領域15bは凹部または空孔である。クラッド層13はAlGaAsからなり、コンタクト層14はGaAsからなる。

[0037] 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、これ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。また、GaAsに原子半径の大きなInを混入させてInGaAsとすると、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のAl組成比は、活性層12の障壁層（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に設定される（例えば、0.4）。活性層12の障壁層のAl組成比は例えば0～0.3に設定される（例えば、0.15）。

[0038] なお、半導体発光素子1Aから出力される、光像に相当するビームパターンには、網目状の暗部を有するノイズ光が重畳することがある。発明者らの研究によれば、この網目状の暗部を有するノイズ光は、半導体発光素子1Aの内部での積層方向の高次モードに起因する。ここで、積層方向の基本モードとは、活性層12を含みクラッド層11とクラッド層13で挟まれた領域に亘って1つのピークが存在する強度分布を有するモードを意味する。また、高次モードとは、2以上のピークが存在する強度分布を有するモードを意味する。なお、基本モードの強度分布のピークが活性層12近傍に形成されるのに対し、高次モードの強度分布のピークはクラッド層11、クラッド層13、コンタクト層14などにも形成される。また、積層方向のモードとしては導波モードと漏れモードとが存在するが、漏れモードは安定して存在しない。そこで、以下の説明では導波モードのみに着目する。また、導波モードには、X-Y平面に沿った方向に電界ベクトルが存在するTEモードと、

X-Y平面に垂直な方向に電界ベクトルが存在するTMモードとがあるが、ここではTEモードのみに着目する。活性層12とコンタクト層との間のクラッド層13の屈折率が、活性層12と半導体基板との間のクラッド層11の屈折率よりも大きい場合に、上述のような高次モードが顕著に生じる。通常、活性層12およびコンタクト層14の屈折率は、各クラッド層11、13の屈折率よりも格段に大きい。したがって、クラッド層13の屈折率がクラッド層11の屈折率よりも大きい場合、クラッド層13にも光が閉じ込められ、導波モードが形成される。これによって高次モードが生じる。

[0039] 本実施形態の半導体発光素子1Aにおいて、クラッド層13の屈折率は、クラッド層11の屈折率以下である。これにより、上述のような高次モードの発生が抑制され、ビームパターンに重畳される網目状の暗部を有するノイズ光が低減され得る。

[0040] ここで、活性層12を含む光導波路層の好適な厚さについて説明する。前提として、位相変調層15Aの屈折率がクラッド層11の屈折率より小さい場合、光導波路層が活性層12のみを含むものとして（光導波路層はクラッド層11、クラッド層13、および位相変調層15Aは含まない）、このような光導波路層と、該光導波路層に隣接する上下の2層とからなる3層スラブ導波構造とみなす。一方、位相変調層15Aの屈折率がクラッド層11の屈折率以上の場合には、光導波路層が位相変調層15Aおよび活性層12を含むものとして（クラッド層11およびクラッド層13は含まない）、このような光導波路層と、該光導波路層に隣接する上下の2層とからなる3層スラブ導波構造とみなす。なお、層厚方向の導波モードはTEモードとする。このとき、光導波路層の規格化導波路幅 V_1 とTEモードの規格化伝搬定数 b は以下の式(1)によって規定される。

[数1]

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left[\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b+a'}{1-b}} + N_1 \pi \right] \dots (1)$$

ただし、光導波路層に導波モードが形成される時（モード次数は N_1 ）、導

波モードがクラッド層 11 を経て半導体基板 10 に漏れないためには、TE モードの等価屈折率がクラッド層 11 の屈折率よりも高い必要があり、規格化伝搬定数 b が以下の式 (2) を満たす必要がある。

[数2]

$$b \geq \frac{n_{\text{clad}}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \dots (2)$$

このとき、上記式 (1) および式 (2) を満たす規格化導波路幅 V_1 の解が 1 つのみとなる範囲内であれば、光導波路層を導波するモードは単一となる。

a' , b は、それぞれ 3 層スラブ導波路における非対称パラメータと規格化伝搬定数を表し、以下の式 (3) および式 (4) をそれぞれ満たす実数である。なお、式 (3) および式 (4) 中、 n_{clad} はクラッド層 11 の屈折率、 n_1 は活性層 12 を含む光導波路層の屈折率、 n_2 は光導波路層に隣接する層のうち屈折率の高い層の屈折率、 n_3 は光導波路層に隣接する層のうち屈折率の低い層の屈折率、 n_{eff} は光導波路層と光導波路層に隣接する上下の 2 層とからなる 3 層スラブ導波路構造に対する TE モードの等価屈折率である。

[数3]

$$a' = \frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \dots (3)$$

[数4]

$$b = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \dots (4)$$

[0041] 発明者らの研究によれば、活性層 12 を含む光導波路層（高屈折率層）においても高次モードが発生することが分かった。そして、発明者らは、光導波路層の厚さおよび屈折率を適切に制御することにより、高次モードを抑制できることを見出した。すなわち、光導波路層の規格化導波路幅 V_1 の値が上述の条件を満たすことにより、高次モードの発生が更に抑制され、ビームパターンに重畳される網目状の暗部を有するノイズ光のより一層低減が可能に

なる。

[0042] コンタクト層 1 4 の好適な厚さは次の通りである。すなわち、コンタクト層 1 4 と、コンタクト層 1 4 に隣接する上下の 2 層とからなる 3 層スラブ導波路構造において、規格化導波路幅 V_2 および T E モードの規格化伝搬定数 b は以下の式 (5) によって規定される。

[数5]

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1-b}} \left[\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + \tan^{-1} \sqrt{\frac{b+a'}{1-b}} + N_2 \pi \right] \dots (5)$$

ただし、コンタクト層に導波モードが形成される時 (モード次数は N_2)、導波モードがクラッド層 1 1 を経て半導体基板 1 0 に漏れないためには、T E モードの等価屈折率がクラッド層 1 1 の屈折率よりも高い必要があり、規格化伝搬定数 b が以下の式 (6) を満たす必要がある。

[数6]

$$b \geq \frac{n_{\text{clad}}^2 - n_5^2}{n_4^2 - n_5^2} \dots (6)$$

このとき、上記式 (5) および式 (6) を満たす規格化導波路幅 V_2 が解なしの範囲内であれば、コンタクト層 1 4 を導波するモードは基本モードすら存在しなくなる。

[0043] a' 、 b は、それぞれ 3 層スラブ導波路における非対称パラメータと規格化伝搬定数を表し、以下の式 (7) および式 (8) をそれぞれ満たす実数である。なお、式 (7) および式 (8) 中において、 n_4 はコンタクト層 1 4 の屈折率、 n_5 はコンタクト層 1 4 と隣接する層のうち屈折率の高い層の屈折率、 n_6 はコンタクト層 1 4 と隣接する層のうち屈折率の低い層の屈折率、 n_{eff} はコンタクト層 1 4 および隣接する上下の 2 層からなる 3 層スラブ導波路構造に対する T E モードの等価屈折率である。

[数7]

$$a' = \frac{n_5^2 - n_6^2}{n_4^2 - n_5^2} \dots (7)$$

[数8]

$$b = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_5^2}{n_4^2 - n_5^2} \dots (8)$$

[0044] このように、コンタクト層14の厚さを適切に制御することにより、コンタクト層14に起因する導波モードの発生が抑制され、半導体発光素子に生じる高次モードの発生が更に抑制され得る。

[0045] 別の例として、半導体基板10はInP基板であり、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、例えば、クラッド層11はInPからなる。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からなり、異屈折率領域15bは凹部（空孔でもよい）である。クラッド層13はInPからなる。コンタクト層14はGaInAsPからなる。

[0046] また、更に別の例として、半導体基板10はGaN基板であり、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、例えば、クラッド層11はAlGaNからなる。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からなり、異屈折率領域15bは凹部（空孔でもよい）である。クラッド層13はAlGaNからなる。コンタクト層14はGaNからなる。

[0047] 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、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。一例として、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と同じ導電型を有する。一方、位相変調層15Aは、活性層12とクラッド層13

との間に設けられる場合、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 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ である。活性層12は、何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 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 以下である。また、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。

[0048] 半導体基板10の厚さは例えば $150 \mu\text{m}$ である。クラッド層11の厚さは例えば 2000nm である。活性層12の厚さは例えば 175nm である。位相変調層15Aの厚さは例えば 280nm である。異屈折率領域15bの深さは例えば 200nm である。クラッド層13の厚さは例えば 2000nm である。コンタクト層14の厚さは例えば 150nm である。

[0049] 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)などの誘電体単層膜、あるい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)などの誘電体層群から選択される2種類以上の誘電体層を積層した膜を用いることができる。例えば、波長λの光に対する光学膜厚で、λ/4の厚さの膜を積層する。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)などの絶縁膜である。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、これらの範囲に限定されな

い。

[0050] 図4は、位相変調層15Aの平面図である。上述のように、位相変調層15Aは、基本層15aと、異屈折率領域15bと、を含む。基本層15aは、第1屈折率媒質からなり、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、位相変調層15Aに、X-Y面に一致する位相変調層15Aの設計面上には、仮想的な正方格子が設定される。正方格子の一辺は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は、X軸に沿った複数列およびY軸に沿った複数行にわたって二次元状に設定され得る。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が、X軸に沿って並列に配列された複数列(x1~x4)およびY軸に沿って並列に配列された複数行(y1~y3)に亘って二次元状に設定される。それぞれの単位構成領域Rの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。異屈折率領域15bは、各単位構成領域R内に1つずつ設けられる。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。

[0051] なお、複数の異屈折率領域15bそれぞれの平面形状は、X-Y平面上において或る方向の幅が該方向と交差する方向に沿って徐々に狭くなる形状である。図4には、このような形状の例として、三角形形状が示されている。すなわち、或る辺から該辺と対向する頂点に向けて徐々に幅が狭くなる形状である。この三角形は、例えば二等辺三角形である。図2および図3に示されたように、本実施形態では、異屈折率領域15bと、クラッド層11および活性層12の少なくとも一方とで規定される屈折率界面が、主面10a(X-Y平面)および主面10aに対して垂直な方向(Z軸方向)に対して傾斜している。この傾斜方向は、或る辺から該辺と対向する頂点に向かう方向と一致する。この方向は、複数の異屈折率領域15bにおいて互いに揃っている。一例では、この方向とX軸方向との成す角は45°もしくは135°で

ある。

[0052] なお、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SA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 SA/a^2 として与えられる。SAはX-Y平面における異屈折率領域15bの面積であり、例えば三角形の場合には、或る一辺の長さLAおよび該一辺と対向する頂点と該一辺との距離hを用いて $SA=LA \cdot h/2$ として与えられる。正方格子の格子間隔aは、波長を等価屈折率で除算した程度であり、例えば300nm程度に設定される。

[0053] 図5は、位相変調層15Aにおける異屈折率領域15bの位置関係を示す図である。図5に示されたように、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。換言すれば、直線Dは、単位構成領域R(x, y)を規定するs軸(X軸に平行)およびt軸(Y軸に平行)の双方に対して傾斜する直線である。s軸に対する直線Dの傾斜角度(格子点を始点とするs軸の一部を基準とした傾斜角度)は θ である。傾斜角度 θ は、位相変調層15A内において一定である(位相変調層15A内の一部が一定でもよい)。また、傾斜角度 θ は、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 45^\circ$ である。または、傾斜角度 θ は、 $180^\circ < \theta < 270^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 225^\circ$ である。傾斜角度 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、s軸およびt軸によって規定される座標平面の第1象限から第3象限に跨って延びる。あるいは、傾斜角度 θ は、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 135^\circ$ である。あるいは、傾斜角度 θ は、 $270^\circ < \theta < 360^\circ$ を満たし、一例では $\theta = 315^\circ$ である。傾斜角度 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、s軸およびt軸によって規定される座標平面の第2象限から第4象限に跨って延びる。このように、傾斜角度 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。

[0054] 図 5 に示された、各異屈折率領域 $15b$ の重心 G と、単位構成領域 $R(x, y)$ の対応する格子点 $O(x, y)$ との距離 $r(x, y)$ は、出力ビームパターン（光像）に応じて異屈折率領域 $15b$ ごとに個別に設定される。すなわち、距離 $r(x, y)$ の分布は、 x （図 4 の例では $x_1 \sim x_4$ ）と y （図 4 の例では $y_1 \sim y_3$ ）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。距離 $r(x, y)$ の分布は、出力ビームパターン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のから決定される。すなわち、後述の、単位構成領域 $R(x, y)$ における位相 $P(x, y)$ が P_0 である場合には距離 $r(x, y)$ が 0 に設定され、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、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。ここで、初期位相 P_0 は任意に設定され得る。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 (9) の範囲である。

[数 9]

$$0 \leq R_0 \leq \frac{a}{\sqrt{2}} \quad \dots (9)$$

なお、出力ビームパターン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。

[0055] 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、図4に示された例と同様に、正方形の内側領域R I Nの内部に、所望のビームパターンを出力するための略周期構造が形成されている。一方、内側領域R I Nを囲む外側領域R O U T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。内側領域R I Nおよび外側領域R O U Tにおいて、仮想的に設定される正方格子の格子間隔は互いに同一(= 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できる。また、X-Y平面に平行な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。

[0056] 図7は、半導体発光素子1 Aからの出力ビームパターン(光像)と、位相変調層1 5 Aにおける距離の分布との関係を説明するための図である。詳細については後述するが、出力ビームパターンの投射範囲であるビーム投射領域を波数空間上に変換して得られる $K_x - K_y$ 平面について考える。この $K_x - K_y$ 平面を規定する K_x 軸および K_y 軸は、互いに直交するとともに、それぞれが、出力ビームパターンの投射方向を主面1 0 aの法線方向(Z軸方向)から該主面1 0 aの面内方向に振った時の該法線方向に対する角度に対応付けられる(詳細は後述)。この $K_x - K_y$ 平面上において、出力ビームパターンを含む特定領域が、それぞれが正方形形状の M_2 (1以上の整数) $\times N_2$ (1以上の整数)個の画像領域F Rで構成されるものとする。また、位相変調層1 5 Aの設計面(X-Y平面)上に設定された仮想的な正方格子が、 M_1 (1以上の整数) $\times N_1$ (1以上の整数)個の単位構成領域Rにより構成されるものとする。なお、整数 M_2 は、整数 M_1 と一致する必要はない。同様に、整数 N_2 は、整数 N_1 と一致する必要もない。このとき、 K_x 軸方向の座標成分 k_x (0以上 $M_2 - 1$ 以下の整数)と K_y 軸方向の座標成分

k_y (0以上 $N-1$ 以下の整数)とで特定される、 K_x-K_y 平面における画像領域 $F(k_x, k_y)$ それぞれを、 X 軸方向の座標成分 x (1以上 $M-1$ 以下の整数)と Y 軸方向の座標成分 y (1以上 $N-1$ 以下の整数)とで特定される単位構成領域 $R(x, y)$ に二次元逆フーリエ変換した、単位構成領域 $R(x, y)$ における複素振幅 $F(x, y)$ が、振幅項 $A(x, y)$ および位相項 $P(x, y)$ で規定される。また、図7に示されたように、座標成分 $x=1\sim M-1$ および $y=1\sim N-1$ の範囲において、単位構成領域 $R(x, y)$ の複素振幅 $F(x, y)$ における振幅項 $A(x, y)$ の分布が、 $X-Y$ 平面上における振幅分布に相当する。また、 $x=1\sim M-1$, $y=1\sim N-1$ の範囲において、単位構成領域 $R(x, y)$ の複素振幅 $F(x, y)$ における位相項 $P(x, y)$ の分布が、 $X-Y$ 平面上における位相分布に相当する。単位構成領域 $R(x, y)$ における距離 $r(x, y)$ は、 $P(x, y)$ から得られ、座標成分 $x=1\sim M-1$ および $y=1\sim N-1$ の範囲において、単位構成領域 $R(x, y)$ の距離 $r(x, y)$ の分布が、 $X-Y$ 平面上における距離分布に相当する。

[0057] なお、 K_x-K_y 平面上における出力ビームパターンの中心 Q は主面10aに対して垂直な軸線上に位置しており、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、一例として第1象限および第3象限に光像が得られる場合が示されたが、第2象限および第4象限、あるいは、全ての象限で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パターンが得られる。図7は、一例として、第3象限に文字「A」が、第1象限に文字「A」を 180° 回転したパターンが、それぞれ得られる場合について示されている。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。

[0058] 半導体発光素子1Aの出力ビームパターン(光像)は、スポット、3点以上からなるスポット群、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つで表現される設計上の光像（元画像）に対応した光像となる。ここで、出力ビームパターン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の距離 $r(x, y)$ の分布が決定される。

[0059] まず、第1の前提条件として、XYZ直交座標系において、X-Y平面上に、それぞれが正方形を有する $M1$ （1以上の整数） \times $N1$ （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。次に、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に示されるように、動径の長さ $d1$ 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 $(d1, \theta_{\text{tilt}}, \theta_{\text{rot}})$ に対して、以下の式(10)～式(12)で示される関係を満たしているものとする。なお、図8は、球面座標 $(d1, \theta_{\text{tilt}}, \theta_{\text{rot}})$ 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(13)で規定される規格化波数であってX軸に対応した K_x 軸上の座標値 k_x と、以下の式(14)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 K_x 軸に直交する K_y 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を1.0として規格化された波数を意味する。このとき、 K_x 軸および K_y 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、それぞれが正方形の $M2$ （1以上の整数） \times $N2$ （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(13)および式(14)は、例えば、以下の文献(1)に記載されている。

(1) Y. Kurosaka et al., "Effects of non-lasing band in two-dimensio

nal photonic-crystal lasers clarified using omnidirectional band structure," Opt. Express 20, 21773-21783 (2012)

[数10]

$$\xi = d \sin \theta_{\text{ilt}} \cos \theta_{\text{rot}} \quad \dots (10)$$

[数11]

$$\eta = d \sin \theta_{\text{ilt}} \sin \theta_{\text{rot}} \quad \dots (11)$$

[数12]

$$\zeta = d \cos \theta_{\text{ilt}} \quad \dots (12)$$

[数13]

$$k_x = \frac{a}{\lambda} \sin \theta_{\text{ilt}} \cos \theta_{\text{rot}} \quad \dots (13)$$

[数14]

$$k_y = \frac{a}{\lambda} \sin \theta_{\text{ilt}} \sin \theta_{\text{rot}} \quad \dots (14)$$

a : 仮想的な正方格子の格子定数

λ : 発振波長

- [0060] 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 $M/2 - 1$ 以下の整数) と K_y 軸方向の座標成分 k_y (0以上 $N/2 - 1$ 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 (1以上 $M/2$ 以下の整数) と Y 軸方向の座標成分 y (1以上 $N/2$ 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(15)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(16)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。

[数15]

$$F(x, y) = \sum_{k_x=0}^{M2-1} \sum_{k_y=0}^{N2-1} FR(k_x, k_y) \exp \left[j2\pi \left(\frac{k_x}{M2} x + \frac{k_y}{N2} y \right) \right] \quad \dots (15)$$

[数16]

$$F(x, y) = A(x, y) \times \exp[jP(x, y)] \quad \dots (16)$$

[0061] 上記第1～第4の前提条件の下、位相変調層15A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、或る座標(x, y)における位相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。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。

[0062] なお、レーザビームのフーリエ変換後の遠視野像は、単一若しくは複数のスポット形状、円環形状、直線形状、文字形状、二重円環形状、または、ラゲルガウスビーム形状などの各種の形状をとることができる。ビーム方向を制御することもできるので、半導体発光素子1Aを1次元または2次元にアレイ化することによって、例えば高速走査を電氣的に行うレーザ加工機を実現できる。なお、ビームパターンは遠方界における角度情報で表わされるものであるので、目標とするビームパターンが2次元的な位置情報で表わされているビットマップ画像などの場合には、一旦角度情報に変換し、その後

波数空間に変換した後に逆フーリエ変換を行うとよい。

[0063] 逆フーリエ変換で得られた複素振幅分布から振幅分布と位相分布を得る方法として、例えば振幅分布 $A(x, y)$ 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。

[0064] ここで、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を述べる。所望の光像である図9(a)の逆フーリエ変換で得られた複素振幅分布より計算される出力ビームパターンは図9(b)のようになる。図9(a)と図9(b)のようにそれぞれA1, A2, A3, およびA4の4つの象限に分割すると、図9(b)の出力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象限のパターンとの重畳パターンが現れる。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象限のパターンとの重畳パターンが現れる。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象限のパターンとの重畳パターンが現れる。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象限のパターンとの重畳パターンが現れる。このとき、180度回転したパターンは-1次光成分によるパターンである。

[0065] したがって、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ビームパターンを用いた場合には、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象限を180度回転したパターンが現れる。

[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ック結晶レーザに関してはスケーリング則が成り立つ。すなわち、波長が定数 α 倍となった場合には、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リング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リング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)により形成される。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℃~850℃とすることができる。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AsH₃(アルシン)、N型不純物用の原料としてSi₂H₆(ジシラン)、P型不純物用の原料としてDEZn(ジエチル亜鉛)が利用される。GaAsの成長においては、TMGとアルシンが利用されるが、TMAは利用されない。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)法により形成される。

[0068] 図10の(a)~(c)は、半導体発光素子1Aの製造方法における各工程を示す図である。まず、図10の(a)に示されたように、半導体基板10の主面10a上に、クラッド層11、活性層12、および基本層15aが、例えばMOCVD(有機金属気相成長)法を用いたエピタキシャル成長法により、順次設けられる。

[0069] 続いて、基本層15aに別のレジストが塗布され、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る。パターンが描画されたレジ

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に転写される。これにより、図10の(b)に示されたように、異屈折率領域15bとなる複数の凹部(空孔でもよい)が形成される。複数の凹部の平面形状は、上述のように、或る方向の幅が該方向と交差する方向に沿って徐々に狭くなる形状(例えば三角形状、図4を参照)である。なお、レジスト形成前にSiN層やSiO₂層がPCVD法で基本層15a上に形成される工程、これら形成された層(SiN層やSiO₂層)の上にレジストマスクが形成される工程、反応性イオンエッチング(RIE)によりSiN層やSiO₂層に微細パターンが転写される工程、レジストを除去してからドライエッチングを行う工程が順次行われてもよい。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。

[0070] 続いて、図10の(c)に示されたように、クラッド層13およびコンタクト層14が順次MOCVD法により設けられる。クラッド層13が成長する際、異屈折率領域15bとしての複数の凹部がクラッド層13により塞がれる。このとき、クラッド層13の一部が凹部内に入り込むが、凹部の平面形状に起因して、その入り込む程度が凹部内で変化する。すなわち、凹部の幅が広い部分と凹部の幅が狭い部分とでクラッド層13の入り込む程度が変化する。したがって、クラッド層13と異屈折率領域15bとの屈折率界面は、基本層15aとクラッド層13との界面に対して傾斜する。基本層15aとクラッド層13との界面は主面10aに対して平行なので、クラッド層13と異屈折率領域15bとの屈折率界面は、主面10aおよび該主面10aに垂直な方向に対して傾斜することとなる。図10(c)では、クラッド層13の一部が凹部に入り込む例が示されているが、逆に凹部がクラッド層13に入り込んでよい。なお、このような方法は、以下の文献(2)に記載されている。

(2) Kazuyoshi Hirose et al., "Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers", Nature Photonics 8, pp. 406-411 (2014)

)

[0071] その後、図2に示された電極16、17が蒸着法、スパッタ法などにより形成される。また、必要に応じて、保護膜18および反射防止膜19がスパッタ法やPCVD法などにより形成される。以上の工程を経て、本実施形態の半導体発光素子1Aが作製される。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が形成される。

[0072] なお、格子間隔 a の正方格子の場合、直交座標の単位ベクトルを x 、 y とすると、基本並進ベクトル $a_1 = ax$ 、 $a_2 = ay$ であり、並進ベクトル a_1 、 a_2 に対する基本逆格子ベクトルは $b_1 = (2\pi/a)x$ 、 $b_2 = (2\pi/a)y$ である。格子の中に存在する波の波数ベクトルが $k = nb_1 + mb_2$ (n 、 m は任意の整数)の場合に、波数 k は Γ 点に存在するが、なかでも波数ベクトルの大きさが基本逆格子ベクトルの大きさに等しい場合には、格子間隔 a が波長 λ に等しい共振モード($X-Y$ 平面内における定在波)が得られる。本実施形態では、このような共振モード(定在波状態)における発振が得られる。このとき、正方格子と平行な面内に電界が存在するようなTEモードを考えると、このように格子間隔と波長が等しい定在波状態は正方格子の対称性から4つのモードが存在する。本実施形態では、この4つの定在波状態のいずれのモードで発振した場合においても同様に所望のビームパターンが得られる。

[0073] 半導体発光素子1Aでは、上述の位相変調層15A内の定在波が所定形状を有する異屈折率領域15bによって散乱され、垂直方向(Z 軸方向)に得られる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。このため偏光板がなくとも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、一对の単峰ビーム(スポット)であるばかりでなく、上述のように、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。

[0074] 基本層15aの屈折率は3.0~3.5、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の凹部（異屈折率領域15b）の平均半径は、940nm帯の場合、例えば20nm~120nm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Z軸方向への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一次の係数で表される光結合係数 κ_1 に比例する。光結合係数については、例えば、以下の文献（3）に記載されている。

（3）K. Sakai et al., “Coupled-Wave Theory for Square-Lattice Photonic Crystal Lasers With TE Polarization”, IEEE J.Q. E. 46, 788-795 (2010)

[0075] 以上の構成を備える、本実施形態の半導体発光素子1Aによって得られる効果について説明する。本実施形態の半導体発光素子1Aでは、活性層12に光学的に結合した位相変調層15Aが、基本層15aと、基本層15a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15bと、を含む。また、位相変調層15Aの設計面上に設定された仮想的な正方格子の格子点O(x, y)を含む単位構成領域R(x, y)において、該格子点O(x, y)を通り、かつ、該正方格子の各辺（単位構成領域R(x, y)を規定するs軸およびt軸に平行）に対して傾斜する直線D上に、対応する異屈折率領域15bの重心Gが配置されている。そして、異屈折率領域15bの重心Gと、対応する格子点O(x, y)との距離r(x, y)は、光像に応じて格子点ごとに個別に設定されている。このような場合、格子点O(x, y)と重心Gとの距離に応じて、ビームの位相が変化する。故に、重心Gの位置を変更するのみで、各異屈折率領域15bから出力されるビームの位相を制御することができ、全体として形成されるビームパターンを所望の形状に制御することが可能になる。すなわち、この半導体発光素子1AはS-i-PMレーザーであり、このような構造によれば、各異屈折率領域15bの重心Gが各格子点O(x, y)周りに光像に応じた回転角度を有する従来の構造（回転方式）と同様に、半導体基板10の主面10aに垂直な方向（法線方向）に対して傾斜した方向に、任意形状の光像を形成する光を出力することができ

る。

[0076] ここで、図11(a)は、半導体発光素子1Aから出力されるビームパターン(光像)の例を示す。図11(a)の中心は、半導体発光素子1Aの発光面と交差し発光面に垂直な軸線に対応する。また、図11(b)は、該軸線を含む断面における光強度分布を示すグラフである。図11(b)は、FFP光学系(浜松ホトニクス製A3267-12)、カメラ(浜松ホトニクス製ORCA-05G)、ビームプロファイラ(浜松ホトニクス製Le pass-12)を用いて取得された遠視野像で、1344ドット×1024ドットの画像データの縦方向のカウントを積算し、プロットした像である。なお、図11(a)の最大カウント数を255で規格化しており、また、±1次光の強度比を明示するために、中央の0次光B0を飽和させている。図11(b)から、1次光および-1次光の強度差が容易に理解される。また、図12(a)は、図11(a)に示されたビームパターンに対応する位相分布を示す図である。図12(b)は、図12(a)の部分拡大図である。図12(a)および図12(b)においては、位相変調層15A内の各箇所における位相が濃淡によって示されており、暗部ほど位相角 0° に、明部ほど位相角 360° に近づく。ただし、位相角の中心値は任意に設定することができるので、必ずしも位相角を $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲内に設定しなくてもよい。図11(a)および図11(b)に示されたように、半導体発光素子1Aは、該軸線に対して傾斜した第1方向に出力される第1光像部分B1を含む1次光と、該軸線に関して第1方向と対称である第2方向に出力され、該軸線に関して第1光像部分B1と回転対称である第2光像部分B2を含む-1次光とを出力する。典型的には、第1光像部分B1はX-Y平面内の第1象限に現れ、第2光像部分B2はX-Y平面内の第3象限に現れる。しかしながら、用途によっては、1次光および-1次光のうち何れか一方の光が不要な場合がある。そのような場合、1次光および-1次光のうち不要な光を、必要な光に対して減光することが望ましい。

[0077] 図13は、各方向の進行波のビームパターンの例を概念的に示す図である

。この例では、s軸およびt軸に対する直線Dの傾斜角を 45° とし、各異屈折率領域15bの重心Gと、単位構成領域R(x、y)において、対応する格子点O(x、y)との距離r(x、y)の最大値 R_0 が以下の式(17)のように設定されている。

[数17]

$$R_0 = \frac{a}{\sqrt{2}} \dots (17)$$

正方格子型のS-iPMレーザの位相変調層では、X-Y平面に沿った基本的な進行波AU、AD、AR、およびALが生じる。進行波AUおよびADは、正方格子の各辺のうちY軸方向に延びる辺に沿って進む光である。進行波AUはY軸正方向に進み、進行波ADはY軸負方向に進む。また、進行波ARおよびALは、正方格子の各辺のうちX軸方向に延びる辺に沿って進む光である。進行波ARはX軸正方向に進み、進行波ALはX軸負方向に進む。この場合、互いに逆向きに進む進行波からは、それぞれ逆向きのビームパターンが得られる。例えば、進行波AUからは第2光像部分B2のみを含むビームパターンBUが得られ、進行波ADからは第1光像部分B1のみを含むビームパターンBDが得られる。同様に、進行波ARからは第2光像部分B2のみを含むビームパターンBRが得られ、進行波ALからは第1光像部分B1のみを含むビームパターンBLが得られる。言い換えると、互いに逆向きに進む進行波同士では、一方が1次光となり他方が-1次光となる。

[0078] 本実施形態の位相変調層15Aによれば、単一の進行波に対しては、1次光および-1次光の各光量に差が生じ、例えば傾斜角度 θ が 45° 、 135° 、 225° または 315° である場合には、シフト量 R_0 が上記式(9)の上限値に近づくほど、理想的な位相分布が得られる。この結果、0次光が低減され、進行波AU、AD、AR、およびALのそれぞれにおいては、1次光および-1次光の一方が選択的に低減される。そのため、互いに逆向きに進む進行波の何れか一方を選択的に低減することで、1次光および-1次光の光量に差を与えることが原理的に可能である。

[0079] ここで、図5に示された、格子点O (x、y) を通り、かつ、正方格子の各辺に対して傾斜した直線D上を異屈折率領域15bが移動する本実施形態の方式において、1次光および-1次光の何れかを選択的に低減することが可能である理由を説明する。或る位置における設計位相φ (x、y) に対して、4つの進行波の1例として図12 (a) および図12 (b) に示されたt軸 (Y軸に平行) の正の向きの進行波AUを考える。このとき、幾何学的な関係から、進行波AUに対しては、格子点Oからのずれがr・sinθ・{φ (x、y) - φ₀} / πとなるため、位相差は(2π/a) r・sinθ・{φ (x、y) - φ₀} / πなる関係となる。ここでは簡単のため傾斜角度θ = 45°、位相角φ₀ = 0° とする。異屈折率領域15bの大きさの影響が小さく無視できる場合、進行波AUに関する位相分布Φ (x、y) は、以下の式(18)で与えられる。

[数18]

$$\Phi(x, y) = \exp\left\{j\left(\frac{\sqrt{2}r}{a}\right)\phi(x, y)\right\} \dots (18)$$

この位相分布Φ (x、y) の0次光および±1次光への寄与は、exp {n Φ (x、y)} (n : 整数) で展開した場合の、n = 0およびn = ±1の成分で与えられる。ところで、下記の数式(19)によって表され、かつ、以下の式(20)の条件を満たす関数f (z) をLaurent級数展開すると、以下の式(21)のような数学公式が成り立つ。

[数19]

$$f(z) = z^c \dots (19)$$

[数20]

$$0 < |c| < 1$$

$$c = \frac{\sqrt{2}r}{a} \dots (20)$$

$$z = \exp\{j\phi(x, y)\}$$

[数21]

$$z^c = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j\pi(c-n)} \cdot \text{sinc}[\pi(c-n)] \cdot z^n \quad \dots (21)$$

ここで、 $\text{sinc}(x) = x / \sin(x)$ である。この数学公式を用いると、位相分布 $\Phi(x, y)$ を級数展開することができ、0次光および±1次光の各光量を説明することができる。このとき、上記式(21)の指数項 $\exp\{j\pi(c-n)\}$ の絶対値が1である点に注意すると、位相分布 $\Phi(x, y)$ の0次光成分の大きさは以下の式(22)で表され、1次光成分の大きさは以下の式(23)で表され、更に、-1次光成分の大きさは以下の式(24)で表される。

[数22]

$$\text{sinc}\left(\frac{\sqrt{2}\pi r}{a}\right) \quad \dots (22)$$

[数23]

$$\text{sinc} \cdot \pi \left(-1 + \frac{\sqrt{2}r}{a}\right) \quad \dots (23)$$

[数24]

$$\text{sinc} \cdot \pi \left(1 + \frac{\sqrt{2}r}{a}\right) \quad \dots (24)$$

そして、上記式(22)～(24)においては、以下の式(25)で規定される条件の場合を除いて、1次光成分以外に0次光および-1次光成分が現れる。しかしながら、±1次光成分の大きさは互いに等しくならない。

[数25]

$$r = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad \dots (25)$$

[0080] 以上の説明では、4つの進行波の1例としてt軸方向(Y軸正方向)の進行波AUについて考えたが、他の3波(進行波AD, AR, AL)について

も同様の関係が成立し、 ± 1 次光成分の大きさに差が生じる。以上の議論から、格子点Oを通り正方格子から傾斜した直線D上を異屈折率領域15bが移動する本実施形態の方式によれば、 ± 1 次光成分の光量に差を与えることが原理的に可能となる。従って、 -1 次光または1次光を低減して所望の光像（第1光像部分B1または第2光像部分B2）のみを選択的に取り出すことが原理的に可能になる。上述の図11（b）においても、1次光と -1 次光との間に強度の差が生じていることが分かる。

[0081] 本実施形態の半導体発光素子1Aでは、異屈折率領域15bとその上層（クラッド層13若しくは活性層12）との界面が、主面10aに対して傾斜している。これにより、図14に示されたように、位相変調層15A内を主面10aと平行に進む進行波AU, AD, AR, およびALは、異屈折率領域15bとその上層との界面において位相変調層15Aの設計面（X-Y平面に平行な面）と交差する方向（例えばZ軸方向）に散乱あるいは反射される。このとき、位相変調層15A内において主面10aに沿って互いに逆向きに進む2つの進行波AU, ADは、互いに異なる向きに散乱あるいは反射され、互いに分離する。同様に、位相変調層15Aの面内において互いに逆向きに進む2つの進行波AR, ALは、互いに異なる向きに散乱あるいは反射され、互いに分離する。

[0082] すなわち、1次光（または -1 次光）である進行波AU, ARは半導体基板10に向けて散乱あるいは反射され、 -1 次光（または1次光）である進行波AD, ALは半導体基板10とは反対側（電極16側）に向けて散乱あるいは反射される。したがって、1次光と -1 次光とで、装置外部に出力されるまでの光路が異なる。進行波AU, ARは、半導体基板10に向けて散乱あるいは反射されるので、そのまま半導体基板10を透過して外部へ出力され、その光路は短くなる。これに対し、進行波AD, ALは、半導体基板10とは反対側に向けて散乱あるいは反射されるので、電極16において反射して半導体基板10に至る分だけ、進行波AU, ARよりも光路が長くなる。故に、半導体における光吸収作用、電極16での不完全な反射、光伝搬

に伴う散乱などの影響によって、進行波AD、ALは進行波AU、ARと比較してより減衰する。故に、本実施形態の半導体発光素子1Aによれば、1次光および-1次光のうち一方の光を、他方の光に対して減光することができる。実験結果に対応する図11(b)においても、1次光と-1次光で強度の差が生じていることが分かる。

[0083] なお、本実施形態では、異屈折率領域15bとその上層との界面が主面10aに対して傾斜しているが、これは一例である。上述の効果は、複数の異屈折率領域15bとその周囲の層との界面のうち少なくとも一部が主面10aに対して傾斜していることによって、好適に得ることができる。

[0084] また、上述の説明では、半導体発光素子1A内での減衰によって一方の光を減光できるとしているが、半導体発光素子1A、または半導体発光素子1Aを備える発光装置は、一方の光を減衰するための構成（例えば位相変調層15Aと半導体基板10との間に設けられる光吸収層、半導体発光素子1Aの外部に設けられる光吸収部材など）を更に備えてもよい。また、一方の光が、他方の光とは逆側の表面（すなわち、活性層12に対してクラッド層13側の表面）から出力される構成であってもよい。

[0085] 更に、本実施形態のように、複数の異屈折率領域15bは凹部であり、複数の異屈折率領域15bそれぞれの平面形状は、或る方向の幅が該方向と交差する方向に沿って徐々に狭くなる形状であってもよい。これにより、位相変調層15A上に別の半導体層（例えばクラッド層13）を再成長させる際に、該半導体層と異屈折率領域15bとの界面が主面10aに対して傾斜する。従って、複数の異屈折率領域15bとその周囲の層との界面の少なくとも一部が主面10aに対して傾斜する構成を、容易に実現できる。

[0086] 本実施形態のように、正方格子に対する直線Dの傾斜角度 θ は、位相変調層15Aに設定される全ての格子点において一致していてもよい。これにより、異屈折率領域15bの重心Gの配置の設計を容易に行うことができる。また、この場合、傾斜角度 θ は 45° 、 135° 、 225° または 315° であってもよい。これにより、正方格子に沿って進む互いに直交する2波（

例えば進行波A D, A R) が、所望の光像の形成に均等に寄与することができる。さらに、傾斜角度 θ が 45° 、 135° 、 225° または 315° である場合、適切なバンド端モードを選択することによって、直線D上における電磁界の方向が一方向に揃うため、直線偏光を得ることができる。このようなモードの一例として、以下の文献(4)のFig. 3に示されているモードA、Bがある。

(4) C. Peng, et al., "Coupled-wave analysis for photonic-crystal surface-emitting lasers on air holes with arbitrary sidewalls," Optics Express Vol. 19, No. 24, pp. 24672-24686 (2011).

[0087] なお、傾斜角度 θ が 0° 、 90° 、 180° または 270° である場合には、4つの進行波A U, A D, A R, およびA Lのうち、Y軸方向またはX軸方向に進む一对の進行波が1次光(信号光)に寄与しなくなるので、信号光を高効率化することは難しい。

[0088] 更に、本実施形態のように、発光部は、半導体基板10上に設けられた活性層12であってもよい。これにより、発光部と位相変調層15Aとを容易に光結合させることができる。

[0089] (第2実施形態)

図15は、第2実施形態に係る発光装置として、半導体発光素子1Bの断面構造を示す図である。この半導体発光素子1Bは、X-Y面に沿って定在波を形成し、位相制御された平面波をZ軸方向に出力するレーザ光源であって、第1実施形態と同様に、半導体基板10の主面10aに垂直な方向(法線方向)および該法線方向対して傾斜した傾斜方向をも含む方向に、2次元の任意形状の光像を形成する光を出力する。ただし、第1実施形態の半導体発光素子1Aは半導体基板10を透過したビームパターン(光像)を裏面から出力するが、本実施形態の半導体発光素子1Bは、活性層12に対してクラッド層13側の表面からビームパターン(光像)を出力する。

[0090] 半導体発光素子1Bは、クラッド層11、活性層12、クラッド層13、コンタクト層14、位相変調層15A、および電流狭窄層21を備える。ク

ラッド層 11 は、半導体基板 10 上に設けられている。活性層 12 は、クラッド層 11 上に設けられている。クラッド層 13 は、活性層 12 上に設けられている。コンタクト層 14 は、クラッド層 13 上に設けられている。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。電流狭窄層 21 は、クラッド層 13 内に設けられている。各層 11~14、15 A の構成（好適な材料、バンドギャップ、屈折率等）は、第 1 実施形態と同様である。

[0091] 位相変調層 15 A の構造は、第 1 実施形態において説明された位相変調層 15 A の構造（図 4 および図 5 を参照）と同様である。必要に応じて、クラッド層 11 とクラッド層 13 の間に、光ガイド層が設けられてもよい。図 16 に示されたように、位相変調層 15 A が、クラッド層 11 と活性層 12 との間に設けられてもよい。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。

[0092] 半導体発光素子 1 B は、コンタクト層 14 上に設けられた電極 23 と、半導体基板 10 の裏面 10 b 上に設けられた電極 22 とを更に備える。電極 23 はコンタクト層 14 とオーミック接触しており、電極 22 は半導体基板 10 とオーミック接触している。図 17 は、半導体発光素子 1 B を電極 23 側（表面側）から見た平面図である。図 17 に示されたように、電極 23 は枠状（環状）の平面形状を有する（開口 23 a を有する）。なお、図 17 には正方形の枠状の電極 23 が例示されているが、電極 23 の平面形状には、例えば円環状など様々な形状が適用可能である。また、図 17 中に破線によって示される電極 22 の形状は、電極 23 の開口 23 a の形状と相似しており、例えば正方形もしくは円形である。電極 23 の開口 23 a の内径（開口 23 a の形状が正方形である場合は 1 辺の長さ）は、例えば $20\ \mu\text{m}$ ~ $50\ \mu\text{m}$ である。

[0093] 再び図 15 を参照する。本実施形態のコンタクト層 14 は、電極 23 と同様の平面形状を有する。すなわち、コンタクト層 14 の中央部は、エッチングにより除去され、開口 14 a となっている。コンタクト層 14 は枠状（環

状)の平面形状を有する。半導体発光素子1Bから出力される光は、コンタクト層14の開口14a、および電極23の開口23aを通過する。コンタクト層14の開口14aを光が通過することにより、コンタクト層14における光吸収を回避し、光出力効率を高めることができる。但し、コンタクト層14における光吸収を許容できる場合には、コンタクト層14は、開口14aを有せずにクラッド層13上の全面を覆っていてもよい。電極23の開口23aを光が通過することにより、電極23に遮られることなく、半導体発光素子1Bの表面側から好適に光が出力され得る。

[0094] コンタクト層14の開口14aから露出したクラッド層13の表面(若しくは、開口14aが設けられない場合にはコンタクト層14の表面)は、反射防止膜25によって覆われている。なお、コンタクト層14の外側にも反射防止膜25が設けられてもよい。また、半導体基板10の裏面10b上における電極22以外の部分は、保護膜24によって覆われている。保護膜24の材料は、第1実施形態の保護膜18と同様である。反射防止膜25の材料は、第1実施形態の反射防止膜19と同様である。

[0095] 電流狭窄層21は、電流を通過させにくい(あるいは通過させない)構造を有し、中央部に開口21aを有する。図17に示されるように、開口21aの平面形状は、電極23の開口23aの形状と相似しており、例えば正方形もしくは円形である。電流狭窄層21は、例えばA1を高い濃度で含む層が酸化されてなるA1酸化層である。あるいは、電流狭窄層21は、クラッド層13内にプロトン(H⁺)が注入されることにより形成された層であってもよい。あるいは、電流狭窄層21は、半導体基板10とは逆の導電型の半導体層と半導体基板10と同じ導電型の半導体層とが順に積層されてなる逆pn接合構造を有してもよい。

[0096] 電極22と電極23との間に駆動電流が供給されると、駆動電流は活性層12に達する。このとき、電極23と活性層12との間を流れる電流は、厚いクラッド層13において十分に拡散するとともに、電流狭窄層21の開口21aを通過する。その結果、活性層12における中央部付近に均一に電流

が拡散する。そして、活性層 1 2 内において電子と正孔の再結合が生じ、活性層 1 2 内で光が発生する。こ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 1 1 およびクラッド層 1 3 の間に効率的に閉じ込められる。活性層 1 2 から出力されたレーザ光は、位相変調層 1 5 A の内部に入り、位相変調層 1 5 A の内部の格子構造に応じた所定のモードを形成する。位相変調層 1 5 A 内から出力されたレーザ光は、クラッド層 1 3 から開口 1 4 a および開口 2 3 a を通って外部へ出力される。

[0097] 本実施形態においても、上述の第 1 実施形態と同様の効果を奏することができる。すなわち、主面 1 0 a に平行な面（進行面）に沿って位相変調層 1 5 A 内を進む進行波 A U, A D, A R, および A L は、異屈折率領域 1 5 b とその上層との界面において位相変調層 1 5 A の設計面と交差する方向（例えば Z 軸方向）に散乱あるいは反射される。このとき、位相変調層 1 5 A の進行面上において互いに逆向きに進む 2 つの進行波 A U, A D は、互いに異なる向きに散乱あるいは反射され、互いに分離する（図 1 3 を参照）。同様に、位相変調層 1 5 A の進行面上において互いに逆向きに進む 2 つの進行波 A R, A L は、互いに異なる向きに散乱あるいは反射され、互いに分離する（図 1 3 を参照）。

[0098] 進行波 A D, A L は、クラッド層 1 3 に向けて散乱あるいは反射されるので、そのままクラッド層 1 3 を透過して外部へ出力され、その光路は短くなる。これに対し、進行波 A U, A R は、クラッド層 1 3 とは反対側に向けて散乱あるいは反射されるので、電極 2 2 において反射してクラッド層 1 3 に至る分だけ、進行波 A D, A L よりも光路が長くなる。故に、半導体における光吸収作用によって、進行波 A U, A R は進行波 A D, A L と比較してより減衰する。故に、本実施形態の半導体発光素子 1 B によれば、1 次光および - 1 次光のうち一方の光を、他方の光に対して減光することができる。

[0099] （第 1 変形例）

図 1 8 (a) ~ 図 1 8 (h) 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。上述の第 1 実施形態において、異屈折率領域 1

5 bの平面形状は、或る方向の幅が、該方向と交差する方向に延びる軸AXに沿って徐々に狭くなる形状である。このような平面形状の例として、図18(a)、図18(d)、および図18(f)は、或る方向に沿った斜辺を有する直角二等辺三角形を示す。また、図18(b)および図18(g)は、或る方向に沿った上底および下底を有する台形を示す。図18(c)および図18(h)は、或る方向に沿った上底および下底を有し、上底と下底とを結ぶ線が湾曲している例を示す。図18(e)は、いずれの角も直角ではなく等辺ではない三角形を示す。これらの形状は、軸AXと直交または交差する方向に延びる辺Sを有する。

[0100] 図18(a)～図18(d)および図18(f)～図18(h)に示されたように、軸AXとX軸との成す角は 45° または 135° であってもよい。これにより、異屈折率領域15bの傾斜した屈折率界面による散乱あるいは反射作用を、進行波AU、ADと進行波AR、ALとに対して均等に及ぼすことができる。また、異屈折率領域15bの平面形状は、軸AXに関して線対称であってもよい。軸AXは、図5に示された直線D、もしくは図19に示された格子点Oと重心Gとを結ぶベクトルと一致してもよい。

[0101] 図19(a)および図19(b)は、異屈折率領域15bのX-Y平面内の形状の別の例を示す平面図である。これらの図に示されたように、軸AXは、X軸またはY軸に沿っていてもよい。これらの場合であっても、異屈折率領域15bの傾斜した屈折率界面による散乱あるいは反射作用を、進行波AU、ADまたは進行波AR、ALに対して及ぼすことができる。結果、1次光および-1次光のうち一方の光は、他方の光に対して減光され得る。

[0102] 図20(a)～図20(g)および図21(a)～図21(k)は、異屈折率領域15bのX-Y平面内の形状の例を示す平面図である。上記第1実施形態を除く他の実施形態および変形例では、X-Y平面内における異屈折率領域15bの形状は、図18(a)～図18(h)、図19(a)および図19(b)に示された形状の他、以下のような様々な形状であることができる。例えば、X-Y平面内における異屈折率領域15b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15bの平面形状と、該直線の他方側に位置する異屈折率領域15b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20（a）に示された真円、図20（b）に示された正方形、図20（c）に示された正六角形、図20（d）に示された正八角形、図20（e）に示された正16角形、図20（f）に示された長方形、および図20（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15bの形状が鏡像対称性（線対称性）を有する。この場合、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15b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。

[0103] また、 $X-Y$ 平面内における異屈折率領域15b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21（a）に示された正三角形、図21（b）に示された直角二等辺三角形、図21（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21（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21（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21（f）に示された二等辺三角形、図21（g）に示された矩形の一边が三角形形状に凹みその対向する一边が三角形形状に尖った形状（矢印形）、図21（h）に示された台形、図21（i）に示された五角形、図21（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21（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。

[0104] 図22(a)～図22(k)および図23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。本変形例では、複数の異屈折率領域15bとは別の複数の異屈折率領域15c(第2異屈折率領域)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、凹部(または空孔)であってもよく、凹部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にそれぞれ一対一で対応して設けられる。そして、異屈折率領域15cの重心と異屈折率領域15bの重心とを合成した重心Gが、格子点Oを通る直線D上に位置する。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較正領域Rの範囲に含まれる。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。

[0105] 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22(a)～図22(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22(a)および図22(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22(c)および図22(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22(e)は、異屈折率領域15b、15cが同じ形状の図形を有し、格子点毎に異屈折率領域15b、15cの重心間の距離が任意に設定された形態を示す。図22(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22(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、格子点毎に異屈折率領域15b、15cの重心間の距離が任意に設定された形態を示す。

[0106] また、図22(h)～図22(k)に示されるように、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。そして、領域15b1、15b2を合わせた重心(単一の異屈折率領

域15bの重心に相当)と、異屈折率領域15cの重心との距離が任意に設定されてもよい。また、この場合、図22(h)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22(i)に示されたように、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。また、図22(j)に示されるように、領域15b1, 15b2を結ぶ直線のX軸に対する角度に加えて、異屈折率領域15cのX軸に対する角度が任意に設定されてもよい。また、図22(k)に示されるように、領域15b1, 15b2および異屈折率領域15cが互いに同じ相対角度を維持したまま、領域15b1, 15b2を結ぶ直線のX軸に対する角度が任意に設定されてもよい。

[0107] 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、ビームパターン内におけるノイズ光およびノイズとなる0次光の発生を抑制できる。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23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。なお、図5の例に示されたように、図18(a)~図18(g)、図19(a)、図19(b)、図20(a)~図20(g)、図21(a)~図21(k)、図22(a)~図22(k)、および図23の何れの場合も各格子点を通る直線Dの中心は格子点Oに一致するように設定されればよい。

[0108] 例えば、本変形例のような位相変調層の構成であっても、Z軸に対して異屈折率領域15bの側面が傾斜していることにより、上記実施形態の効果を好適に奏することができる。

[0109] (第2変形例)

図24(a)~図24(c)は、異屈折率領域15bのZ軸に沿った断面

形状の変形例を示す図である。異屈折率領域 15 b の Z 軸に沿った断面形状は、その周囲の層との界面の少なくとも一部が主面 10 a (X-Y 平面) に対して傾斜していればよく、図 24 (a) ~ 図 24 (c) に例示された形状には限定されない。なお、図 24 (a) は、一辺が X-Y 平面に対して傾斜した三角形の断面を示す。図 24 (b) は、上底および下底が X-Y 平面に対して傾斜した台形状の断面を示す。図 24 (c) は、斜辺が X-Y 平面に対して傾斜した直角二等辺三角形の断面を示す。これらの断面形状であっても、X-Y 平面に対して傾斜した屈折率界面において各進行波 A U, A D, A R, A L が散乱あるいは反射することにより、上述した各実施形態と同様の効果を奏することができる。

[0110] (第 3 変形例)

図 25 は、第 1 実施形態の一変形例 (第 3 変形例) として、半導体発光素子 1 C の断面構造を模式的に示す図である。本変形例と第 1 実施形態との相違点は、位相変調層における異屈折率領域 15 b の断面形状である。すなわち、本変形例の位相変調層 15 A C においては、異屈折率領域 15 b の深さ方向が Z 軸に対して傾斜している。換言すれば、基本層 15 a との屈折率界面である異屈折率領域 15 b の側面が、主面 10 a の法線方向に対して傾斜している。異屈折率領域 15 b の内径は、深さ方向に略一定である。このような構成であっても、主面 10 a または該主面 10 a の法線方向に対して傾斜した屈折率界面において各進行波 A U, A D, A R, A L が散乱または反射することにより、上述した各実施形態と同様の効果を奏することができる。

[0111] 図 26 (a) ~ 図 26 (c) は、本変形例の位相変調層 15 C の製造方法を説明するための図である。まず、図 26 (a) に示されたように、半導体基板 10 の主面 10 a 上に、クラッド層 11、活性層 12、および基本層 15 a がエピタキシャル成長法により設けられる (第 1 工程)。次に、基本層 15 a 上に、電子線描画法などの微細加工技術を用いてエッチングマスクが形成される。続いて、図 26 (b) に示されたように、基本層 15 a に対す

るドライエッチングにより、異屈折率領域 15 b となるべき複数の凹部（空孔でもよい）が形成される（第 2 工程）。この第 2 工程では、Z 軸方向に対して傾斜する方向から基本層 15 a にエッチング反応ガス EG が当てられる。例えば、以下の文献（5）に示されるように、シース電界制御板等を基本層 15 a 上に配置し、電界の方向を主面 10 a の法線方向に対して傾斜させることにより、エッチング反応ガス EG の進行方向を傾斜させることができる。そして、図 26（c）に示されたように、MOCVD 法を用いてクラッド層 13 およびコンタクト層 14 の再成長が行われる。これにより、凹部はクラッド層 13 によって塞がれ、異屈折率領域 15 b（密閉空間）が形成される。その後、図 25 に示された電極 16, 17 が、蒸着法、スパッタ法などにより形成される。また、必要に応じて、保護膜 18 および反射防止膜 19 が、スパッタ等により形成される。以上の工程を経て、本変形例の半導体発光素子 1 C が作製される。なお、エッチング反応ガス EG の進行方向を傾斜させる方法は、以下の文献（6）および文献（7）にも記載されている。

(5) Shigeki Takahashi et al., “Direct creation of three-dimensional photonic crystals by a top-down approach”, *Nature Materials* 8, pp. 721-725 (2009)

(6) Masaya Nishimoto et al., “Design of photonic-crystal surface-emitting lasers with circularly-polarized beam”, *OPTICS EXPRESS* 25, p p.6104-6111 (2017)

(7) Katsuyoshi Suzuki et al., “Three-dimensional photonic crystals created by single-step multi-directional plasma etching”, *OPTICS EXPRESS* 22, pp.17099-17106 (2014)

[0112] また、本変形例においても、第 2 実施形態と同様に、表面出力型の構成とすることができる。また、異屈折率領域 15 b の配置は、第 1 実施形態の配置（図 5 を参照）とすることが可能である。また、本変形例において、異屈折率領域 15 b は、基本層 15 a とは屈折率が異なる半導体を凹部内に埋め込むことにより形成されてもよい（このとき、凹部はクラッド層 13 に入り

込んでもよい)。その場合、例えば基本層15aの凹部がエッチングにより形成され、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半導体が凹部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の凹部内に半導体を埋め込むことにより異屈折率領域15bが形成された後、更に、該凹部上に基本層15aまたは異屈折率領域15bと同一の半導体が堆積されてもよい。

[0113] (第4変形例)

図27は、第1実施形態の一変形例(第4変形例)として、半導体発光素子1Dの断面構造を模式的に示す図である。本変形例と第1実施形態との相違点は、位相変調層における異屈折率領域15bの断面形状である。すなわち、本変形例の位相変調層15ADにおいても、第5変形例と同様に、異屈折率領域15bの深さ方向がZ軸に対して傾斜している。換言すれば、基本層15aとの屈折率界面である異屈折率領域15bの側面が、主面10aまたは主面10aの法線方向に対して傾斜している。ただし、上述の第3変形例と異なり、異屈折率領域15bの内径は、深さ方向(Z軸方向)に変化している。このような構成であっても、主面10aに対して傾斜した屈折率界面において各進行波AU, AD, AR, ALが散乱あるいは反射することにより、上述した各実施形態と同様の効果を奏することができる。

[0114] 図28(a)~図28(c)は、本変形例の位相変調層15Dの製造方法を説明するための図である。まず、図28(a)に示されたように、半導体基板10の主面10a上に、クラッド層11、活性層12、および基本層15aがエピタキシャル成長法により設けられる(第1工程)。次に、図28(b)に示されたように、基本層15aに対するドライエッチングにより、異屈折率領域15bとなるべき複数の凹部(空孔でもよい)が形成される(第2工程)。続いて、図28(c)に示されたように、MBE法を用いてクラッド層13およびコンタクト層14の再成長が行われる(第3工程)。これにより、凹部はクラッド層13によって塞がれ、異屈折率領域15b(密

閉空間)が形成される。この第3工程では、少なくともクラッド層13のエピタキシャル成長の際、Z軸方向に対して傾斜する方向から基本層15aに原料ビームが当てられる。すなわち、第2工程におけるエッチング反応ガスの供給方向と、第3工程における原料ガスの供給方向と、は異なる。上記第3工程のような方法は、例えば、以下の文献(8)に記載されている。これにより、凹部の深さ方向に対して傾斜する方向から原料が飛来するので、凹部の側面に堆積した材料によって、凹部の側面も深さ方向に対して傾斜することになる。その後、図27に示された電極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、スパッタ等により形成される。以上の工程を経て、本変形例の半導体発光素子1Dが作製される。

(8) Masaya Nishimoto et al., "Fabrication of photonic crystal lasers by MBE air-hole retained growth", Applied Physics Express 7, 092703 (2014)

[0115] 本変形例においても、第3変形例と同様に、異屈折率領域15bの平面形状としては、上記各実施形態の形状(或る方向の幅が該方向と交差する方向に沿って徐々に狭くなる形状)に限られず、様々な形状が可能である(図20(a)~図20(g)、図21(a)~図21(k)、図22(a)~図22(k)、および図23を参照)。また、本変形例においても、第2実施形態と同様に、表面出力型の構成とすることができる。また、異屈折率領域15bの配置は、第1実施形態の配置(図5を参照)とすることが可能である。また、本変形例において、クラッド層13以外の半導体層(例えば、基本層15aと同じ材料からなる半導体層)が、上述したクラッド層13と同じ方法により再成長されてもよい。

[0116] (第5変形例)

図29は、第5変形例に係る発光装置1Eの構成を示す図である。この発光装置1E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とを備える。各半導体発光素子1Aの構成は、上記第1実施形態と同様である。ただし、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よい。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。

[0117] 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（適宜必要な素子を駆動することによって）、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、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。なお、本変形例において、半導体発光素子1Aは、第2実施形態の半導体発光素子1Bもしくは上記各変形例の半導体発光素子に置き換えられてもよい。

[0118] （第1実施形態の具体例）

発明者らは、活性層を含む光導波路層の厚さと屈折率、コンタクト層の厚さと屈折率について、高次モードを生じない条件を検討した。その検討過程および結果を以下に説明する。

[0119] まず、本具体例において検討対象とした半導体発光素子1Aの具体的構造について説明する。図30は、半導体発光素子1AがGaAs系化合物半導体からなる場合（発光波長940nm帯）の層構造を示す表である。図30の表には、各層の導電型、組成、層厚さ、および屈折率が示されている。な

お、層番号1はコンタクト層14、層番号2はクラッド層13、層番号3は位相変調層15A、層番号4は光ガイド層および活性層12、層番号5はクラッド層11を示す。図31は、図30に示された層構造を備える半導体発光素子1Aの屈折率分布G21aおよびモード分布G21bを示す。横軸は積層方向位置（範囲は $2.5\mu\text{m}$ ）を表す。このとき、基本モードのみが生じており、高次モードが抑制されていることが分かる。

[0120] 図32は、半導体発光素子1AがInP系化合物半導体からなる場合（発光波長1300nm帯）の層構造を示す表である。層番号1はコンタクト層14、層番号2はクラッド層13、層番号3は位相変調層15A、層番号4は光ガイド層および活性層12、層番号5はクラッド層11を示す。図33は、図32に示された層構造を備える半導体発光素子1Aの屈折率分布G22aおよびモード分布G22bを示す。横軸は積層方向位置（範囲は $2.5\mu\text{m}$ ）を表す。このとき、基本モードのみが生じており、高次モードが抑制されていることが分かる。

[0121] 図34は、半導体発光素子1Aが窒化物系化合物半導体からなる場合（発光波長405nm帯）の層構造を示す表である。層番号1はコンタクト層14、層番号2はクラッド層13、層番号3はキャリア障壁層、層番号4は活性層12、層番号5は光ガイド層、層番号6は位相変調層15A、層番号7はクラッド層11を示す。図35は、図34に示された層構造を備える半導体発光素子1Aの屈折率分布G23aおよびモード分布G23bを示す。横軸は積層方向位置（範囲は $2.5\mu\text{m}$ ）を表す。このとき、基本モードのみが生じており、高次モードが抑制されていることが分かる。

[0122] なお、上記の各構造において、位相変調層15Aのフィリングファクタ（Filling Factor：FF）は15%である。フィリングファクタとは、1つの単位構成領域R内に占める異屈折率領域15bの面積の比率である。

[0123] 次に、検討の前提条件について説明する。以下の検討では、TEモードを前提とした。すなわち、漏れモードおよびTMモードは考慮されていない。また、クラッド層11が十分に厚く、半導体基板10の影響は無視できるも

のである。また、クラッド層 1 3 の屈折率が、クラッド層 1 1 の屈折率以下である。そして、活性層 1 2 (MQW層) および光ガイド層は、特に分けて記載しない限り、平均誘電率と合計膜厚とを有する 1 つの光導波路層 (コア層) と見なされる。更に、位相変調層 1 5 A の誘電率は、フィリングファクタに基づく平均誘電率である。

[0124] 活性層 1 2 および光ガイド層からなる光導波路層の平均屈折率および膜厚の計算式は以下の通りである。すなわち、 ϵ_{core} は光導波路層の平均誘電率であり、以下の式 (26) で規定される。 ϵ_i は各層の誘電率であり、 d_i は各層の厚さであり、 n_i は各層の屈折率である。 n_{core} は光導波路層の平均屈折率であり、以下の式 (27) で規定される。 d_{core} は光導波路層の膜厚であり、以下の式 (28) で規定される。

[数26]

$$\epsilon_{core} = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^N d_i} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \cdot d_i}{\sum_{i=1}^N d_i} \quad \dots (26)$$

[数27]

$$n_{core} = \sqrt{\epsilon_{core}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \cdot d_i}{\sum_{i=1}^N d_i}} \quad \dots (27)$$

[数28]

$$d_{core} = \sum_{i=1}^N d_i \quad \dots (28)$$

[0125] また、位相変調層 1 5 A の平均屈折率の計算式は以下の通りである。すなわち、 n_{PM} は位相変調層 1 5 A の平均屈折率であり、以下の式 (29) で規定される。 ϵ_{PM} は位相変調層 1 5 A の誘電率であり、 n_1 は第 1 屈折率媒質の屈折率であり、 n_2 は第 2 屈折率媒質の屈折率であり、 FF はフィリングファクタである。

[数29]

$$n_{PM} = \sqrt{\varepsilon_{PM}} = \sqrt{n_1^2 \cdot FF + n_2^2 \cdot (1-FF)} \quad \dots (29)$$

[0126] 以下の検討では、5層もしくは6層のスラブ型導波路によって導波路構造の近似が行われた。図36(a)および図36(b)は、6層のスラブ型導波路によって導波路構造を近似する場合を説明するための断面図および屈折率分布である。図37(a)および図37(b)は、5層のスラブ型導波路によって導波路構造を近似する場合を説明するための断面図および屈折率分布である。図36(a)および図36(b)に示されたように、位相変調層15Aの屈折率がクラッド層11の屈折率より小さい場合には位相変調層15Aに導波機能がないので、6層のスラブ型導波路について近似が行われた。すなわち、光導波路層は、活性層12および光ガイド層を含む一方、クラッド層11、クラッド層13、および位相変調層15Aを含まない構造を有する。このような近似は、例えば図32および図34に示された構造（本具体例ではInP系化合物半導体、もしくは窒化物系化合物半導体）に適用されることができる。

[0127] また、図37(a)および図37(b)に示されたように、位相変調層15Aの屈折率がクラッド層11の屈折率以上の場合には位相変調層15Aに導波機能があるので、5層のスラブ型導波路について近似が行われた。すなわち、光導波路層は、位相変調層15Aおよび活性層12を含む一方、クラッド層11およびクラッド層13を含まない構造を有する。このような近似は、例えば図30に示された構造（本実施例ではGaAs系化合物半導体）に適用されることができる。

[0128] 更に、計算をより簡略化するために、半導体発光素子1Aの等価屈折率よりも屈折率が高い光導波路層およびコンタクト層それぞれの周辺部分に計算範囲が限定されている。すなわち、光導波路層および該光導波路層に隣接する上下の層によって、光導波路層に関する3層スラブ構造が規定され、コンタクト層14および隣接する上下の層によって、コンタクト層14に関する

3層スラブ構造が規定される。

[0129] 図38(a)および図38(b)は、6層のスラブ型導波路(図36(a)および図36(b)参照)における、光導波路層に関する3層スラブ構造を説明するための断面図および屈折率分布である。この場合、図38(b)の屈折率分布において実線で示された屈折率分布に基づいて、光導波路層の導波モードが計算される。また、図39(a)および図39(b)は、6層のスラブ型導波路(図36(a)および図36(b)参照)における、コンタクト層14に関する3層スラブ構造を説明するための断面図および屈折率分布である。この場合、図39(b)において実線で示された屈折率分布に基づいて、コンタクト層14の導波モードが計算される。

[0130] 図40(a)および図40(b)は、5層のスラブ型導波路(図37(a)および図37(b)参照)における、光導波路層に関する3層スラブ構造を説明するための断面図および屈折率分布である。この場合、図40(b)において実線で示された屈折率分布に基づいて、光導波路層の導波モードが計算される。また、図41(a)および図41(b)は、5層のスラブ型導波路(図37(a)および図37(b)参照)における、コンタクト層14に関する3層スラブ構造を説明するための断面図および屈折率分布である。この場合、図41(b)において実線で示された屈折率分布に基づいて、コンタクト層14の導波モードが計算される。

[0131] なお、上述の3層スラブ構造による近似の際、クラッド層11を経て半導体基板10に導波モードが漏れないようにするために、クラッド層11の屈折率が半導体発光素子1Aの等価屈折率以下であることを要する。

[0132] ここで、3層スラブ構造の解析式について説明する。図42(a)および図42(b)は、クラッド層11、光導波路層31、およびクラッド層13からなる3層スラブ構造30と、その屈折率分布とを示す。ここでは、クラッド層11の屈折率を n_2 とし、光導波路層31の屈折率を n_1 とし、クラッド層13の屈折率を n_3 とする。そして、光導波路層31の規格化導波路幅 V_1 が上記式(1)によって規定されたとき、規格化導波路幅 V_1 の解が1つのみと

なる範囲内であれば、導波モードは基本モードのみとなる。ただし、3層スラブ構造の解析式で、上記の5層スラブ構造および6層スラブ構造の導波モードを調べる際には、クラッド層11に導波モードが漏れない必要があるため、上記式(2)に示す条件も同時に満たしている必要がある。

[0133] コンタクト層14に関しては、図42(a)および図42(b)においてクラッド層11をクラッド層13に、光導波路層31をコンタクト層14に、クラッド層13を空気層に、それぞれ置き換えるとよい。そして、コンタクト層14の屈折率を n_4 とし、空気層の屈折率を n_5 とすると、コンタクト層14の規格化導波路幅 V_2 に関する上記式(5)が得られる。そして、規格化導波路幅 V_2 の解がない範囲内であれば、コンタクト層14に導波モードは存在しない。ただし、3層スラブ構造の解析式で、上記の5層スラブ構造および6層スラブ構造の導波モードを調べる際には、クラッド層11に導波モードが漏れない必要があるため、上記式(6)に示す条件も同時に満たしている必要がある。

[0134] なお、クラッド層13の膜厚を変化させて発生する導波モードを解析することで、クラッド層13の膜厚が導波モードに影響を与えないことが確認できた。

[0135] (半導体発光素子1AがGaAs系化合物半導体からなる場合)

図43は、半導体発光素子1AがGaAs系化合物半導体からなる場合の5層スラブ構造の例を示す表である。この5層スラブ構造における光導波路層(層番号4)およびコンタクト層(層番号2)の膜厚の範囲は、以下の計算によって求められる。

[0136] 図44(a)は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層11の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式(1)および式(2)によって示される光導波路層の規格化導波路幅 V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係が、図45に示されている。図45中、グラフG31a~G31fは、それぞれ、モード次数 $N=0\sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、導波モードが基本モード(すなわち $N=0$)のみと

なるのは、規格化導波路幅 V_1 の解が 1 つとなる範囲であって、範囲 H_1 の内側である。範囲 H_1 は、規格化伝搬係数 b が 0 であるときの $N = 0$ に対応する規格化導波路幅 V_1 の値を下限值とし、規格化伝搬係数 b が 0 であるときの $N = 1$ に対応する規格化導波路幅 V_1 の値を上限值とする範囲である。図 4 4 (b) は、そのような下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[0137] また、図 4 6 (a) は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式 (5) および式 (6) によって示されるコンタクト層 1 4 の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係が、図 4 7 に示されている。図 4 7 中、グラフ G 3 2 a ~ G 3 2 f は、それぞれモード次数 $N = 0 \sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、コンタクト層 1 4 に起因する導波モードが生じず、半導体発光素子 1 A の導波モードが光導波路層の基本モードのみとなるのは、規格化導波路幅 V_2 の解が無い範囲であって、範囲 H_2 の内側である。範囲 H_2 は、0 を下限値とし、規格化伝搬係数 b がクラッド層 1 1 の屈折率に対応する値 b_1 であるときの $N = 0$ に対応する規格化導波路幅 V_2 の値を上限值とする範囲である。図 4 6 (b) は、そのような上限値の計算結果を示す表である。

[0138] 図 4 8 は、図 4 3 に示された層構造を備える半導体発光素子 1 A の屈折率分布 G 2 4 a およびモード分布 G 2 4 b を示す。基本モードのみが顕著に生じており、高次モードが抑制されていることがわかる。

[0139] (半導体発光素子 1 A が I n P 系化合物半導体からなる場合)

図 4 9 は、半導体発光素子 1 A が I n P 系化合物半導体からなる場合の 6 層スラブ構造の例を示す表である。この 6 層スラブ構造における光導波路層 (層番号 5) およびコンタクト層 (層番号 2) の膜厚の範囲は、以下の計算によって求められる。

[0140] 図 5 0 (a) は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式 (1) および式 (2) によって示される光導波路層の規格化導波路幅

V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係が、図 5 1 に示されている。図 5 1 中、グラフ G 3 3 a ~ G 3 3 f は、それぞれモード次数 $N = 0 \sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、導波モードが基本モード（すなわち $N = 0$ ）のみとなるのは、規格化導波路幅 V_1 の解が 1 つとなる範囲であって、範囲 H_1 の内側である。なお、範囲 H_1 の定義は前述した G a A s 系化合物半導体の場合と同様である。図 5 0 (b) は、下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[0141] また、図 5 2 (a) は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式 (5) および式 (6) によって示されるコンタクト層 1 4 の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係は、図 5 3 に示すグラフのようになる。図 5 3 中、グラフ G 3 4 a ~ G 3 4 f は、それぞれモード次数 $N = 0 \sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、コンタクト層 1 4 に起因する導波モードが生じず、半導体発光素子 1 A の導波モードが光導波路層の基本モードのみとなるのは、規格化導波路幅 V_2 の解が無い範囲であって、範囲 H_2 の内側である。範囲 H_2 の定義は前述した G a A s 系化合物半導体の場合と同様である。図 5 2 (b) は、そのような上限値の計算結果を示す表である。

[0142] 図 5 4 は、図 4 9 に示された層構造を備える半導体発光素子 1 A の屈折率分布 G 2 5 a およびモード分布 G 2 5 b を示す。基本モードのみが顕著に生じており、高次モードが抑制されていることが分かる。

[0143] (半導体発光素子 1 A が窒化物系化合物半導体からなる場合)

図 5 5 は、半導体発光素子 1 A が窒化物系化合物半導体からなる場合の 6 層スラブ構造の例を示す表である。この 6 層スラブ構造における光導波路層（層番号 4）およびコンタクト層（層番号 2）の膜厚の範囲は、以下の計算によって求められる。

[0144] 図 5 6 (a) は、計算に用いられた屈折率 n_1 、 n_2 、および n_3 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式 (1) および式 (2) によって示される光導波路層の規格化導波路幅 V_1 と、規格化伝搬係数 b との関係が、図 5 7 に示されている。図 5 7 中、グ

ラフ G 3 5 a ~ G 3 5 f は、それぞれモード次数 $N = 0 \sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、導波モードが基本モード（すなわち $N = 0$ ）のみとなるのは、規格化導波路幅 V_1 の解が 1 つとなる範囲であって、範囲 H_1 の内側である。範囲 H_1 は、規格化伝搬係数 b が値 b_1 であるときの $N = 0$ に対応する規格化導波路幅 V_1 の値を下限値とし、規格化伝搬係数 b が値 b_1 であるときの $N = 1$ に対応する規格化導波路幅 V_1 の値を上限値とする範囲である。図 5 6 (b) は、下限値および上限値の計算結果を示す表である。

[0145] また、図 5 8 (a) は、計算に用いられた屈折率 n_4 、 n_5 、および n_6 、非対称パラメータ a' およびクラッド層 1 1 の屈折率 n_{clad} を示す表である。この場合、上記式 (5) および式 (6) によって示されるコンタクト層 1 4 の規格化導波路幅 V_2 と、規格化伝搬係数 b との関係が、図 5 9 に示されている。図 5 9 中、グラフ G 3 6 a ~ G 3 6 f は、それぞれモード次数 $N = 0 \sim 5$ の場合を示す。このグラフにおいて、コンタクト層 1 4 に起因する導波モードが生じず、半導体発光素子 1 A の導波モードが光導波路層の基本モードのみとなるのは、規格化導波路幅 V_2 の解が無い範囲であって、範囲 H_2 の内側である。範囲 H_2 の定義は前述した G a A s 系化合物半導体の場合と同様である。図 5 8 (b) は、そのような上限値の計算結果を示す表である。

[0146] 図 6 0 は、図 5 5 に示された層構造を備える半導体発光素子 1 A の屈折率分布 G 2 6 a およびモード分布 G 2 6 b を示す。基本モードのみが顕著に生じており、高次モードが抑制されていることが分かる。

[0147] 本発明による発光装置およびその製造方法は、上述の実施形態には限定されず、他に様々な変形が可能である。例えば、上記実施形態では G a A s 系、I n P 系、および窒化物系（特に G a N 系）の化合物半導体からなる半導体発光素子が例示されたが、本発明は、これら以外の様々な半導体材料からなる半導体発光素子に適用できる。

[0148] また、上記実施形態では位相変調層 1 5 A と共通の半導体基板 1 0 上に設けられた活性層 1 2 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 1 0 から分離して設けられてもよい。発光部は位相変調層

と光学的に結合され、位相変調層に光を供給する部分であれば、そのような分離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

[0149] 1 A, 1 B, 1 C, 1 D…半導体発光素子、1 E…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、10 a…主面、10 b…裏面、11, 13…クラッド層、12…活性層、14…コンタクト層、14 a…開口、15 A…位相変調層、15 a…基本層、15 b, 15 c…異屈折率領域、16, 17…電極、17 a…開口、18, 24…保護膜、19, 25…反射防止膜、21…電流狭窄層、21 a…開口、22, 23…電極、23 a…開口、AU, AD, AR, AL…進行波、AX…軸、BD, BL, BR, BU…ビームパターン、D…直線、EG…エッチング反応ガス、G…重心、O…格子点、Q…中心、R…単位構成領域、R I N…内側領域、R O U T…外側領域、 θ …傾斜角度。

請求の範囲

[請求項1] 主面の法線方向および前記法線方向に対して傾斜した傾斜方向の少なくとも何れかの方向に光像を形成する光を出力する発光装置であって、

前記主面を有する基板と、

前記基板上に設けられた発光部と、

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

前記法線方向に直交する前記位相変調層の設計面上において、前記複数の異屈折率領域は、前記光像を形成するための配置パターンに従って、前記基本層中における所定位置に配置され、

前記複数の異屈折率領域のそれぞれは、前記主面に対面した第1面、前記第1面に対して前記主面とは反対側に位置する第2面、および、前記第1面と前記第2面とを連絡する側面により規定される立体形状を有し、

前記立体形状において、前記第1面、前記第2面、および前記側面の少なくとも何れかは、前記主面に対して傾斜した部分を含む、発光装置。

[請求項2] 前記複数の異屈折率領域それぞれは、前記基本層と、前記基本層に接触している1またはそれ以上の層と、により規定される密閉空間であり、

前記位相変調層の前記設計面上において、前記複数の異屈折率領域それぞれは、前記設計面上の第1方向に沿った幅が前記第1方向と交差する第2方向に沿って徐々に減少していく平面形状を有することを特徴とする請求項1に記載の発光装置。

[請求項3] 前記複数の異屈折率領域それぞれは、前記基本層と、前記基本層に

接触している 1 またはそれ以上の層と、により規定される密閉空間であり、

前記第 1 面の少なくとも一部は、前記第 2 面に対して傾斜していることを特徴とする請求項 1 に記載の発光装置。

[請求項4]

前記位相変調層の前記設計面上において、前記複数の異屈折率領域それぞれは、仮想的な正方格子の何れかの格子点に 1 対 1 対応するよう、配置されており、かつ、

前記仮想的な正方格子を構成する格子点のうち前記複数の異屈折率領域が対応付けられている複数の有効格子点において、任意の特定格子点と前記特定格子点に対応付けられた特定異屈折率領域の重心とを結ぶ線分は、前記特定格子点に対して最短距離で隣接する複数の周辺格子点と前記複数の周辺格子点にそれぞれ対応付けられた複数の周辺異屈折率領域の重心とを結ぶ線分それぞれに対して平行であることを特徴とする請求項 1 ～ 3 の何れか一項に記載の発光装置。

[請求項5]

前記位相変調層の前記設計面上において、前記複数の異屈折率領域それぞれは、仮想的な正方格子の何れかの格子点に 1 対 1 対応するよう、配置されており、かつ、

前記仮想的な正方格子を構成する格子点のうち前記複数の異屈折率領域が対応付けられている複数の有効格子点において、任意の特定格子点と前記特定格子点に対応付けられた特定異屈折率領域の重心とを結ぶ線分は、前記特定格子点を除く残りの有効格子点と前記残りの有効格子点にそれぞれ対応付けられた残りの異屈折率領域とを結ぶ線分それぞれに対して平行であることを特徴とする請求項 1 ～ 3 の何れか一項に記載の発光装置。

[請求項6]

発光部は、前記基板上に設けられた活性層であることを特徴とする請求項 1 ～ 5 の何れか一項に記載の発光装置。

[請求項7]

請求項 1 ～ 6 の何れか一項に記載の発光装置の製造方法であって、前記基板上に前記基本層を設ける第 1 工程と、

ドライエッチングにより、前記複数の異屈折率領域となるべき複数の空孔または凹部を、前記基本層に形成する第2工程と、
を含み、

前記第2工程において、ドライエッチングは、前記法線方向に対して傾斜した方向から前記基本層にエッチング反応ガスを当てる、発光装置の製造方法。

[請求項8]

請求項1～6の何れか一項に記載の発光装置の製造方法であって、
前記基板上に前記基本層を設ける第1工程と、

ドライエッチングにより、前記複数の異屈折率領域となるべき複数の空孔または凹部を、前記基本層に形成する第2工程と、

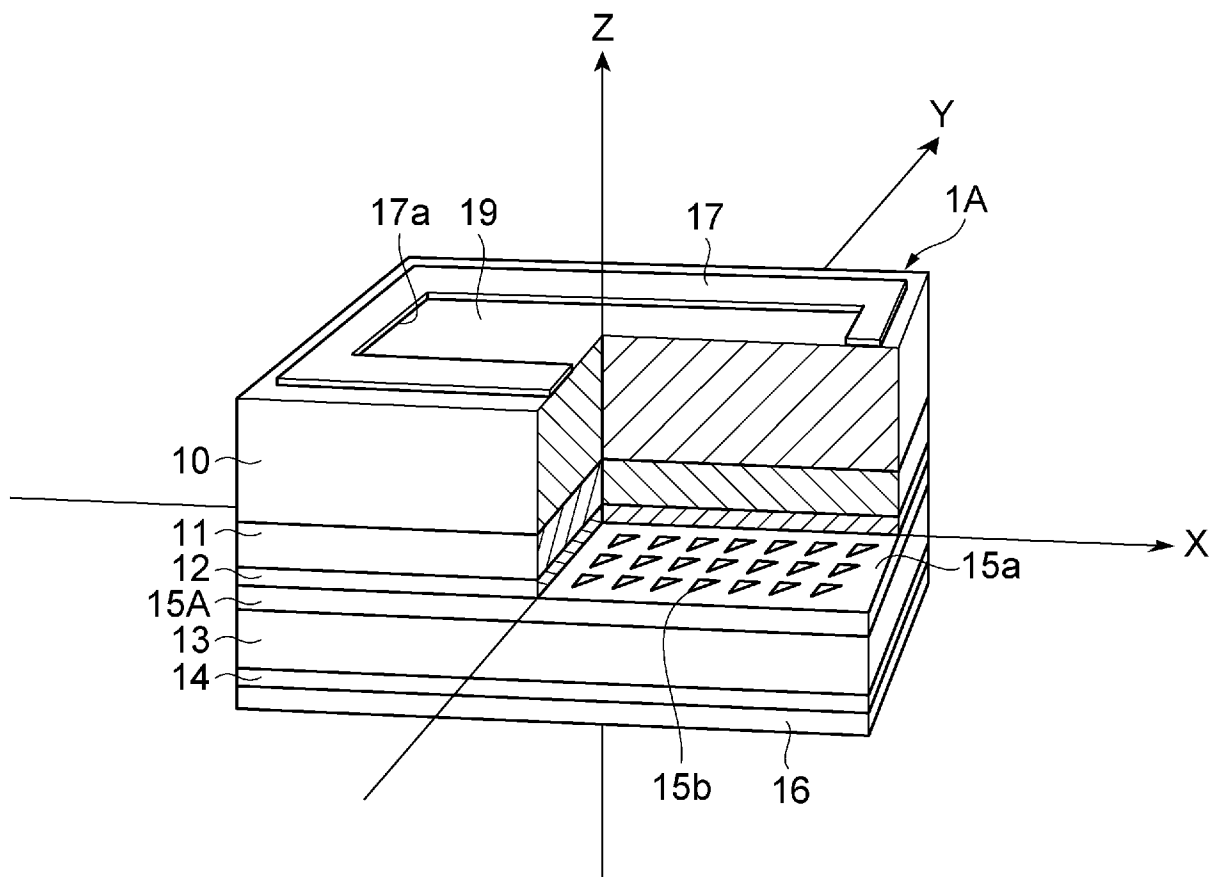
前記基本層に形成された前記複数の空孔または凹部の開口部分を塞ぐ蓋層を、前記基本層上に形成する第3工程と、
を含み、

前記第3工程において、前記蓋層を形成するための原料ガスは、前記法線方向に対して傾斜した方向から前記基本層に当てられる、発光装置の製造方法。

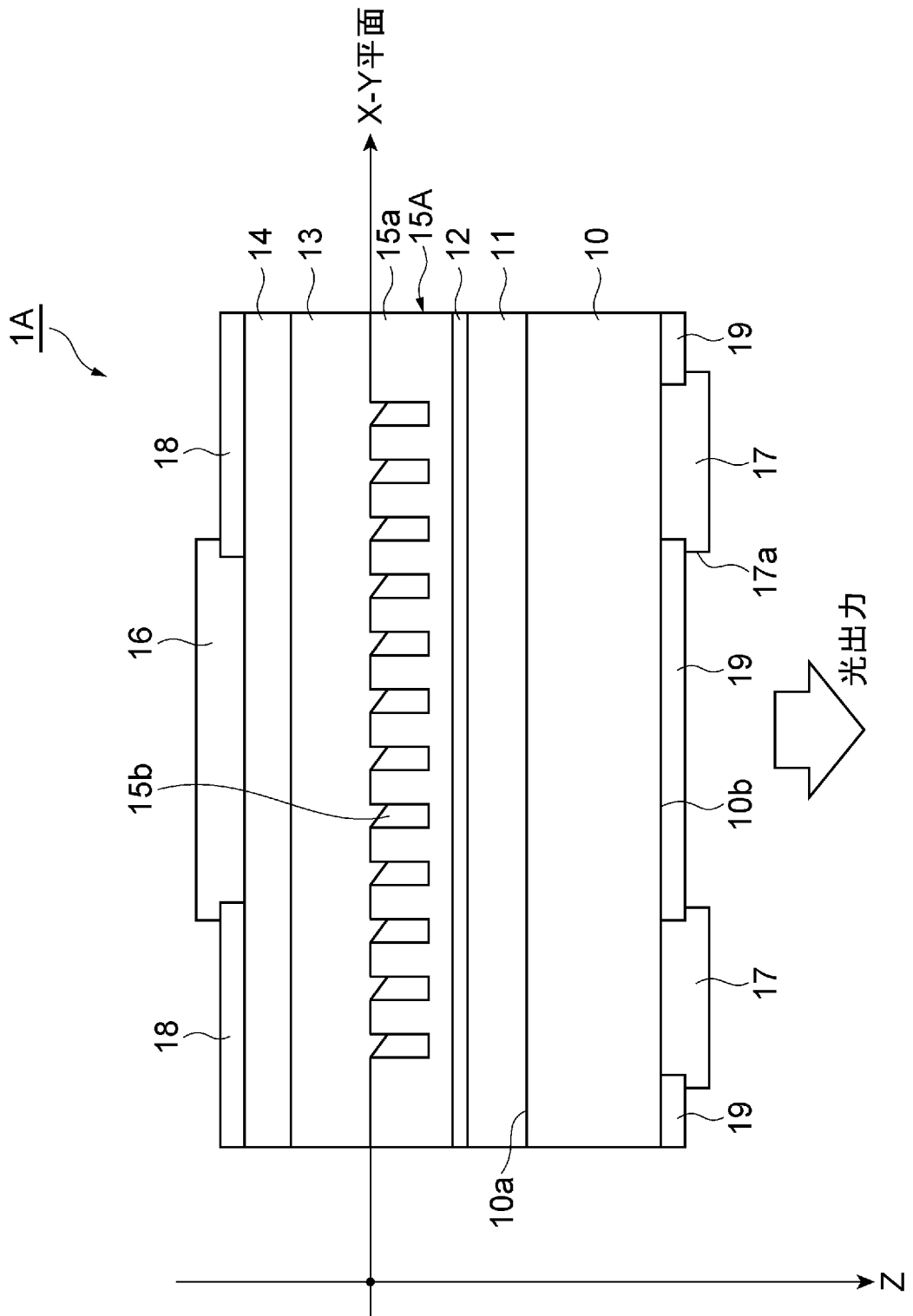
[請求項9]

前記複数の空孔または凹部を形成するためのエッチング反応ガスが供給される方向は、前記原料ガスが供給される方向と異なっていることを特徴とする請求項8に記載の発光装置の製造方法。

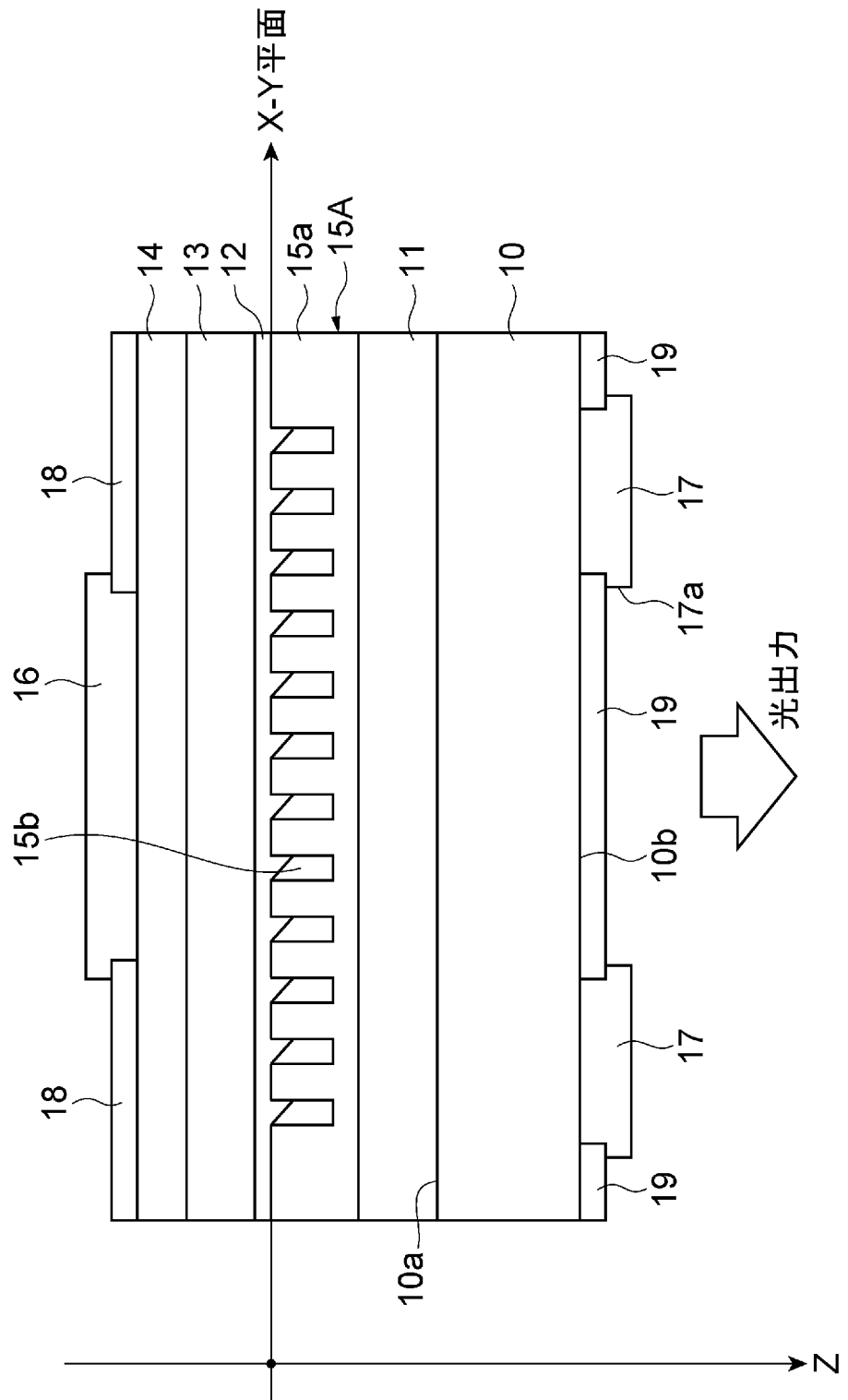
[図1]



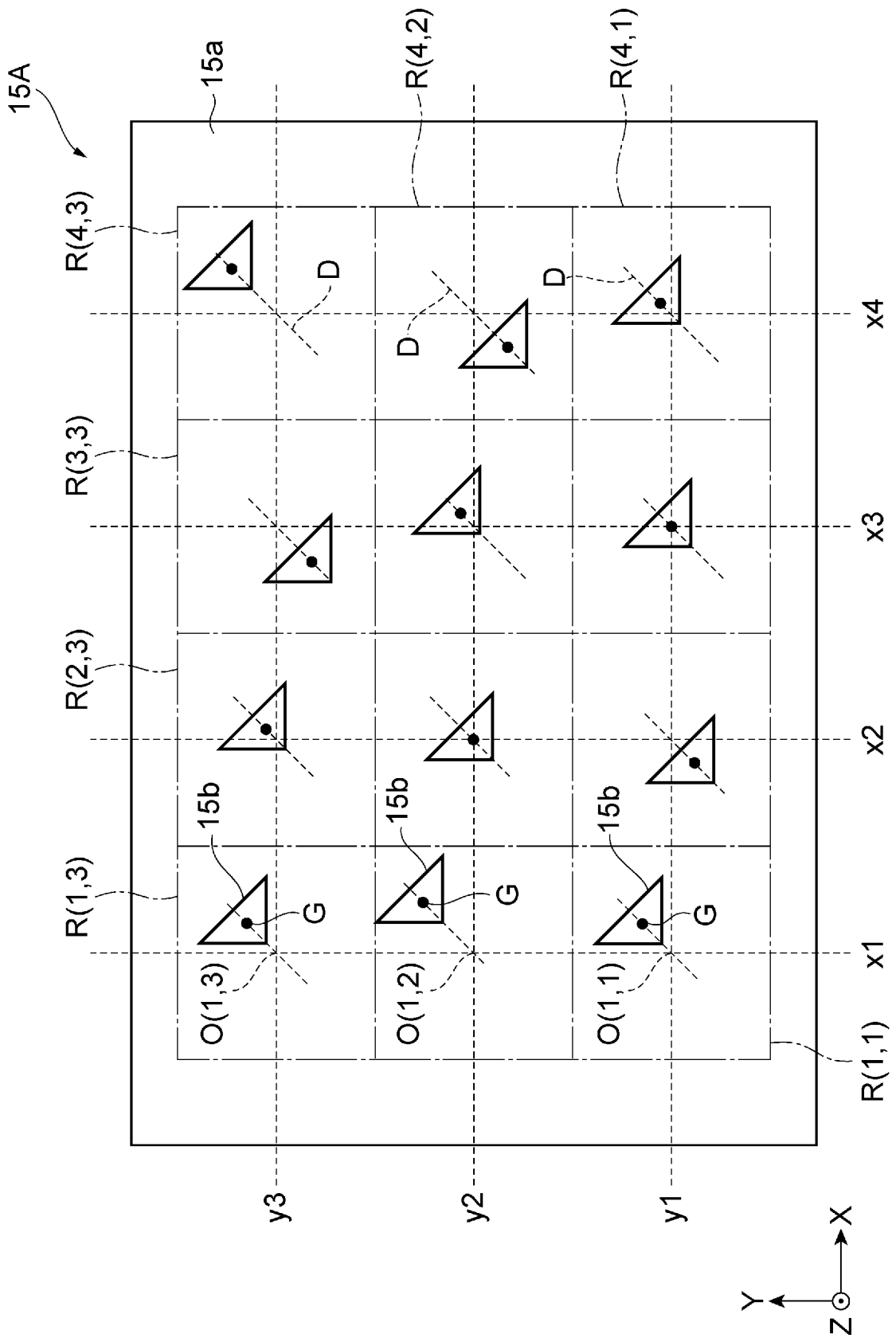
[図2]



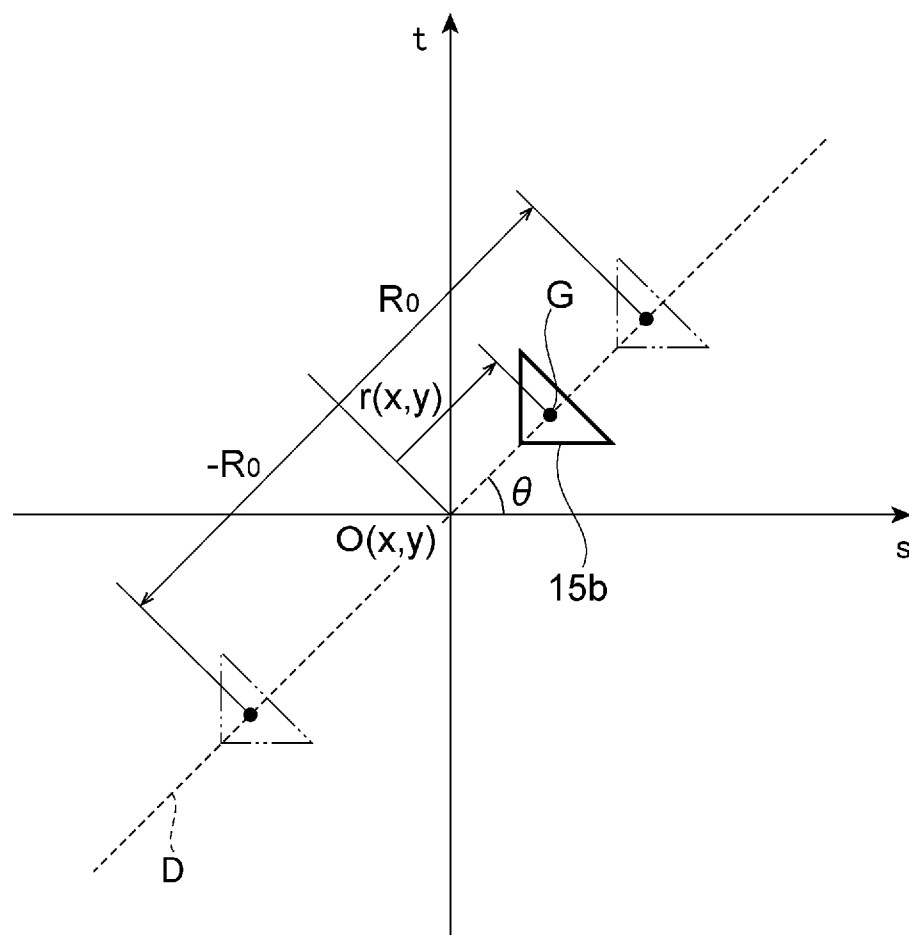
[図3]



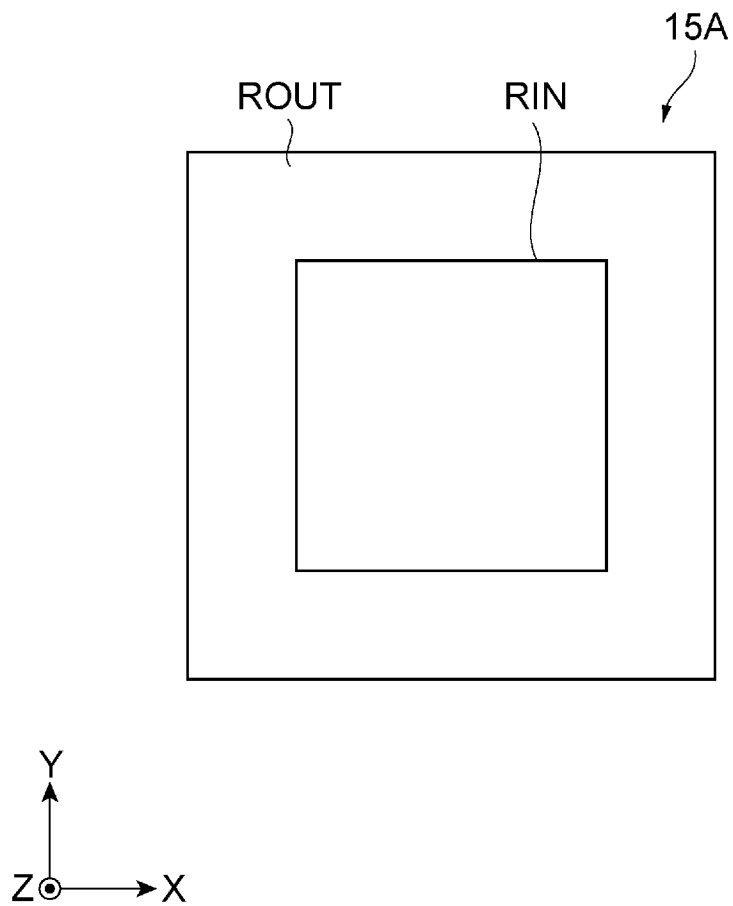
[図4]



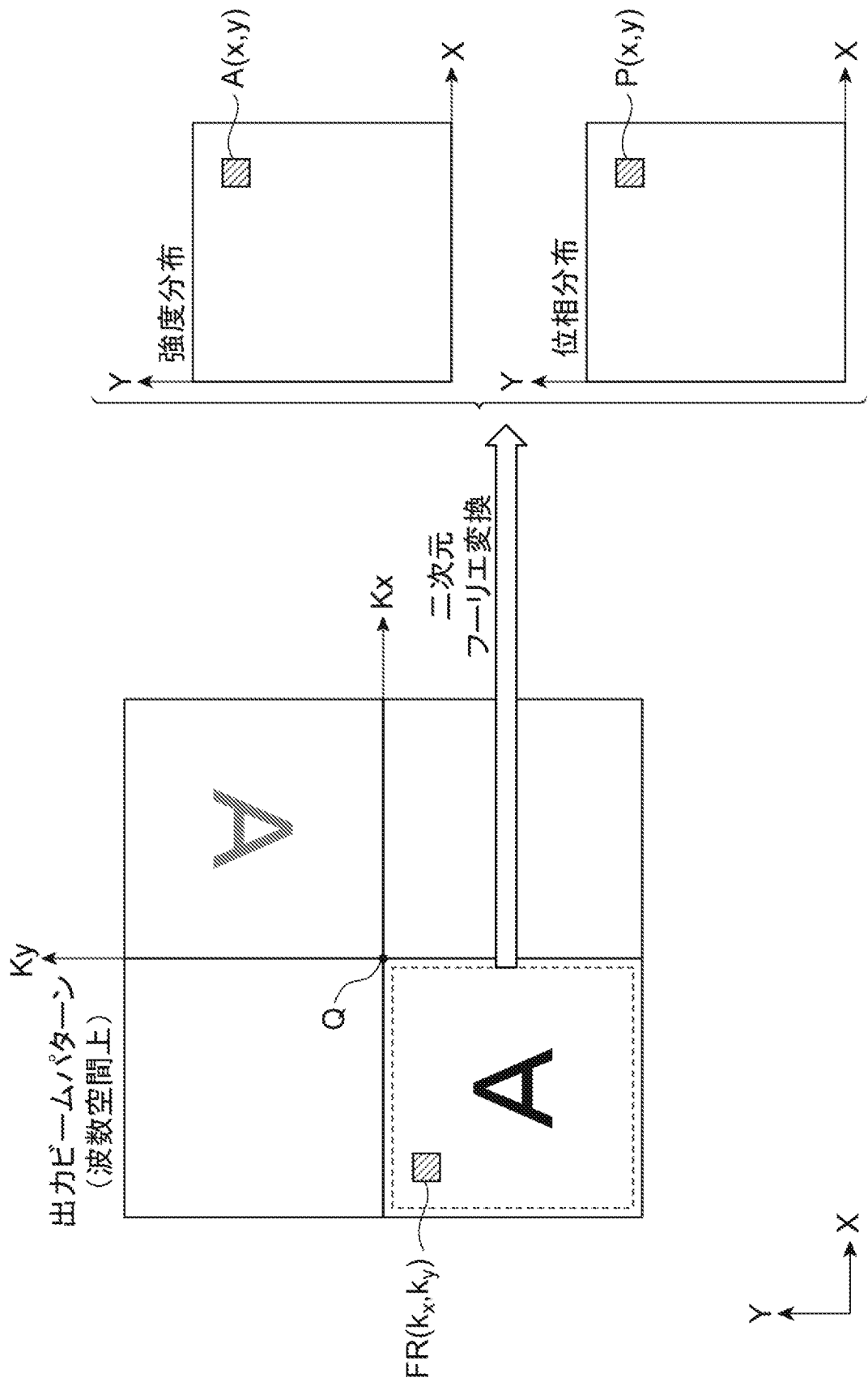
[図5]



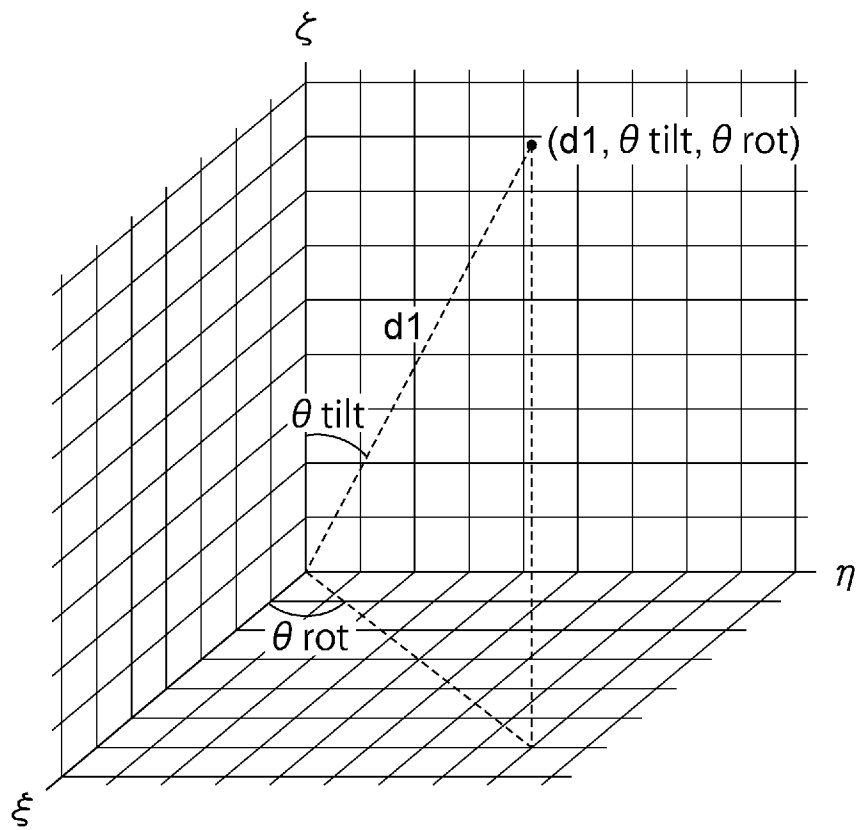
[図6]



[図7]



[図8]



[図9]

(a)

A2	A1
A3	A4

元画像

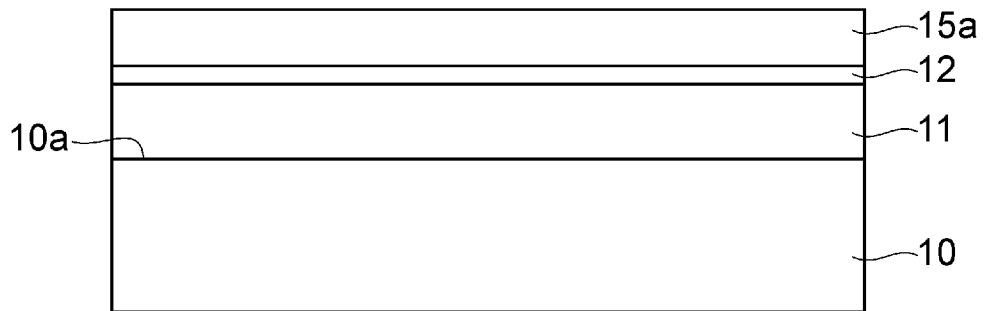
(b)

A4 A2回転	A3 A1回転
A1 A3回転	A2 A4回転

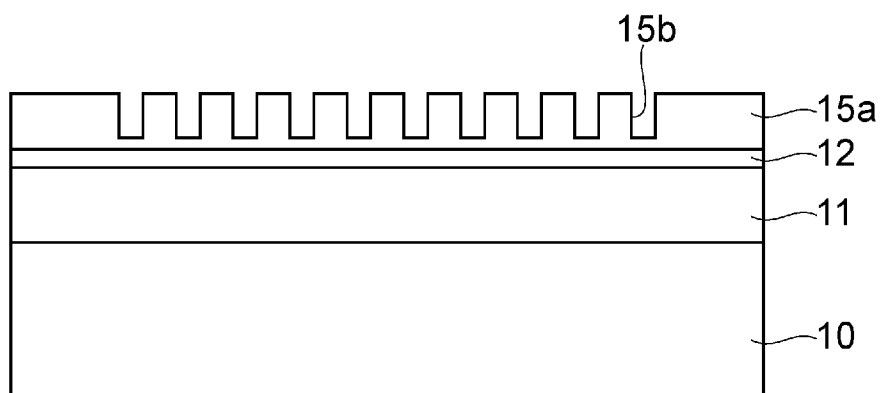
得られるビームパターン

[図10]

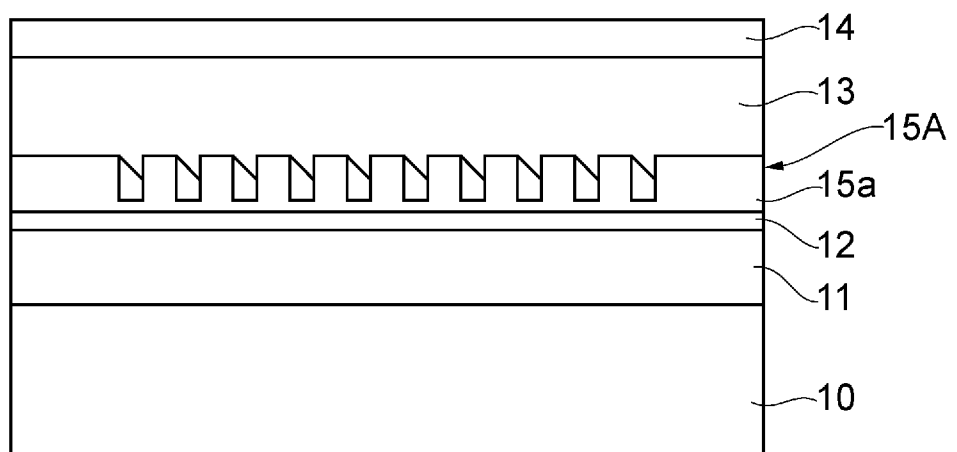
(a)



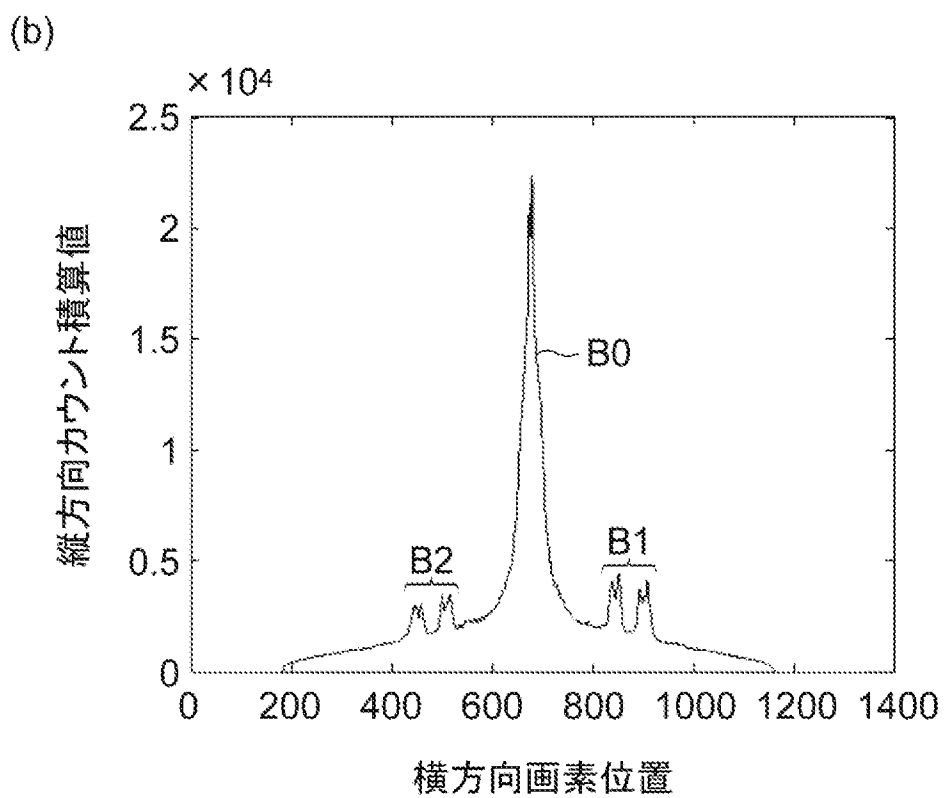
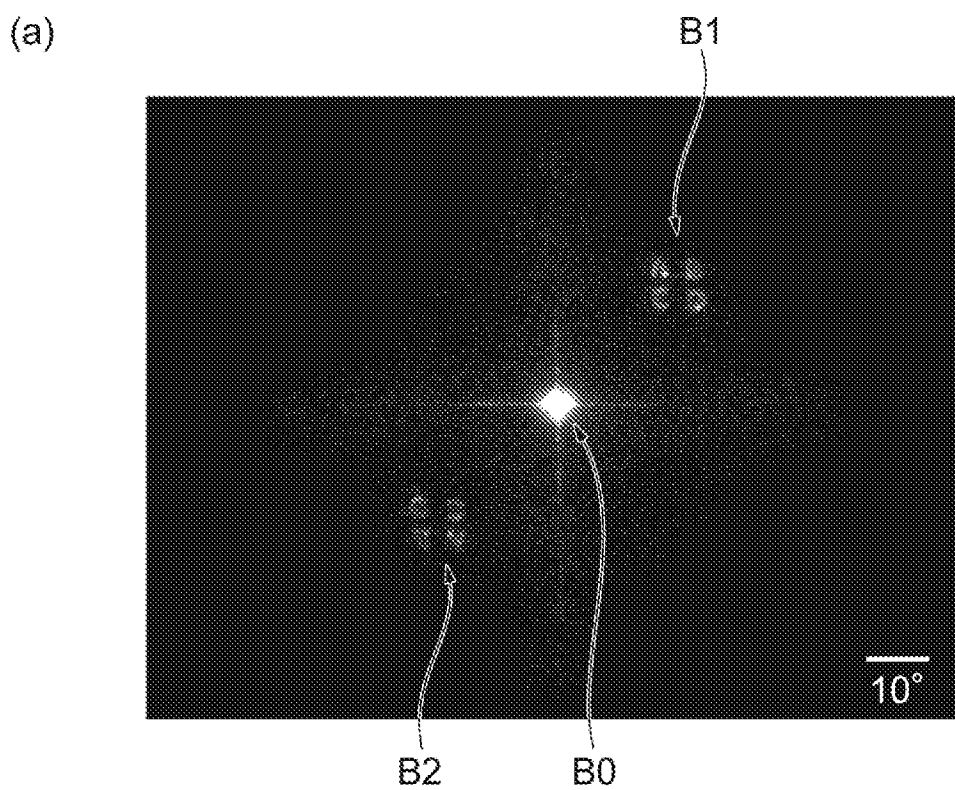
(b)



(c)

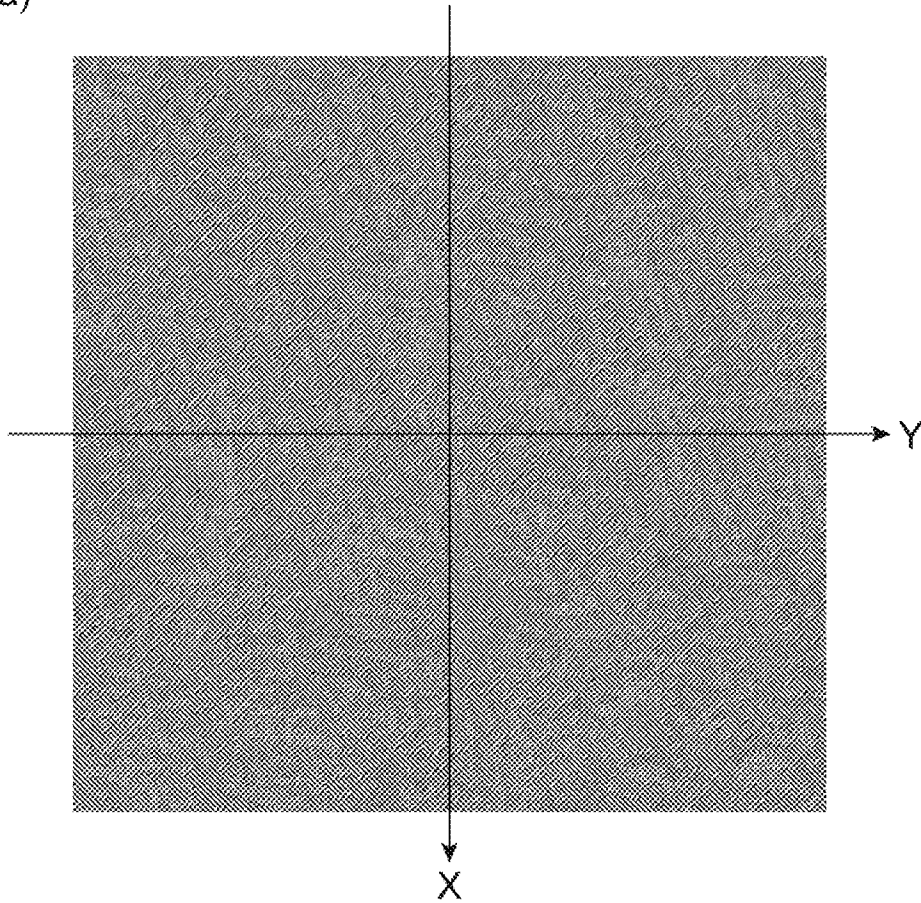


[図11]

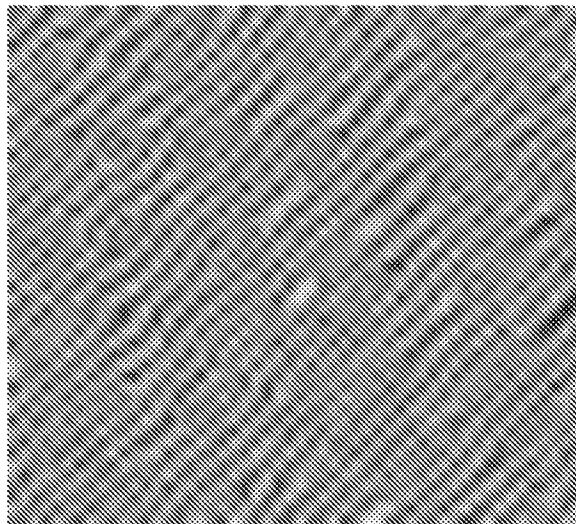


[図12]

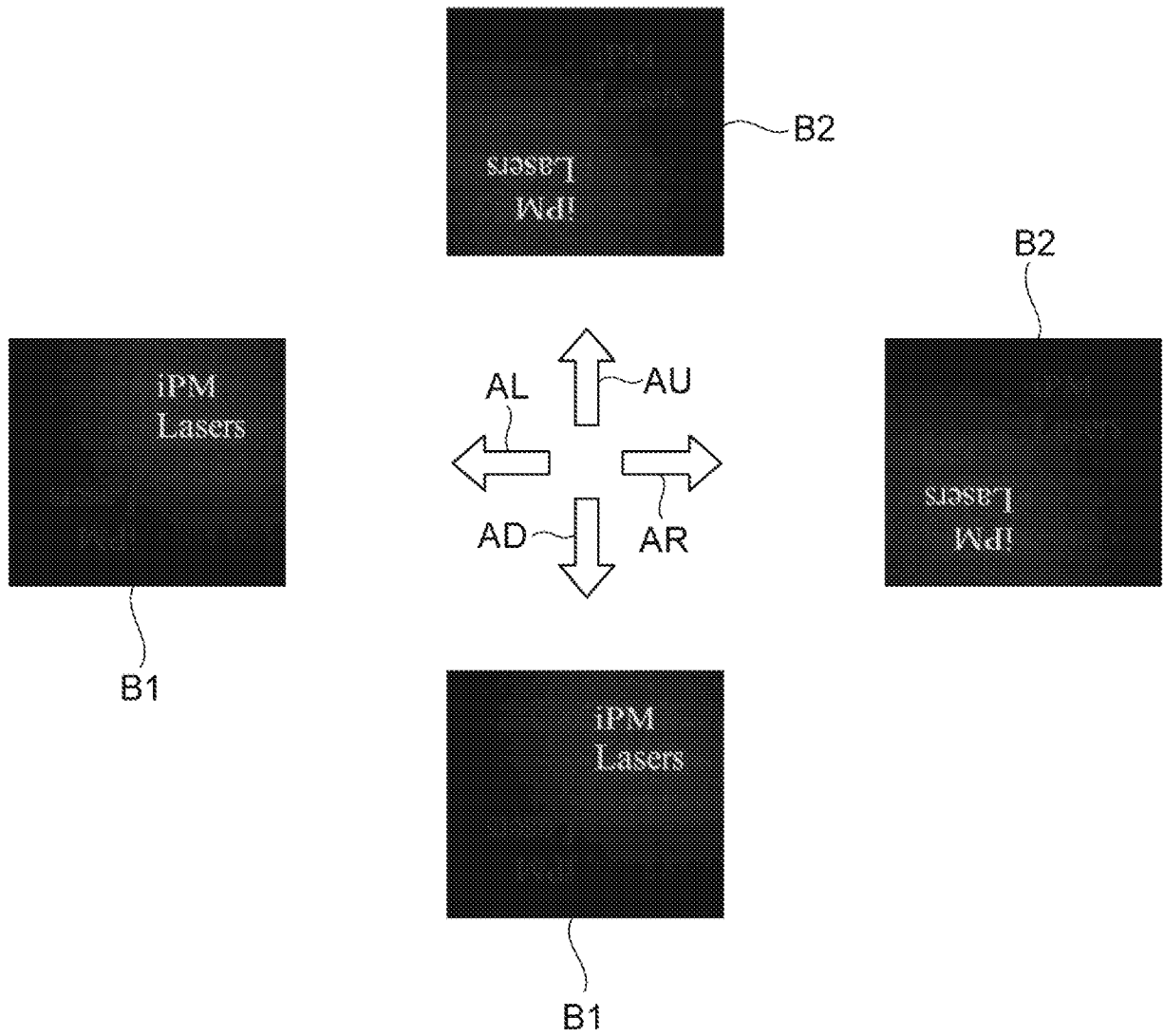
(a)



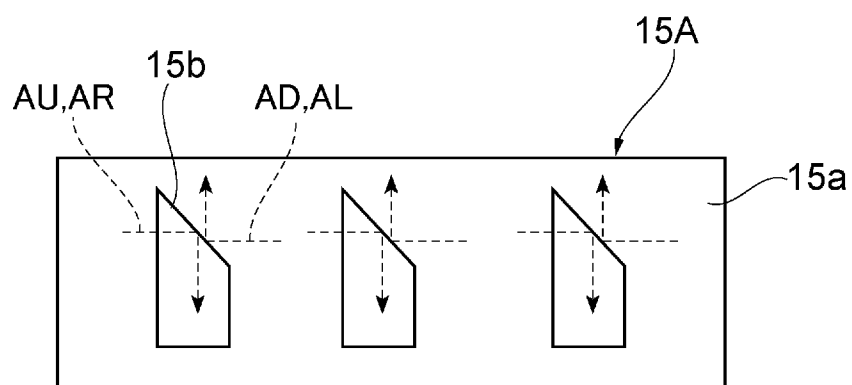
(b)



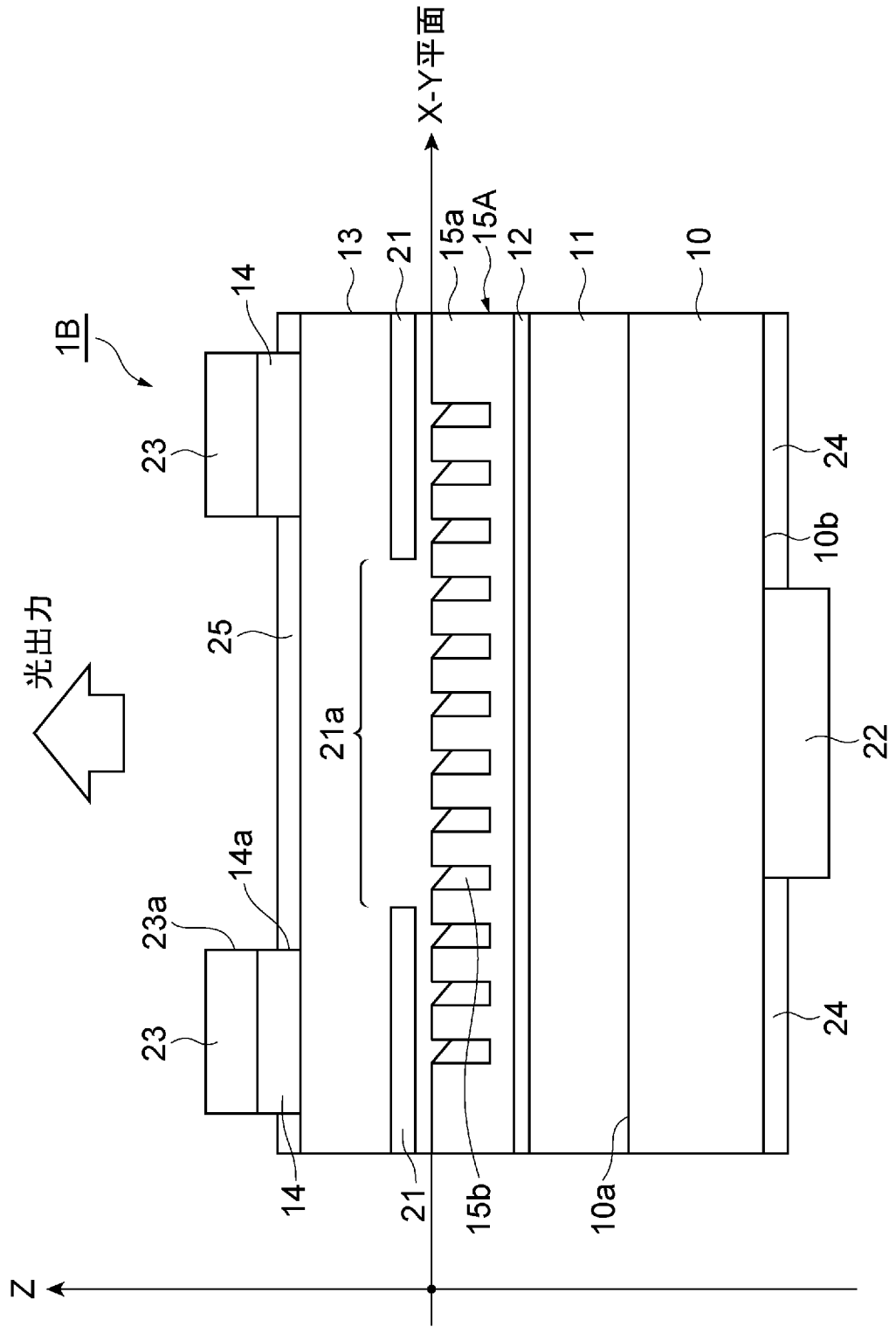
[図13]



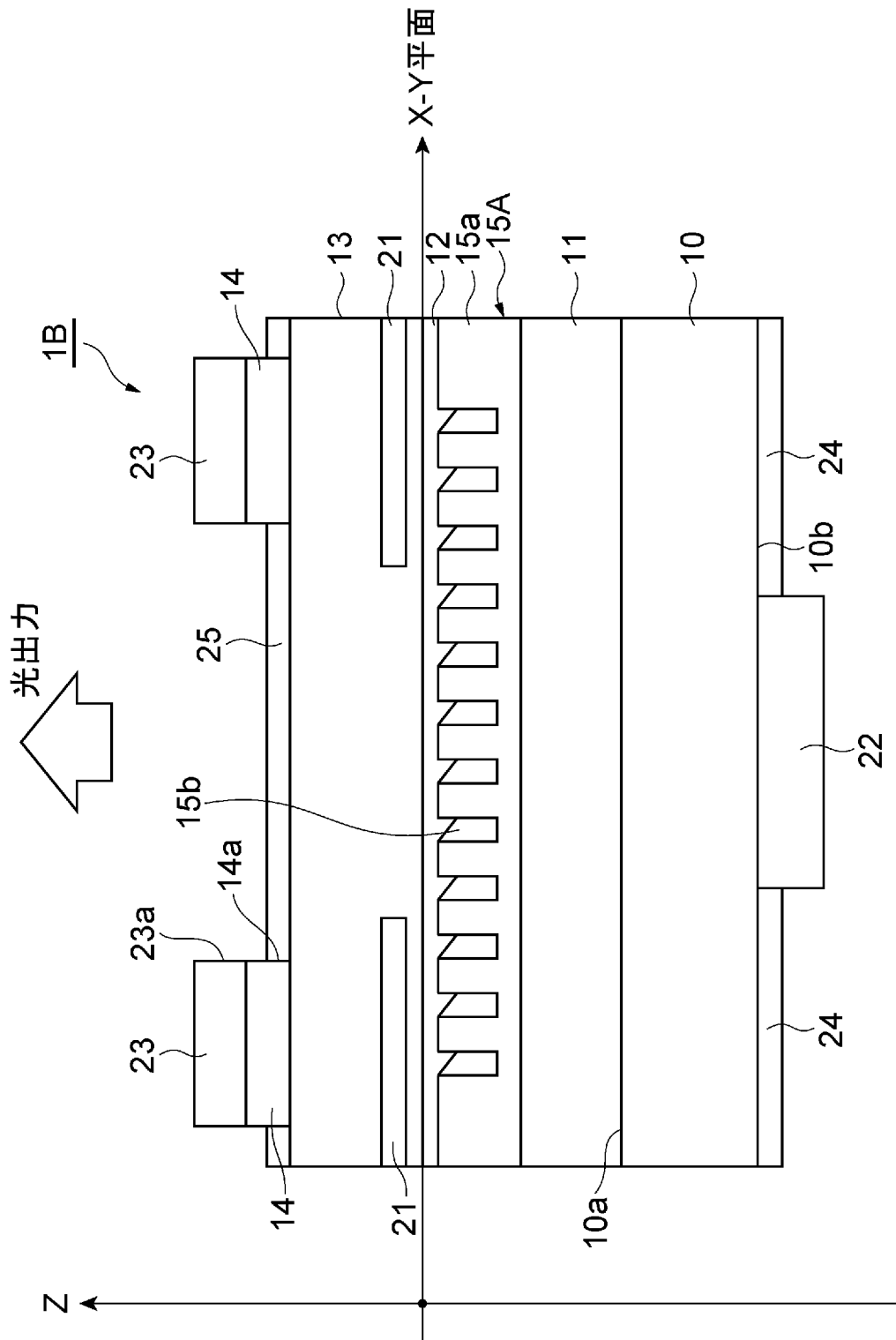
[図14]



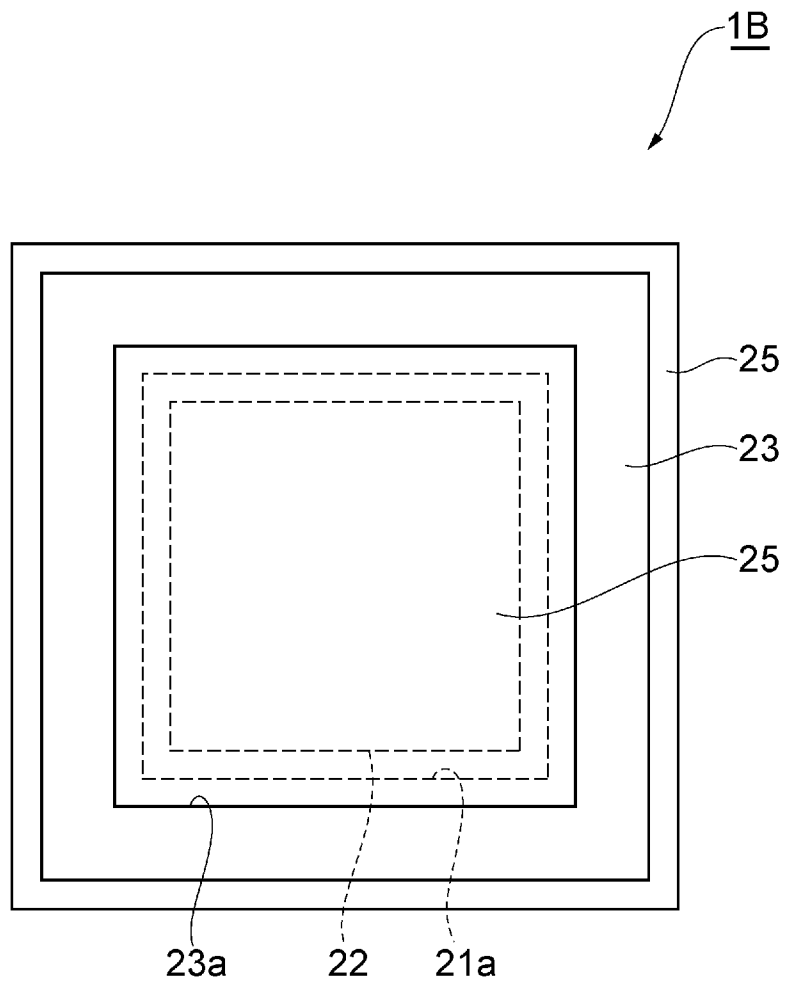
[図15]



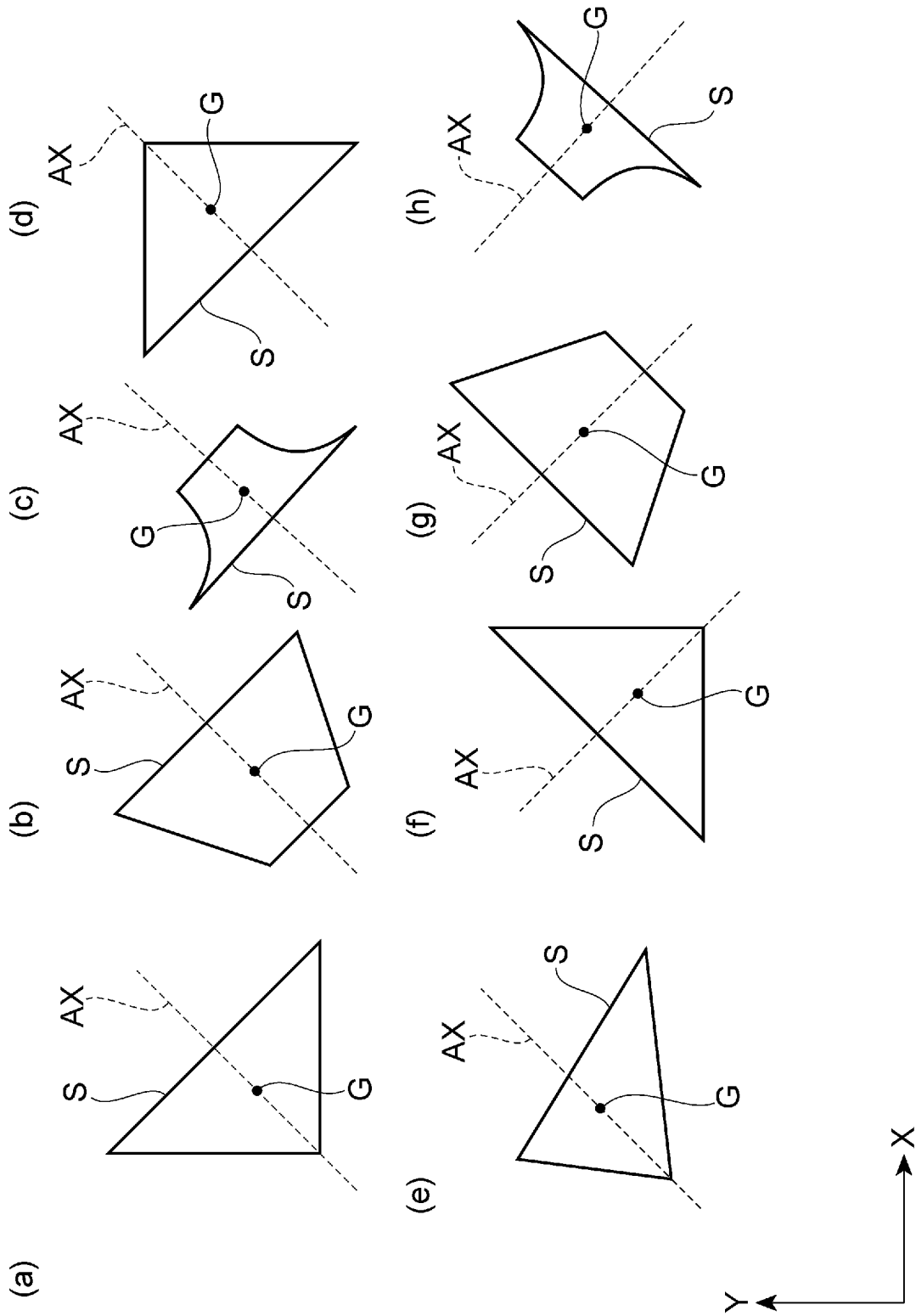
[図16]



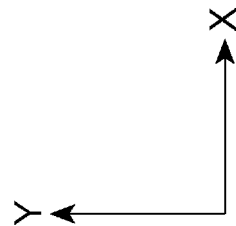
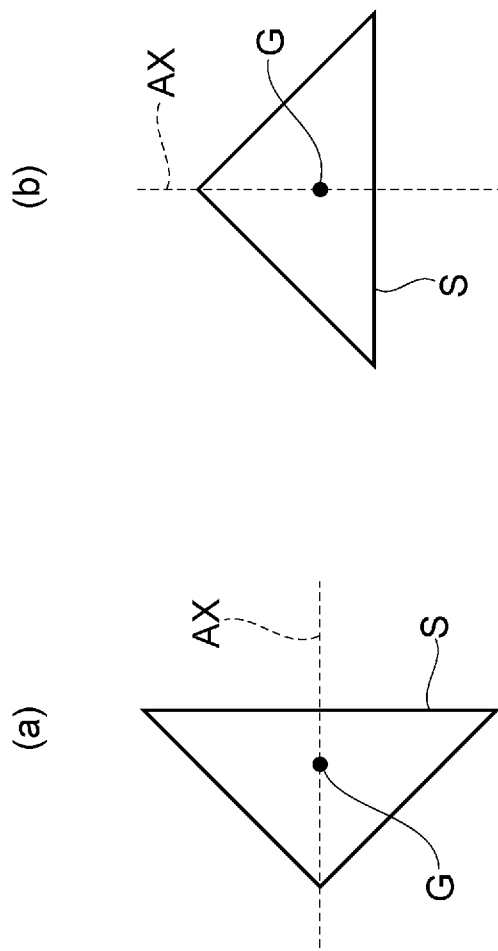
[図17]



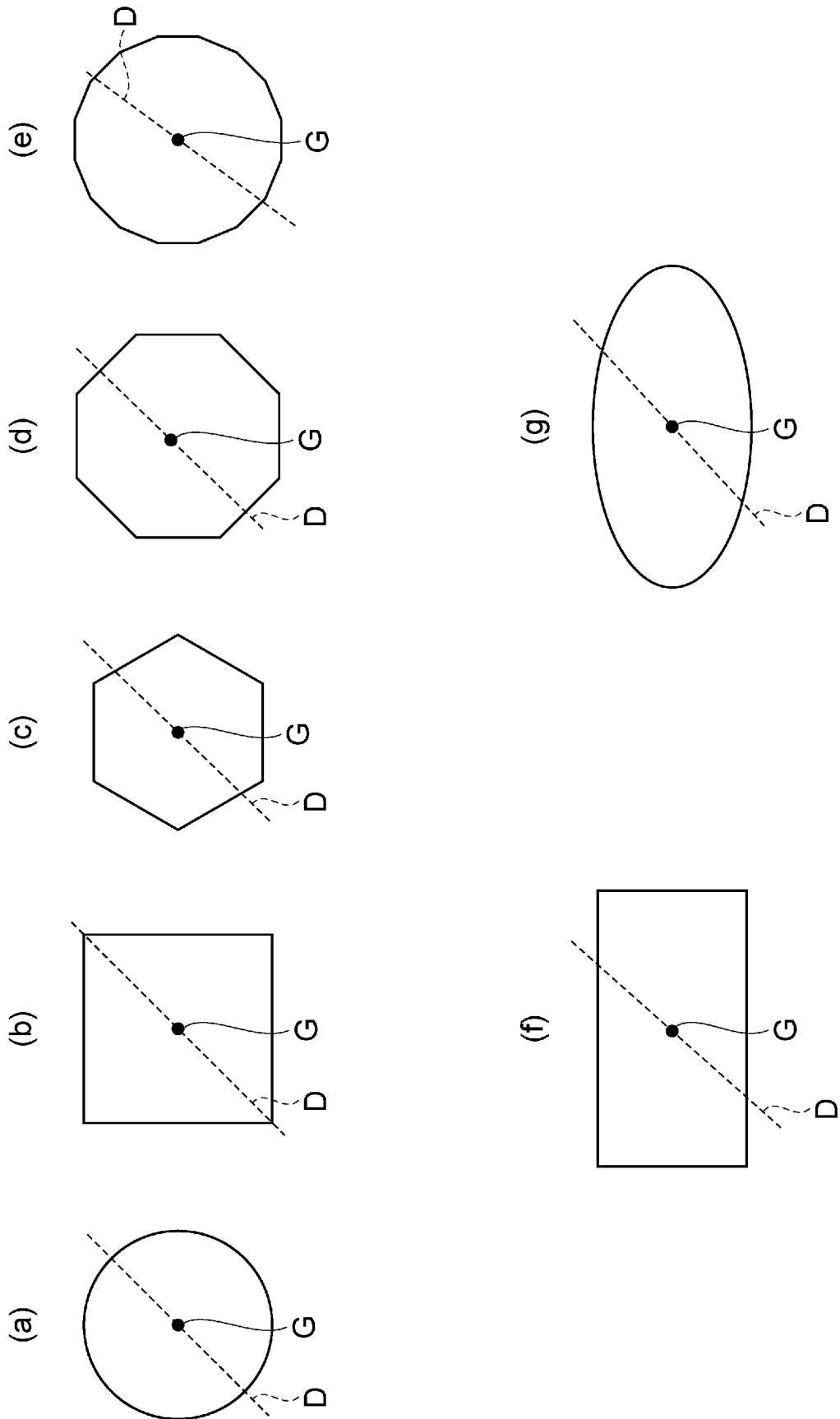
[圖18]



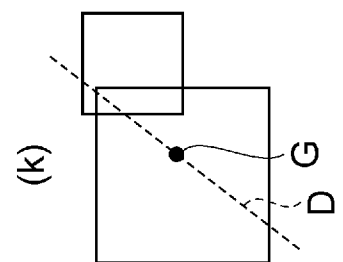
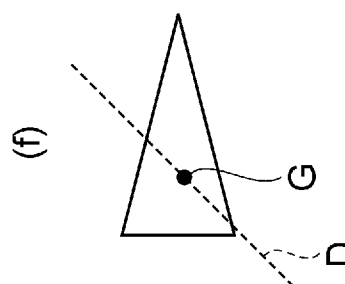
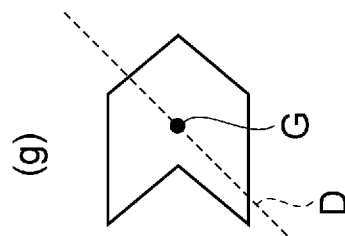
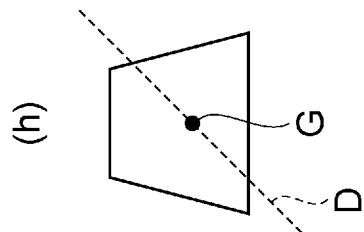
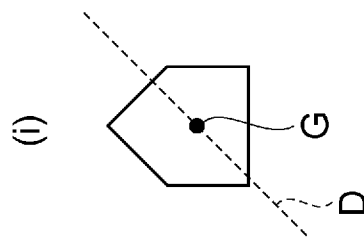
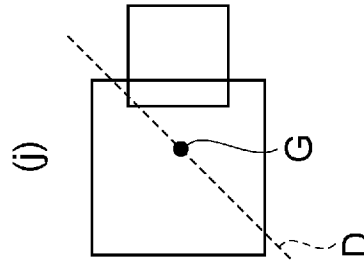
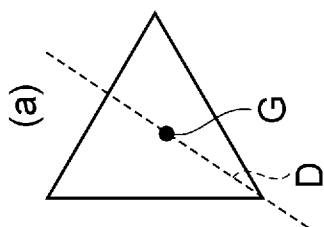
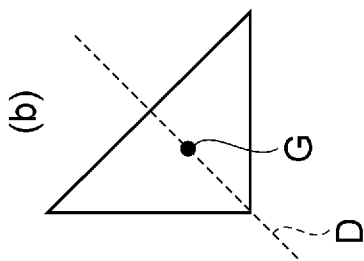
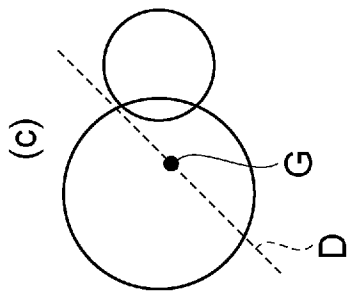
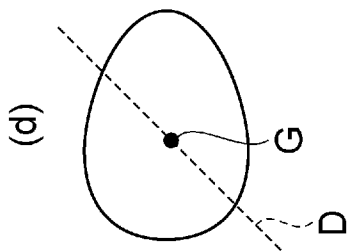
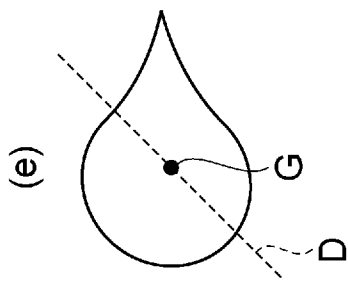
[圖19]



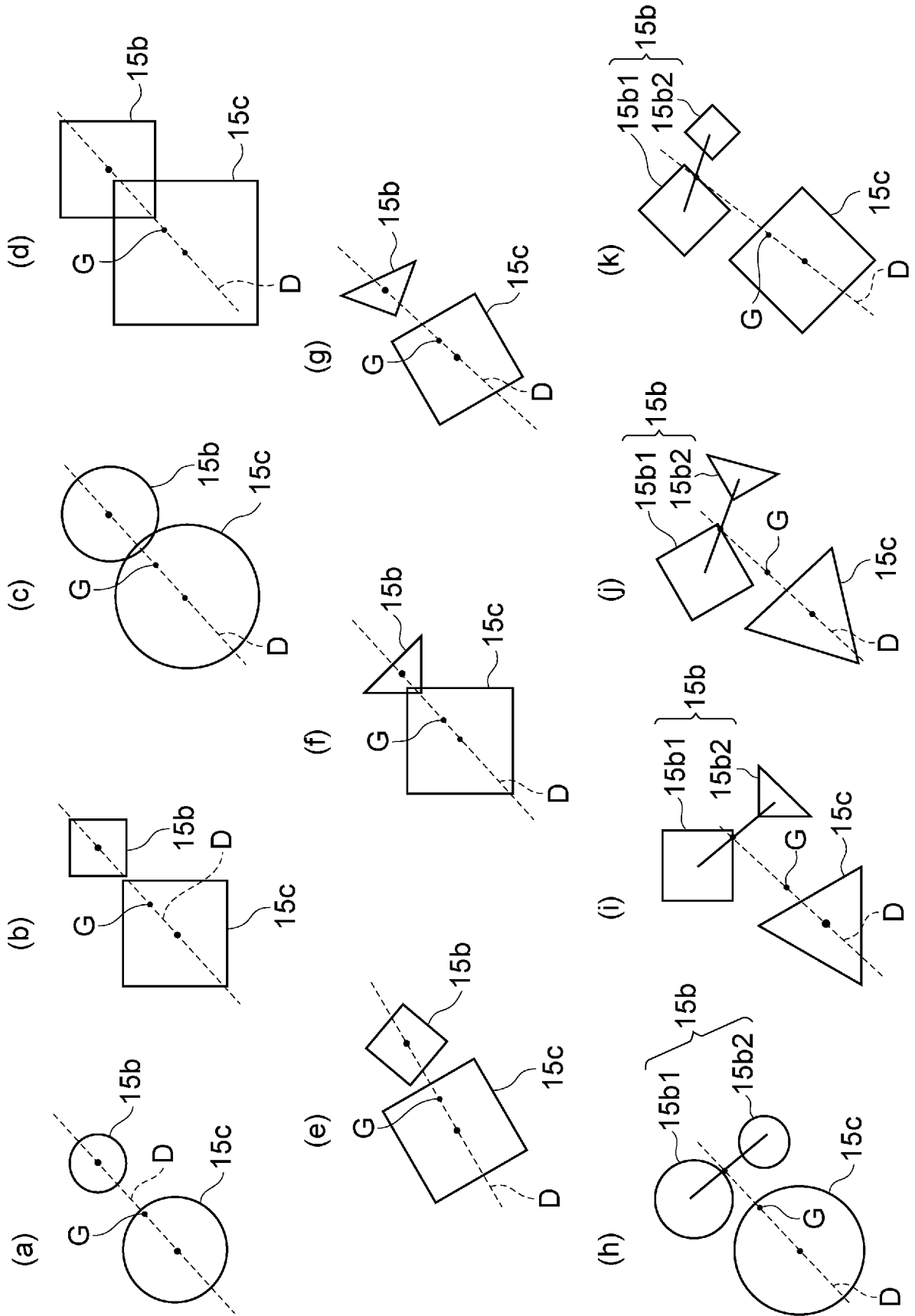
[図20]



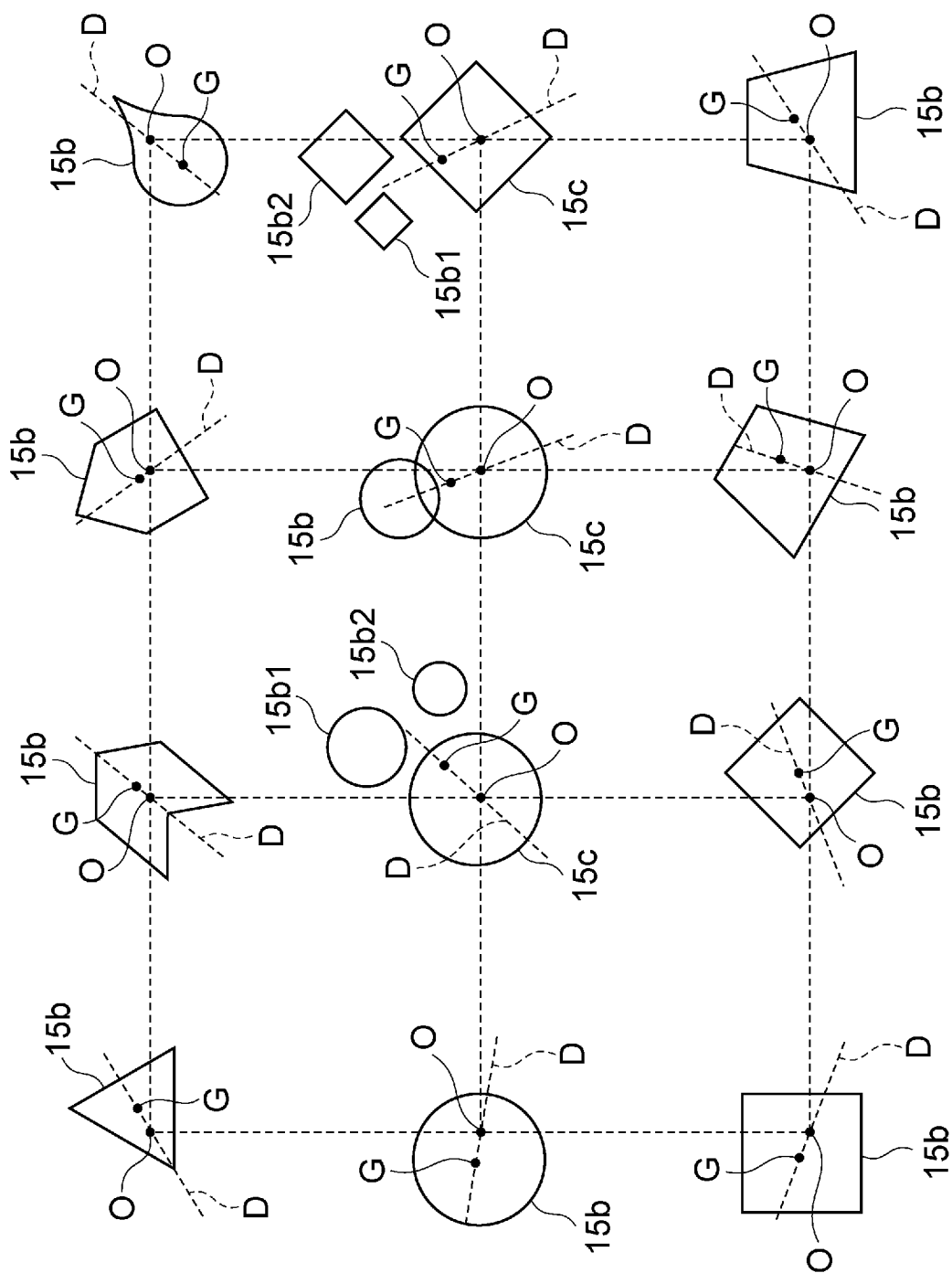
[図21]



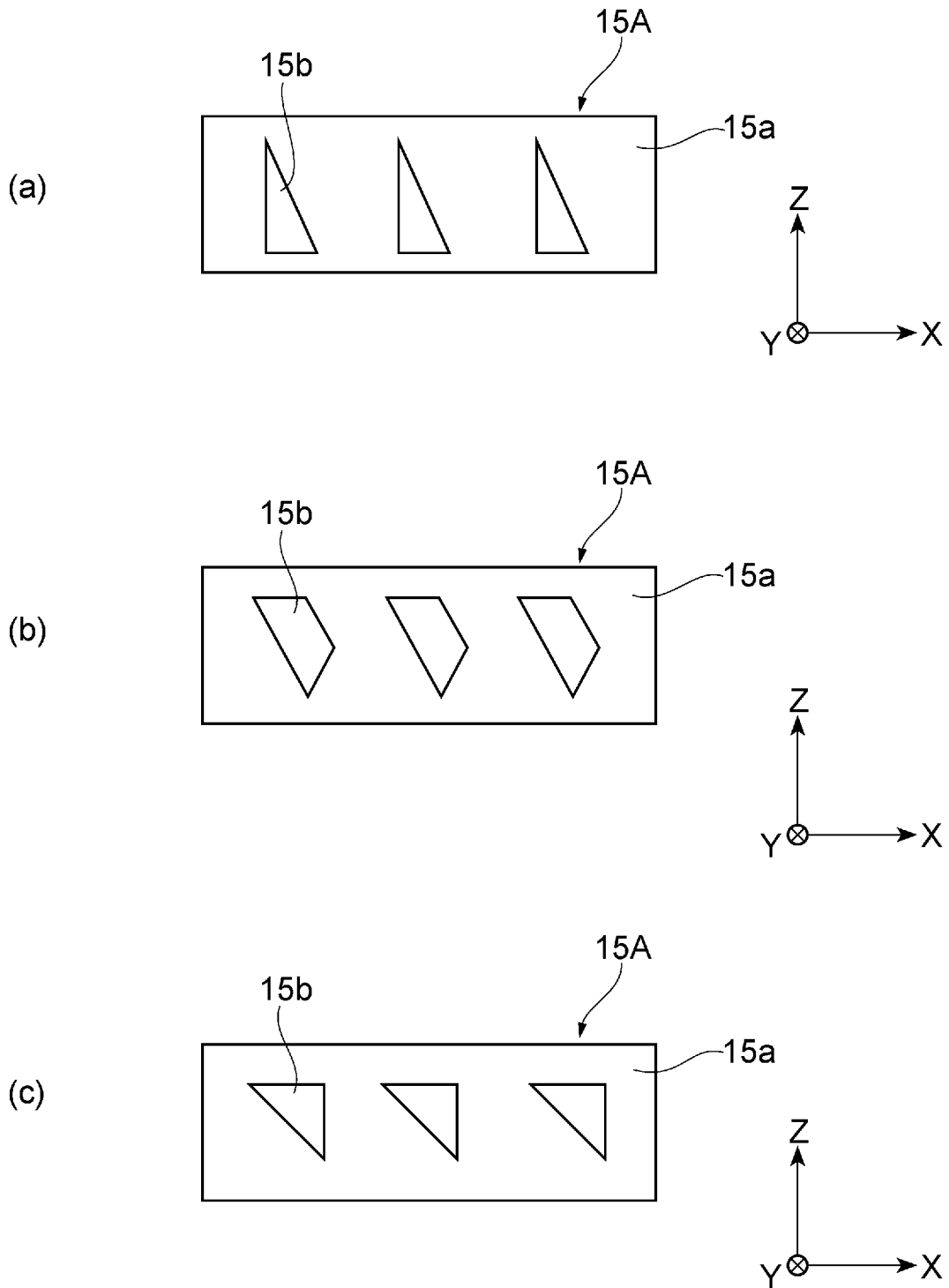
[図22]



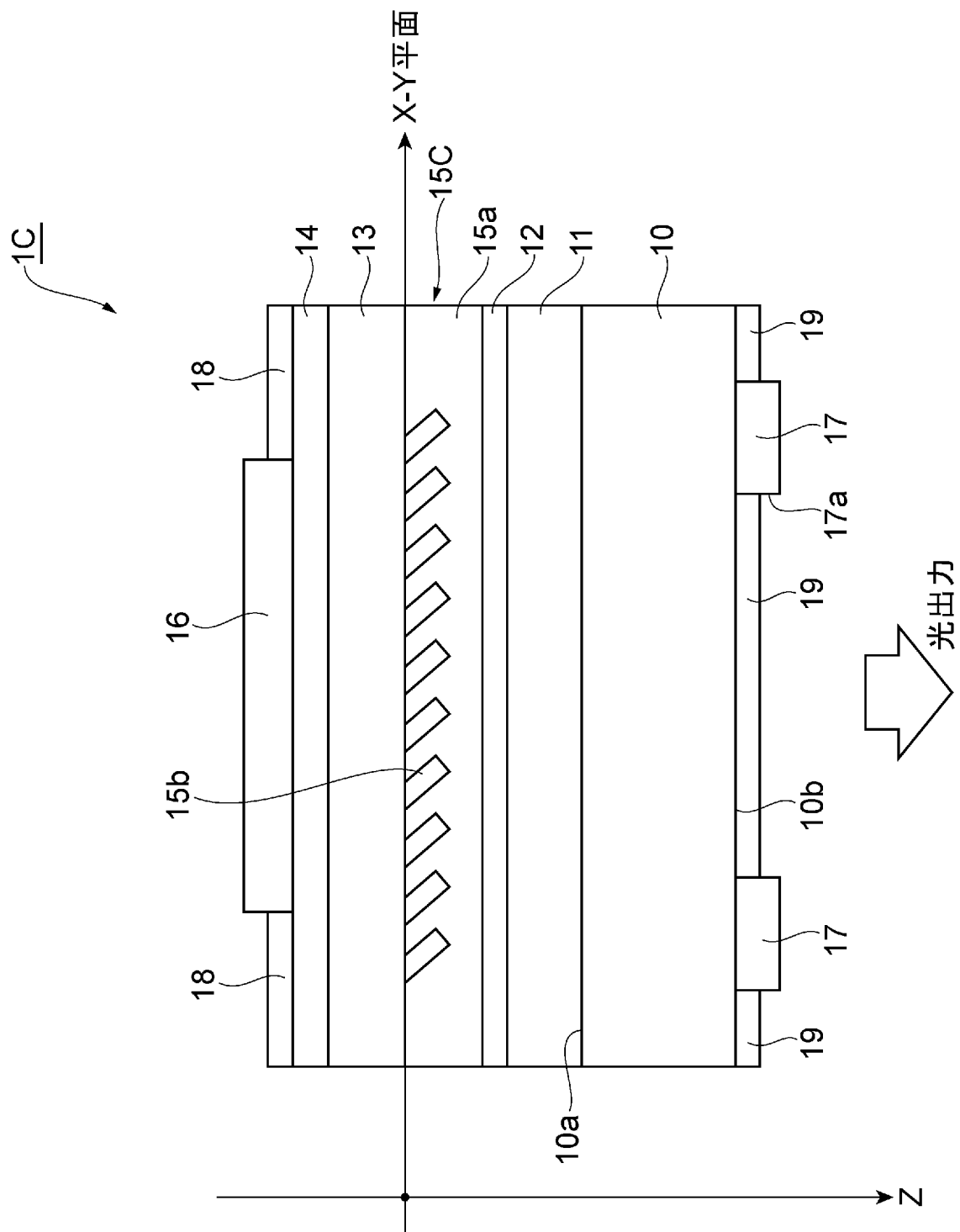
[図23]



[図24]

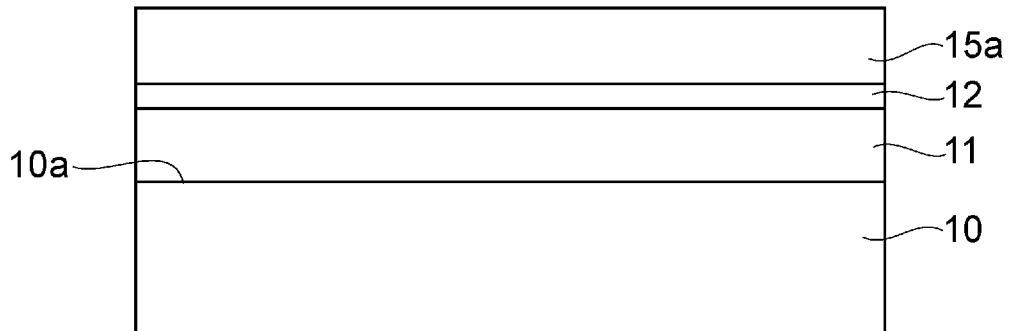


[図25]

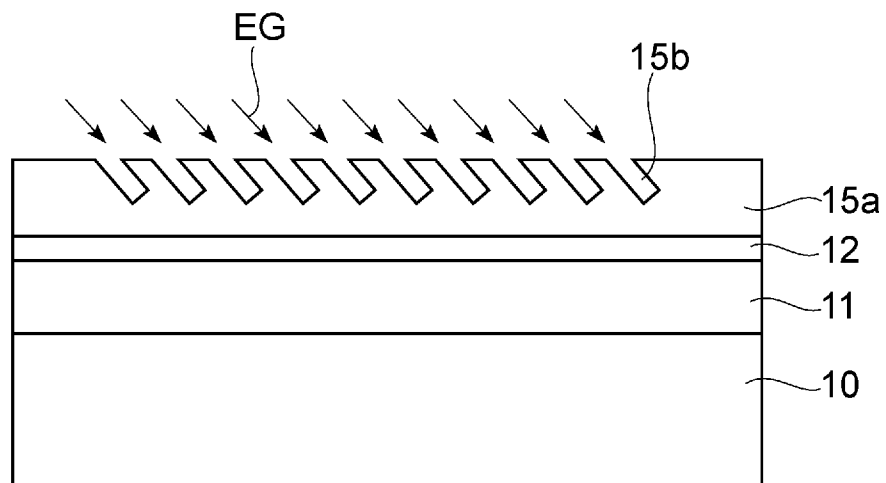


[図26]

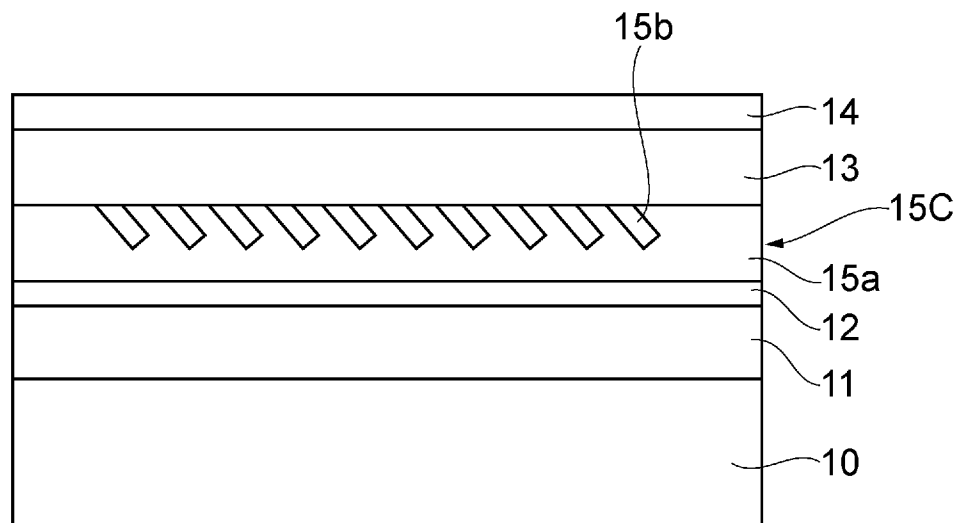
(a)



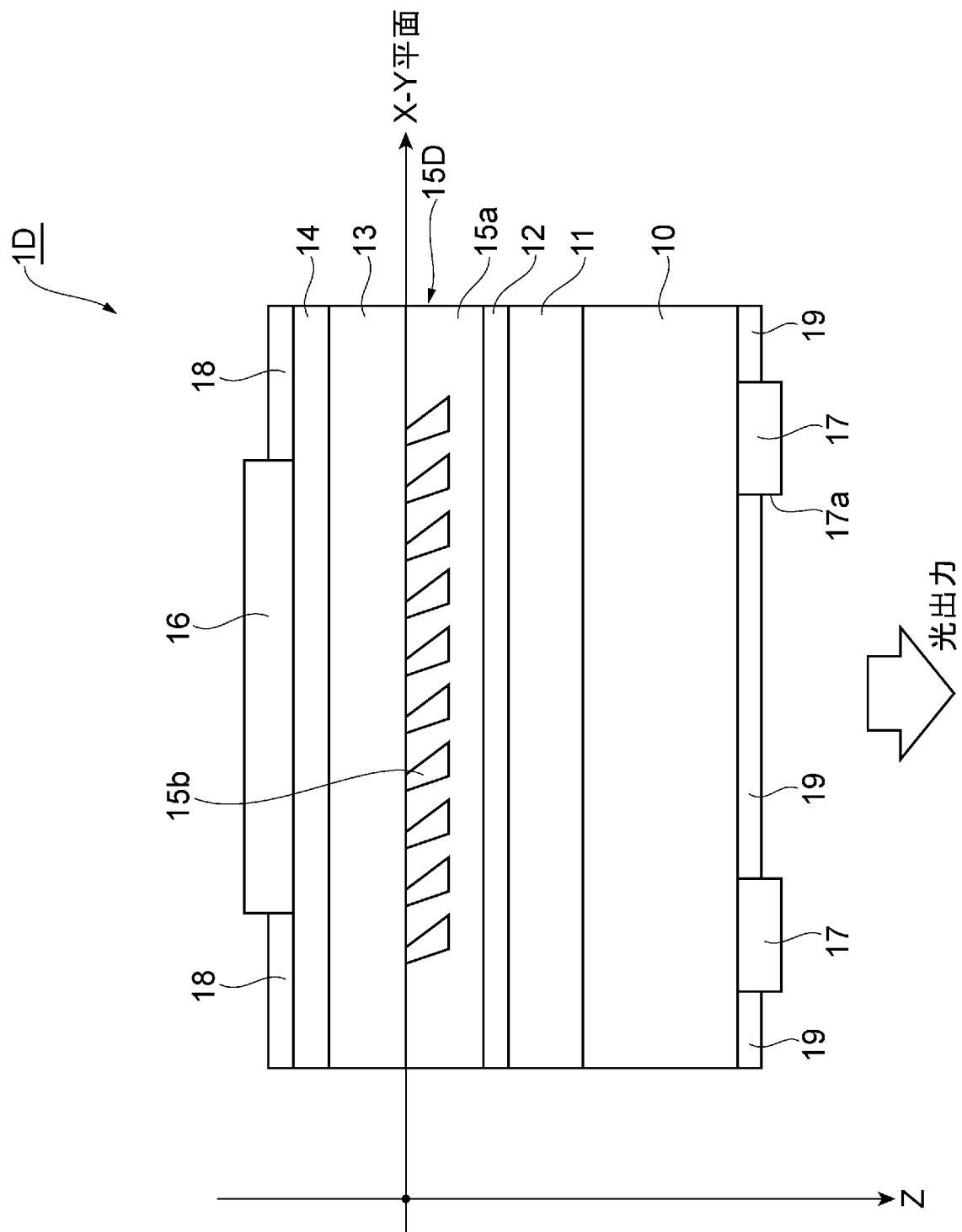
(b)



(c)

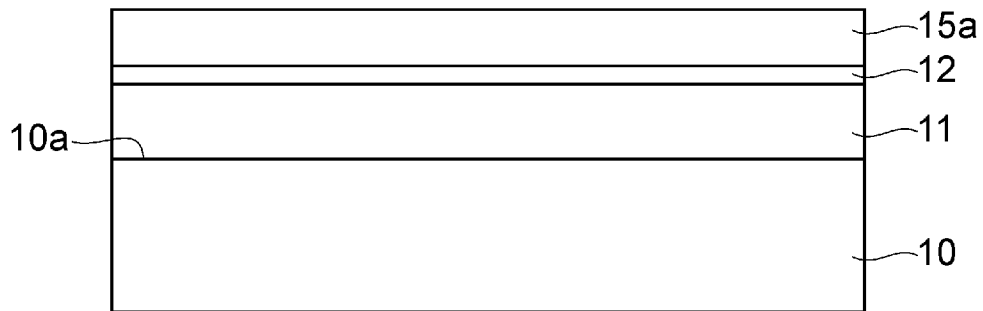


[図27]

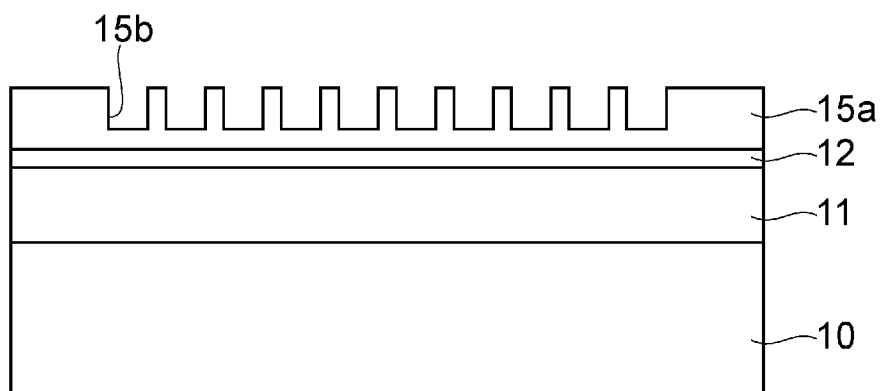


[図28]

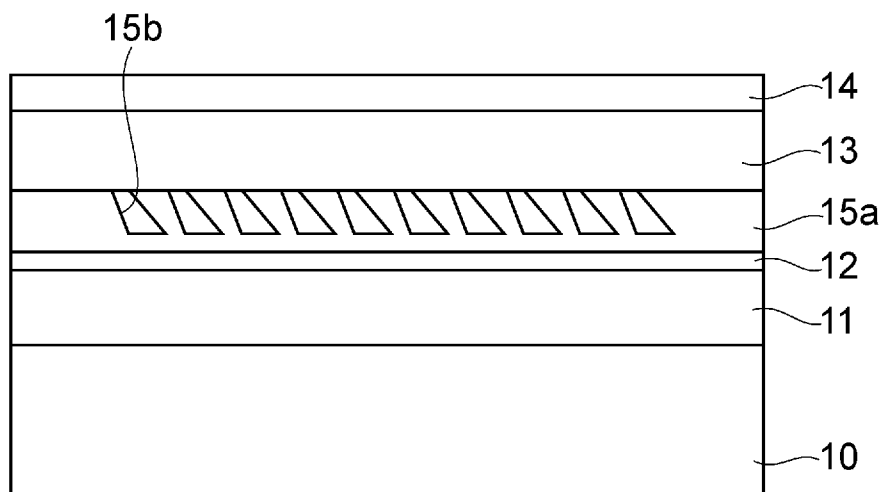
(a)



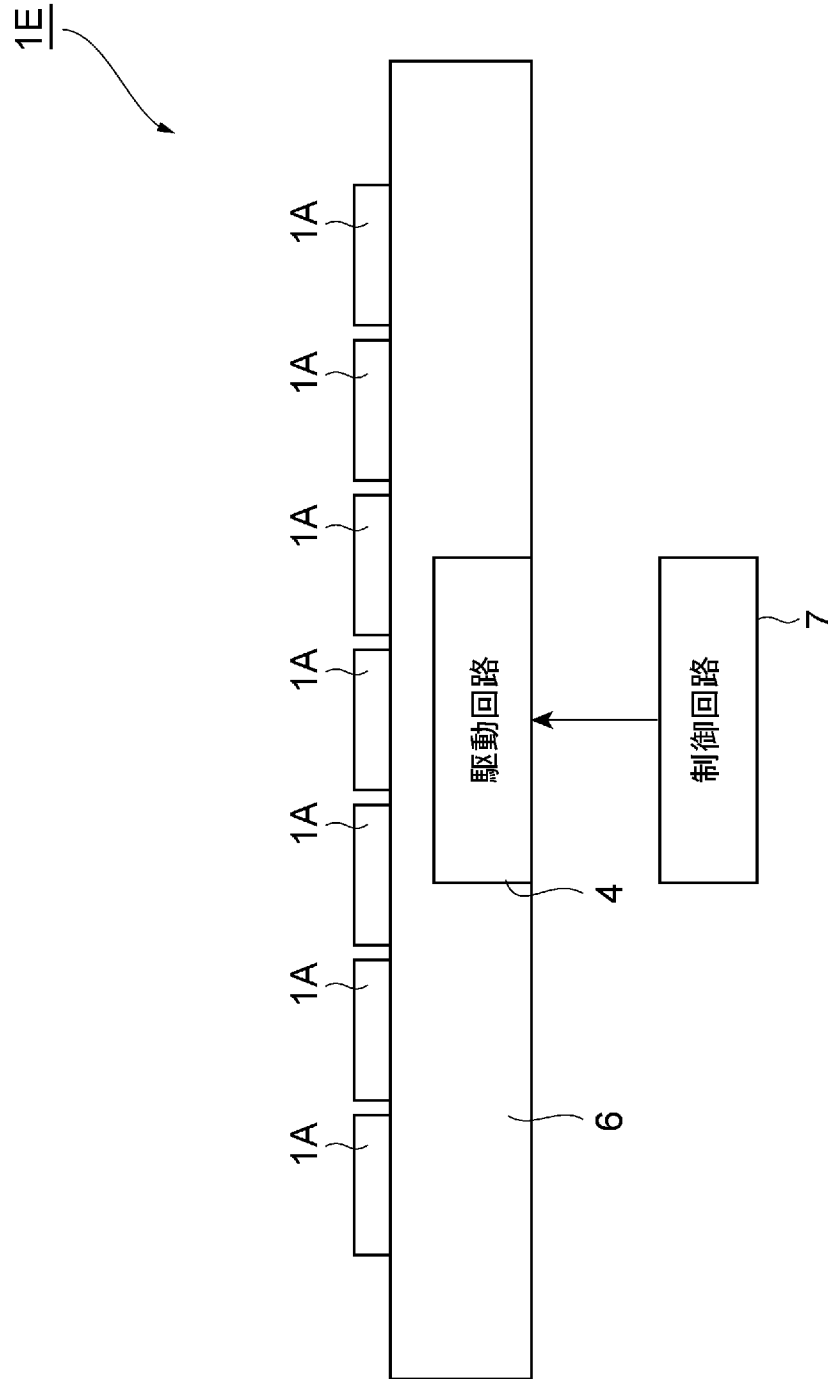
(b)



(c)



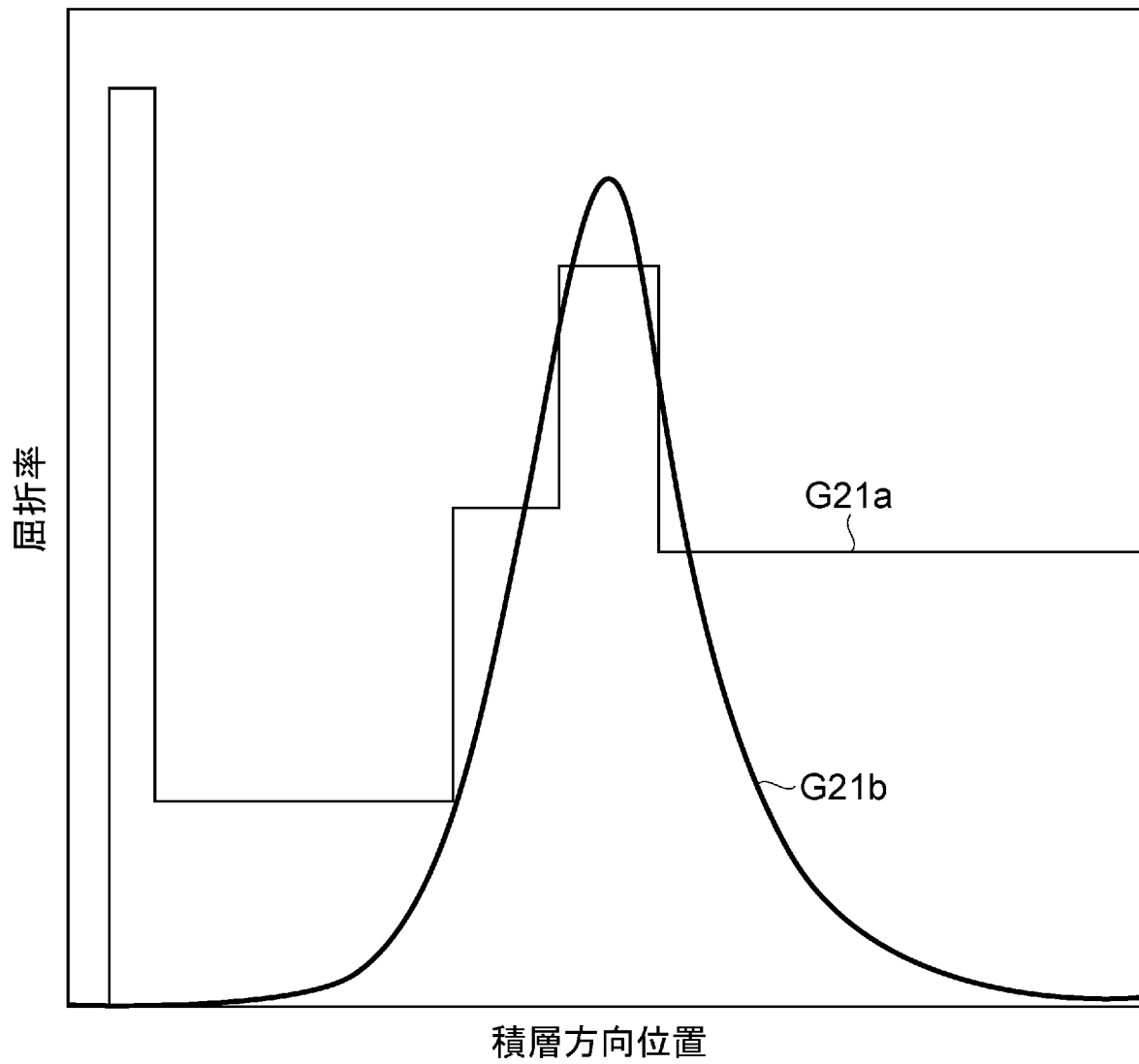
[図29]



[図30]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	P型	GaAsコンタクト層	100	3.55
2	P型	AlGaAsクラッド層	700	3.12
3	I型	位相変調層(GaAs/空洞, 空洞FF=15%)	250	3.30
4	I型	InGaAs/AlGaAs活性層	225	3.46
5	N型	AlGaAsクラッド層	2000	3.27

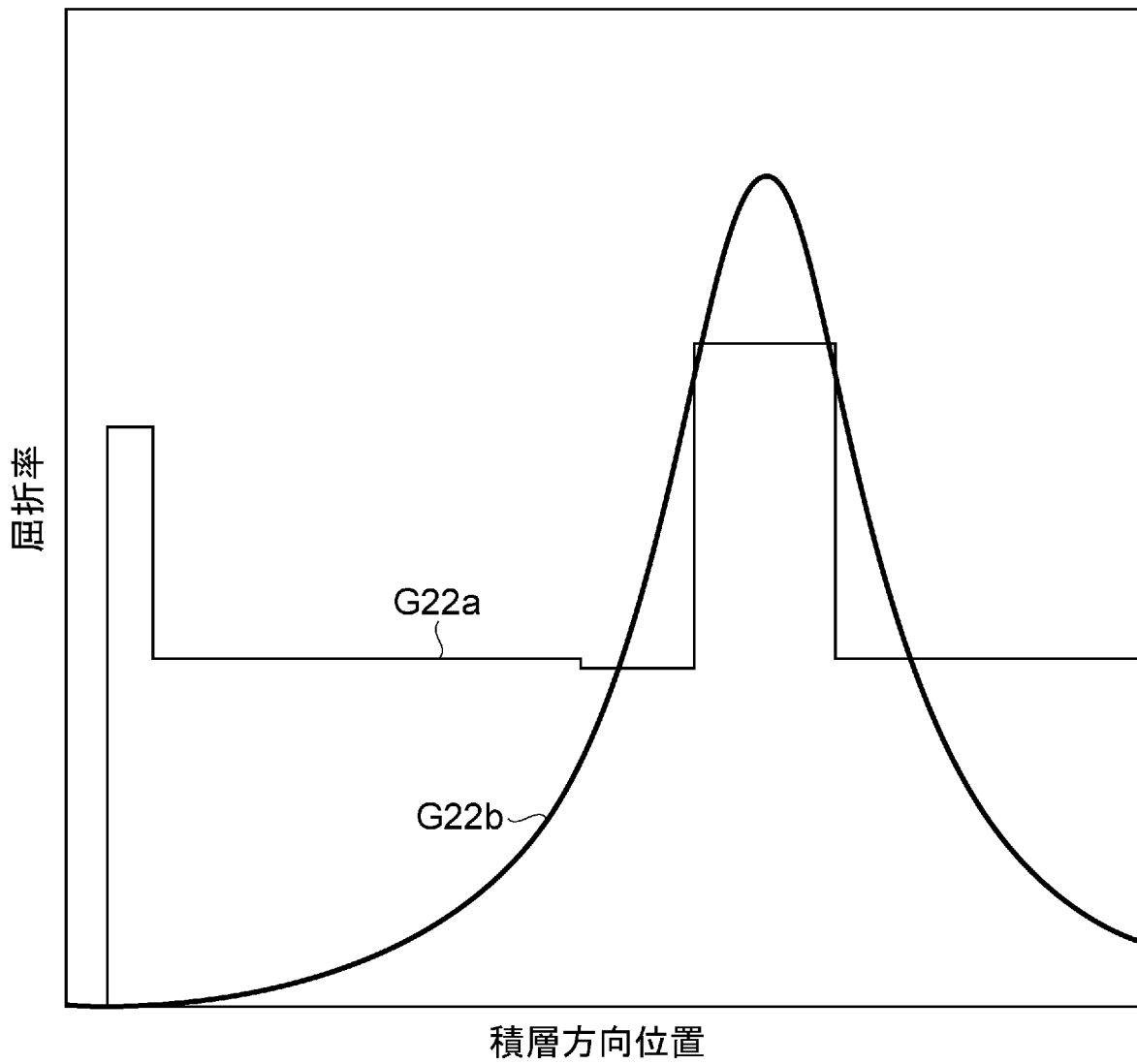
[図31]



[図32]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	P型	GaInAsP(Eg=1.15eV)コンタクト層	100	3.35
2	P型	InPクラッド層	1000	3.21
3	I型	位相変調層(GaInAsP(Eg=1.0eV)/空洞, 空洞FF=15%)	300	3.20
4	I型	GaInAsP活性層	275	3.42
5	N型	InPクラッド層	2000	3.21

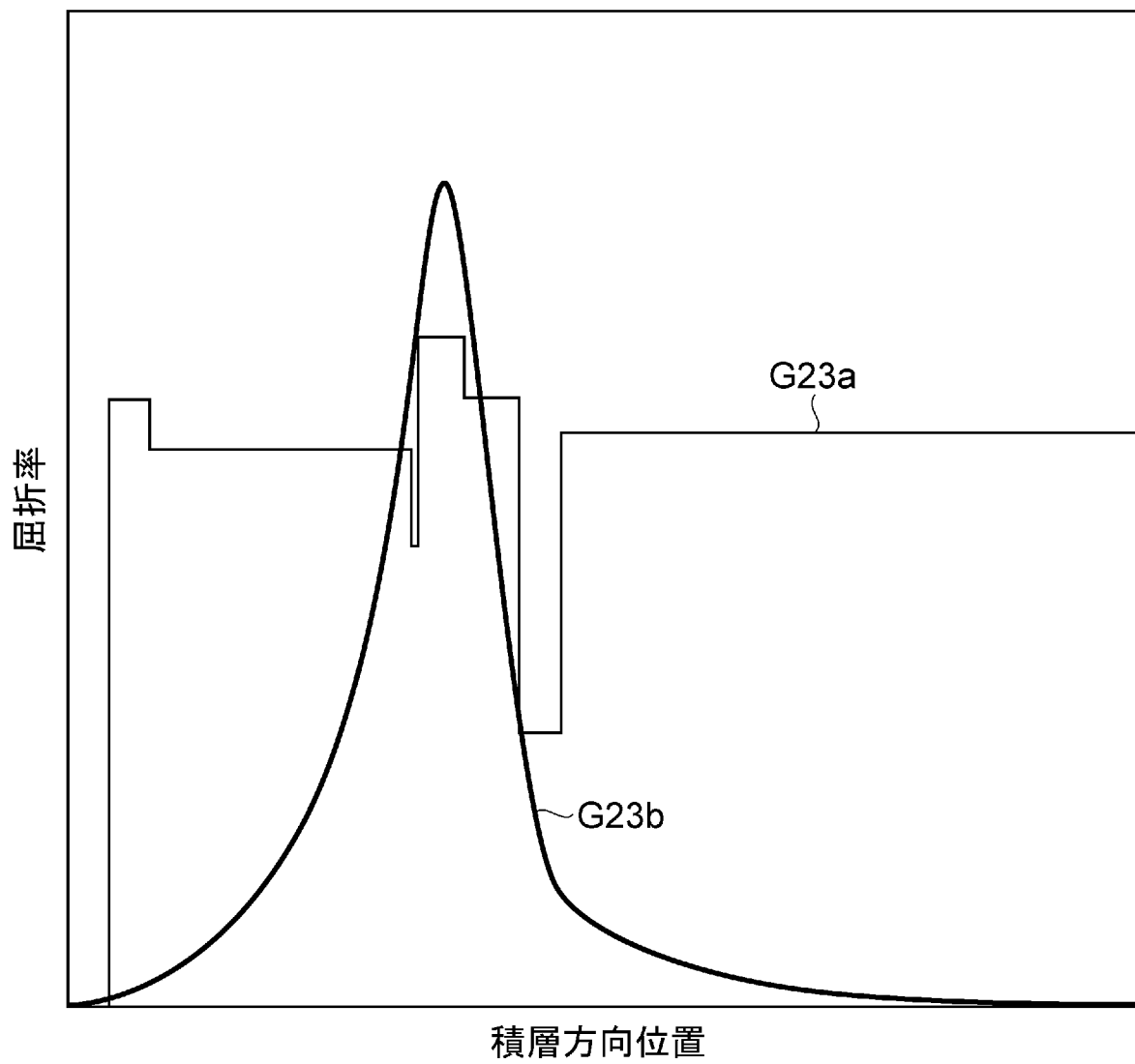
[圖33]



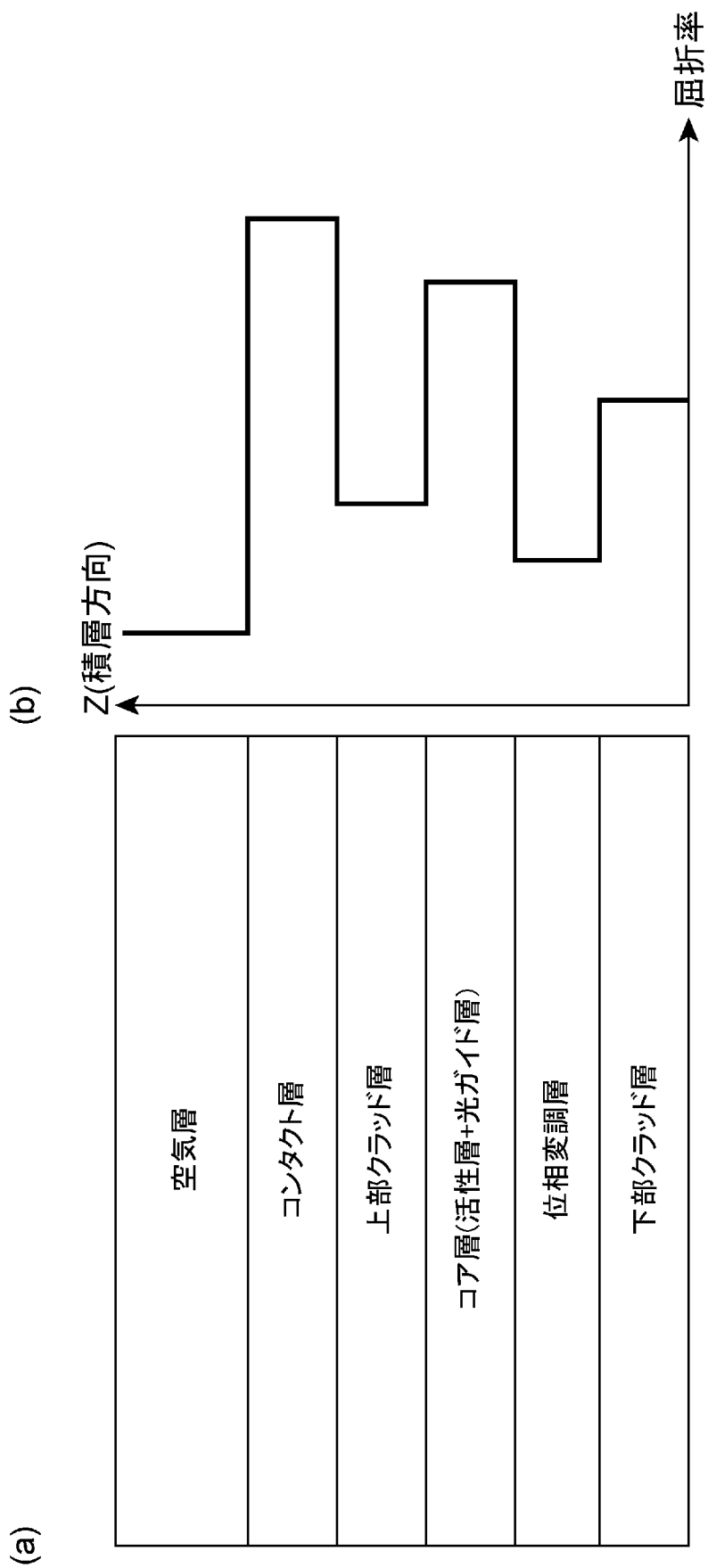
[図34]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	P型	GaNコンタクト層	100	2.55
2	P型	AlGaNクラッド層	600	2.53
3	P型	AlGaNキャリア障壁層	20	2.48
4	I型	InGaN活性層	130	2.59
5	N型	GaNガイド層	150	2.55
6	N型	位相変調層(GaN/空洞, 空洞FF=15%)	100	2.39
7	N型	AlGaNクラッド層	2000	2.54

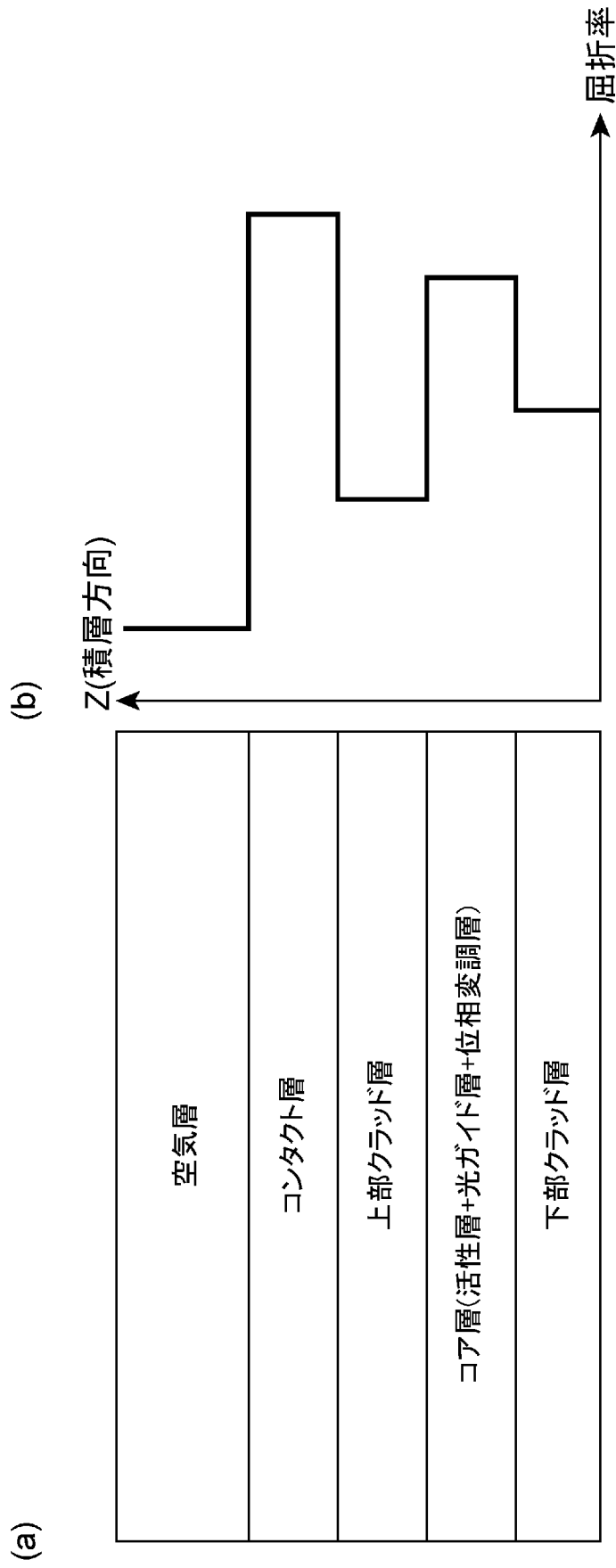
[図35]



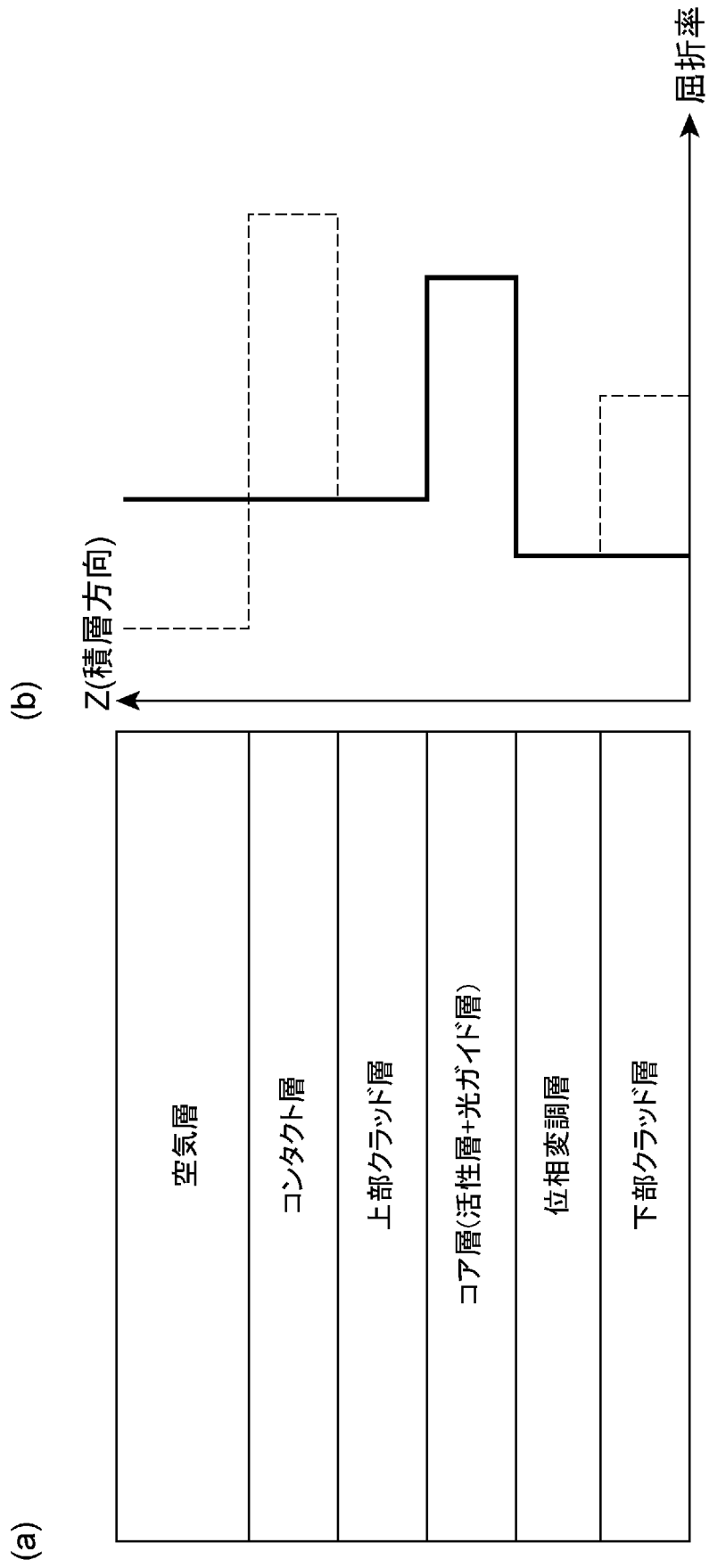
[図36]



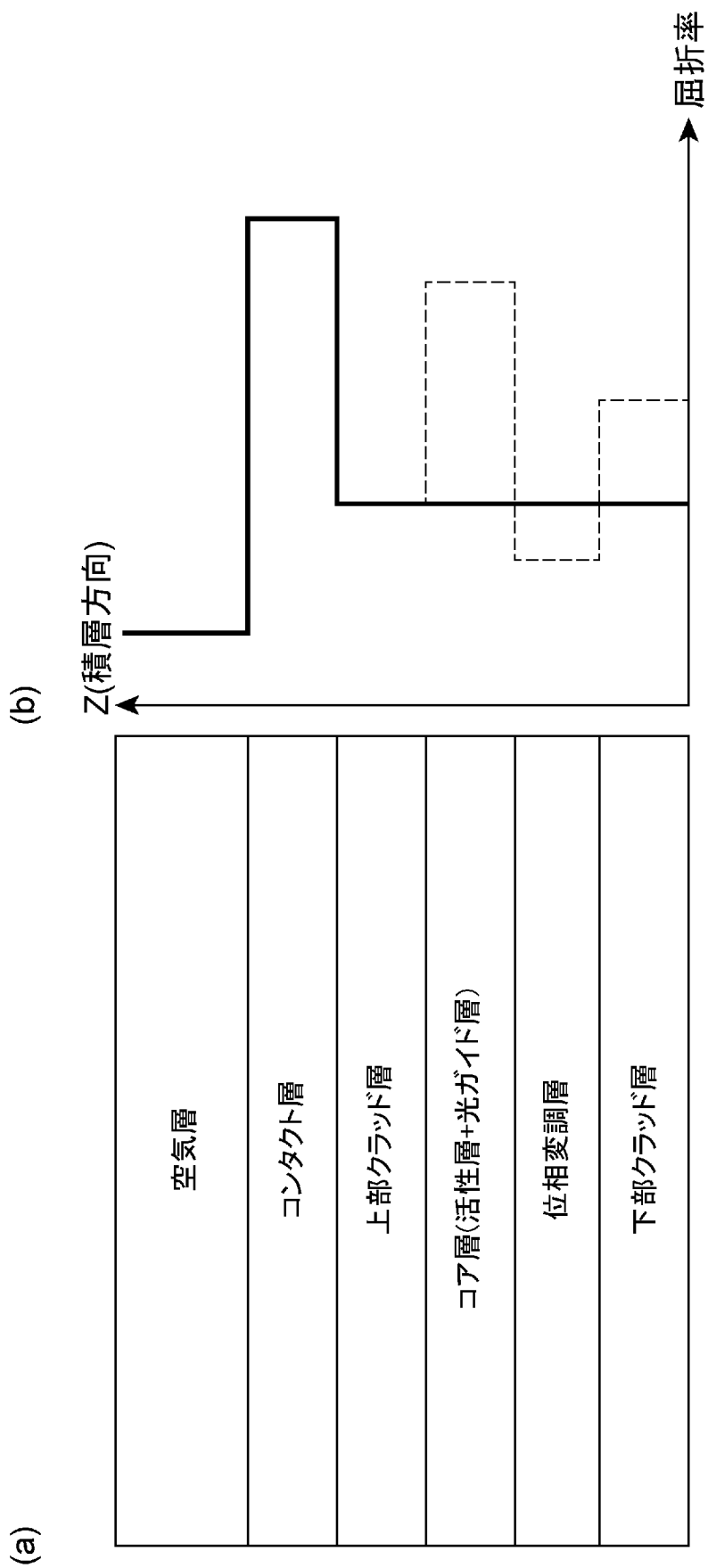
[図37]



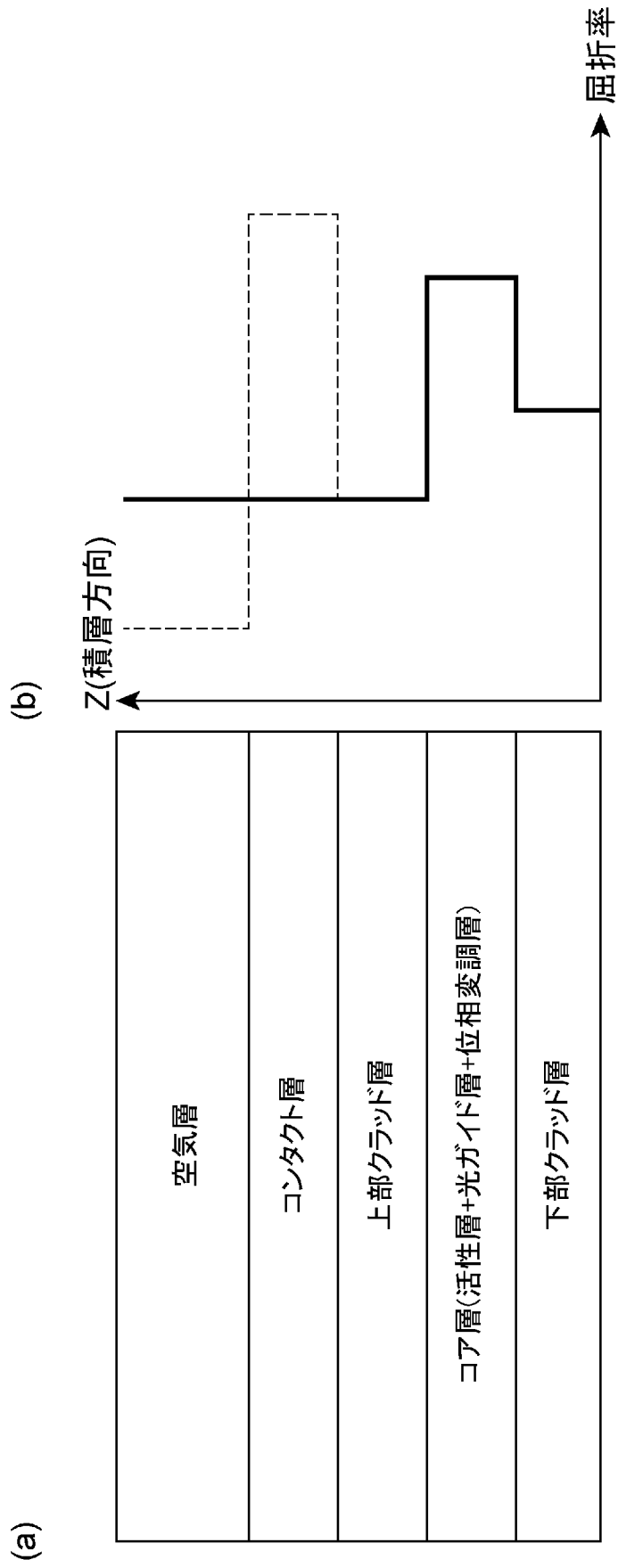
[図38]



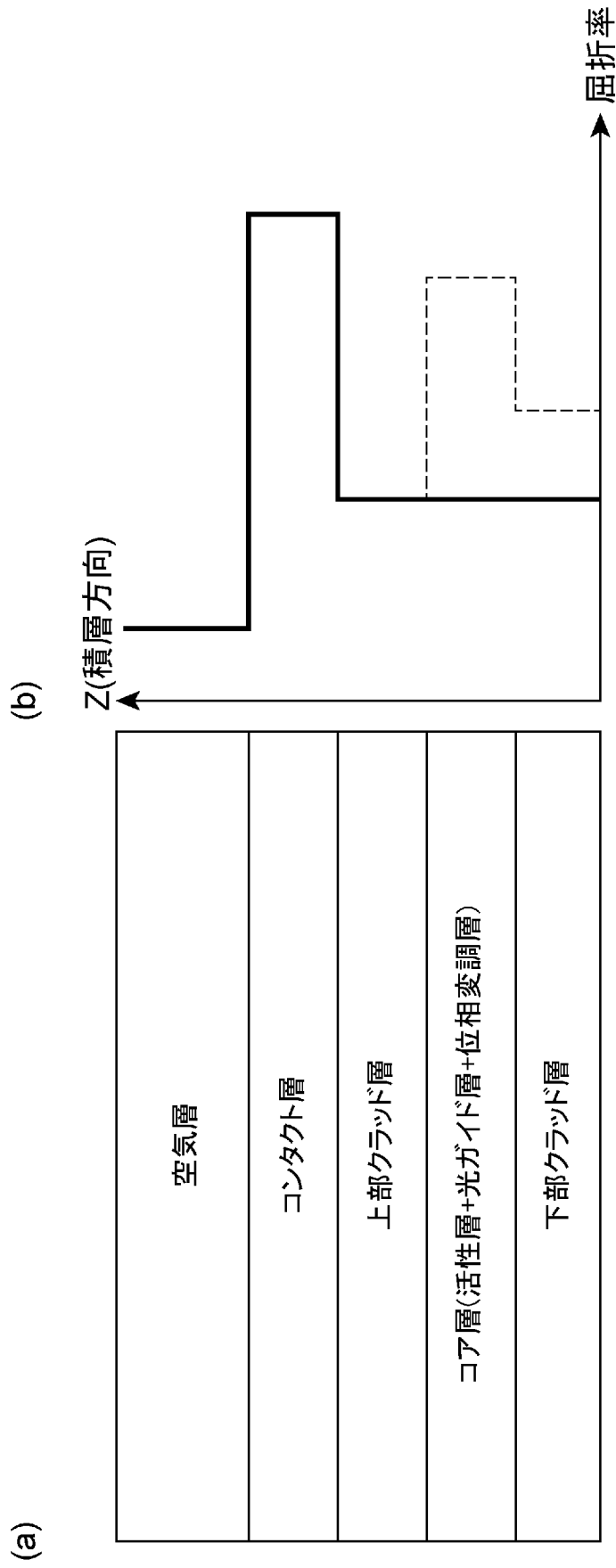
[図39]



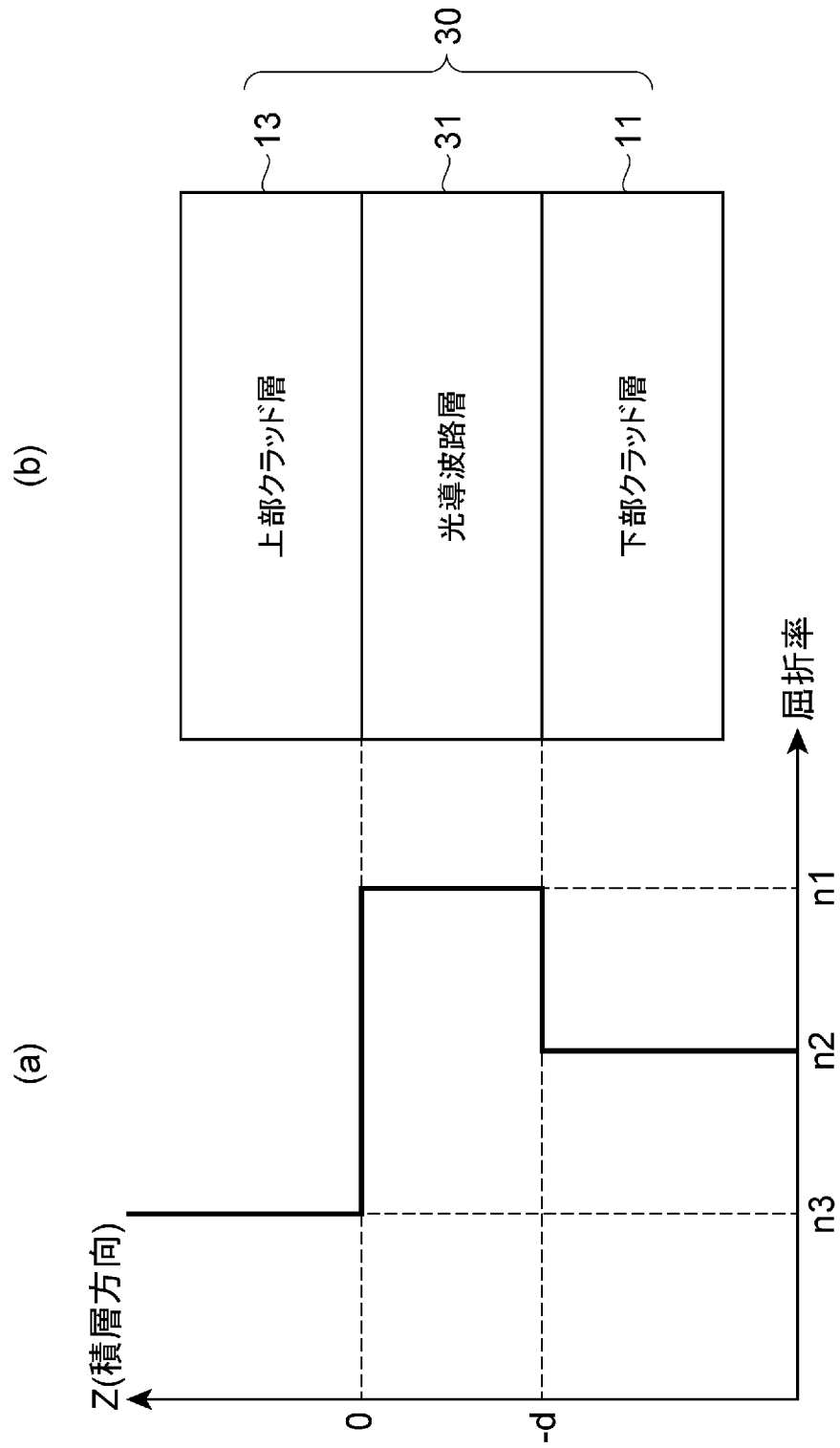
[図40]



[図41]



[図42]



[図43]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	—	空気	∞	1.00
2	P型	GaAsコンタクト層	100	3.55
3	P型	AlGaAsクラッド層	700	3.12
4	I型	コア層(位相変調+量子井戸+ガイド層)	475	3.38
5	N型	AlGaAsクラッド層	2000	3.27

[図44]

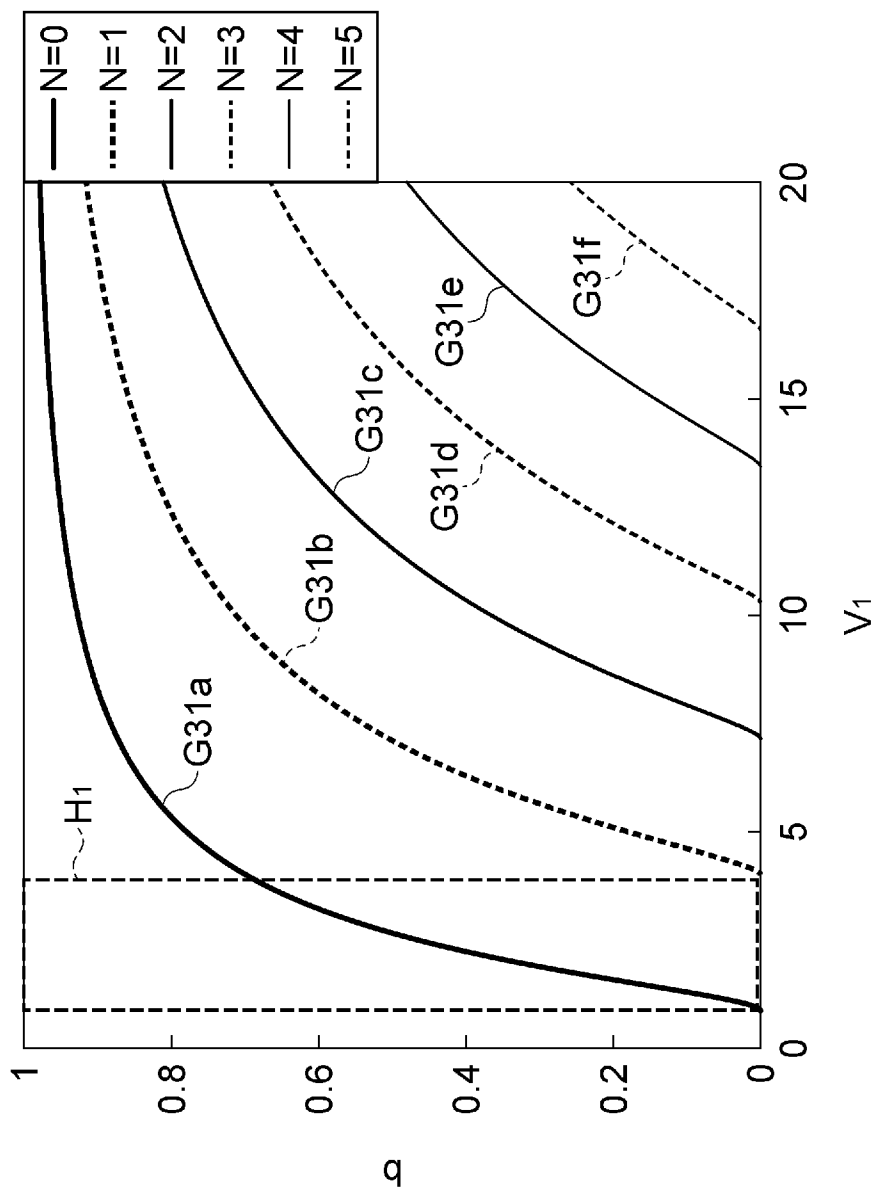
(a)

波長	940nm
n ₁	3.38
n ₂	3.27
n ₃	3.12
a'	1.40
n _{clad}	3.12

(b)

次数	V ₁	膜厚(nm)
0	0.869	157
1	4.01	723

[図45]



[図46]

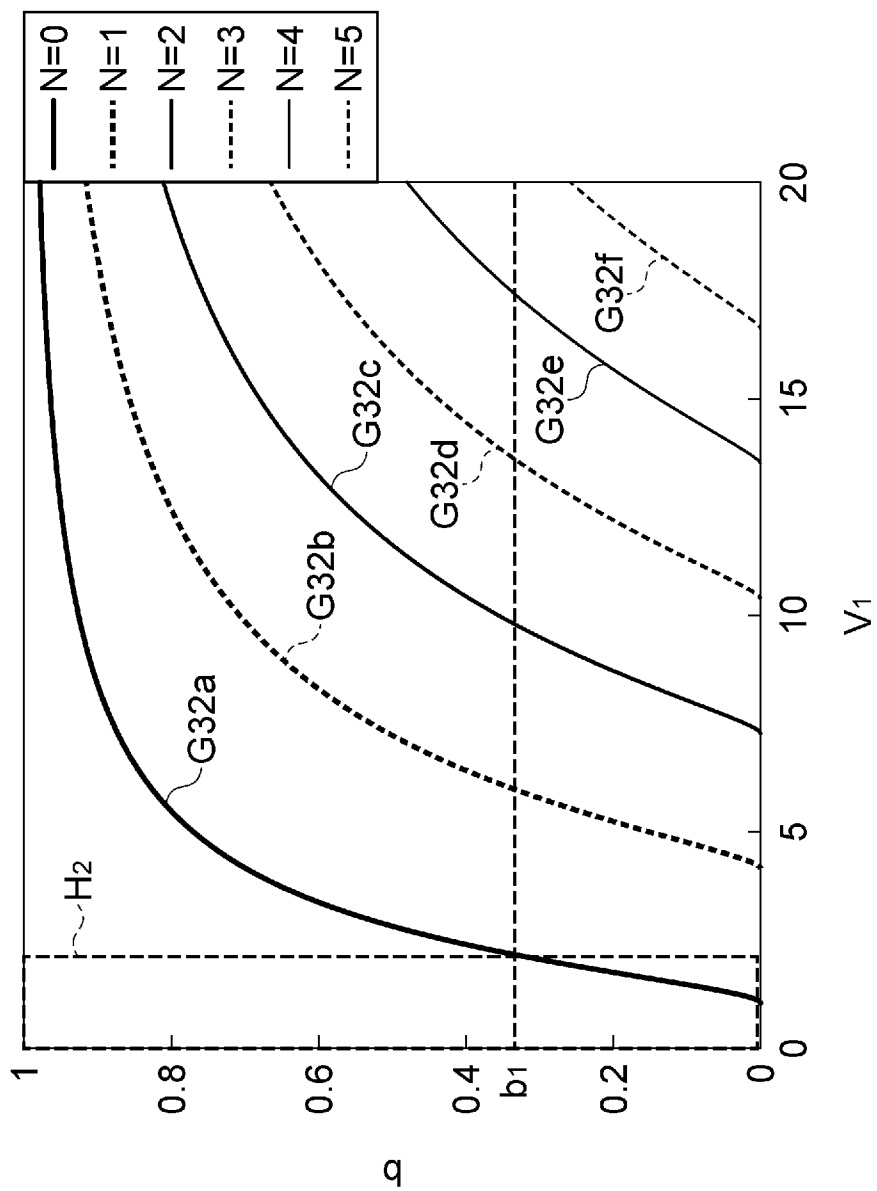
(a)

波長	940nm
n4	3.55
n5	3.12
n6	1.00
a'	3.04
nclad	3.27

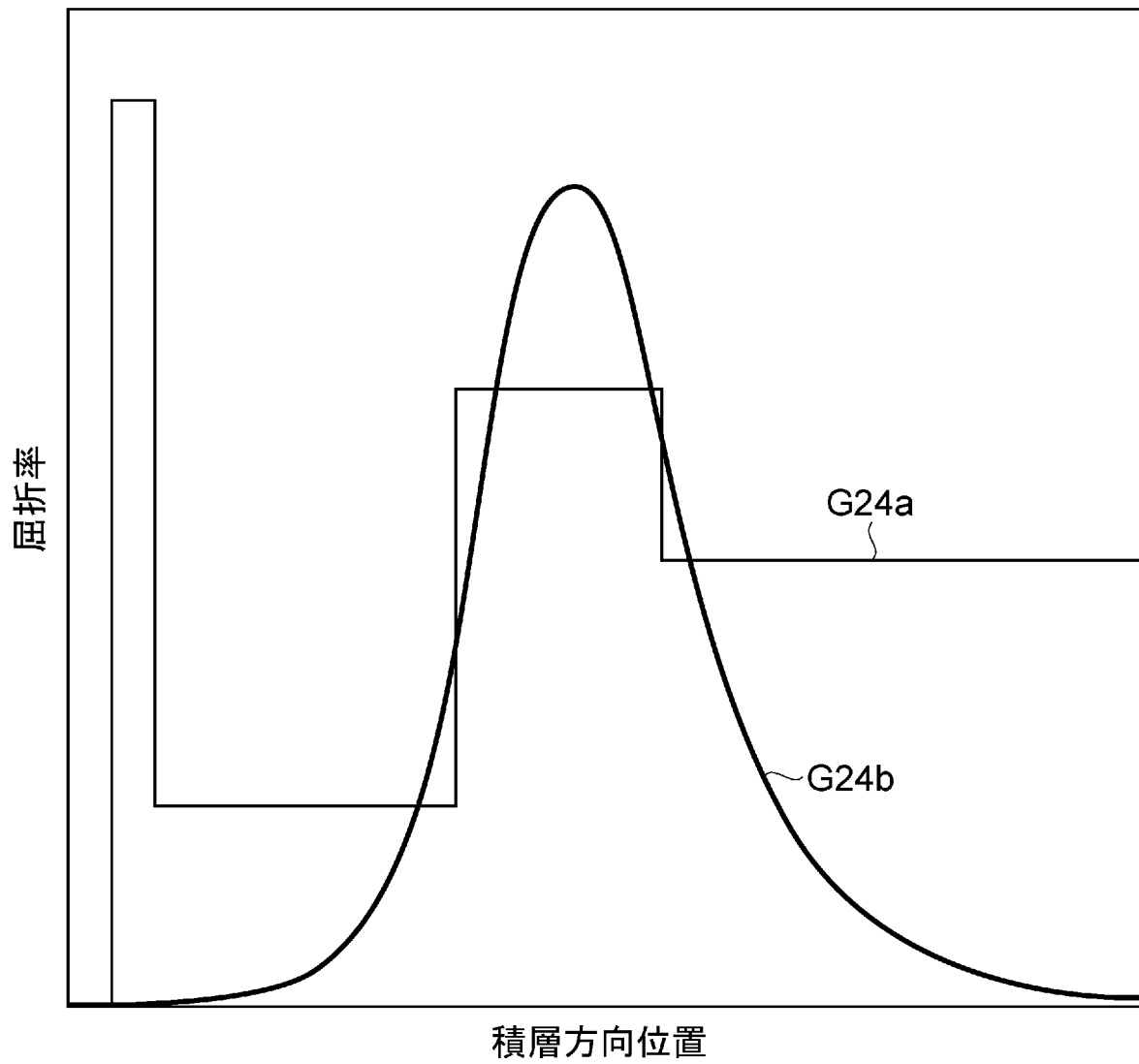
(b)

b	V ₂	膜厚(nm)
0.335	2.17	192

[圖47]



[図48]



[図49]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	—	空気	∞	1.00
2	P型	GaInAsP(Eg=1.15eV)コンタクト層	100	3.35
3	P型	InPクラッド層	1000	3.21
4	I型	位相変調層(GaInAsP(Eg=1.0eV)/空洞, 空洞FF=15%)	300	3.20
5	I型	コア層(量子井戸+ガイド層)	275	3.42
6	N型	InPクラッド層	∞	3.21

[図50]

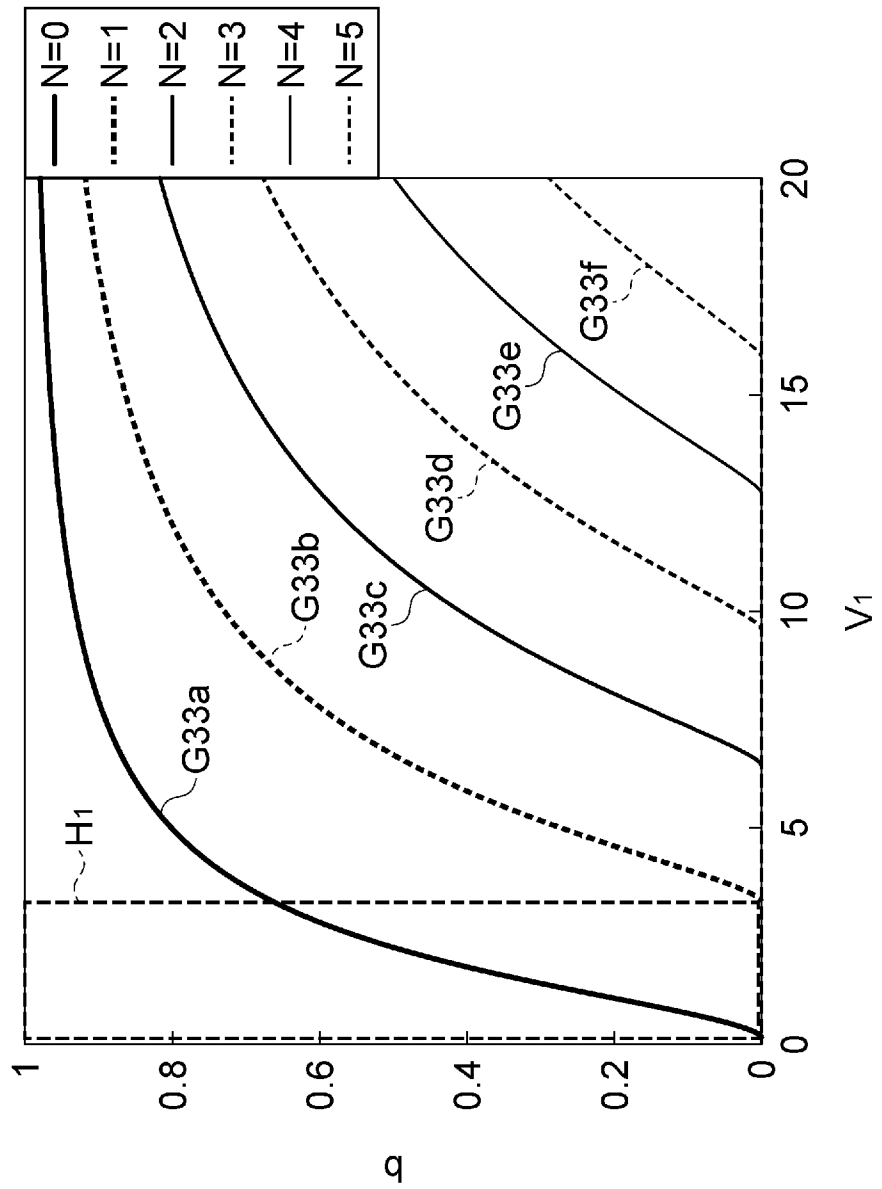
(a)

波長	1300nm
n ₁	3.42
n ₂	3.21
n ₃	3.20
a'	0.0267
n _{clad}	3.21

(b)

b	V ₂	膜厚(nm)
0	0.162	28
0	3.30	579

[図51]



[図52]

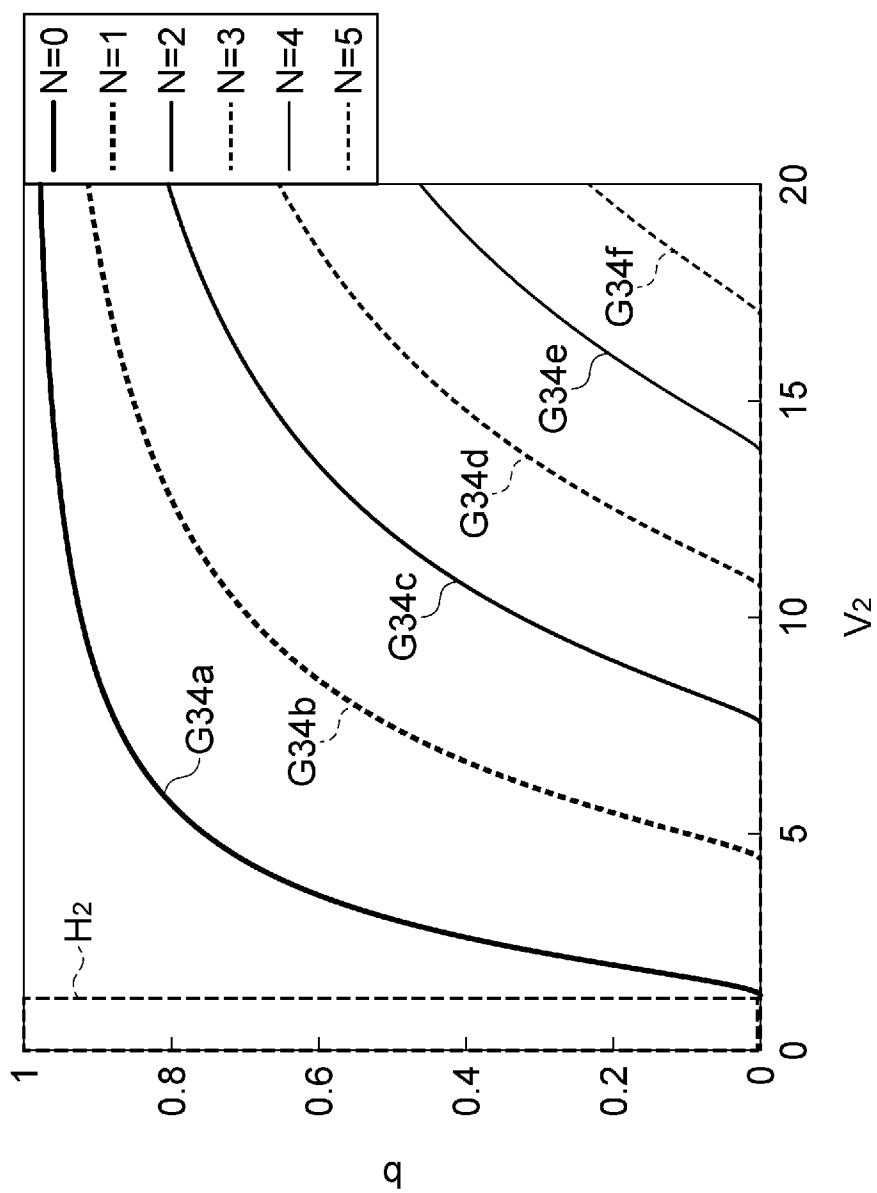
(a)

波長	1300nm
n ₄	3.35
n ₅	3.21
n ₆	1.00
a'	10.1
n _{clad}	3.21

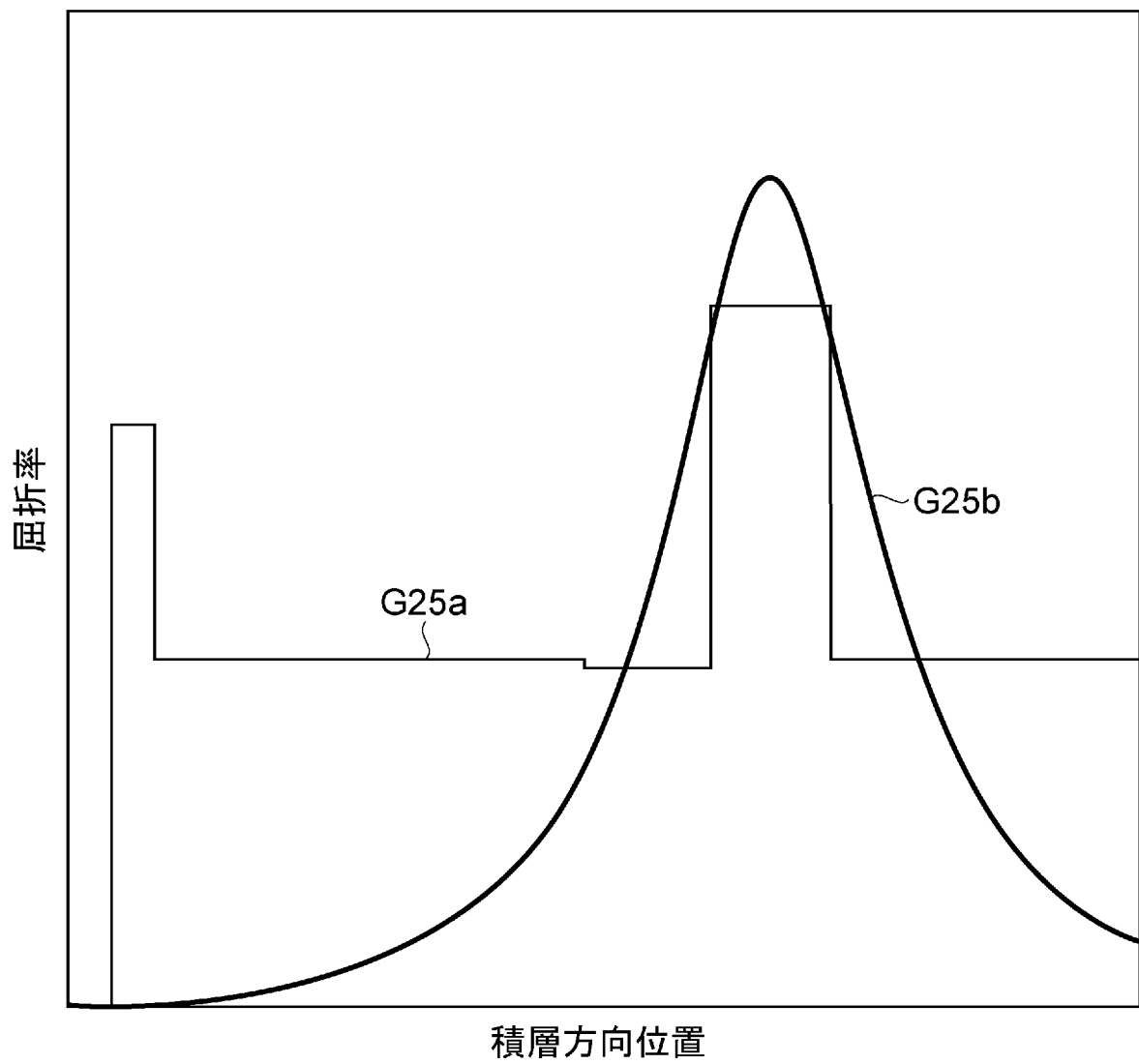
(b)

b	V ₂	膜厚(nm)
0	1.27	273

[53]



[図54]



[図55]

層番号	伝導型	層構造	膜厚(nm)	屈折率
1	—	空気	∞	1.00
2	P型	GaNコンタクト層	100	2.55
3	P型	AlGaNクラッド層	600	2.53
4	I/N型	コア層(量子井戸+ガイド層)	300	2.57
5	N型	位相変調層(GaN/空洞, 空洞FF=15%)	100	2.39
6	N型	AlGaNクラッド層	∞	2.54

[図56]

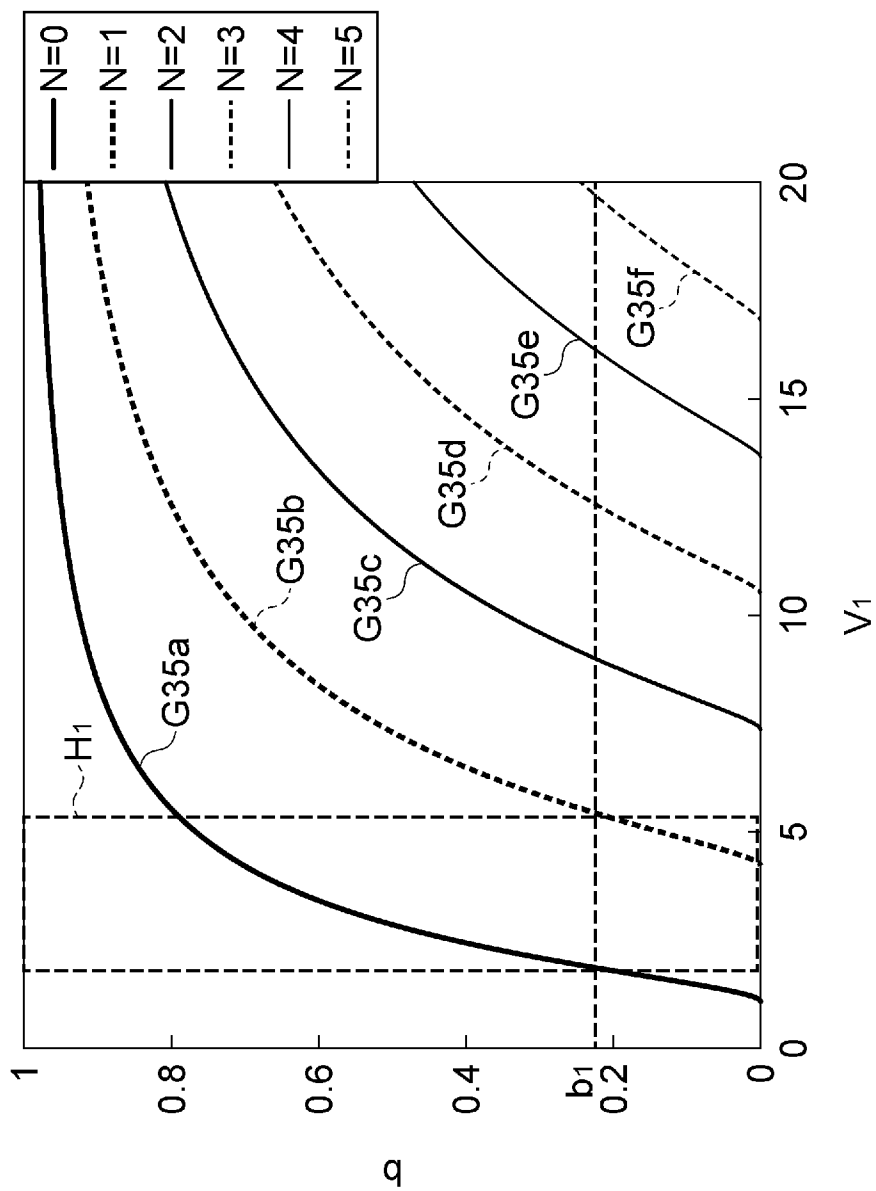
(a)

波長	405nm
n ₁	2.57
n ₂	2.53
n ₃	2.39
a'	3.59
n _{clad}	2.54

(b)

b	V ₁	膜厚(nm)
0.224	1.86	273
0.224	5.43	795

[図57]



[図58]

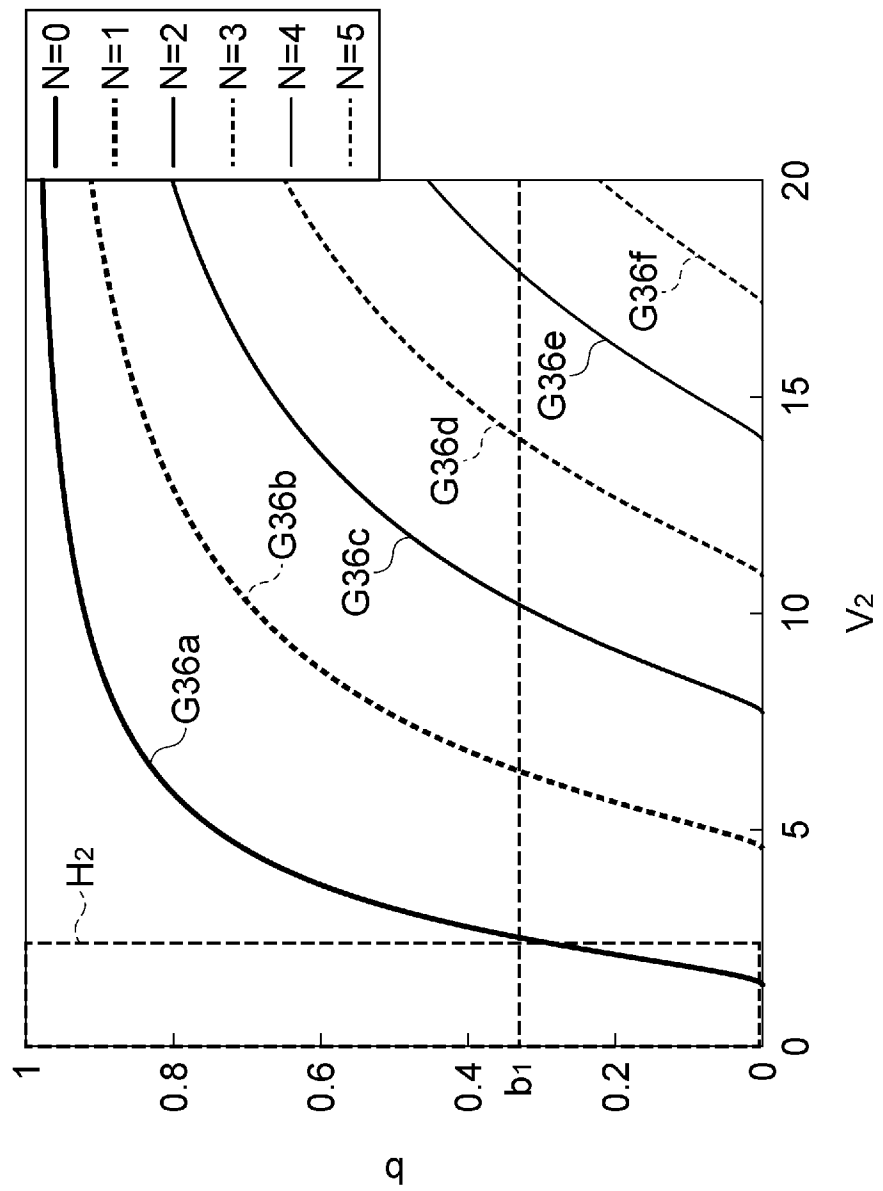
(a)

波長	405nm
n ₄	2.55
n ₅	2.53
n ₆	1.00
a'	40.8
n _{clad}	2.54

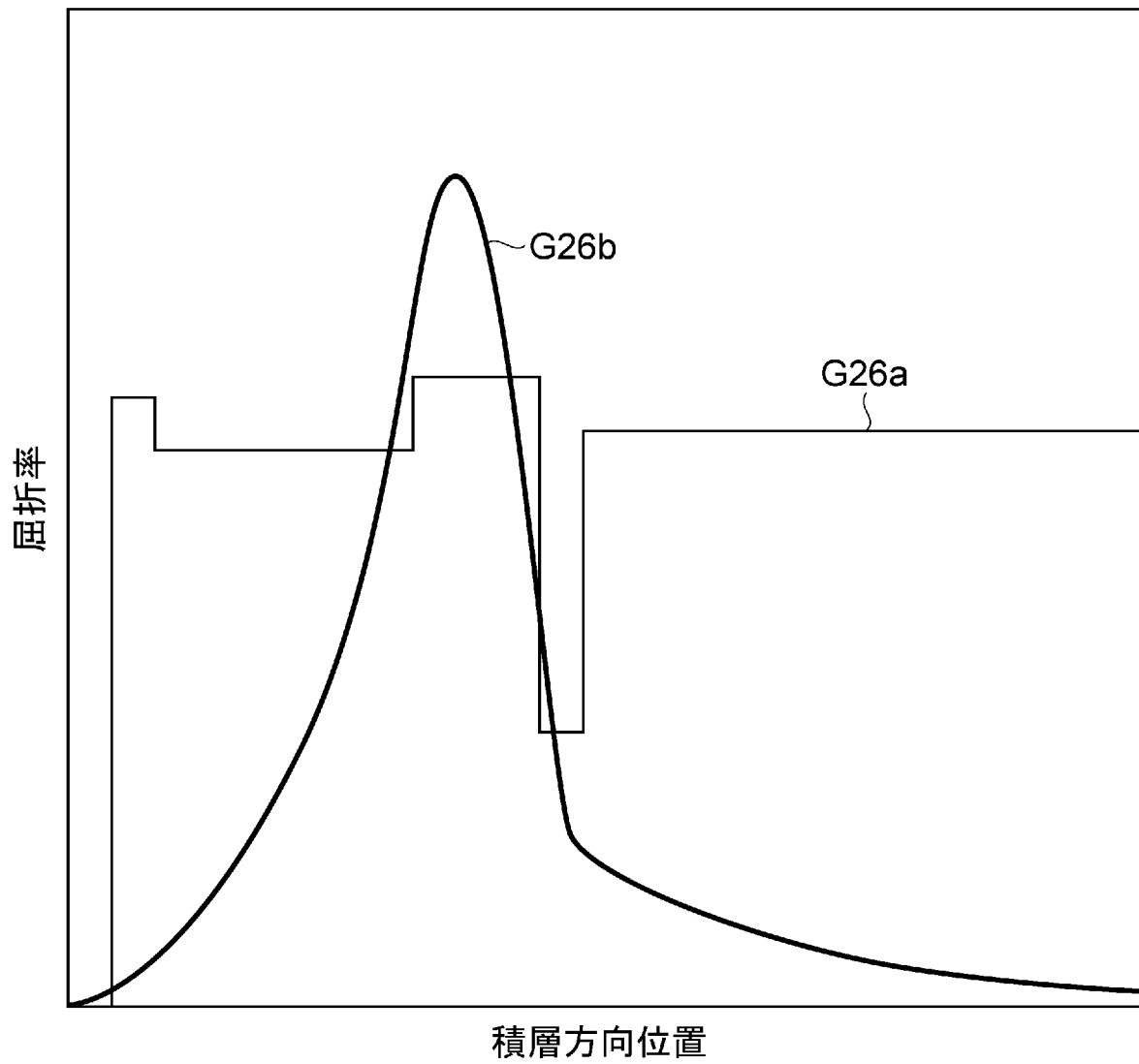
(b)

b	V ₂	膜厚(nm)
0.33	2.51	445

[59]



[図60]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/043813

<p>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl. H01S5/18 (2006.01) i</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>											
<p>B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int.Cl. H01S5/00-5/50</p> <p>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched</p> <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:80%;">Published examined utility model applications of Japan</td> <td style="width:20%;">1922-1996</td> </tr> <tr> <td>Published unexamined utility model applications of Japan</td> <td>1971-2019</td> </tr> <tr> <td>Registered utility model specifications of Japan</td> <td>1996-2019</td> </tr> <tr> <td>Published registered utility model applications of Japan</td> <td>1994-2019</td> </tr> </table> <p>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) IEEE Xplore, nature.com, Scitation, OSA Publishing</p>			Published examined utility model applications of Japan	1922-1996	Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019	Registered utility model specifications of Japan	1996-2019	Published registered utility model applications of Japan	1994-2019	
Published examined utility model applications of Japan	1922-1996										
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019										
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019										
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019										
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:10%;">Category*</th> <th style="width:70%;">Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th style="width:20%;">Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td align="center">Y A</td> <td>KUROSAKA et al., "Phase-modulating lasers toward on-chip integration", SCIENTIFIC REPORTS, 26 July 2016, vol. 6, p. 30138</td> <td align="center">1-2, 4-9 3</td> </tr> <tr> <td align="center">Y A</td> <td>JP 2007-73571 A (KYOTO UNIVERSITY) 22 March 2007, paragraphs [0011]-[0029], fig. 3-12 & US 2012/0002692 A1 & WO 2007/029661 A1 & EP 1933431 A1 & KR 10-2008-0049734 A & CN 101258653 A & US 2009/0135869 A1, paragraphs [0015]-[0109], fig. 1-12</td> <td align="center">1-2, 4-9 3</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	Y A	KUROSAKA et al., "Phase-modulating lasers toward on-chip integration", SCIENTIFIC REPORTS, 26 July 2016, vol. 6, p. 30138	1-2, 4-9 3	Y A	JP 2007-73571 A (KYOTO UNIVERSITY) 22 March 2007, paragraphs [0011]-[0029], fig. 3-12 & US 2012/0002692 A1 & WO 2007/029661 A1 & EP 1933431 A1 & KR 10-2008-0049734 A & CN 101258653 A & US 2009/0135869 A1, paragraphs [0015]-[0109], fig. 1-12	1-2, 4-9 3
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.									
Y A	KUROSAKA et al., "Phase-modulating lasers toward on-chip integration", SCIENTIFIC REPORTS, 26 July 2016, vol. 6, p. 30138	1-2, 4-9 3									
Y A	JP 2007-73571 A (KYOTO UNIVERSITY) 22 March 2007, paragraphs [0011]-[0029], fig. 3-12 & US 2012/0002692 A1 & WO 2007/029661 A1 & EP 1933431 A1 & KR 10-2008-0049734 A & CN 101258653 A & US 2009/0135869 A1, paragraphs [0015]-[0109], fig. 1-12	1-2, 4-9 3									
<p><input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.</p>											
<table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:50%; border:none;"> * 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 </td> <td style="width:50%; border:none;"> "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 </td> </tr> </table>			* 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							
* 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 12 February 2019 (12.02.2019)		Date of mailing of the international search report 26 February 2019 (26.02.2019)									
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/JP2018/043813

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	WO 2016/148075 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) 22 September 2016, paragraphs [0020]-[0148], fig. 1-51 & US 2018/0109075 A1, paragraphs [0071]-[0241], fig. 1-51	2, 4-9 3
Y A	WO 2014/175447 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) 30 October 2014, paragraphs [0018]-[0052], fig. 1-7 & US 2016/0064894 A1, paragraphs [0030]-[0064], fig. 1-7	2, 4-9 3
Y	JP 5373717 B2 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 27 September 2013, paragraphs [0004]-[0009], fig. 1, 3 (Family: none)	7-9
Y	NISHIMOTO et al., "Fabrication of photonic crystal lasers by MBE air-hole retained growth", Applied Physics Express, 19 August 2014, vol. 7, p. 092703	8-9
A	US 2014/0211822 A1 (FATTAL et al.) 31 July 2014, paragraphs [0020]-[0049], fig. 1-12 & WO 2013/039503 A1 & KR 10-2014-0059288 A & CN 103907251 A	1-9

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. H01S5/18(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 1971-2019年 日本国実用新案登録公報 1996-2019年 日本国登録実用新案公報 1994-2019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） IEEE Xplore, nature.com, Scitation, OSA Publishing		
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
Y A	KUROSAKA et al., Phase-modulating lasers toward on-chip integration, SCIENTIFIC REPORTS, 2016.07.26, Vol.6, p.30138	1-2, 4-9 3
Y A	JP 2007-73571 A (国立大学法人京都大学) 2007.03.22, 段落[0011]-[0029], 図 3-12 & US 2012/0002692 A1 & WO 2007/029661 A1 & EP 1933431 A1 & KR 10-2008-0049734 A & CN 101258653 A & US 2009/0135869 A1 段落[0015]-[0109], FIGS. 1-12	1-2, 4-9 3
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> 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 12.02.2019	国際調査報告の発送日 26.02.2019	
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） 百瀬 正之 電話番号 03-3581-1101 内線 3255	2K 4084

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
Y A	WO 2016/148075 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2016.09.22, 段落[0020]-[0148], 図 1-51 & US 2018/0109075 A1 段落[0071]-[0241], FIGS. 1-51	2, 4-9 3
Y A	WO 2014/175447 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2014.10.30, 段落[0018]-[0052], 図 1-7 & US 2016/0064894 A1 段落[0030]-[0064], FIGS. 1-7	2, 4-9 3
Y	JP 5373717 B2 (日本電信電話株式会社) 2013.09.27, 段落[0004]-[0009], 図 1, 3 (ファミリーなし)	7-9
Y	NISHIMOTO et al., Fabrication of photonic crystal lasers by MBE air-hole retained growth, Applied Physics Express, 2014.08.19, Vol.7, p.092703	8-9
A	US 2014/0211822 A1 (FATTAL et al.) 2014.07.31, 段落[0020]-[0049], FIGS. 1-12 & WO 2013/039503 A1 & KR 10-2014-0059288 A & CN 103907251 A	1-9