

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7531408号
(P7531408)

(45)発行日 令和6年8月9日(2024.8.9)

(24)登録日 令和6年8月1日(2024.8.1)

(51)国際特許分類		F I	
H O 1 L	31/0232(2014.01)	H O 1 L	31/02 D
H O 1 L	31/107(2006.01)	H O 1 L	31/10 B
G O 1 S	7/486(2020.01)	G O 1 S	7/486
G O 1 C	3/06 (2006.01)	G O 1 C	3/06 1 2 0 Q
H O 1 L	27/146(2006.01)	H O 1 L	27/146 D
		請求項の数	22 (全26頁) 最終頁に続く
(21)出願番号	特願2021-2071(P2021-2071)	(73)特許権者	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22)出願日	令和3年1月8日(2021.1.8)	(74)代理人	110004026 弁理士法人 i X
(65)公開番号	特開2022-107240(P2022-107240 A)	(72)発明者	岡本 和晃 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会 社東芝内
(43)公開日	令和4年7月21日(2022.7.21)	(72)発明者	権 鎬楠 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会 社東芝内
審査請求日	令和5年2月14日(2023.2.14)	(72)発明者	清水 真理子 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会 社東芝内
		(72)発明者	鈴木 和拓 最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車

(57)【特許請求の範囲】
【請求項1】

複数の素子であって、前記複数の素子のそれぞれは、第1導電形の第1半導体領域と、前記第1半導体領域の上に設けられ前記第1半導体領域よりも高い第1導電形の不純物濃度を有する第1導電形の第2半導体領域と、前記第2半導体領域の上に設けられた第2導電形の第3半導体領域と、を含み、前記複数の素子は、前記第1半導体領域から前記第2半導体領域へ向かう第1方向と交差する第2方向において第1周期で並ぶ、前記複数の素子と、
前記第3半導体領域と電氣的に接続されたクエンチ部と、
前記複数の素子のそれぞれの上に設けられた複数のレンズであって、前記複数のレンズのうちの1つが前記複数の素子のうちの1つの上に位置する前記複数のレンズと、
前記複数の素子と前記複数のレンズとの間に設けられた第1厚さの屈折層であって、前記第1周期に対する前記第1厚さの比は、0.16以上0.72以下であり、前記レンズよりも厚い屈折層と、
前記第1半導体領域と異なる屈折率を有する第1構造体と、
を備え、
前記複数の素子は、互いに隣接する第1素子と第2素子とを含み、
前記第1構造体の少なくとも一部は、前記第1素子の前記第1半導体領域と、前記第2素子の前記第1半導体領域と、の間に設けられ、
前記第1構造体の上端は、前記屈折層の内部に位置し、前記第1素子を含む第1半導体

層の上面よりも高く、前記屈折層の上面より低い、光検出器。

【請求項 2】

前記第 1 半導体領域、前記第 2 半導体領域、及び前記第 3 半導体領域を含む第 1 半導体層の厚さは、第 2 厚さであり、

前記第 1 周期に対する前記第 2 厚さの比は、0.4 以上 1.2 以下である、請求項 1 記載の光検出器。

【請求項 3】

前記屈折層は、前記複数のレンズと前記複数の素子との間に設けられた第 1 層と、前記第 1 層と前記複数のレンズとの間に設けられた第 2 層と、を含む、請求項 1 または 2 に記載の光検出器。

【請求項 4】

前記第 3 半導体領域と前記クエンチ部とを接続する導電部をさらに備え、

前記導電部の少なくとも一部は、前記第 1 方向に垂直な平面において前記屈折層に囲まれた、請求項 1～3 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 5】

前記第 1 周期は、15 マイクロメートル以下である、請求項 1～4 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 6】

前記第 1 厚さは、2 マイクロメートル以上 8 マイクロメートル以下である、請求項 1～4 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 7】

前記第 2 半導体領域及び前記第 3 半導体領域は、前記第 1 方向に垂直な平面において、前記第 1 半導体領域の一部に囲まれた、請求項 1～6 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 8】

前記第 1 半導体領域と異なる屈折率を有する第 2 構造体をさらに備え、

前記第 2 構造体の少なくとも一部は、前記第 1 構造体の前記少なくとも一部と、前記第 2 素子の前記第 1 半導体領域と、の間に設けられ、

前記第 1 構造体の前記少なくとも一部と、前記第 2 構造体の前記少なくとも一部とは、互いに離れた、請求項 1 記載の光検出器。

【請求項 9】

前記第 1 構造体は、前記第 1 素子を囲む、請求項 1 または 8 に記載の光検出器。

【請求項 10】

前記第 1 構造体及び前記第 2 構造体は、前記第 1 素子及び前記第 2 素子をそれぞれ囲む請求項 8 記載の光検出器。

【請求項 11】

少なくとも前記第 1 構造体及び前記第 2 構造体のいずれかは、前記第 1 方向から見たときに、八角形である請求項 10 記載の光検出器。

【請求項 12】

前記第 1 構造体は、前記第 1 方向から見たときに、前記第 1 素子を不連続に囲む、請求項 1、8～10 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 13】

前記第 1 半導体領域よりも高い第 1 導電形の不純物濃度を有する第 1 導電形の第 2 半導体層をさらに備え、

前記第 1 半導体領域は、前記第 2 半導体層の上に設けられ、

前記第 1 構造体の下部は、前記第 2 半導体層に囲まれた、請求項 1、8～12 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 14】

前記第 1 構造体の上部は、前記屈折層に囲まれた、請求項 1、8～13 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 15】

前記複数の素子は、ガイガーモードで動作するアバランシェフォトダイオードである請求項 1 ～ 1 4 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 1 6】

前記複数のレンズの配置を上方から見た場合に互いに隣接する前記レンズの間に間隔が設けられる請求項 1 ～ 1 5 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 1 7】

前記屈折層は、互いに隣接する前記素子の上において前記第 1 厚さを有する請求項 1 ～ 1 6 のいずれか 1 つに記載の光検出器。

【請求項 1 8】

請求項 1 ～ 1 7 のいずれか 1 つに記載の光検出器と、
前記光検出器の出力信号から光の飛行時間を算出する距離計測回路と、
を備えた光検出システム。

【請求項 1 9】

物体に光を照射する光源と、
前記物体に反射された光を検出する請求項 1 8 記載の光検出システムと、
を備えたライダー装置。

【請求項 2 0】

前記光源と前記光検出器との配置関係に基づいて、3 次元画像を生成する画像認識システムをさらに備えた、請求項 1 9 記載のライダー装置。

【請求項 2 1】

請求項 1 9 または 2 0 に記載のライダー装置を備えた移動体。

【請求項 2 2】

車体の 4 つの隅に請求項 1 9 または 2 0 に記載のライダー装置を備えた車。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明の実施形態は、光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

半導体領域に入射した光を検出する光検出器がある。光検出器について、性能の向上が望まれている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0 0 0 3】

【文献】特開 2 0 1 4 - 9 0 0 3 4 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 0 4】

本発明の実施形態は、性能を向上可能な、光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0 0 0 5】

本発明の実施形態によれば、光検出器は、複数の素子と、クエンチ部と、複数のレンズと、屈折層と、を含む。前記複数の素子のそれぞれは、第 1 導電形の第 1 半導体領域と、前記第 1 半導体領域の上に設けられ前記第 1 半導体領域よりも高い第 1 導電形の不純物濃度を有する第 1 導電形の第 2 半導体領域と、前記第 2 半導体領域の上に設けられた第 2 導電形の第 3 半導体領域と、を含む。前記複数の素子は、前記第 1 半導体領域から前記第 2 半導体領域へ向かう第 1 方向と交差する第 2 方向において第 1 周期で並ぶ。前記クエンチ部は、前記第 3 半導体領域と電氣的に接続される。前記複数のレンズは、前記複数の素子

10

20

30

40

50

のそれぞれの上に設けられる。前記複数のレンズのうちの１つが前記複数の素子うちの１つの上に位置する。前記屈折層は、前記複数の素子と前記複数のレンズとの間に設けられ第１厚さある。前記第１周期に対する前記第１厚さの比は、 0.16 以上 0.72 以下である。

【図面の簡単な説明】

【０００６】

【図１】図１は、第１実施形態に係る光検出器を例示する模式的平面図である。

【図２】図２（ａ）及び図２（ｂ）は、第１実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

【図３】図３（ａ）～図３（ｃ）は、光検出器における光路の計算結果を表す模式的断面図である。

10

【図４】図４は、光検出器における光吸収効率の計算結果を表すグラフ図である。

【図５】図５（ａ）及び図５（ｂ）は、第１実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

【図６】図６は、第１実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する断面図である。

【図７】図７は、第２実施形態に係る光検出器を例示する平面図である。

【図８】図８は、第２実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

【図９】図９（ａ）～図９（ｄ）は、第２実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

【図１０】図１０（ａ）及び図１０（ｂ）は、第２実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

20

【図１１】図１１は、第２実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

【図１２】図１２は、第２実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

【図１３】図１３は、第２実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

【図１４】図１４は、第２実施形態に係る光検出器の一部を表す平面図である。

【図１５】図１５は、第２実施形態に係る光検出器の一部を表す平面図である。

【図１６】図１６（ａ）及び図１６（ｂ）は、光検出器のアバランシェ領域の分布範囲の計算結果を表す模式的断面図である。

【図１７】図１７は、アバランシェ確率の分布の計算結果を表すグラフ図である。

【図１８】図１８（ａ）～図１８（ｃ）は、光検出器における光路の計算結果を表す模式的断面図である。

30

【図１９】図１９は、第３実施形態に係るライダー（Laser Imaging Detection and Ranging: LIDAR）装置を例示する模式的断面図である。

【図２０】図２０は、ライダー装置の検出対象の検出を説明するための図である。

【図２１】図２１は、第３実施形態に係るライダー装置を備えた車の上面略図である。

【発明を実施するための形態】

【０００７】

以下に、本発明の各実施の形態について図面を参照しつつ説明する。

図面は模式的または概念的なものであり、各部分の厚さと幅との関係、部分間の大きさの比率などは、必ずしも現実のものとは限らない。同じ部分を表す場合であっても、図面により互いの寸法や比率が異なって表される場合もある。

40

本願明細書と各図において、既出の図に関して前述したものと同様の要素には同一の符号を付して詳細な説明は適宜省略する。

【０００８】

（第１実施形態）

図１は、第１実施形態に係る光検出器を例示する模式的平面図である。

図１に表したように、第１実施形態に係る光検出器１００は、複数の素子１０（受光素子）と、屈折層３０と、複数のレンズ４０と、を含む。複数の素子１０の上に屈折層３０が設けられ、屈折層３０の上にレンズ４０が設けられている。

【０００９】

50

複数の素子10は、X-Y平面に沿って、アレイ状または格子状に並んでいる。例えば、複数の素子10は、X軸方向及びY軸方向において、周期的に等ピッチで並んでいる。

【0010】

なお、実施形態の説明においては、X-Y平面に対して交差する方向、又は、後述する第1半導体領域11（図2参照）から第2半導体領域12（図2参照）へ向かう方向をZ軸方向とする。Z軸方向に対して垂直な方向な方向をX軸方向（第2方向）とする。Z軸方向及びX軸方向に垂直な方向をY軸方向（第3方向）とする。また、説明のために、第1半導体領域11から第2半導体領域12に向かう方向を「上」と言い、その反対方向を「下」と言う。これらの方向は、第1半導体領域11と第2半導体領域12との相対的な位置関係に基づき、重力の方向とは無関係である。「上」は、レンズ40が設置される光検出器の光が入射される側に対応する。

10

【0011】

複数のレンズ40のそれぞれは、複数の素子10のそれぞれの上に設けられる。言い換えれば、複数のレンズ40は、複数の素子10の周期に合わせて配列されており、複数のレンズ40のうちの1つは、複数の素子10のうちの1つの上に位置している。複数のレンズ40は、例えばマイクロレンズアレイである。マイクロレンズアレイは、受光素子が配置されていないエリアに照射される光の光路を屈折により変更し、受光素子内に照射することで光検出器の受光感度を向上させる。

【0012】

複数の素子10は、X軸方向において第1周期L1で並び、Y軸方向において第2周期L2で並ぶ。この例では、1つの素子10において、X軸方向の長さY軸方向の長さとは、実質的に互いに同じである。また、この例では、Z軸方向から見たときに、複数の素子10の形状は、実質的に互いに同じであり、第1周期L1と第2周期L2とは、実質的に互いに等しい。

20

【0013】

例えば、複数の素子10は、第1素子10aと、第2素子10bと、第3素子10cとを含む。第2素子10bは、第1素子10aとX軸方向において隣接している。第3素子10cは、第1素子10aとY軸方向において隣接している。周期（ピッチ）は、位置の繰り返しの単位の長さである。第1周期L1は、第1素子10aのX軸方向の中心と、第2素子10bのX軸方向の中心と、を結ぶ長さに対応する。また、第2周期L2は、第1素子10aのY軸方向の中心と、第3素子10cのY軸方向の中心と、を結ぶ長さに対応する。例えば、第1素子10aと隣接する別の素子10のうち、第1素子10aの中心と当該別の素子の中心とを結ぶ距離が最小となる素子10を第2素子10bとする。

30

【0014】

図2（a）及び図2（b）は、第1実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式図である。

図2（a）は、図1に示したA1-A2線断面を示す。すなわち、図2（a）は、図1に示した光検出器100の1つ分、言い換えると周期構造の1周期分の断面を表す。図2（a）に表したように、光検出器100は、電極50と、半導体層22（第2半導体層）と、素子10（第1半導体領域11、第2半導体領域12、及び第3半導体領域13）と、屈折層30と、レンズ40と、導電部61と、を含む。図2（b）は、図2（a）に対応する回路図である。図2（b）に表したように、光検出器100は、クエンチ部63と、第1配線51と、をさらに含む。なお、図2（a）においては、便宜上、クエンチ部63及び第1配線51を省略している。また、図1では、配線等の図示は、省略している。

40

【0015】

電極50は、例えば裏面電極である。半導体層22は、電極50の上に設けられ、電極50と電氣的に接続される。半導体層22は、例えば、第1導電形の半導体基板である。

【0016】

第1半導体領域11は、半導体層22の上に設けられ、半導体層22と接する。第1半導体領域11は、第1導電形であり、半導体層22と電氣的に接続される。

50

【0017】

第2半導体領域12は、第1半導体領域11の上に設けられ、第1半導体領域11と接する。第2半導体領域12は、第1導電形であり、第1半導体領域11と電氣的に接続される。第2半導体領域12の第1導電形の不純物濃度は、第1半導体領域11の第1導電形の不純物濃度よりも高い。

【0018】

第3半導体領域13は、第2半導体領域12の上に設けられ、第2半導体領域12と接する。第3半導体領域13は、第2導電形であり、第2半導体領域12と電氣的に接続される。

【0019】

第1導電形は、p形及びn形の一方である。第2導電形は、p形及びn形の他方である。以下では、第1導電形がp形、第2導電形がn形の場合について説明する。

【0020】

第1半導体領域11、第2半導体領域12及び第3半導体領域13は、例えば1つの半導体層21（第1半導体層）に設けられた領域である。第2半導体領域12と第3半導体領域13との界面でpn接合が形成される。例えば、第2半導体領域12及び第3半導体領域13は、半導体層21内に設けられた拡散層である。第2半導体領域12と第3半導体領域13とによって、フォトダイオードが形成される。複数の素子10のそれぞれが、第1半導体領域11、第2半導体領域12及び第3半導体領域13を含む。

【0021】

この例では、第3半導体領域13の幅は、第2半導体領域12の幅よりも広い。「幅」とは、Z軸方向に垂直な方向（例えばX軸方向）に沿った長さである。ただし、実施形態において、第3半導体領域13の幅は、第2半導体領域12の幅と同じであってもよい。第2半導体領域12及び第3半導体領域13のそれぞれは、Z軸方向に垂直な方向において、第1半導体領域11の一部と並ぶ。すなわち、第2半導体領域12及び第3半導体領域13は、X-Y平面に沿って第1半導体領域11に囲まれている。第2半導体領域12の側面12s及び第3半導体領域13の側面13sは、第1半導体領域11と接する。Z軸方向に垂直な方向において、第2半導体領域12の中心または第3半導体領域13の中心が、素子10の中心に対応する。

【0022】

半導体層21（第1半導体領域11、第2半導体領域12及び第3半導体領域13）及び半導体層22は、シリコン、炭化シリコン、ガリウムヒ素、及び窒化ガリウムからなる群より選択される少なくとも1つの半導体材料を含む。例えば、半導体層21及び半導体層22は、シリコンを含む。例えば、半導体層22の第1導電形の不純物濃度は、第1半導体領域11の第1導電形の不純物濃度よりも高い。第2半導体領域12は、シリコンに例えばボロンをp形不純物として注入することで得られる。第3半導体領域13は、シリコンに例えばリン、ヒ素、又はアンチモンをn形不純物として注入することで得られる。半導体層21は、例えば基板の上に形成されたエピタキシャル層である。半導体層21及び半導体層22に含まれるシリコン単結晶の（100）面は、例えばZ軸方向に対して垂直である。

【0023】

屈折層30は、複数の素子10（半導体層21）と複数のレンズ40との間に設けられる。屈折層30は、複数の素子10の受光面、すなわち半導体層21の上面21Uと接する。屈折層30は、複数のレンズ40と接する。屈折層30の厚さは、1 μ m（マイクロメートル）以上10 μ m以下が好ましく、2 μ m以上8 μ m以下がより好ましい。

【0024】

屈折層30は、例えば絶縁層である。屈折層30には、例えば光透過性の材料が用いられる。屈折層30は、シリコンと、酸素及び窒素からなる群より選択される1つと、を含む。例えば、屈折層30は、酸化シリコン及び窒化シリコンの少なくともいずれかを含む。屈折層30の屈折率は、例えば1.4以上2以下である。なお、本願明細書において、

10

20

30

40

50

屈折率とは、絶対屈折率である。

【0025】

屈折層30の厚さ（Z軸方向に沿った長さ）を、第1厚さIとする。後述するように、第1周期L1に対する第1厚さIの比（第1厚さ／第1周期＝I／L1）は、例えば0.16以上0.72以下が好ましく、0.24以上0.64以下がより好ましい。

【0026】

導電部61は、第3半導体領域13の上に設けられ、第3半導体領域13と接する。導電部61は、第3半導体領域13と電氣的に接続される。この例では、導電部61の少なくとも一部は、屈折層30内に設けられている。導電部61の少なくとも一部は、X軸方向及びY軸方向において屈折層30の一部と並び、すなわち、Z軸方向から見て、導電部61の少なくとも一部が屈折層30の一部と重ならない領域を有しており、X-Y平面に沿って屈折層30に囲まれている。これにより、導電部61が外部と接触して短絡することを抑制できる。

【0027】

クエンチ部63は、導電部61と電氣的に接続される。これにより、クエンチ部63の一端は、導電部61を介して、第3半導体領域13と電氣的に接続される。クエンチ部63は複数設けられ、複数のクエンチ部63のそれぞれが、複数の半導体領域13のそれぞれと電氣的に接続される。クエンチ部63の他端は、第1配線51と電氣的に接続される。

【0028】

例えば、クエンチ部63は、クエンチ抵抗であり、クエンチ部63の電気抵抗は、導電部61の電気抵抗よりも大きい。抵抗体としてのクエンチ部63は、例えばポリシリコンを含む。クエンチ部63には、n形不純物又はp形不純物が添加されていても良い。クエンチ部63の抵抗は、例えば、50kΩ以上2MΩ以下である。

【0029】

電極50、導電部61及び各配線は、例えば、チタン、タングステン、銅、金、アルミニウムからなる群より選択された少なくとも1つの金属を含む。電極50及び導電部61は、例えば、アルミニウム（またはアルミニウム含有材料）、銅（または銅含有材料）、金（または金含有材料）、酸化インジウムスズ（ITO：Indium Tin Oxide）、または、これらの材料と他の金属材料との組合せである。

【0030】

レンズ40は、屈折層30の上に設けられる。例えば、1つのレンズ40は、1つの素子10の上に位置する。レンズ40の上面は、上方に向けて凸である。レンズ40は、素子10に向けて光を集める。この例では、レンズ40の形状は、Z軸方向から見た時に、略円形であり、隣接するレンズ40同士は互いに離れている（図1参照）。レンズ40の幅は、8μm以上30μm以下が好ましく、10μm以上15μm以下であることがより好ましい。レンズ40の上面の曲率半径は、例えば4μm以上10μm以下である。

【0031】

レンズ40は、光透過性の樹脂を含む。樹脂は、例えばアクリル樹脂を含む。レンズ40には、例えば東京応化工業社製のアクリル樹脂（TMR-C006）を使用することができる。例えば、レンズ40は、屈折層30上に、透明性の平坦化膜と感光性のマイクロレンズ用樹脂とを塗布し、フォトリソグラフィ技術を用いて受光素子とおおよそ同周期の樹脂パターンを形成した後、熱処理により樹脂パターンを熱変形させることで形成される。レンズ40の製作に使用するマイクロレンズ用樹脂の屈折率は、1.4以上2以下であることが好ましい。レンズ40の屈折率は、例えば屈折層30の屈折率よりも高い。レンズ40の屈折率は、屈折層30の屈折率よりも低くてもよい。

【0032】

光検出器100の動作を説明する。

上方から光検出器100に入射した光は、レンズ40を通過して、屈折層30に入射する。屈折層30に入射した光は、屈折層30を通過して、素子10（半導体層21）に入射する。素子10に光が入射すると、半導体層21で電荷が発生する。電荷が発生すると

10

20

30

40

50

、クエンチ部 63 及び第 1 配線 51 に電流が流れる。第 1 配線 51 に流れる電流を検出することで、素子 10 への光の入射を検出できる。

【0033】

導電部 61 及び電極 50 は、第 2 半導体領域 12 と第 3 半導体領域 13 とに電圧を印加して受光素子を駆動させる。第 2 半導体領域 12 内で光電変換により生じた電気信号は、クエンチ部 63 及び第 1 配線 51 等を介して、駆動・読み出し部（図面には省略）に出力される。電極 50 の電位を制御することで、第 2 半導体領域 12 と第 3 半導体領域 13 との間に電圧が印加される。例えば、第 2 半導体領域 12 と第 3 半導体領域 13 との間には、逆電圧が印加される。素子 10 は、アバランシェフォトダイオードとして機能する。第 2 半導体領域 12 と第 3 半導体領域 13 との間には、降伏電圧を超える逆電圧が印加されても良い。すなわち、素子 10 は、ガイガーモードで動作しても良い。ガイガーモードで動作することにより、高いゲインと短い時定数を持ったパルス状の信号が出力される。これにより、光検出器 100 の受光感度を向上できる。

10

【0034】

クエンチ部 63 は、素子 10 に光が入射し、アバランシェ降伏が発生した際に、アバランシェ降伏の継続を抑制するために設けられる。アバランシェ降伏が発生し、クエンチ部 63 に電流が流れると、クエンチ部 63 の電気抵抗に応じて電圧降下が生じる。電圧降下により、第 2 半導体領域 12 と第 3 半導体領域 13 との間の電位差が小さくなり、アバランシェ降伏が停止する。これにより、次に素子 10 へ入射した光を検出できるようになる。

【0035】

20

上述したように、大きな電圧降下を生じさせる抵抗体がクエンチ部 63 として設けられても良いし、抵抗体に代えて電流を遮断する制御回路がクエンチ部 63 として設けられても良い。例えば、制御回路は、コンパレータ、制御ロジック部、及び 2 つのスイッチング素子を含む。制御回路には、アクティブクエンチ回路を適用可能である。アクティブクエンチ回路には公知の構成を用いることができる。

【0036】

図 3 (a) ～図 3 (c) は、光検出器における光路の計算結果を表す模式的断面図である。

図 3 (a) に表した例では、屈折層の厚さが $1 \mu\text{m}$ であり、素子の周期に対する屈折層の厚さ ($I/L1$) は 0.08 である。図 3 (b) に表した例では、屈折層の厚さが $5 \mu\text{m}$ であり、素子の周期に対する屈折層の厚さ ($I/L1$) は 0.4 である。図 3 (c) に表した例では、屈折層の厚さが $15 \mu\text{m}$ であり、素子の周期に対する屈折層の厚さ ($I/L1$) は 1.2 である。

30

【0037】

図 3 (a) ～図 3 (c) の各光路の計算において、屈折層の厚さ以外のパラメータは共通である。レンズ 40 の幅 (X 軸方向に沿った長さ) は、 $12.5 \mu\text{m}$ であり、レンズ 40 の高さ (Z 軸方向に沿った長さ) は、 $5.3 \mu\text{m}$ であり、半導体層 21 の屈折率は 3.621 であり、屈折層 30 の屈折率は 1.452 であり、レンズ 40 の屈折率は 1.545 である。上記以外については、図 3 (a) ～図 3 (c) に表した各素子は、図 2 に関する説明と同様である。

40

【0038】

シミュレーションにおいて、光検出器への入射光の波長は 900 nm である。レンズ 40 及び屈折層 30 は、素子 10 に照射される光の光路を調節する。レンズ 40 に照射された光 L_i (入射光) は、レンズ 40 の表面で素子 10 の中心に向かって屈折し、レンズ 40 と屈折層 30 内を通過する。その後、光 L_i は、屈折層 30 と半導体層 21 との界面で再度屈折して、半導体層 21 内を直進する。

【0039】

図 3 (a) ～図 3 (c) に表したように、レンズ 40 を変更しなくても、第 1 周期 $L1$ に対する屈折層 30 の厚さ ($I/L1$) を変更することで、半導体層 21 を通る入射光の光路が変化する。半導体層 21 を通過する光の光路が、第 1 周期 $L1$ に対する屈折層 30

50

の厚さ ($I/L1$) によって変化するため、第1周期 $L1$ に対する屈折層30の厚さ ($I/L1$) によって素子10の特性を向上させることができる。

【0040】

図4は、光検出器における光吸収効率の計算結果を表すグラフ図である。

図4は、図3(a)～図3(c)と同様の光検出器において、屈折層の厚さにより $I/L1$ を変化させたときの、光吸収効率の計算結果を表す。ここで吸収とは、光検出器内で入射光が光電変換による電子を発生させる現象のことを指す。光吸収効率の評価に際しては、まず、半導体層21内において発生したキャリアがアバランシェ倍増を起こす可能性（アバランシェ確率）のある領域（アバランシェ領域）を計算する。光吸収効率は、光検出器に入射される光量 I_i に対するアバランシェ領域内で吸収される光量 I_a の比（吸収光量／入射光量 = I_a/I_i ）によって評価される。従って、 I_a/I_i の値が大きいほど、光が光検知素子内で検出される確率が高くなる。図4の光吸収効率の計算に使用するアバランシェ領域には後述する図16(b)のアバランシェ領域を使用している。

10

【0041】

図4に表したように、第1周期 $L1$ に対する第1厚さ I の比 ($I/L1$) が0.16以上0.72以下の場合に、高い光吸収効率（光検出効率）が得られる。すなわち、光検出器100の感度が向上可能である。

【0042】

比 $I/L1$ を0.16以上0.72以下とすることにより、光検出器100に入射した光の光路が、素子中央に集中しやすいと考えられる。例えば、図3(b)に表した半導体層21への入射光の分布範囲 $R1b$ は、図3(a)に表した半導体層21への入射光の分布範囲 $R1a$ よりも狭い。つまり、半導体層21への入射光は、図3(a)におけるよりも図3(b)において、素子中央に集中している。

20

【0043】

例えば、素子10の半導体層21内においては、入射した光の検知確率（例えば発生したキャリアがアバランシェ倍増を起こす可能性）に分布がある。複数の素子10が受光面に配列された光検出器100においては、素子10の端部（Z軸方向から見たときの外周部）に比べて、素子10の中央において、検知確率が高い。また、例えば、素子10の端部には、隣接する素子を電氣的又は光学的に分離する分離構造が設けられる場合もある。分離構造としては、例えば、半導体層21におけるトレンチ構造や不純物濃度分布が挙げられる。入射光が素子中央に集中することにより、高い光検出効率を得られると考えられる。

30

【0044】

実施形態においては、比 $I/L1$ は、0.16以上が好ましい。これにより、例えば、光の検知確率が高い素子10の中央を、光路が通過しやすくなる。例えば、屈折層30は、レンズ40よりも厚くてもよい。入射光の一部の屈折層30内における光路長は、入射光の当該一部のレンズ40内における光路長よりも長くてもよい。

【0045】

一方、光検出効率は、比 $I/L1$ が0.72よりも大きくなるにつれて低下する。比 $I/L1$ が大きい場合、光検出器100に入射した光は、半導体層21に入射する前に、屈折層30内において収束しやすい。例えば、図3(c)に表した屈折層30内の光の分布範囲 $R2c$ は、図3(b)に表した屈折層30内の光の分布範囲 $R2b$ よりも狭い。屈折層30内において光が収束した場合、半導体層21内において、光は素子10の外側に向かって進行する。例えば、図3(c)に表した半導体層21内の光の分布範囲 $R3c$ は、図3(b)に表した半導体層21内の光の分布範囲 $R3b$ よりも広い。半導体層21内において光が素子10の外側に向かって進行する場合、半導体層21において、光は検知確率の高い素子中央を通過しにくくなる。

40

【0046】

実施形態においては、比 $I/L1$ は、0.72以下が好ましい。これにより、例えば、光の検知確率が高い素子10の中央を、光路が通過しやすくなる。屈折層30の応力に

50

よる歪みや材料費の観点からも、屈折層 30 は厚過ぎないことが好ましい。例えば、屈折層 30 の第 1 厚さ I は、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $8\ \mu\text{m}$ 以下が好ましい。

【0047】

半導体層 21（第 1 半導体領域 11）の厚さ（ Z 軸方向に沿った長さ）を、第 2 厚さ T （図 2（a）参照）とする。第 1 周期 $L1$ に対する第 2 厚さ T の比（第 2 厚さ / 第 1 周期 $= T / L1$ ）は、 0.4 以上が好ましい。例えば、第 1 周期 $L1$ を短くすることで比 $T / L1$ を 0.4 以上とする。第 1 周期 $L1$ が短いことにより、光検出器 100 の解像度を向上させることができる。また、例えば、第 2 厚さ T を厚くすることで、比 $T / L1$ を 0.4 以上とする。半導体層 21 が厚いことにより、半導体層 21 中の光路長を確保することができ、光の検知確率を向上させることができる。

10

【0048】

一方、第 1 周期 $L1$ が短すぎる場合は、素子 10 の受光面において、素子端部（外周部）の割合が大きくなり、光検知確率の高い素子中央を通過する光が減少する恐れがある。これに対して、第 1 周期 $L1$ に対する第 2 厚さ T の比 $T / L1$ は、 1.2 以下が好ましい。この場合、第 1 周期 $L1$ が短すぎることを抑制され、素子中央を通過する光が減少することを抑制できる。例えば、第 1 周期 $L1$ は、 $10\ \mu\text{m}$ 以上 $15\ \mu\text{m}$ 以下が好ましい。

【0049】

第 1 周期 $L1$ が比較的短い場合に、第 1 周期 $L1$ に対する第 1 厚さ I の比 $I / L1$ を、 0.16 以上 0.72 以下とすることがより好ましい。これにより、第 1 周期 $L1$ が比較的短く、素子端部の割合が相対的に大きくなる場合であっても、素子中央を光が通過しやすく、素子中央を通過する光が減少することを抑制できる。

20

以上説明したように、実施形態によれば、例えば受光素子の小面積化と高感度との両立が図れる。

【0050】

図 5（a）及び図 5（b）は、第 1 実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

図 5（a）は、第 1 実施形態の変形例に係る光検出器 101 の一部を表す。このように、複数のレンズ 40 のうち、隣接するレンズ 40 同士は、互いに接していてもよい。また、隣接するレンズ 40 の一部は互いに重なるように並べられてもよい。

図 5（b）は、第 1 実施形態の変形例に係る光検出器 102 の一部を表す。この例では、レンズ 40 の形状は、 Z 軸方向から見たときに、角に曲率を有する四角形である。レンズ 40 の形状は、 Z 軸方向から見たときに、円形でなくてもよく、概ね、多角形、または角丸の多角形でもよい。

30

【0051】

図 6 は、第 1 実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する断面図である。

図 6 は、図 2（a）と同様に、第 1 実施形態の変形例に係る光検出器 103 の一部を表す。光検出器 103 においては、屈折層 30 は、複数の層を含む積層構造を有する。これ以外については、光検出器 103 には、光検出器 100 と同様の説明を適用することができる。なお、図 6 においては、導電部 61、クエンチ部 63 及び第 1 配線 51 の図示を省略している。

40

【0052】

この例では、屈折層 30 は、第 1 層 31 と、第 2 層 32 と、第 3 層 33 と、を含む。第 1 層 31 は、複数のレンズ 40 と複数の素子 10 との間に設けられる。第 2 層 32 は、第 1 層 31 と複数のレンズ 40 との間に設けられる。第 3 層 33 は、第 2 層 32 と複数のレンズ 40 との間に設けられる。積層構造は、必ずしも 3 層に限らず、2 層でもよいし、4 層以上でもよい。

【0053】

第 1 層 31 ～第 3 層 33 の厚さは、互いに異なってもよいし、同じでもよい。第 1 層 31 ～第 3 層 33 の屈折率は、互いに異なってもよいし、同じでもよい。第 1 層 31 ～第 3 層 33 のそれぞれの屈折率は、例えば 1.4 以上 2 以下である。例えば、第 1 層

50

３１～第３層３３のそれぞれは、シリコンと、酸素及び窒素からなる群より選択される１つと、を含む。例えば、第１層３１～第３層３３のそれぞれは、酸化シリコン、窒化シリコン及び樹脂の少なくともいずれかを含む。

【００５４】

屈折層３０は、前述した入射光の光路調節とは別の役割を有していてもよい。例えば、屈折層３０は、光検出器の製造プロセス（例えばエッチングや研磨など）におけるストッパとしての役割、または電極（例えば導電部６１）が外部と接触して短絡しないように保護する役割などを有していてもよい。このような場合、これらの役割に応じて絶縁層を積層させることで屈折層３０を作成してもよい。例えば、第１層３１は、半導体層２１の表面を保護するシリコン酸化膜であり、第２層３２は、プロセスにおけるストッパ層であるシリコン窒化膜であり、第３層３３は、電極を保護するシリコン酸化膜でもよい。

10

【００５５】

（第２実施形態）

図７は、第２実施形態に係る光検出器を例示する平面図である。

図７に表したように、第２実施形態に係る光検出器１２０は、複数の構造体７０を含む。例えば、構造体７０は、半導体層２１に設けられたトレンチ部である。これ以外については、光検出器１２０には、第１実施形態に係る光検出器１００と同様の説明を適用できる。なお、図７においては、屈折層３０、複数のレンズ４０、導電部６１、及びクエンチ部６３などの図示を省略している。

20

【００５６】

この例では、構造体７０は、Ｚ軸方向に沿って見たときに、略八角形である。複数の構造体７０のそれぞれは、Ｘ－Ｙ平面に沿って複数の素子１０のそれぞれを囲むように設けられる。そのため、複数の構造体７０は、複数の素子１０の周期に合わせて配列されている。例えば、複数の構造体７０は、第１構造体７０ａと、第２構造体７０ｂと、を含む。第１構造体７０ａは、第１素子１０ａを囲む。第２構造体７０ｂは、第２素子１０ｂを囲む。

【００５７】

ここでは、「囲む」とは、ある構成要素が、別の構成要素を途切れることなく連続的に囲んでいる場合だけでなく、互いに離れて設けられた複数の前記構成要素が、前記別の構成要素の周りに並んで設けられる場合も含む。例えば、前記複数の構成要素を辿って得られる軌跡の内側に前記別の構成要素が位置する場合、前記別の構成要素は、前記複数の構成要素によって囲まれていると見なすことができる。

30

【００５８】

第１構造体７０ａ及び第２構造体７０ｂのそれぞれは、Ｚ軸方向から見たときに八角形である。ここで八角形とは角丸の八角形でもよい。この例では、１つの構造体７０において、Ｘ軸方向の長さやＹ軸方向の長さとは、実質的に互いに同じである。また、この例では、Ｚ軸方向から見たときに、複数の構造体７０の形状は、実質的に互いに同じである。複数の構造体７０の配列の周期は、複数の素子１０の配列の周期（第１周期Ｌ１及び第２周期Ｌ２）と実質的に同じでよい。

【００５９】

図８は、第２実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

40

図８は、図７に示したＡ３－Ａ４線断面を示す。図８に表したように、構造体７０の少なくとも一部は、半導体層２１に設けられる。

【００６０】

この例では、構造体７０の上端の高さは、半導体層２１の上面（受光面）の高さと略同じである。構造体７０の上面は、屈折層３０と接していてもよい。また、この例では、構造体７０は、半導体層２２まで到達しておらず、構造体７０の下端は、半導体層２１の下面よりも高い。構造体７０の少なくとも一部は、第１半導体領域１１、第２半導体領域１２及び第３半導体領域１３のそれぞれと、Ｚ軸方向と垂直な方向において並ぶ。

【００６１】

50

第2半導体領域12及び第3半導体領域13は、構造体70に接触しない。第2半導体領域12と構造体70との間に、第1半導体領域11の一部が位置し、第2半導体領域12と構造体70とに接触している。第3半導体領域13と構造体70との間に、第1半導体領域11の別の一部が位置し、第3半導体領域13と構造体70とに接触している。ただし、第2半導体領域12及び第3半導体領域13は、構造体70に接触していてもよい。
【0062】

構造体70の屈折率は、半導体層21の屈折率と異なる。構造体70の屈折率は、第1半導体領域11、第2半導体領域12及び第3半導体領域13のそれぞれの屈折率と異なる。構造体70は、絶縁性である。構造体70は、素子10同士の間における電氣的な導通及び光学的な干渉を抑制するために設けられる。構造体70により、素子10同士の間における二次光子及びキャリアの移動が抑制される。素子10に光が入射し、二次光子が発生したとき、隣接する素子10へ進む二次光子は、構造体70の界面で反射、屈折される。構造体70が設けられることでクロストークノイズを低減できる。

10

【0063】

例えば、第1構造体70aの少なくとも一部は、第1素子10aの第1半導体領域11と、第2素子10bの第1半導体領域11と、の間に設けられている。これにより、第1素子10aと第2素子10bとの間における二次光子及びキャリアの移動を抑制できる。

【0064】

複数の構造体70は、素子毎に独立して設けられる。すなわち、複数の構造体70は、互いに物理的に接触しておらず離れている。例えば、第2構造体70bの少なくとも一部は、第1構造体70aの少なくとも一部と、第2素子10bの第1半導体領域11と、の間に設けられる。第1構造体70aと第2構造体70bとは、互いに離れている。これにより、例えば、隣り合う素子10同士の間には1つの分離構造が設けられる場合に比べて、隣り合う素子10同士の間において構造体70の界面の数が増加する。界面の数の増加により、素子10で二次光子が発生したとき、隣接する素子10に向けて進む二次光子がより反射されやすくなる。これにより、クロストークノイズをさらに低減できる。第1構造体70aと第2構造体70bとの間には、半導体領域14（例えば半導体層21の一部）が設けられてもよい。半導体領域14は、第1構造体70aと第2構造体70bと接触する。例えば、半導体領域14は、X軸方向において隣り合う構造体70同士の間をY軸方向に延びている。半導体領域14は、Y軸方向において隣り合う構造体70同士の間をX軸方向において延びている。

20

【0065】

構造体70は、絶縁材料を含む。例えば、構造体70は、酸素及び窒素からなる群より選択される1つと、シリコンと、を含む。例えば、構造体70は、酸化シリコン又は窒化シリコンを含む。構造体70は、積層構造であってもよい。

【0066】

構造体70が設けられる場合、素子10と構造体70との界面には、例えば熱膨張係数の差に起因して、欠陥が生じる場合がある。例えば、素子10の端部（外周部）の半導体層21内に結晶欠陥が生じる。このような欠陥は、ノイズの原因となることがある。例えば、欠陥で生じたキャリアが半導体層21内でアバランシェ増倍を起こす可能性がある。

40

【0067】

光検出器120においても、例えば、第1周期L1に対する第1厚さIの比は、0.16以上0.72以下である。これにより、第1実施形態と同様に、光の検知確率が高い素子中央を、光路が通過しやすくなる。また、多くの光が通過する領域を、結晶欠陥が生じやすい素子端部から離すことができる。例えば素子端部におけるアバランシェ確率を低くすることで、ノイズを抑制しつつ、高い光検出効率を得ることができる。

【0068】

図9(a)～図9(d)は、第2実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

図9(a)、図9(b)、図9(c)、図9(d)は、それぞれ、第2実施形態の変形

50

例に係る光検出器 1 2 1、1 2 2、1 2 3、1 2 4 の一部を表す。図 7 に表した光検出器 1 2 0 と比較して、光検出器 1 2 1、1 2 2、1 2 3、1 2 4 は、構造体 7 0 の形状が異なる。これ以外については、光検出器 1 2 1、1 2 2、1 2 3、1 2 4 には、光検出器 1 2 0 と同様の説明を適用できる。

【0 0 6 9】

図 9 (a) に表した光検出器 1 2 1 のように、構造体 7 0 は、Z 軸方向から見たときに、四角形でもよい。構造体 7 0 の形状は、Z 軸方向から見たときに、多角形、または角丸の多角形でもよい。

【0 0 7 0】

図 9 (b) ~ 図 9 (d) に表したように、構造体 7 0 は、Z 軸方向から見たときに、素子 1 0 を不連続に囲む。言い換えれば、構造体 7 0 は、Z 軸方向から見たときに、完全な環状構造でなく、一部が開いている形状であってもよい。これにより、導電部 6 1 と構造体 7 0 との干渉を抑制できる。例えば、構造体 7 0 の途切れた部分に、導電部 6 1 の一部を配置してもよい。構造体 7 0 の形状を変化させることで、導電部 6 1、クエンチ部 6 3 及び第 1 配線 5 1 などの配置が容易となる。

【0 0 7 1】

図 9 (b) に表した光検出器 1 2 2 においては、Z 軸方向から見たときに略八角形の構造体 7 0 が素子 1 0 を囲んでいる。構造体 7 0 の平面形状は、八角形の一边に設けられた 1 つの開口部 7 0 i (環状が途切れた部分) を有する。

【0 0 7 2】

図 9 (c) に表した光検出器 1 2 3 においては、Z 軸方向から見たときに略四角形の構造体 7 0 が素子 1 0 を囲んでいる。構造体 7 0 の平面形状は、四角形の各角に設けられた計 4 つの開口部 7 0 i を有する。

【0 0 7 3】

図 9 (d) に表した光検出器 1 2 4 においては、Z 軸方向から見たときに略四角形の構造体 7 0 が素子 1 0 を囲んでいる。構造体 7 0 の平面形状は、四角形の対角に設けられた計 2 つの開口部 7 0 i を有する。

【0 0 7 4】

図 9 (b) ~ 図 9 (d) に表したように、半導体層 2 1 は、Z 軸方向から見たときに、開口部 7 0 i に位置する半導体領域 1 5 を含む。構造体 7 0 の内側の素子 1 0 は、構造体 7 0 の外側の半導体領域 1 4 と、半導体領域 1 5 を介して連続している。

【0 0 7 5】

図 1 0 (a) 及び図 1 0 (b) は、第 2 実施形態に係る別の光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

図 1 0 (a)、図 1 0 (b) は、それぞれ、図 8 と同様に、第 2 実施形態の変形例に係る光検出器 1 2 5、1 2 6 の一部を表す。図 8 に表した光検出器 1 2 0 と比較して、光検出器 1 2 5、1 2 6 においては、構造体 7 0 の配置が異なる。これ以外については、光検出器 1 2 5、1 2 6 には、光検出器 1 2 0 と同様の説明を適用できる。

【0 0 7 6】

構造体 7 0 の深さは、例えば素子 1 0 の特性や製造プロセスに応じて変更することができる。例えば、図 1 0 (a) に表したように、構造体 7 0 は、半導体層 2 1 を貫通して、半導体層 2 2 まで延びていてもよい。すなわち、構造体 7 0 の下端は、半導体層 2 1 の下面よりも低くてもよい。構造体 7 0 の下部 7 0 p は、X-Y 平面において、半導体層 2 2 に囲まれていてもよい。

【0 0 7 7】

図 1 0 (b) に表したように、構造体 7 0 は、屈折層 3 0 内に延びていてもよい。すなわち、構造体 7 0 の上端は、半導体層 2 1 の上面よりも高くてもよい。構造体 7 0 の上部 7 0 q は、X-Y 平面において、屈折層 3 0 に囲まれていてもよい。

【0 0 7 8】

構造体 7 0 を、屈折層 3 0 内または半導体層 2 1 内まで延ばすことにより、素子間のク

10

20

30

40

50

ロストークをより抑制することができる。

【0079】

図11は、第2実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

図12は、第2実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的断面図である。

これらの図は、第2実施形態の変形例に係る光検出器127を表している。図11においては、レンズ40及び屈折層30の図示が省略されている。図12は、図11のA4-A5断面を示す。

構造体70は、図12に表したように、第1絶縁層IL1及び第2絶縁層IL2を含んでも良い。第2絶縁層IL2は、第1絶縁層IL1と素子10との間、及び第1絶縁層IL1と半導体層22との間に設けられる。例えば、第1絶縁層IL1及び第2絶縁層IL2は酸化シリコンを含み、第2絶縁層IL2は第1絶縁層IL1に比べて緻密な構造を有する。

【0080】

図12に表したように、Z軸方向において半導体層22と構造体70との間にp形の半導体領域23が設けられても良い。半導体領域23におけるp形不純物濃度は、第1半導体領域11におけるp形不純物濃度よりも高い。

【0081】

この例では、クエンチ部63として、各素子10に、クエンチ抵抗が電氣的に接続されている。例えば、Z軸方向から見たときに、クエンチ部63は、フォトダイオードPDと異なる位置に存在する。例えば、クエンチ部63は、Z軸方向において、構造体70又は半導体領域14と並ぶ。クエンチ部63の他端は、第1配線51と電氣的に接続される。

【0082】

複数の導電部61のそれぞれが、複数の素子10のそれぞれに接続される。複数の導電部61のそれぞれは、コンタクト64及び接続配線65を含む。クエンチ部63は、コンタクト64及び接続配線65を介して第3半導体領域13と電氣的に接続され、コンタクト66を介して第1配線51と電氣的に接続される。

【0083】

コンタクト64及び66は、金属材料を含む。例えば、コンタクト64及び66は、チタン、タングステン、銅、及びアルミニウムからなる群より選択された少なくとも1つを含む。コンタクト64及び66は、チタン、タングステン、銅、及びアルミニウムからなる群より選択された少なくとも1つの窒化物又はシリコン化合物からなる導電体を含んでも良い。図12に示すように、コンタクト64は、金属層64a及び金属層64bを含んでも良い。コンタクト66は、金属層66a及び金属層66bを含んでも良い。金属層64bは、金属層64aと第1層31との間、金属層64aと第2層32との間、及び金属層64aと第3層33との間に設けられる。金属層66bは、金属層66aと第2層32との間、及び金属層66aと第3層33との間に設けられる。例えば、金属層64a及び66aは、タングステンを含む。金属層64b及び66bは、チタンを含む。金属層64bは、チタン層と、チタン層と金属層64aとの間に設けられた窒化チタン層と、を含んでも良い。金属層66bは、チタン層と、チタン層と金属層66aとの間に設けられた窒化チタン層と、を含んでも良い。接続配線65、銅及びアルミニウムからなる群より選択された少なくとも1つを含む。

【0084】

例えば、クエンチ部63のZ軸方向における位置は、第3半導体領域13のZ軸方向における位置と、第1配線51のZ軸方向における位置と、の間にある。1つの第1配線51は、Y軸方向に並ぶ複数のフォトダイオードPDと電氣的に接続される。

【0085】

クエンチ部63の電気抵抗は、コンタクト64、コンタクト66、及び接続配線65のそれぞれの電気抵抗よりも大きい。クエンチ抵抗は、半導体材料としてポリシリコンを含む。クエンチ抵抗には、n形不純物又はp形不純物が添加されていても良い。

【0086】

10

20

30

40

50

例えば、屈折層 30 は、第 1 層 31 ～ 第 4 層 34 を含む。第 1 層 31 ～ 第 3 層 33 は、Z 軸方向において複数の素子 10 と第 4 層 34 との間に設けられる。第 1 層 31 及び第 2 層 32 は、Z 軸方向において複数の素子 10 と第 3 層 33 との間に設けられる。第 1 層 31 は、Z 軸方向において複数の素子 10 と第 2 層 32 との間に設けられる。

【0087】

コンタクト 64 及び 66 は、X-Y 平面に沿って、第 1 層 31、第 2 層 32、及び第 3 層 33 に囲まれる。第 1 層 31 の一部は、Z 軸方向において半導体領域 14 とクエンチ部 63 との間に設けられる。第 1 配線 51 及び接続配線 65 は、第 4 層 34 に囲まれる。

【0088】

第 1 半導体領域 11 における p 形不純物濃度は、例えば $1.0 \times 10^{13} \text{ atom/cm}^3$ 以上、 $1.0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$ 以下である。この濃度範囲に設定することで、第 1 半導体領域 11 で空乏層を十分に広げ、光子検出効率又は受光感度を高めることができる。

10

第 2 半導体領域 12 における p 形不純物濃度は、例えば $1.0 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3$ 以上、 $1.0 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3$ 以下である。この濃度範囲に設定することで、第 2 半導体領域 12 を、第 3 半導体領域 13 と pn 接合させ、且つ第 2 半導体領域 12 において空乏層を広がり易くできる。

【0089】

第 3 半導体領域 13 における n 形不純物濃度は、例えば $1.0 \times 10^{18} \text{ atom/cm}^3$ 以上、 $1.0 \times 10^{21} \text{ atom/cm}^3$ 以下である。この濃度範囲に設定することで、第 3 半導体領域 13 における電気抵抗を低減し、第 2 半導体領域 12 におけるキャリアの損失を低減できる。

20

半導体層 22 における p 形不純物濃度は、 $1.0 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$ 以上、 $1.0 \times 10^{21} \text{ atom/cm}^3$ 以下である。半導体層 22 の代わりに、金属を含む導電層を用いても良い。例えば、アルミニウム、銅、チタン、金、及びニッケルからなる群より選択された少なくとも 1 つを含む導電層が用いられる。

【0090】

図 13 は、第 2 実施形態に係る光検出器の一部を例示する模式的平面図である。

図 13 に示すように、光検出器 127 は、共通配線 54 及びパッド 55 をさらに含む。なお、図 11 は、図 13 に示す部分 P を示す。Y 軸方向に並ぶ複数の素子 10 に、1 つの第 1 配線 51 が電氣的に接続される。X 軸方向に並ぶ複数の第 1 配線 51 は、共通配線 54 と電氣的に接続される。共通配線 54 は、1 つ以上のパッド 55 と電氣的に接続される。パッド 55 には、外部のデバイスの配線が電氣的に接続される。

30

【0091】

図 14 及び図 15 は、第 2 実施形態に係る光検出器の一部を表す平面図である。

図 14 に示すように、構造体 70 は、Z 軸方向から見たときに、5 角以上の多角形である。図 14 の例では、構造体 70 は、Z 軸方向から見たときに、八角形である。例えば、構造体 70 は、Z 軸方向に延びる一対の第 1 延在部 71-1、X 方向に延びる一対の第 2 延在部 71-2、及び複数の連結部 71C を含んでも良い。第 1 ～ 第 3 半導体領域 11 ～ 13 半導体（フォトダイオード PD）は、X 軸方向において、一対の第 1 延在部 71-1 の間に設けられる。第 1 ～ 第 3 半導体領域 11 ～ 13 は、Y 軸方向において、一対の第 2 延在部 71-2 の間に設けられる。各連結部 71C は、第 1 延在部 71-1 の一端と、第 2 延在部 71-2 の一端と、を連結している。

40

【0092】

このような構造によれば、構造体 70 の角の角度をより大きくし、構造体 70 の角における応力を緩和できる。例えば、応力の緩和により、半導体領域 14 にクラックが発生することを抑制でき、クラックの発生に起因する動作不良を抑制できる。また、構造体 70 の形成時に、半導体層にクラックが発生すると、この後のフォトリソグラフィ工程において、レジストがクラックに入り込む可能性がある。レジストがクラックに入ると、レジストを剥離する際に、クラック内にレジストの残渣が発生しうる。レジストの残渣は、その

50

後の酸化等熱工程において酸化炉の有機汚染を引き起こす。構造体 7 0 の角における応力を緩和することで、これらの課題を解決できる。

【0093】

第 1 延在部 7 1 - 1 の Y 軸方向における長さは、連結部 7 1 C の Y 軸方向における長さよりも長い。第 2 延在部 7 1 - 2 の X 軸方向における長さは、連結部 7 1 C の X 軸方向における長さよりも長い。例えば、Z 軸方向から見たときに、連結部 7 1 C は直線状であり、構造体 7 0 は八角形である。Z 軸方向から見たときに、構造体 7 0 の形状は、八角以上であることが好ましい。すなわち、第 1 延在部 7 1 - 1 と連結部 7 1 C との間の角度 $\theta 1$ は、135 度以上が好ましい。第 2 延在部 7 1 - 2 と連結部 7 1 C との間の角度 $\theta 2$ は、135 度以上が好ましい。これにより、第 1 延在部 7 1 - 1 と連結部 7 1 C との間の外角、及び第 2 延在部 7 1 - 2 と連結部 7 1 C との間の外角の角度をより大きくできる。これらの外角の角度が大きくなることで、構造体 7 0 の角における応力を緩和できる。

10

【0094】

連結部 7 1 C の X 軸方向における長さ $L n 1$ 及び連結部 7 1 C の Y 軸方向における長さ $L n 2$ は、それぞれ $1 \mu m$ 以上であることが好ましい。これにより、連結部 7 1 C で発生する応力をさらに緩和できる。

【0095】

又は、図 1 5 に示すように、構造体 7 0 は、Z 軸方向から見たときに、角が湾曲した多角形であっても良い。すなわち、Z 軸方向から見たときに、連結部 7 1 C が湾曲していても良い。図 1 5 の例では、構造体 7 0 は、Z 軸方向から見たときに、角丸の四角形である。このような構造により、構造体 7 0 の角における応力を緩和できる。

20

【0096】

例えば、第 1 延在部 7 1 - 1 と連結された連結部 7 1 C の一端は、Y 軸方向に沿う。第 2 延在部 7 1 - 2 と連結された連結部 7 1 C の他端は、X 軸方向に沿う。これにより、連結部 7 1 C は、第 1 延在部 7 1 - 1 及び第 2 延在部 7 1 - 2 と滑らかに連結される。同様に、Z 軸方向から見たときに、連結部 7 1 C が湾曲していても良い。連結部 7 1 C を湾曲させることで、構造体 7 0 における応力の集中をさらに緩和できる。

【0097】

なお、光検出器の構造は、図示した例に限らず、種々の変形が可能である。例えば、Z 軸方向から見たときに、複数のフォトダイオード PD の 1 つ（第 1 フォトダイオード）を囲む構造体 7 0（第 1 構造体）の形状は、複数のフォトダイオード PD の別の 1 つ（第 2 フォトダイオード）を囲む別の構造体 7 0（第 2 構造体）の形状と異なっても良い。Z 方向から見たときに、第 1 フォトダイオードの形状は、第 2 フォトダイオードの形状と異なっても良い。Z 方向から見たときに、第 1 フォトダイオードの面積は、第 2 フォトダイオードの面積と異なっても良い。第 1 フォトダイオードと電氣的に接続されたクエンチ部 6 3 の電気抵抗と第 2 フォトダイオードと電氣的に接続されたクエンチ部 6 3 の電気抵抗が、互いに異なっても良い。第 1 フォトダイオードと電氣的に接続された第 1 配線 5 1 と第 2 フォトダイオードと電氣的に接続された第 1 配線 5 1 に、互いに異なる動作電圧が印加されても良い。第 1 フォトダイオードと電氣的に接続された第 1 配線 5 1 の信号と、第 2 フォトダイオードと電氣的に接続された第 1 配線 5 1 の信号が、分けて読み出されても良い。

30

40

【0098】

次に、第 1、2 実施形態の光検出器における、理論計算によるシミュレーションについて説明する。以下のシミュレーションにおいて、半導体層 2 2 は、ボロン濃度 $4.5 \times 10^{18} / cm^3$ の高濃度 p 形基板であり、半導体層 2 1 は、ボロン濃度 $1.0 \times 10^{15} / cm^3$ の半導体層であり、素子 1 0（受光セル）の第 1 周期 $L 1$ は、 $12.5 \mu m$ である。

【0099】

図 1 6（a）及び図 1 6（b）は、光検出器のアバランシェ領域の分布範囲の計算結果を表す模式的断面図である。

まずは、半導体層 2 1 内で発生したキャリアがアバランシェ増倍を起こす可能性（アバ

50

ランシェ確率)のある領域(アバランシェ領域)の分布を理論計算により確認した。図中の色の濃淡は、アバランシェ確率の高低を表す。色が濃い(黒い)ほどアバランシェ確率が低く、色が薄い(白い)ほどアバランシェ確率が高い。光検出器が高い光子検出効率を得るために、受光素子の内の入射光の光路とアバランシェ領域との重なりは多いことが望ましい。

【0100】

アバランシェ領域の分布は、半導体層21内の不純物濃度プロファイルに影響を受ける。図16(a)及び図16(b)は、第2半導体領域12を作製するためのボロン(B)注入条件を変更した2条件の受光セルのアバランシェ領域分布を示している。

【0101】

図16(a)は、ボロンの条件が加速電圧400keV、ドーズ量 $3.3 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ の場合に、アバランシェ領域分布の計算を行った結果である。図16(b)は、ボロンの注入条件が加速電圧400keV、ドーズ量 $2.6 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ の場合に、アバランシェ領域分布の計算を行った結果である。受光セルへの印加電圧としては、ブレークダウン電圧よりも5V高い電圧を設定した。

【0102】

図16(a)の場合の不純物濃度プロファイルのピークは、図16(b)の場合の不純物濃度プロファイルのピークよりも高い。図16(a)では、アバランシェ領域は、X軸方向(及びY軸方向)に広がっており、Z軸方向にはあまり広がっていない。例えば、図16(a)では、アバランシェ領域の分布範囲RAのZ軸方向に沿った長さは、アバランシェ領域の分布範囲RAのX軸方向に沿った長さよりも短い。一方、図16(b)では、アバランシェ領域は、X軸方向(及びY軸方向)にはあまり広がらず、Z軸方向に広がっている。例えば、図16(b)では、アバランシェ領域の分布範囲RAのZ軸方向に沿った長さは、アバランシェ領域の分布範囲RAのX軸方向に沿った長さよりも長い。

【0103】

実施形態に係る光検出器は、例えばLiDAR用近赤外光(例えば波長 $0.7 \mu\text{m}$ 以上 $2.5 \mu\text{m}$ 以下)の検知に用いられる。近赤外光の半導体層21への侵入長は長い。この場合、光検出器の光検出効率を上げるために入射光の光路とアバランシェ領域との重なりが多いことが望ましい。例えば、図16(b)のようなアバランシェ領域を有する受光素子が望ましい。

【0104】

また、第2実施形態に関して述べたとおり、構造体70のようなトレンチ構造を使用した場合、トレンチ構造と半導体層21との界面付近には、例えば熱膨張係数の差に起因して欠陥が発生する。欠陥から発生した熱電子によるアバランシェ倍増は、光検出器のノイズ出力となる。そのため、光検出器のノイズ低減のためには、図16(a)のようなアバランシェ領域の形状よりも、図16(b)のようなアバランシェ領域の形状が望ましい。例えば、素子10の動作中において、第2半導体領域12及び第3半導体領域13によって形成される空乏層のZ軸方向に沿った長さは、当該空乏層のX軸方向に沿った長さよりも長くてもよい。

【0105】

図16(b)は、図3(a)～図3(c)に示した受光素子において行った計算結果に相当する。

【0106】

図17は、アバランシェ確率の分布の計算結果を表すグラフ図である。

図17は、図16(b)に示したアバランシェ領域の範囲p-p'間におけるアバランシェ確率Pa1の分布の計算結果を示す。アバランシェ確率は、素子中央に近いほど高く、素子中央から離れて素子端部に近いほど低くなっている。そのため、入射される光の光路が受光素子中央付近を通るほど、光検出効率が高い。

【0107】

図18(a)～図18(c)は、光検出器における光路の計算結果を表す模式的断面図

10

20

30

40

50

である。

図18(a)～図18(c)は、それぞれ、図3(a)～図3(c)に、図16(b)に示したアバランシェ領域の分布範囲RAを重ねて表す。

【0108】

図18(a)に表したように、第1周期L1に対する屈折層30の厚さ($I/L1$)が0.08の場合、多くの入射光がアバランシェ領域の分布範囲RAを通過するが、アバランシェ確率の低いアバランシェ領域端(分布範囲RAの端部)も光が通過している。

【0109】

図18(b)に表したように、第1周期L1に対する屈折層30の厚さ($I/L1$)が0.4の場合、光路がアバランシェ領域の分布範囲RA内により集中しており、多くの入射光がアバランシェ確率の高い素子中央を通過している。

【0110】

図18(c)に表したように、第1周期L1に対する屈折層30の厚さ($I/L1$)が1.2の場合、光路の収束が早すぎるため、光がアバランシェ領域に到達するころには、光路が再度発散し始めている。そのため、入射光の一部がアバランシェ確率の低いアバランシェ領域端を通過している。

【0111】

(第3実施形態)

図19は、第3実施形態に係るライダー(Laser Imaging Detection and Ranging: LIDAR)装置を例示する模式図である。

この実施形態は、ライン光源、レンズと構成され長距離被写体検知システム(LIDAR)などに応用できる。ライダー装置5001は、対象物411に対してレーザ光を投光する投光ユニットUと、対象物411からのレーザ光を受光しレーザ光が対象物411までを往復してくる時間を計測し距離に換算する受光ユニットR(光検出システムともいう)と、を備えている。

投光ユニットUにおいて、レーザ光発振器(光源ともいう)404はレーザ光を発振する。駆動回路403は、レーザ光発振器404を駆動する。光学系405は、レーザ光の一部を参照光として取り出し、そのほかのレーザ光をミラー406を介して対象物411に照射する。ミラーコントローラ402は、ミラー406を制御して対象物411にレーザ光を投光する。ここで、投光とは、光を当てることを意味する。

【0112】

受光ユニットRにおいて、参照光用光検出器409は、光学系405によって取り出された参照光を検出する。光検出器410は、対象物411からの反射光を受光する。距離計測回路408は、参照光用光検出器409で検出された参照光と光検出器410で検出された反射光に基づいて、対象物411までの距離を計測する。画像認識システム407は、距離計測回路408で計測された結果に基づいて、対象物411を認識する。

【0113】

ライダー装置5001は、レーザ光が対象物411までを往復してくる時間(飛行時間)を計測し距離に換算するToF法を採用している。ライダー装置5001は、車載ドライブーアシストシステム、リモートセンシング等に応用される。光検出器410として上述した実施形態の光検出器を用いると、特に近赤外線領域で良好な感度を示す。このため、ライダー装置5001は、人が不可視の波長帯域への光源に適用することが可能となる。ライダー装置5001は、例えば、車向け障害物検知に用いることができる。

【0114】

図20は、ライダー装置の検出対象の検出を説明するための図である。

光源3000は、検出対象となる物体600に光412を発する。光検出器3001は、物体600を透過あるいは反射、拡散した光413を検出する。

【0115】

光検出器3001は、例えば、上述した本実施形態に係る光検出器を用いると、高感度な検出を実現する。なお、光検出器410および光源のセットを複数設け、その配置関係

10

20

30

40

50

を前もってソフトウェア（回路でも代替可）に設定しておくことが好ましい。光検出器 410 および光源のセットの配置関係は、例えば、等間隔で設けられることが好ましい。それにより、各々の光検出器 410 の出力信号を補完しあうことにより、正確な 3 次元画像を生成することができる。

【0116】

図 21 は、第 3 実施形態に係るライダー装置を備えた車の上面略図である。

ライダー装置 5001 は、例えば、車、ドローンまたはロボットなどの移動体に搭載される。図 21 の例では、移動体として車両 700 が用いられている。本実施形態に係る車両 700 は、車体 710 の 4 つの隅にライダー装置 5001 を備えている。本実施形態に係る車両は、車体の 4 つの隅にライダー装置を備えることで、車両の全方向の環境をライダー装置によって検出することができる。

10

【0117】

以上で説明した各実施形態における、各半導体領域の間の不純物濃度の相対的な高低については、例えば、SCM（走査型静電容量顕微鏡）を用いて確認することが可能である。なお、各半導体領域におけるキャリア濃度は、各半導体領域において活性化している不純物濃度と等しいとみなせる。従って、各半導体領域の間のキャリア濃度の相対的な高低についても、SCMを用いて確認することができる。また、各半導体領域における不純物濃度については、例えば、SIMS（二次イオン質量分析法）により測定することが可能である。

【0118】

実施形態によれば、性能を向上可能な、光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車が提供できる。

20

【0119】

本願明細書において、「垂直」は、厳密な垂直だけではなく、例えば製造工程におけるばらつきなどを含むものであり、実質的に垂直であれば良い。

【0120】

以上、具体例を参照しつつ、本発明の実施の形態について説明した。しかし、本発明は、これらの具体例に限定されるものではない。例えば、光検出器に含まれる複数の素子、クエンチ部、複数のレンズ、及び屈折層などの各要素の具体的な構成に関しては、当業者が公知の範囲から適宜選択することにより本発明を同様に実施し、同様の効果を得ることができる限り、本発明の範囲に包含される。

30

【0121】

各具体例のいずれか 2 つ以上の要素を技術的に可能な範囲で組み合わせたものも、本発明の要旨を包含する限り本発明の範囲に含まれる。

【0122】

その他、本発明の実施の形態として上述した光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車を基にして、当業者が適宜設計変更して実施し得る全ての光検出器、光検出システム、ライダー装置、移動体及び車も、本発明の要旨を包含する限り、本発明の範囲に属する。

【0123】

その他、本発明の思想の範疇において、当業者であれば、各種の変更例及び修正例に想到し得るものであり、それら変更例及び修正例についても本発明の範囲に属するものと了解される。

40

【0124】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

【符号の説明】

50

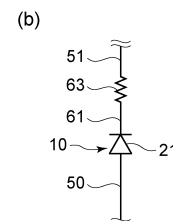
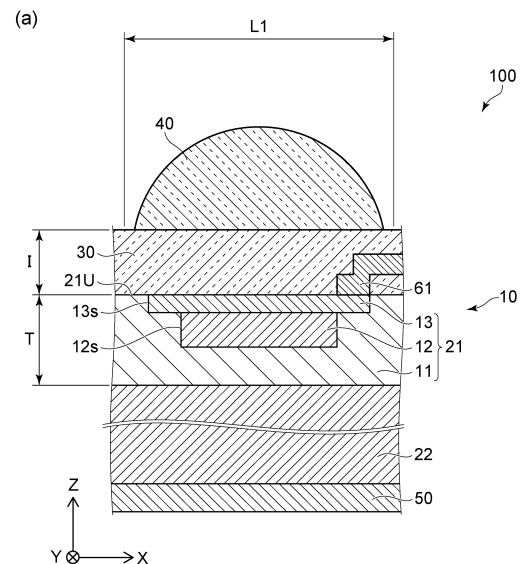
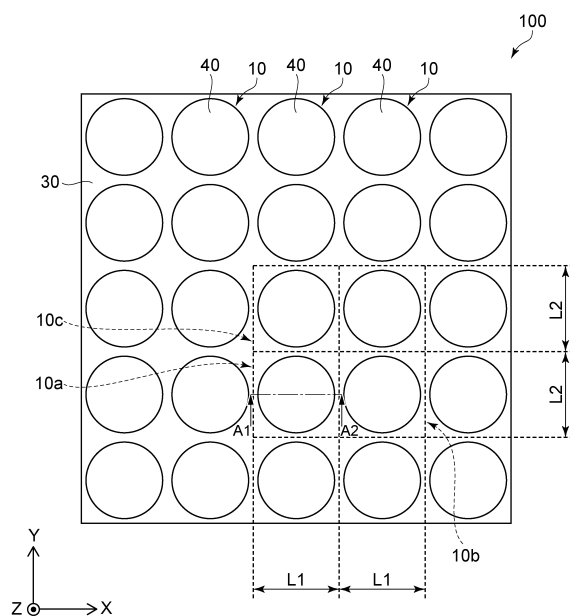
【 0 1 2 5 】

1 0…素子、 1 0 a…第1素子、 1 0 b…第2素子、 1 0 c…第3素子、 1 1…第1半導体領域、 1 2…第2半導体領域、 1 2 s…側面、 1 3…第3半導体領域、 1 3 s…側面、 1 4、 1 5…半導体領域、 2 1…半導体層、 2 1 U…上面、 2 2…半導体層、 2 3…半導体領域、 3 0…屈折層、 3 1～3 4…第1～第4層、 4 0…レンズ、 5 0…電極、 5 1…第1配線、 5 4…共通配線、 5 5…パッド、 6 1…導電部、 6 3…クエンチ部、 6 4…コンタクト、 6 4 a…金属層、 6 4 b…金属層、 6 5…接続配線、 6 6…コンタクト、 6 6 a…金属層、 6 6 b…金属層、 7 0…構造体、 7 0 a…第1構造体、 7 0 b…第2構造体、 7 0 i…開口部、 7 0 p…下部、 7 0 q…上部、 7 1-1…第1延在部、 7 1-2…第2延在部、 7 1 C…連結部、 θ 1、 θ 2…角度、 1 0 0～1 0 3、 1 2 0～1 2 7…光検出器、 3 0 0 0…光源、 3 0 0 1…光検出器、 4 0 2…ミラーコントローラ、 4 0 3…駆動回路、 4 0 4…レーザ光発振器、 4 0 5…光学系、 4 0 6…ミラー、 4 0 7…画像認識システム、 4 0 8…距離計測回路、 4 0 9…参照光用光検出器、 4 1 0…光検出器、 4 1 1…対象物、 4 1 2、 4 1 3…光、 5 0 0 1…ライダー装置、 6 0 0…物体、 7 0 0…車両、 7 1 0…車体、 I…第1厚さ、 I L 1…第1絶縁層、 I L 2…第2絶縁層、 I a…吸収光量、 I i…入射光量、 L 1…第1周期、 L 2…第2周期、 L n 1…長さ、 L n 2…長さ、 L i…光、 P D…フォトダイオード、 P a 1…アバランシェ確率、 R…受光ユニット、 R 1 a、 R 1 b、 R 2 b、 R 2 c、 R 3 b、 R 3 c…分布範囲、 R A…分布範囲、 T…第2厚さ、 U…投光ユニット

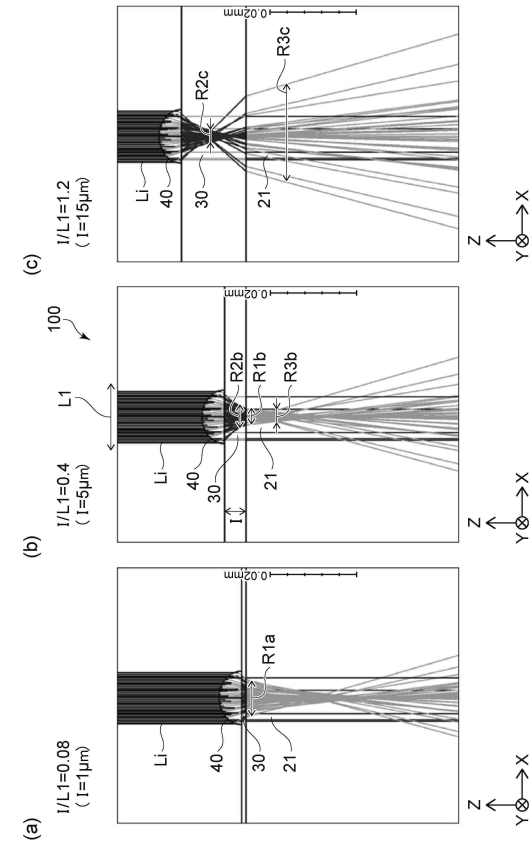
【図面】

【図 1】

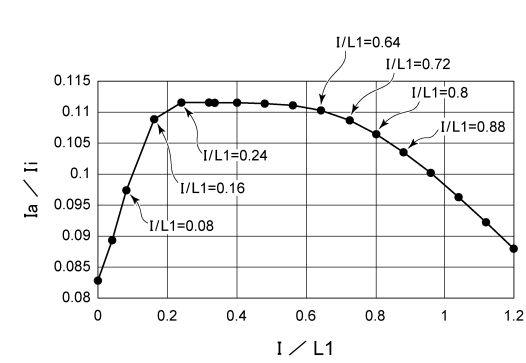
【図 2】



【図 3】



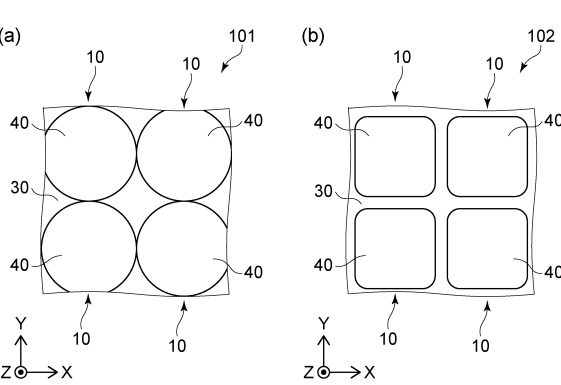
【図 4】



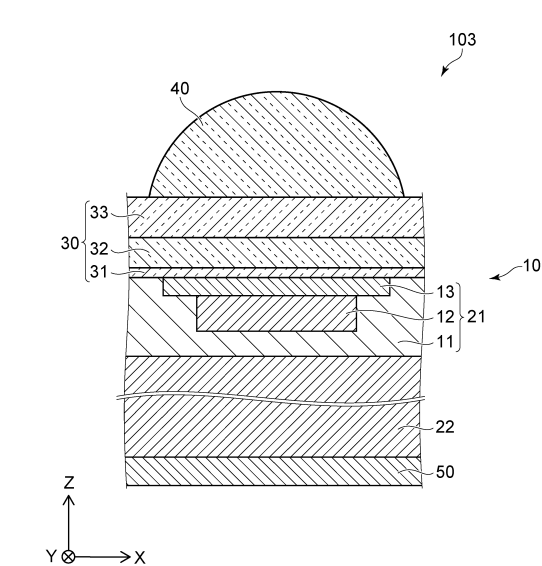
10

20

【図 5】



【図 6】

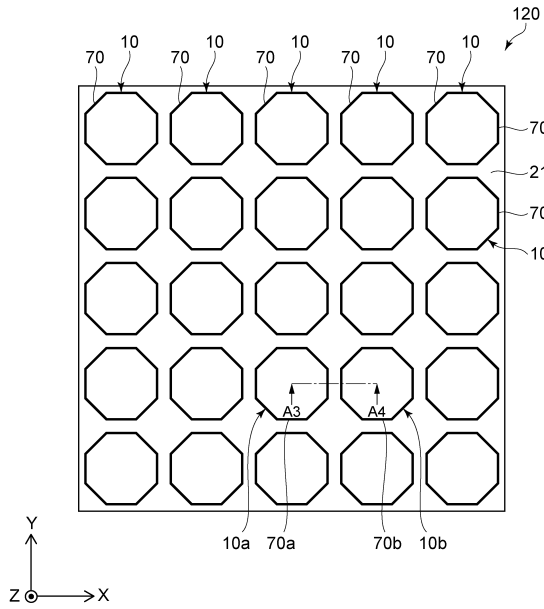


30

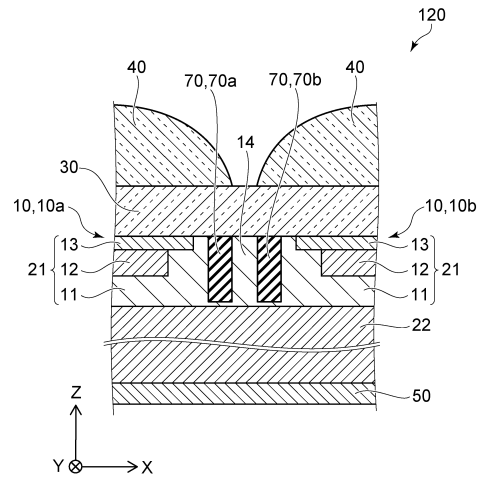
40

50

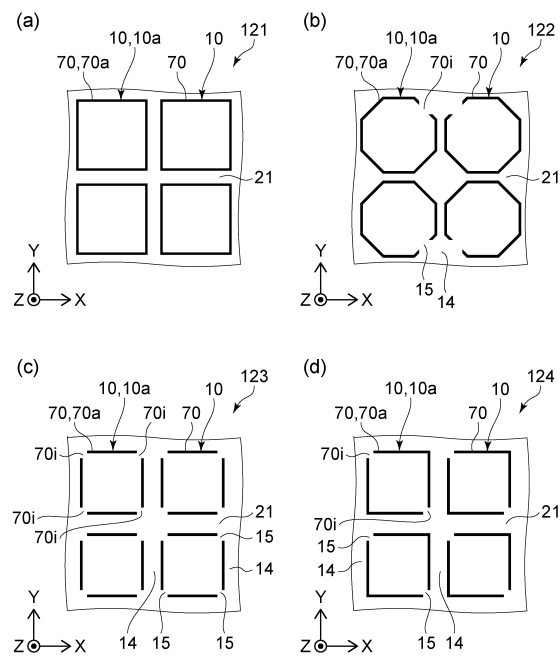
【圖 7】



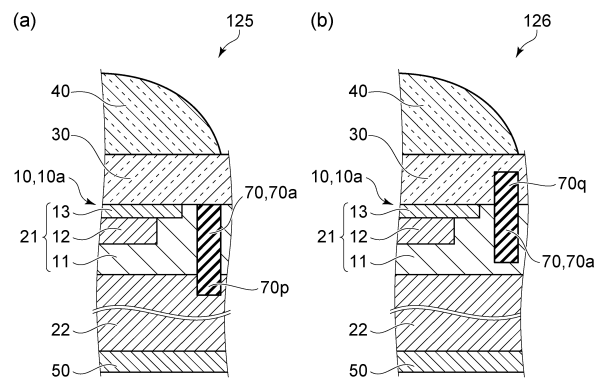
【図 8】



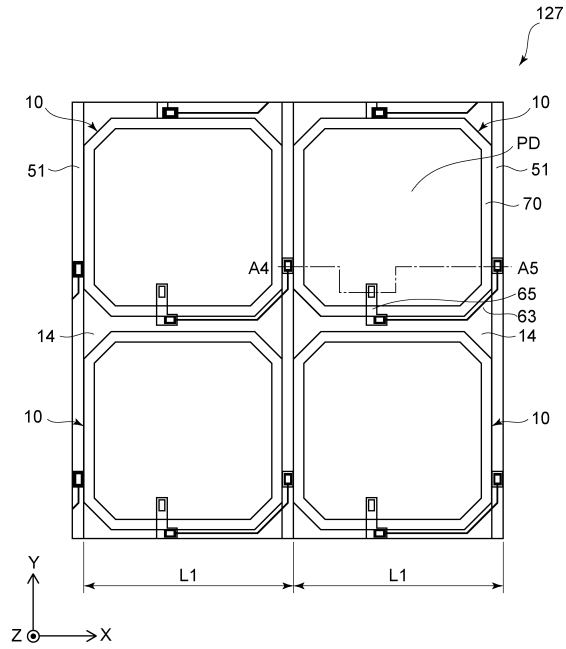
【図 9】



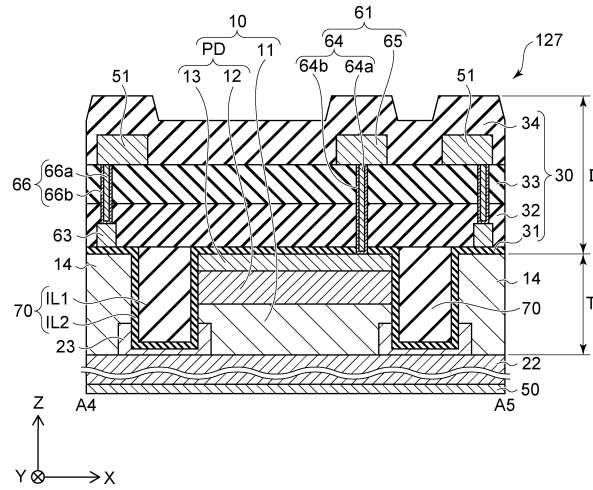
【図 10】



【図 1 1】



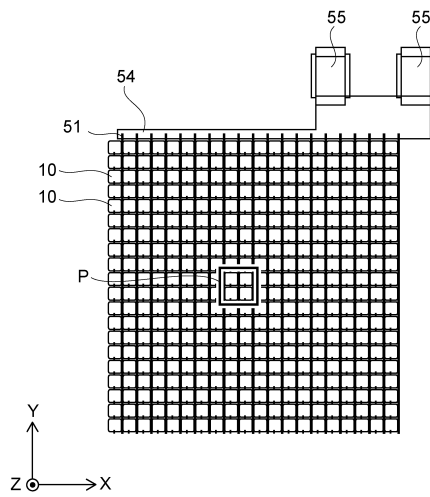
【図 12】



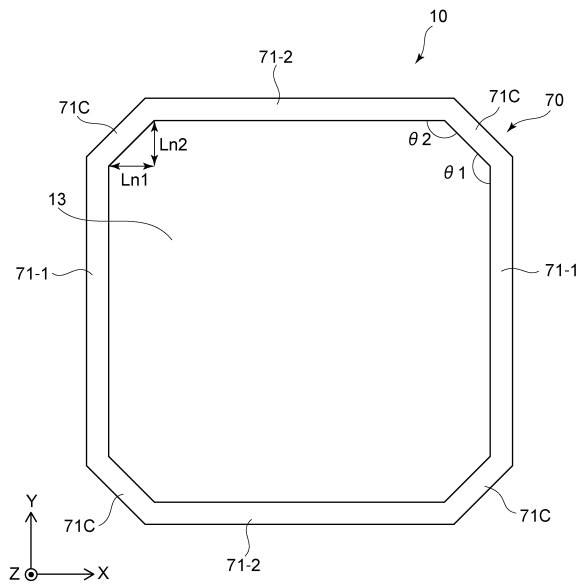
10

20

【図 13】



【図 14】

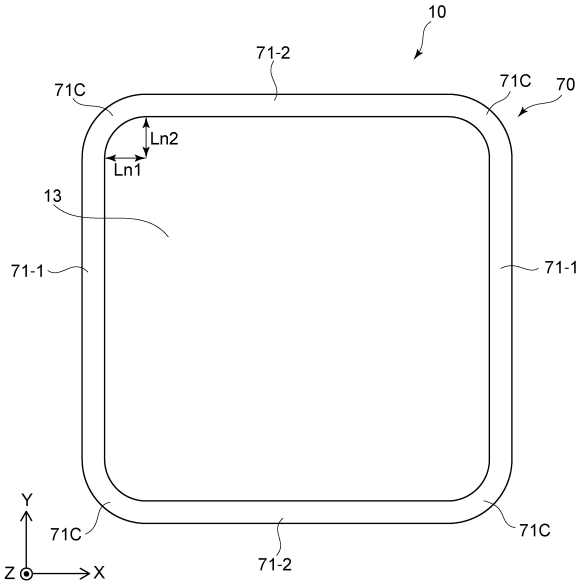


30

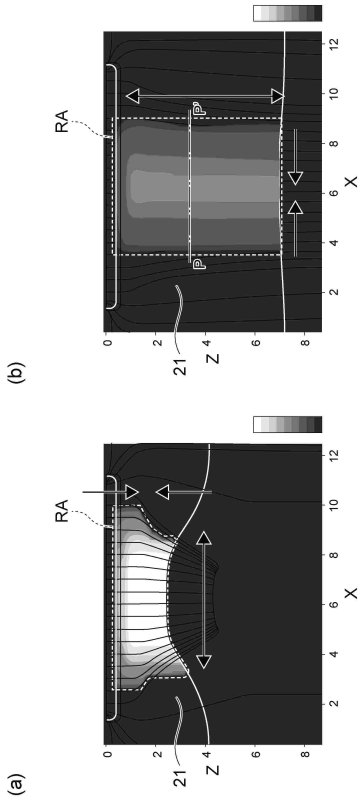
40

50

【図 15】



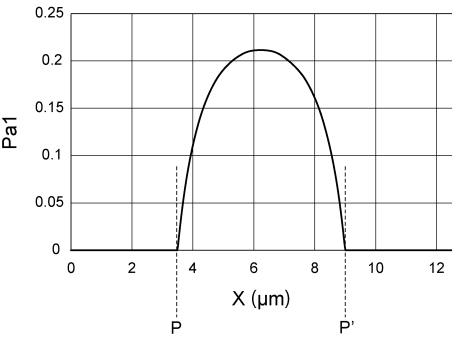
【図 16】



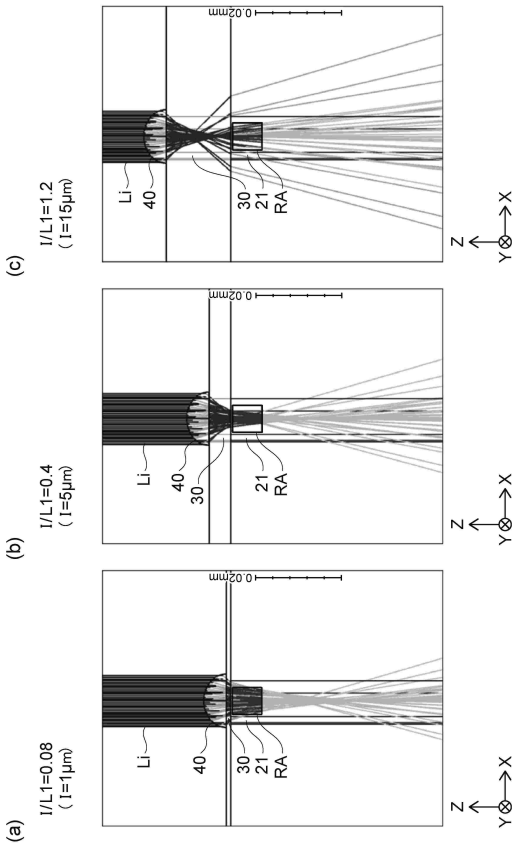
10

20

【図 17】



【図 18】

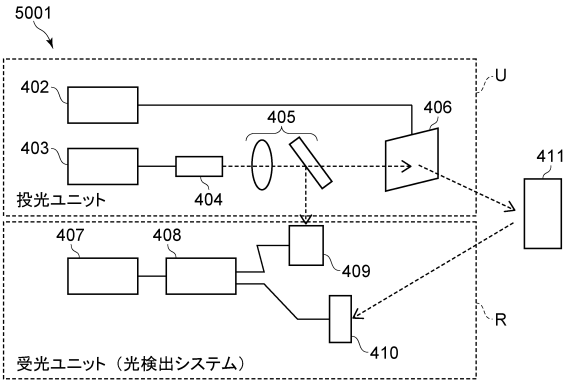


30

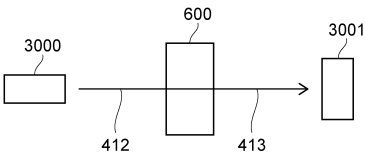
40

50

【図 19】

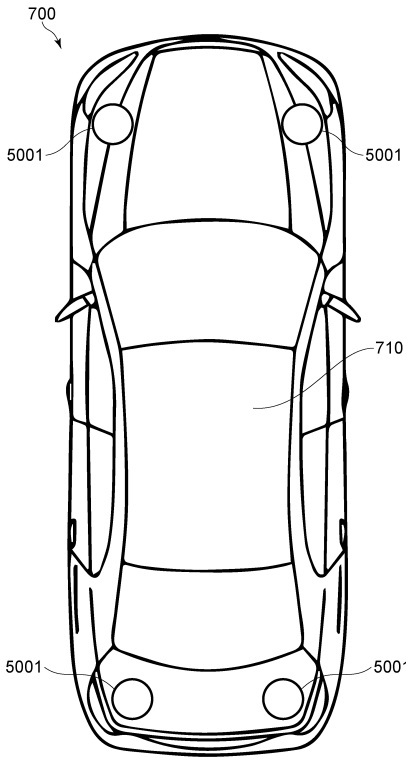


【図 20】



10

【図 21】



20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類 F I
H 0 1 L 27/146 A

(72)発明者 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
佐々木 啓太

(72)発明者 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
藤原 郁夫

審査官 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
佐竹 政彦

(56)参考文献 特開2008-103614 (JP, A)
特開2020-148644 (JP, A)
国際公開第2020/003972 (WO, A1)
特開2020-013950 (JP, A)
国際公開第2018/088479 (WO, A1)
特開2015-032636 (JP, A)
特開昭60-060756 (JP, A)
中国実用新案第209045574 (CN, U)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H 0 1 L 31/00-31/20
H 0 1 L 27/144-27/148