

(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
2013年11月21日(21.11.2013)



(10) 国際公開番号
WO 2013/172269 A1

- (51) 国際特許分類:
G01J 1/02 (2006.01) H01L 31/10 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/063182
- (22) 国際出願日: 2013年5月10日(10.05.2013)
- (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 2012-112348 2012年5月16日(16.05.2012) JP
特願 2012-287866 2012年12月28日(28.12.2012) JP
PCT/JP2013/056621 2013年3月11日(11.03.2013) 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1126番地の1 Shizuoka (JP).
- (72) 発明者: 中嶋 和利 (NAKAJIMA Kazutoshi); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 山西 正道 (YAMANISHI Masamichi); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 藤田 和上 (FUJITA Kazuue); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 新垣 実 (NIIGAKI Minoru); 〒

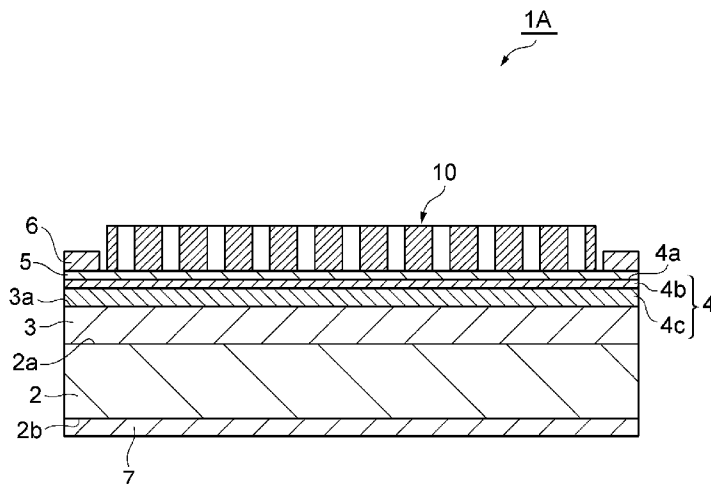
4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 廣畑 徹 (HIROHATA Toru); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 山下 博行 (YAMASHITA Hiroyuki); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 赤堀 亘 (AKAHORI Wataru); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).

(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丁目1番1号丸の内 MY PLAZA (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

[続葉有]

- (54) Title: PHOTODETECTOR
- (54) 発明の名称: 光検出器



(57) Abstract: This photodetector (1A) is provided with: an optical element (10) which has a structure including first regions, and second regions periodically arranged with respect to the first regions, along a perpendicular surface, in a prescribed direction, and which generates an electric field component in a prescribed direction when light is incident along a prescribed direction; and a semiconductor stacked body (4) which is disposed on another side of the optical element (10) in a prescribed direction, said other side being opposite to one side of the optical element (10) in the prescribed direction, and which has a quantum cascade structure for generating electric current using the electric field component in the prescribed direction generated by the optical element (10). The quantum cascade structure includes: an active region (4b) having a first quantum upper level, and a second quantum upper level lower than the first quantum upper level; and an injector region (4c) for transporting electrons excited by the active region (4b).

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2013/172269 A1



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, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

この光検出器 1 A は、第 1 の領域、及び所定の方向に垂直な面に沿って第 1 の領域に対し周期的に配列された第 2 の領域を含む構造体を有し、所定の方向に沿って光が入射したときに所定の方向の電界成分を生じさせる光学素子 10 と、光学素子 10 に対し所定の方向における一方の側とは反対側の他方の側に配置され、光学素子 10 により生じさせられた所定の方向の電界成分によって電流を生じる量子カスケード構造を有する半導体積層体 4 と、を備え、量子カスケード構造は、第 1 の量子上位準位、及び当該第 1 の量子上位準位よりも低い第 2 の量子上位準位を有するアクティブ領域 4 b と、アクティブ領域 4 b で励起された電子を輸送するインジェクタ領域 4 c とを含む。

明 細 書

発明の名称：光検出器

技術分野

[0001] 本発明は、光検出器に関する。

背景技術

[0002] 量子サブバンド間遷移の光吸収を利用する光検出器として、QWIP（量子井戸型赤外光センサ）、QDIP（量子ドット赤外光センサ）、QCD（量子カスケード型光センサ）等が知られている。これらはエネルギーバンドギャップ遷移を利用しないため、波長範囲の設計自由度が大きい、暗電流が比較的小さい、室温動作が可能である等のメリットを有する。

[0003] これらの光検出器のうち、QWIPとQCDは、量子井戸構造や量子カスケード構造等の周期的な積層構造を有する半導体積層体を備えている。この半導体積層体は、入射する光が半導体積層体の積層方向の電界成分を有する場合にのみ当該電界成分によって電流を生じるため、当該積層方向の電界成分を有しない光（半導体積層体の積層方向から入射する平面波）に対しては光感度を有しない。

[0004] 従って、QWIP又はQCDで光を検出するには、光の電界の振動方向が半導体積層体の積層方向と一致するように光を入射させる必要がある。例えば、光の進行方向に垂直な波面を有する平面波を検出する場合は、光を半導体積層体の積層方向と垂直な方向から入射させる必要があるため、光検出器としての使用が煩わしいものとなる。

[0005] そこで、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しない光を検出するために、半導体積層体の表面に金の薄膜を設け、この薄膜に当該光の波長以下の直径を有する孔を周期的に形成した光検出器が知られている（非特許文献1参照）。この例では、金の薄膜における表面プラズモン共鳴の効果によって、半導体積層体の積層方向の電界成分を有するように光を変調している。

[0006] また、半導体積層体の表面に光透過層を設け、この光透過層の表面に凹凸

パターンからなる回折格子及びこれを覆う反射膜を形成した光検出器が知られている（特許文献1参照）。この例では、当該回折格子及び反射膜による入射光の回折及び反射の効果によって、半導体積層体の積層方向の電界成分を有するように光を変調している。

[0007] また、半導体積層体の積層方向に対して入射面が斜めとなるように加工した光検出器が知られている（特許文献2参照）。この例では、当該入射面から屈折して入射した光がチップ内で全反射を繰り返すことによって、半導体積層体の積層方向の電界成分を有するように光を変調している。

[0008] また、そもそも量子井戸を利用する光検出器は、検出できる波長帯域が狭いという特性があるところ、その波長広帯域化を実現するための試みとして、異なるバリアの厚さ及び井戸の幅と高さを有する構造を形成すること（特許文献3参照）、及び、組成の異なる量子井戸層を積層し、それぞれの層からの信号を取り出すこと（非特許文献2）が知られている。

先行技術文献

特許文献

- [0009] 特許文献1：特開2000-156513号公報
特許文献2：特開2012-69801号公報
特許文献3：特表2001-524757号公報

非特許文献

- [0010] 非特許文献1：W. Wu, et al., "Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity", Appl. Phys. Lett., 96, 161107(2010).
非特許文献2：S. V. Bandara, et al., "Multi-band and broad-band infrared detectors based on III-V materials for spectral imaging instruments", Infrared Phys. Technol., 47, 15(2005).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0011] このように、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しない光を検出するために、当該光を当該積層方向の電界成分を有するように変調する技術、及び、その波長広帯域化の技術が種々提案されている。
- [0012] しかしながら、非特許文献1記載の光検出器は、量子井戸構造として、等しい井戸幅の量子井戸を単純に積層したQWIP構造を有しており、これを光検出器として動作させるためには外部からバイアス電圧を印加する必要がある、これによる暗電流が光感度に与える悪影響を無視できない。
- [0013] また、特許文献1記載の光検出器では、実効的な光感度を得るためには量子井戸構造を何周期も積層して、光吸収層を何層も形成する必要がある。
- [0014] また、特許文献2記載の光検出器は、回折による光の伝搬方向は完全には水平にはならず、ごく一部のみが光電変換に寄与するにとどまり、十分な光感度を得ることはできない。
- [0015] また、波長広帯域化を目指した特許文献3及び非特許文献2記載の光検出器では、光吸収が生じる量子井戸構造が半導体積層体の表層から深層まで分布しているため、光電変換に必要となる半導体積層体の積層方向の電界成分をこれらの層に均一に提供することができなければ、深層（光の入射する側から遠い部分）における光吸収の寄与が小さくなってしまう。
- [0016] そこで、本発明は、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しない光を検出することができ、且つ感度を有する波長帯域が広げられた光検出器を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0017] 本発明の光検出器は、第1の領域、及び所定の方に垂直な面に沿って第1の領域に対し周期的に配列された第2の領域を含む構造体を有し、所定の方に沿って光が入射したときに所定の方の電界成分を生じさせる光学素子と、光学素子に対し所定の方における一方の側とは反対側の他方の側に配置され、光学素子により生じさせられた所定の方の電界成分によって電流を生じる量子カスケード構造を有する半導体積層体と、を備え、量子カスケード構造は、第1の量子上位準位、及び当該第1の量子上位準位よりも低

い第2の量子上位準位を有するアクティブ領域と、アクティブ領域で励起された電子を輸送するインジェクタ領域とを含む。

[0018] この光検出器が備える光学素子は、所定の方向に沿って光が入射したときに所定の方向の電界成分を生じさせる。この電界成分により、半導体積層体の量子カスケード構造においてアクティブ領域で電子が励起され、この電子がインジェクタ領域により輸送されることで、量子カスケード構造に電流を生じる。このとき、アクティブ領域は第1の量子上位準位、及び当該第1の量子上位準位よりも低い第2の量子上位準位を有するため、それぞれの量子上位準位への電子励起エネルギーに相当する二種類の波長の光が検出されることになる。すなわち、この光検出器は、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しない光を検出することができ、且つ感度を有する波長帯域が広げられているといえる。

[0019] ここで、半導体積層体は、所定の方向に沿って積層された複数の量子カスケード構造を有していてもよい。この場合、半導体積層体に、より大きな電流を生じるため、光検出器の光感度が一層高くなる。

[0020] 本発明の光検出器は、半導体積層体の一方の側の表面に形成された第1のコンタクト層と、半導体積層体の他方の側の表面に形成された第2のコンタクト層と、を更に備えていてもよい。また、この場合、本発明の光検出器は、第1のコンタクト層と電氣的に接続された第1の電極と、第2のコンタクト層と電氣的に接続された第2の電極と、を更に備えていてもよい。これらによれば、半導体積層体で生じる電流を効率的に検出することができる。

[0021] 本発明の光検出器は、第2のコンタクト層、半導体積層体、第1のコンタクト層及び光学素子が他方の側から順に積層された基板を更に備えていてもよい。これによれば、光検出器の各構成の安定化を図ることができる。

[0022] 本発明の光検出器が備える光学素子において、第1の領域は、所定の方向に沿って光を透過させて当該光を変調する誘電体からなってもよく、光により表面プラズモンが励起される金属からなってもよい。いずれの場合も、所定の方向に沿って光が光学素子に入射したときに所定の方向の電界

成分を生じさせることができるため、半導体積層体が有する量子カスケード構造に電流を生じることができる。

[0023] 本発明の光検出器が備える光学素子において、第1の領域に対する第2の領域の配列の周期は、0.5～500 μm であってもよい。これによれば、所定の方向に沿って光が光学素子に入射したときに、所定の方向の電界成分を一層効率よく生じさせることができる。

[0024] 本発明の光検出器が備える光学素子に入射する光は、赤外線であってもよい。これによれば、本発明の光検出器を、赤外光検出器として好適に使用することができる。

[0025] 本発明の光検出器においては、光学素子が、一方の側から光が入射したときに所定の方向の電界成分を生じさせるものであってもよいし、或いは、光学素子が、半導体積層体を介して他方の側から光が入射したときに所定の方向の電界成分を生じさせるものであってもよい。

発明の効果

[0026] 本発明によれば、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しない光を検出することができ、且つ感度を有する波長帯域が広げられた光検出器を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0027] [図1]本発明の第1の実施形態の光検出器の平面図である。

[図2]図1のII-II線に沿っての断面図である。

[図3]本発明の第1の実施形態の光学素子の平面図である。

[図4]図3のIV-IV線に沿っての断面図である。

[図5]量子カスケード構造におけるサブバンド準位構造について示す図である。

[図6]本発明の第1の実施形態の光学素子の変形例の平面図である。

[図7]本発明の第1の実施形態の光学素子の変形例の平面図である。

[図8]本発明の第2の実施形態の光検出器の断面図である。

[図9]本発明の第3の実施形態の光検出器の断面図である。

[図10]本発明の第4の実施形態の光検出器の平面図である。

[図11]図10のXI-XI線に沿っての断面図である。

[図12]本発明の第5の実施形態の光検出器の平面図である。

[図13]図12のXIII-XIII線に沿っての断面図である。

[図14]本発明の第6の実施形態の光検出器の平面図である。

[図15]図13のXV-XV線に沿っての断面図である。

[図16]図8の光学素子についてのFDTD法による電界強度分布である。

[図17]量子上位準位の数別の光感度スペクトルを示すグラフである。

[図18]量子カスケード構造の段数を変化させた場合の垂直電界強度の積算値を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0028] 以下、本発明の好適な実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、各図において同一部分又は相当部分には同一符号を付し、重複する説明は省略する。なお、本実施形態の光検出器が検出するべき光（光学素子に入射する光）は、赤外線（波長が $1\sim 1000\mu\text{m}$ の光）である。

[0029] [第1の実施形態]

図1及び図2に示されるように、光検出器1Aは、n型のInPからなる厚さ $300\sim 500\mu\text{m}$ の矩形板状の基板2を備え、これにコンタクト層3、5と、半導体積層体4と、電極6、7と、光学素子10とが積層されている。この光検出器1Aは、半導体積層体4における量子サブバンド間遷移の光吸収を利用する光検出器である。

[0030] 基板2の表面2aの全面には、コンタクト層（第2のコンタクト層）3が設けられている。コンタクト層3の表面3aの全面には、半導体積層体4が設けられている。半導体積層体4の表面4aの全面には、コンタクト層（第1のコンタクト層）5が設けられている。コンタクト層5の表面5aの中央には、表面5aの全面よりも小さな面積をもつ光学素子10が設けられている。つまり、光学素子10は、平面視した場合にコンタクト層5に含まれるように配置されている。表面5aのうち、光学素子10が設けられていない

周縁の領域には、電極（第1の電極）6が光学素子10を囲むように環状に形成されている。一方、基板2の表面2aとは反対側の表面2bの全面には、もう一つの電極（第2の電極）7が設けられている。

[0031] 半導体積層体4は、検出しようとする光の波長に合わせて設計された量子カスケード構造を有するものであり、光を吸収して電子が励起されるアクティブ領域4bが光学素子10側に位置するように、且つ一方向への電子輸送を担うインジェクタ領域4cがその反対側に位置するように積層されて形成されている。ここで、量子カスケード構造の厚さは50nm程度である。

[0032] アクティブ領域4b及びインジェクタ領域4cのそれぞれでは、互いにエネルギーバンドギャップの異なる、例えばInGaAs及びInAlAsの半導体層が、一層あたり数nmの厚さで交互に積層されている。アクティブ領域4bにおけるInGaAsの半導体層は、シリコン等のn型の不純物がドーピングされることで量子井戸層として機能し、InAlAsの半導体層は、当該InGaAsの半導体層を挟んで量子障壁層として機能する。一方、インジェクタ領域4cでは、不純物がドーピングされていないInGaAsの半導体層とInAlAsの半導体層とが交互に積層されている。InGaAs及びInAlAsの積層数は、アクティブ領域4b及びインジェクタ領域4cの合計として、例えば16である。アクティブ領域4bの構造によって、吸収される光の中心波長が決まる（詳細は後述する）。

[0033] コンタクト層3, 5は、半導体積層体4で生じた電流を検出するために、半導体積層体4と電極6, 7とをそれぞれ電氣的に連絡するための層であり、n型のInGaAsからなる。コンタクト層3の厚さは0.1~1μmが好ましい。一方、コンタクト層5の厚さは、後述する光学素子10による効果が量子カスケード構造に及びやすいように、可能な限り薄く、具体的には5~100nmが好ましい。電極6, 7は、Ti/Auからなるオーミック電極である。

[0034] 光学素子10は、所定の方向における一方の側（光学素子10が設けられている側）から光が入射したときに所定の方向の電界成分を生じさせるもの

である。図3及び図4に示されるように、光学素子10は、構造体11を備えており、構造体11は、第1の領域R1、及び所定の方向に垂直な面に沿って第1の領域R1に対し入射光の波長に応じて $0.5 \sim 500 \mu\text{m}$ （入射光の波長以下とする。）となる周期dにより周期的に配列された第2の領域R2を有する。

[0035] 構造体11は、所定の方向における一方の側から他方の側に貫通する複数の貫通孔12が設けられた膜体13を有する。当該複数の貫通孔12は、図3に示されるように膜体13の平面視スリット形状をなしている。このスリット形状の貫通孔12は、当該スリット形状の長手方向と垂直な方向に一直線に並んでいる。そして、それぞれの貫通孔12は、図4に示されるように所定の方向における一方の側から他方の側（図2における半導体積層体4の積層方向）に貫通している。なお、膜体13の厚さは $10 \text{ nm} \sim 2 \mu\text{m}$ であることが好ましい。

[0036] ここで、第1の領域R1は、膜体13における貫通孔12間の部分13aであり、具体的には金からなる。第2の領域R2は、貫通孔12内の空間Sであり、具体的には空気である。つまり、光検出器1Aを光学素子10の側から平面視した場合（つまり図1において）、コンタクト層5の一部が貫通孔12から覗いている。

[0037] 次に、量子カスケード構造について詳述する。図5は、図1及び図2に示された光検出器1Aの量子カスケード構造におけるサブバンド準位構造について示す図である。一つの量子カスケード構造は、第1障壁層171と、入射光の吸収に用いられる吸収井戸層141と、励起された電子の緩和、輸送等を行う抽出部構造48と、からなる単位積層体46に相当する。量子カスケード構造は、具体的には、 n を4以上の整数として、吸収井戸層として機能する第1井戸層を含む n 個の量子井戸層、及び n 個の量子障壁層からなる半導体積層構造で構成されている。抽出構造部48は、第1障壁層171と吸収井戸層141とを除く、第2障壁層～第 n 障壁層及び第2井戸層～第 n 井戸層が交互に積層されることで構成されている。言い換えれば、第1障壁

層 1 7 1、吸収井戸層 1 4 1 及び第 2 障壁層によってアクティブ領域 4 b が形成され、第 2 障壁層よりも後の構造がインジェクタ領域 4 c に相当する。

[0038] なお、本実施形態の光検出器 1 A は、量子カスケード構造を一段のみ有したものであるが、図 5 では、説明の便宜上、量子カスケード構造が多段に積層された様子が示されている。単位積層体 4 6 のそれぞれは、前段の単位積層体 4 6 a 側から順に、第 1 障壁層 1 7 1 と、第 1 井戸層である吸収井戸層 1 4 1 と、抽出構造部 4 8 とによって構成されている。このような構成により、単位積層体 4 6 中においては、量子井戸構造によるエネルギー準位構造であるサブバンド準位構造が形成される。

[0039] 本実施形態における単位積層体 4 6 は、そのサブバンド準位構造において、吸収井戸層 1 4 1 に起因する検出下準位（基底準位） L_{1a} 、検出上準位（上位励起準位） L_{1b} と、吸収井戸層 1 4 1 を除く抽出構造部 4 8 の各井戸層に起因する第 2 準位 L_2 、第 3 準位 L_3 、第 4 準位 L_4 、…、第 n 準位 L_n とを有している。第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n は、例えば、第 2 井戸層 ~ 第 n 井戸層に起因し、量子力学的に結合した結果生成される準位である。これらのエネルギー準位のうち、検出下準位 L_{1a} 、上準位 L_{1b} は、サブバンド間の電子励起による光吸収に関わる準位である。また、第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n は、光吸収で励起された電子の緩和、輸送、抽出に関わる抽出準位構造（緩和準位構造）を構成している。

[0040] ここで、検出下準位 L_{1a} は、例えば、吸収井戸層 1 4 1 における基底準位に対応する準位である。また、検出上準位 L_{1b} は、検出下準位 L_{1a} よりも高いエネルギー準位であって、例えば、吸収井戸層 1 4 1 における励起準位に対応する準位である。また、第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n は、例えば、それぞれ第 2 井戸層 ~ 第 n 井戸層における基底準位に起因する準位である。なお、抽出準位構造を構成する第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n については、通常は、吸収井戸層 1 4 1 側の第 2 準位 L_2 から後段の単位積層体 4 6 b 側の第 n 準位 L_n に向けて順次エネルギーが低くなるように設定される。ただし、これらの準位のエネルギー順序は、電子の輸送が可能であれば一部で入れ替わってもよ

い。

[0041] また、各サブバンド準位のエネルギー間隔については、検出上準位 L_{1b} と電子引き抜き用の第2準位 L_2 とのエネルギー間隔 ΔE_{12} は、共鳴トンネル効果による電子の移動を考慮して、準位間の結合が十分に大きくなるように設定される。この準位間の結合の大きさは、準位間の反交差（アンチクロッシング）のエネルギーギャップによって評価することができる。

[0042] 第2準位 L_2 と第3準位 L_3 とのエネルギー間隔 ΔE_{23} は、縦光学フォノン（LOフォノン）のエネルギー E_{LO} に対して、 E_{LO} 以上、 $2 \times E_{LO}$ 以下となる下記の条件

$$E_{LO} \leq \Delta E_{23} \leq 2 \times E_{LO}$$

を満たすように設定されている。また、第3準位 L_3 と第4準位 L_4 とのエネルギー間隔 ΔE_{34} は、 E_{LO} よりも小さい下記の条件

$$\Delta E_{34} < E_{LO}$$

を満たすように設定されている。

[0043] ここで、LOフォノンのエネルギー E_{LO} は、例えば、量子井戸層の半導体材料としてInGaAsを想定した場合、 $E_{LO} = 34 \text{ meV}$ である。また、LOフォノンのエネルギー E_{LO} は、量子井戸層をGaAsとした場合に 36 meV 、InAsとした場合に 32 meV であり、上記した 34 meV とほぼ同程度である。また、上記した準位間のエネルギー間隔 ΔE_{23} 、 ΔE_{34} の E_{LO} に関する設定条件は、抽出準位構造における電子の輸送の高速化、高効率化を考慮したものである。

[0044] このようなサブバンド準位構造において、光が入射される以前には、ドーピングされた半導体層を用いることにより、吸収井戸層141の検出下準位 L_{1a} に電子が蓄積されている。検出対象の光 $h\nu$ が量子カスケード構造、より具体的には吸収井戸層141に入射すると、検出下準位 L_{1a} に存在する電子は、サブバンド間での光の吸収によって検出上準位 L_{1b} へと励起される。検出上準位 L_{1b} に励起された電子は、共鳴トンネル効果によって第2準位 L_2 へと高速で引き抜かれ、さらに、第2準位 L_2 ～第 n 準位 L_n による抽出準位

構造を介し、第2準位 L_2 から第3、第4準位 L_3 、 L_4 へのLOフォノン散乱などの緩和過程を経て、後段の単位積層体46bの吸収井戸層の検出下準位 L_{1a} へと高速で輸送、抽出される。

[0045] 以上のように構成された光検出器1Aは、自由電子を有する金からなる第1の領域R1及び空気からなる第2の領域R2が構造体11において所定の方向に垂直な面に沿って周期的に配列された光学素子10を備えているため、所定の方向における一方の側からこの光学素子10に光が入射した場合（例えば、半導体積層体4の積層方向から平面波が入射した場合）、表面プラズモン共鳴により表面プラズモンが励起される。このとき、所定の方向の電界成分が生じる。更に、光学素子10における構造体11は、一方の側から他方の側に貫通する複数の貫通孔12が設けられた膜体13を有し、第1の領域R1は、膜体13における貫通孔12間の部分13aであり、第2の領域R2は、貫通孔12内の空間Sである。このため、当該構造体11は1種類の材料から形成することができるため、製造も容易であり、コストも低減できる。

[0046] そして、上記のように表面プラズモンが励起されたことにより生じた所定の方向の電界成分は、半導体積層体4の積層方向の電界成分でもあるため、この電界成分により、半導体積層体4の量子カスケード構造において光学素子10側の最表面に形成されたアクティブ領域4bで電子が励起され、この電子がインジェクタ領域4cにより一方向に輸送されることで、量子カスケード構造に電流を生じる。この電流が電極6、7を介して検出される。すなわち、この光検出器1Aによれば、半導体積層体4の積層方向の電界成分を有しない光を検出することができる。なお、電極6からは電子が供給されるため、電流連続の条件が満たされる。

[0047] 量子カスケード構造における作用を詳述すれば、以下のとおりである。光検出器1Aでは、量子カスケード構造において、第1井戸層～第n井戸層、及び第1障壁層～第n障壁層が交互に積層されている。そして、吸収井戸層141において、光吸収によるサブバンド間の電子励起に関わる検出下準位

L_{1a} 、検出上準位 L_{1b} を設け、抽出構造部 48 において、次周期の単位積層体 46b への電子の輸送、抽出に関わる第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n による抽出準位構造を設けている。このような準位構造によれば、サブバンド間の光吸収、及び光吸収で生じた電流の取り出しによる光検出動作を好適に実現することができる。

[0048] また、上記構成では、井戸層 141 での光吸収によって検出上準位 L_{1b} へと励起された電子を、共鳴トンネル効果によって第 2 準位 L_2 へと移動、緩和させることで、電子を高速で引き抜くとともに、第 2 準位 L_2 ~ 第 n 準位 L_n による抽出準位構造において、第 2 準位 L_2 と第 3 準位 L_3 とのエネルギー間隔を、条件

$$E_{L0} \leq \Delta E_{23} \leq 2 \times E_{L0}$$

を満たすように設定している。このような構成では、共鳴トンネル効果によって検出上準位 L_{1b} から第 2 準位 L_2 へと移動した電子は、LO フォノン散乱を介して第 2 準位 L_2 から第 3 以降の準位へと高速で引き抜かれることとなる。これにより、上準位 L_{1b} に励起された電子が、後段の単位積層体 46b へと輸送されずに再び下準位 L_{1a} に緩和してしまうことを抑制して、光検出動作の効率を向上することができる。

[0049] さらに、上記構成では、第 3 準位 L_3 と第 4 準位 L_4 とのエネルギー間隔を、条件

$$\Delta E_{34} < E_{L0}$$

を満たすように設定している。このように、第 3 準位 L_3 と第 4 準位 L_4 とのエネルギー間隔を LO フォノンのエネルギーよりも小さく設定して、それらの準位を近接させる構成によれば、第 3、第 4 準位 L_3 、 L_4 を含む複数の準位を、LO フォノン散乱による第 2 準位 L_2 からの電子の引き抜き先の準位として機能させることができる。これにより、抽出準位構造における電子の輸送を安定化、高速化することができる。

[0050] また、このように電子の引き抜き先を複数の準位とする構成では、電子の引き抜き構造の設計が容易化されるとともに、検出器の製造時における特性

の安定化、結晶成長揺らぎへの自由度向上、及び歩留まりの向上等を実現することが可能となる。以上により、吸収井戸層 1 4 1 において光吸収によって励起されたキャリア電子を、効率的に順方向電流として機能させることで、入射光に対する光検出感度が向上された量子カスケード型光検出器を好適に実現することができる。

[0051] そして、量子カスケード構造においては、電子が検出下準位 L_{1a} から検出上準位 L_{1b} へと励起されることが可能であり、また、電子が検出下準位 L_{1a} から第 2 準位 L_2 と励起されることも可能である。このように、吸収井戸層 1 4 1 は電子励起エネルギーの異なる 2 つの量子上位準位を有するため、それぞれの量子上位準位への電子励起エネルギーに相当する二種類の波長の光を検出することができる。すなわち、光検出器 1 A は、感度を有する波長帯域が広げられているといえる。なお、量子カスケードレーザに適用した例ではあるが、量子カスケード構造において電子が励起される量子上位準位を 2 準位形成させた技術としては、Kazuue Fujita, et al., "High-performance, homogeneous broad-gain quantum cascade lasers based on dual-upper-state design", Appl. Phys. Lett., 96, 241107(2010)が知られている。

[0052] また、光検出器 1 A は、コンタクト層 3、5、半導体積層体 4、及び光学素子 1 0 を支持する基板 2 を更に備えているため、光検出器 1 A の各構成が安定化されている。

[0053] 表面プラズモン共鳴を利用する光検出器として、上記非特許文献 1 記載の光検出器が知られているが、当該光検出器は、量子井戸構造として、等しい井戸幅の量子井戸を単純に積層した QWIP 構造を採用しているため、これを光検出器として動作させるためには外部からバイアス電圧を印加する必要があり、これによる暗電流が光感度に与える悪影響を無視できない。これに対して本実施形態の光検出器 1 A は、インジェクタ領域 4 c が、アクティブ領域 4 b で励起された電子を一方向に輸送するように設計されているため、動作させるために外部からバイアス電圧を印加する必要がなく、光により励

起された電子が、バイアス電圧がない状態において量子準位間を散乱して移動するため、暗電流が極めて小さい。また、本実施形態の光検出器 1 A では、量子カスケード構造において、アクティブ領域 4 b がインジェクタ領域 4 c に対して一方の側、つまり光学素子 1 0 が設けられている側の最表面に形成されているために、光学素子 1 0 により生じる所定の方向の電界成分の影響を強く受けることができる。従って、この光検出器 1 A によれば、半導体積層体の積層方向の電界成分を有しないより微小な強さの光を高い感度で検出することができる。例えば、中赤外光検出器として従来から知られている PbS (Se) や HgCdTe を用いた検出器に比べて、より弱い光を検出することが可能になる。

[0054] また、上記特許文献 1 記載の光検出器では、光透過層の表面に回折格子を形成するため、光検出器としての設計の自由度が低い。これに対し、本実施形態の光検出器 1 A では、光学素子 1 0 はコンタクト層 5 とは別に形成されるものであるため、表面プラズモンが励起される材料の選択、並びに、光学素子 1 0 の形成及び加工の技術の選択の幅が広い。従って、本実施形態の光検出器 1 A は、入射光の波長や所望の光感度等に応じた設計の自由度が高い。

[0055] また、検出波長の広帯域化を目指した上記特許文献 3 及び非特許文献 2 記載の光検出器では、光吸収が生じる量子井戸構造が半導体積層体の表層から深層まで分布しているため、光電変換に必要となる半導体積層体の積層方向の電界成分をこれらの層に均一に提供することができなければ、深層（光の入射する側から遠い部分）における光吸収の寄与が小さくなってしまう。これに対し、本実施形態の光検出器 1 A では、光吸収が生じる量子井戸層を有するアクティブ領域 4 b が半導体積層体 4 のうち限定された深さに存在するために、光学素子 1 0 の作用で生じた所定の方向の電界成分を効率よく捉えることができ、半導体積層体 4 における光電変換の効率が高くなる。

[0056] なお、上記第 1 の実施形態の光検出器 1 A は、その光学素子 1 0 を別の態様とすることもできる。例えば、図 6 に示されるように、光学素子 1 0 にお

いて、膜体 13 に設けられた複数の貫通孔 12 の形状を円柱形状とし、その配置を平面視正方格子状とすることもできる。上記実施形態の光検出器 1A では、表面プラズモンを励起させることができる光が、スリット形状の貫通孔が並ぶ方向に偏光を有する光に限られていたが、図 6 に示された光学素子 10 を備える本実施形態の光検出器では、第 1 の領域 R1 及び第 2 の領域 R2 が二次元方向に周期的に配列しているため、表面プラズモンを励起させることができる入射光の偏光方向が二種類に増加することになる。

[0057] また、当該円柱形状の複数の貫通孔の配置を、正方格子状に替えて、図 7 に示されるように、三角格子状とすることもできる。これによれば、正方格子状の配列に比べて、入射光の偏光方向に対する依存性が更に小さくなる。

[0058] [第 2 の実施形態]

本発明の第 2 の実施形態として、光検出器の他の形態について説明する。図 8 に示される第 2 の実施形態の光検出器 1B が第 1 の実施形態の光検出器 1A と異なる点は、光学素子として、金からなる光学素子 10 に替えて、屈折率の大きな誘電体からなる光学素子 20 を備えている点である。

[0059] この光学素子 20 は、所定の方向における一方の側から他方の側に光を透過させて、当該光を変調するための光学素子であり、第 1 の領域 R1 が、屈折率の大きな誘電体からなる。第 1 の領域（誘電体）R1 の屈折率と第 2 の領域（空気）R2 の屈折率との差は、2 以上であることが好ましく、3 以上であることがより好ましい。例えば波長が $5\ \mu\text{m}$ の中赤外光について、ゲルマニウムの屈折率は 4.0 であり、空気の屈折率は 1.0 である。この場合、屈折率の差は 3.0 である。なお、光学素子 20 における膜体 13 の厚さは $10\ \text{nm} \sim 2\ \mu\text{m}$ であることが好ましい。

[0060] このように構成された光検出器 1B は、上記光学素子 20 を備えているため、所定の方向における一方の側からこの光学素子 20 に光が入射した場合（例えば、半導体積層体 4 の積層方向から平面波が入射した場合）、当該光は、構造体 11 において所定の方向に垂直な面に沿って周期的に配列された第 1 の領域 R1 及び第 2 の領域 R2 の屈折率の差により変調され、その後、

所定の方向における他方の側から出射する。すなわち、所定の方向の電界成分を有しない光を、当該所定の方向の電界成分を有するように効率よく変調することができる。また、第1の領域R1の屈折率と第2の領域R2の屈折率との差は、2以上であり、第1の領域R1及び第2の領域R2の配列の周期dは、0.5～500 μm であり、入射光の波長に応じて決められるため、光の変調が一層効率よく行われる。

[0061] また、上記第1の実施形態の光検出器では、入射光（ここでは赤外線）の一部が金の薄膜により遮光されるうえ、表面プラズモン共鳴自体もエネルギー損失が大きい傾向があり、光感度の低下を招く場合がある。更に、表面プラズモン共鳴は、金属中の自由電子が光の電界成分等と結合した結果生じる振動の共鳴状態をいうことから、表面プラズモン共鳴を利用するためには、光が入射する面に自由電子が存在することが不可欠であるという制限がある。これに対し、本実施形態の光検出器1では、第1の領域R1及び第2の領域R2がいずれも入射光に対して透過性を有し、且つ光の変調に表面プラズモン共鳴を利用しないため、第1の実施形態の光検出器で懸念される光感度の低下が生じず、且つ使用材料が自由電子を有する金属に制限されないという利点がある。

[0062] なお、上記第2の実施形態の光検出器1Bは、第1の実施形態の光検出器1Aと同様に、その光学素子20を別の態様とすることもできる。すなわち、光学素子20において、膜体に設けられた複数の貫通孔の形状を円柱形状として、その配置を平面視正方格子状又は三角格子状とすることもできる。また、貫通孔に、二酸化シリコン、窒化シリコン、酸化アルミニウム等を埋設して第2の領域を構成したものであってもよい。

[0063] [第3の実施形態]

本発明の第3の実施形態として、光検出器の他の形態について説明する。図9に示される第3の実施形態の光検出器1Cが第1の実施形態の光検出器1Aと異なる点は、コンタクト層5が、半導体積層体4の表面4aの全面に設けられていることに替えて、電極6の直下のみに設けられている点、及び

、これに伴い光学素子 10 が半導体積層体 4 の表面 4 a に直接設けられている点である。また、光学素子 10 に替えて、第 2 の実施形態における光学素子 20 を適用してもよい。後述する計算結果から明らかなように、所定の方向の一方側から光学素子に入射した光から生じる所定の方向の電界成分が最も強く現れるのは、光学素子における他方側の表面付近である。従って、本実施形態の光検出器 1 C は、光学素子 10 と半導体積層体 4 とが直接接しているために、第 1 の実施形態の光検出器 1 A と比べて、光感度が高い。

[0064] [第 4 の実施形態]

本発明の第 4 の実施形態として、光検出器の他の形態について説明する。図 10 及び図 11 に示される第 4 の実施形態の光検出器 1 D が第 3 の実施形態の光検出器 1 C と異なる点は、コンタクト層 5 と電極 6 との間に、光学素子 10 を形成している材料（ここでは金）からなる介在部材 10 a が配置され、且つ当該介在部材 10 a が、コンタクト層 5 の内側の側面と光学素子 10 との間の領域に進出し、光学素子 10 とコンタクト層 5 及び電極 6 とを電気的に接続している点である。これによれば、光学素子 10 が半導体積層体 4 の表面 4 a に直接設けられている場合であっても、直列抵抗のロスによる光感度の低下を抑制することができる。

[0065] [第 5 の実施形態]

本発明の第 5 の実施形態として、光検出器の他の形態について説明する。図 12 及び図 13 に示される第 5 の実施形態の光検出器 1 E が第 1 の実施形態の光検出器 1 A と異なる点は、基板 2 c として半絶縁性タイプの InP 基板を使用している点、半導体積層体 4 がコンタクト層 3 の表面 3 a の全面よりも小さな面積をもち、コンタクト層 3 の表面 3 a の全面ではなく中央に設けられている点、及び、電極 7 が、コンタクト層 3 の表面 3 a のうち半導体積層体 4 が設けられていない周縁の領域に、半導体積層体 4 を囲むように環状に形成されている点である。このような電極 7 は、コンタクト層 3、半導体積層体 4、コンタクト層 5 を一旦積層した後で、コンタクト層 5 及び半導体積層体 4 をエッチング除去してコンタクト層 3 の表面 3 a を露出させるこ

とにより形成可能である。電磁誘導の小さな半絶縁性タイプの基板 2 c を用いることにより、低ノイズ化や高速化、又はアンプ回路等との集積回路が実現しやすくなる。

[0066] 更に、光検出器 1 E では、基板 2 c のコンタクト層 3 と反対側の表面に電極が設けられていないため、光検出器 1 E の裏面側（所定の方向における他方の側）から光を入射させて、その光を検出することが可能になる。これにより、光学素子 1 0 による入射光の反射及び吸収を回避することができるため、一層の光感度の増大が可能になる。更に、パッケージ、サブマウント或いは集積回路等に光検出器 1 E をフリップチップボンディングにより搭載した状態で、簡便に光を入射させることができるため、特にイメージセンサ等への発展の可能性が広がるというメリットがある。

[0067] なお、本実施形態においても基板として n 型の InP 基板を用いることもできる。

[0068] [第 6 の実施形態]

本発明の第 6 の実施形態として、光検出器の他の形態について説明する。図 1 4 及び図 1 5 に示される第 6 の実施形態の光検出器 1 F が第 2 の実施形態の光検出器 1 B と異なる点は、光学素子として、形状が異なる光学素子 3 0 を使用している点、及び、半導体積層体 4 が、所定の方向に沿って積層された複数の量子カスケード構造を有する点である。具体的には、図 5 に示されるように、量子カスケード構造（すなわち単位積層体 4 6）が、多段に積層されている。

[0069] 光学素子 3 0 は、所定の方向に垂直な方向に延びる複数の棒状体 3 3 a（第 1 の領域 R 1）が、空間 S（第 2 の領域 R 2）とともにストライプを形成するように同一平面上に互いに平行に配置されたものである。

[0070] 所定の方向の電界成分は、後述するシミュレーションから明らかなように、光学素子 3 0 の表層に近い部分において最も強度が高くなるが、半導体積層体 4 の深い領域においてもその強度はゼロではなく、深くなるに従って減衰しながらも存在している。半導体積層体 4 は量子カスケード構造を多段に

有しているため、深い領域に届いている電界成分によっても光励起電子を有効に発生させる。このため、本実施形態の光検出器は、光感度が一層高められているといえる。

[0071] 以上、本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に何ら限定されるものではない。例えば、上記実施形態では、InP基板上に形成した量子カスケード構造として、InAlAsとInGaAsから構成される例を取り上げたが、InPとInGaAsから構成されるものであってもよく、GaAs基板上に形成したAlGaAsとGaAsからなるものであってもよく、他にも、GaNとInGaNからなるものなど、量子準位が形成されるあらゆる半導体層を適用することができる。

[0072] また、第1の実施形態では、光学素子10の材料として金(Au)を示したが、アルミニウム(Al)や銀(Ag)などの電気抵抗が低い他の金属であってもよい。また、第2の実施形態では、光学素子10の材料である屈折率の高い誘電体としてゲルマニウム(Ge)を示したが、これに限られるものではない。また、上記各実施形態におけるオーミック電極6, 7を構成する金属についてもここに示した限りではない。このように、通常考えられるデバイス形状のバリエーション範囲において、本発明の適用が可能である。

[0073] また、第4及び第5実施形態の光検出器における光学素子10に替えて、第2の実施形態における光学素子20を適用してもよいし、第1の領域及び第2の領域を構成する材料として、文献(M. Choi et al., "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index", Nature, 470, 369(2011).)に開示されているような、微細加工技術により誘電率と透磁率を人工的に操作したメタマテリアルと呼ばれる材料を用いてもよい。

[0074] また、本発明の光検出器においては、光学素子が、所定の方向における一方の側から光が入射したときに当該所定の方向の電界成分を生じさせるものであってもよいし、或いは、光学素子が、半導体積層体を介して所定の方向における他方の側から光が入射したときに当該所定の方向の電界成分を生じ

させるものであってもよい。つまり、本発明の光学素子は、所定の方向に沿って光が入射したときに当該所定の方向の電界成分を生じさせるものである。

- [0075] さらに、光学素子における第1の領域R1及び第2の領域R2に関し、周期的に配列された方向における寸法比（幅比）は、特に制限されない。例えば、第1の領域R1の幅を第2の領域R2の幅よりも小さく構成してもよく、逆に、第1の領域R1の幅を第2の領域R2の幅よりも大きく構成してもよい。それぞれの目的に合わせて、自由に設計することができる。

実施例

- [0076] 本発明における光学素子について、光が出射する側の近傍における電界強度分布をシミュレーションにより計算した。

- [0077] 図8に示される光学素子20を対象とした。光学素子20の厚さ、並びに第1の領域R1及び第2の領域R2の構成材料及び寸法は次のとおりである。

光学素子の厚さ… $0.5\ \mu\text{m}$

周期 $d = 1.5\ \mu\text{m}$

第1の領域…ゲルマニウム（屈折率4.0）、幅 $0.7\ \mu\text{m}$

第2の領域…空気（屈折率1.0）、幅が $0.8\ \mu\text{m}$

- [0078] 電界強度分布の計算は、FDTD（Finite-Difference Time-Domain）法（有限差分時間領域法）と呼ばれる逐次近似法にて行った。結果を図16に示す。ここで入射光は、波長 $5.2\ \mu\text{m}$ の平面波であり、図16における下方から上方に向けて（つまり所定の方向に）入射させた。偏光方向は、光学素子20のスリット形状が並ぶ方向とした。図16は光学素子20における第1の領域R1及び第2の領域R2がなす面に（つまり所定の方向に垂直な面に）に垂直な電界成分の強度を示している。

- [0079] 入射光は一様な平面波であり、その電界成分は横方向にしか存在しない。図16によれば、第1の領域（ゲルマニウム）と第2の領域（空気）との周期的な配列により、入射光に含まれていなかった所定方向の電界成分が新た

に生じていることが分かる。またその強度分布から、垂直電界強度が強い領域は光学素子20の表層に近い範囲に集中しており、このことから、量子カスケード構造においてアクティブ領域4bは、可能な限り半導体積層体4の表層に近い部分に形成した方が、より高い光感度を得られることがわかる。

[0080] また、ゲルマニウムからなる光学素子を備える光検出器を実際に作製し、その光感度スペクトルを作成した。その光感度スペクトルを図17に示す。ここで、作製した光検出器は、光学素子の材質をゲルマニウム、形状をストライプ（図3の形状）とした。光学素子の寸法としては、周期を $1.5\mu\text{m}$ 、幅を $0.8\mu\text{m}$ とした。半導体構造は、InGaAsの井戸層とInAlAsの障壁層とから構成した。基板はn型のInPとした。

[0081] 図17によれば、アクティブ領域の量子井戸層内における量子上位準位が1準位である従来例では、光感度ピークが1つであったが、量子上位準位を2準位設けた本発明の実施例では、それぞれの準位への電子励起エネルギーに相当する2つの光感度ピークが観測された。これにより、本発明の実施例では、光検出器の感度波長帯域が広がっていることが分かる。

[0082] また、量子カスケード構造の段数を変化させながら、半導体積層体内全体に生じる垂直電界強度の積算値を計算した一例を図18に示す。図18によれば、少なくとも段数が50までは段数とともに垂直電界強度が増加し、それ以上の段数で垂直電界強度が飽和傾向になることが分かる。この結果から、量子カスケード構造の段数は、数十段あることが望ましいことが分かる。

符号の説明

[0083] 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F…光検出器、2, 2c…基板、3, 5…コンタクト層、4…半導体積層体、4b…アクティブ領域、4c…インジェクタ領域、6, 7…電極、10, 20, 30…光学素子、11…構造体、R1…第1の領域、R2…第2の領域。

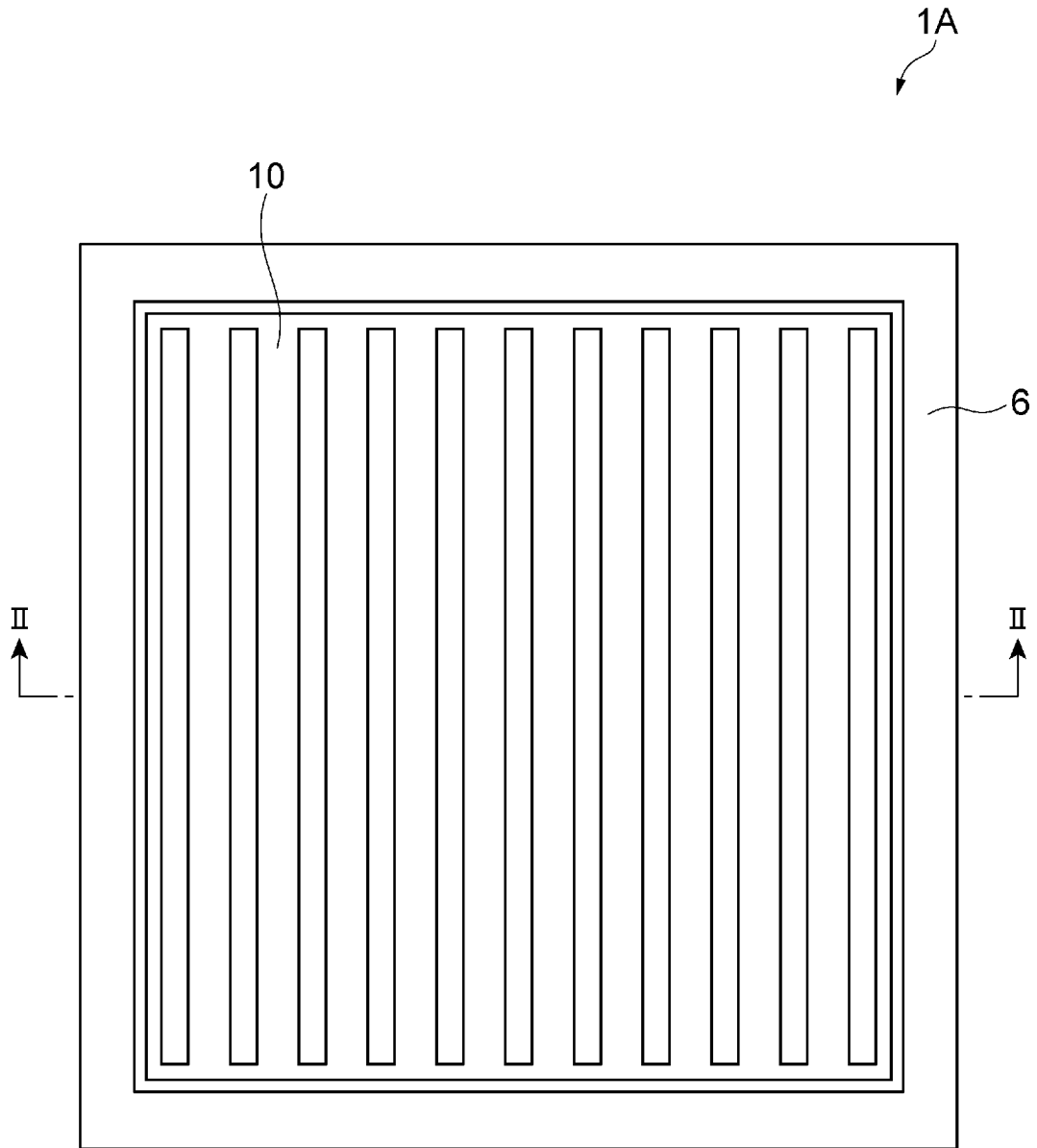
請求の範囲

- [請求項1] 第1の領域、及び所定の方向に垂直な面に沿って前記第1の領域に対し周期的に配列された第2の領域を含む構造体を有し、前記所定の方向に沿って光が入射したときに前記所定の方向の電界成分を生じさせる光学素子と、
- 前記光学素子に対し前記所定の方向における一方の側とは反対側の他方の側に配置され、前記光学素子により生じさせられた前記所定の方向の電界成分によって電流を生じる量子カスケード構造を有する半導体積層体と、を備え、
- 前記量子カスケード構造は、
- 第1の量子上位準位、及び当該第1の量子上位準位よりも低い第2の量子上位準位を有するアクティブ領域と、
- 前記アクティブ領域で励起された電子を輸送するインジェクタ領域と、を含む、光検出器。
- [請求項2] 前記半導体積層体は、前記所定の方向に沿って積層された複数の前記量子カスケード構造を有する、請求項1記載の光検出器。
- [請求項3] 前記半導体積層体の前記一方の側の表面に形成された第1のコンタクト層と、
- 前記半導体積層体の前記他方の側の表面に形成された第2のコンタクト層と、を更に備える、請求項1又は2記載の光検出器。
- [請求項4] 前記第1のコンタクト層と電氣的に接続された第1の電極と、
- 前記第2のコンタクト層と電氣的に接続された第2の電極と、を更に備える、請求項3記載の光検出器。
- [請求項5] 前記第2のコンタクト層、前記半導体積層体、前記第1のコンタクト層及び前記光学素子が前記他方の側から順に積層された基板を更に備える、請求項3又は4記載の光検出器。
- [請求項6] 前記第1の領域は、前記所定の方向に沿って前記光を透過させて当該光を変調する誘電体からなる、請求項1～5のいずれか一項記載の

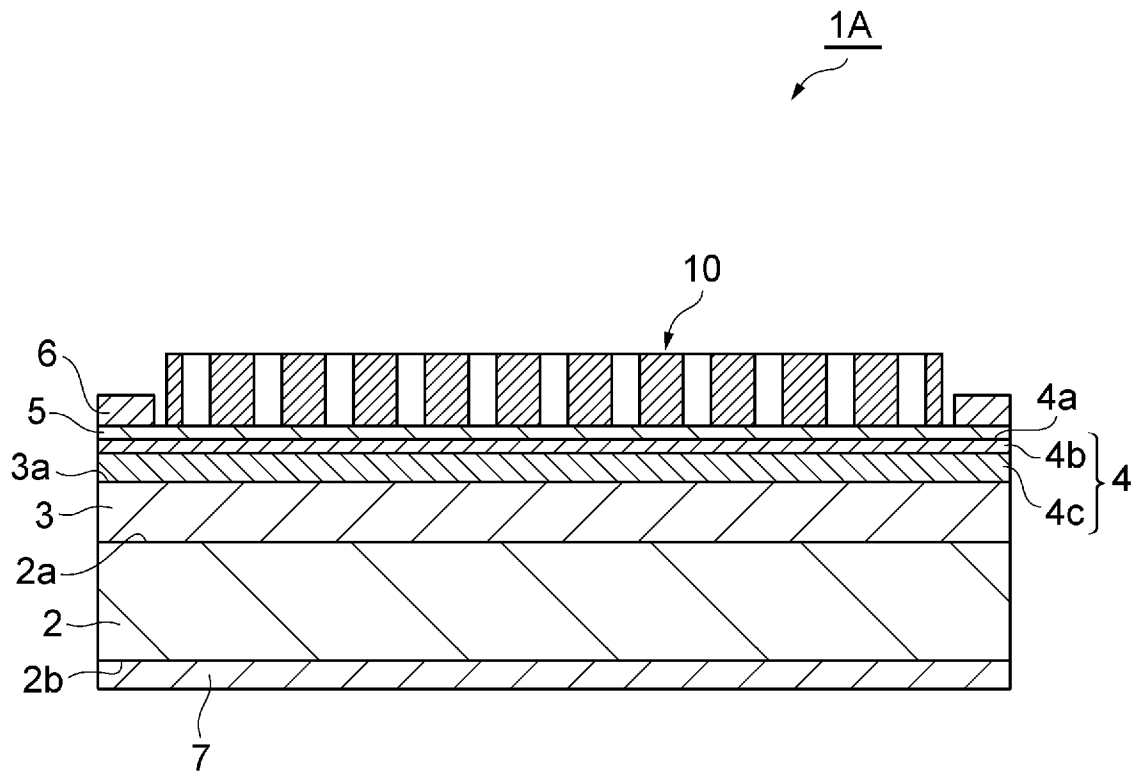
光検出器。

- [請求項7] 前記第1の領域は、前記光により表面プラズモンが励起される金属からなる、請求項1～5のいずれか一項記載の光検出器。
- [請求項8] 前記第1の領域に対する前記第2の領域の配列の周期は、 $0.5 \sim 500 \mu\text{m}$ である、請求項1～7のいずれか一項記載の光検出器。
- [請求項9] 前記光は、赤外線である、請求項1～8のいずれか一項記載の光検出器。
- [請求項10] 前記光学素子は、前記一方の側から光が入射したときに前記所定の方向の電界成分を生じさせる、請求項1～9のいずれか一項記載の光検出器。
- [請求項11] 前記光学素子は、前記半導体積層体を介して前記他方の側から光が入射したときに前記所定の方向の電界成分を生じさせる、請求項1～9のいずれか一項記載の光検出器。

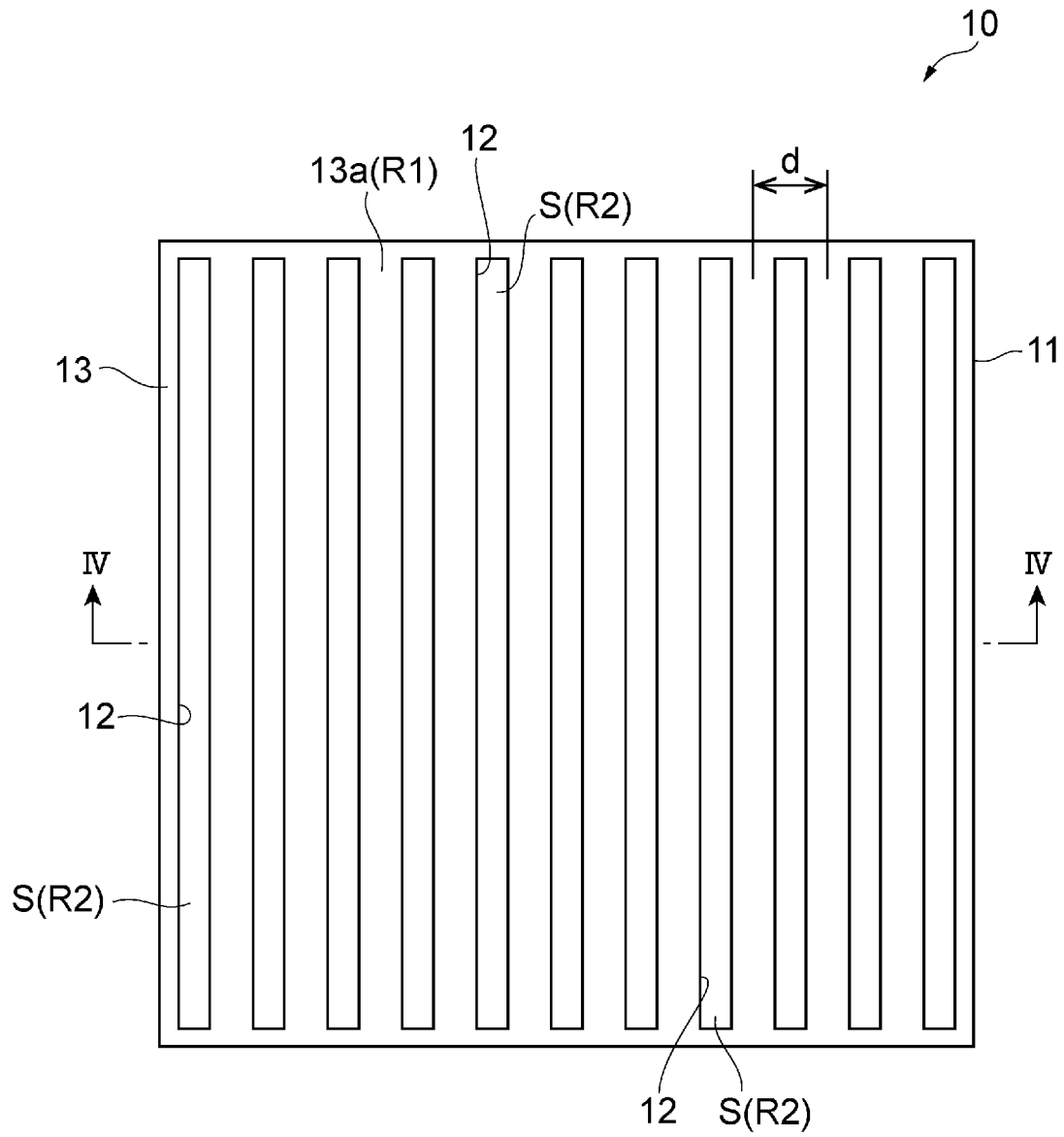
[図1]



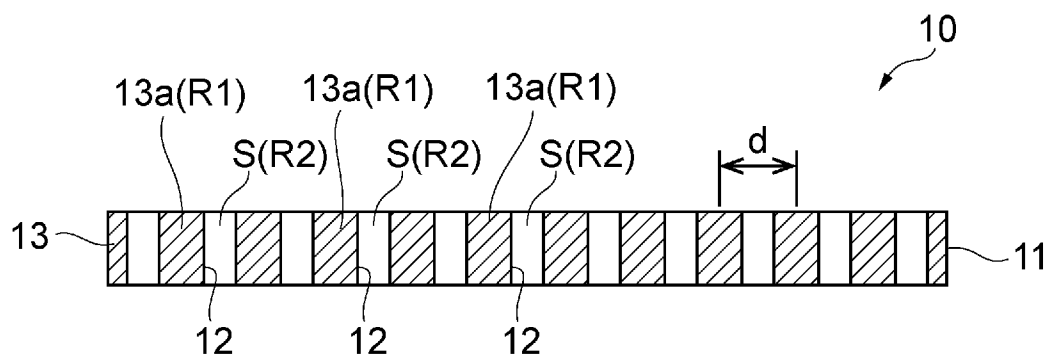
[図2]



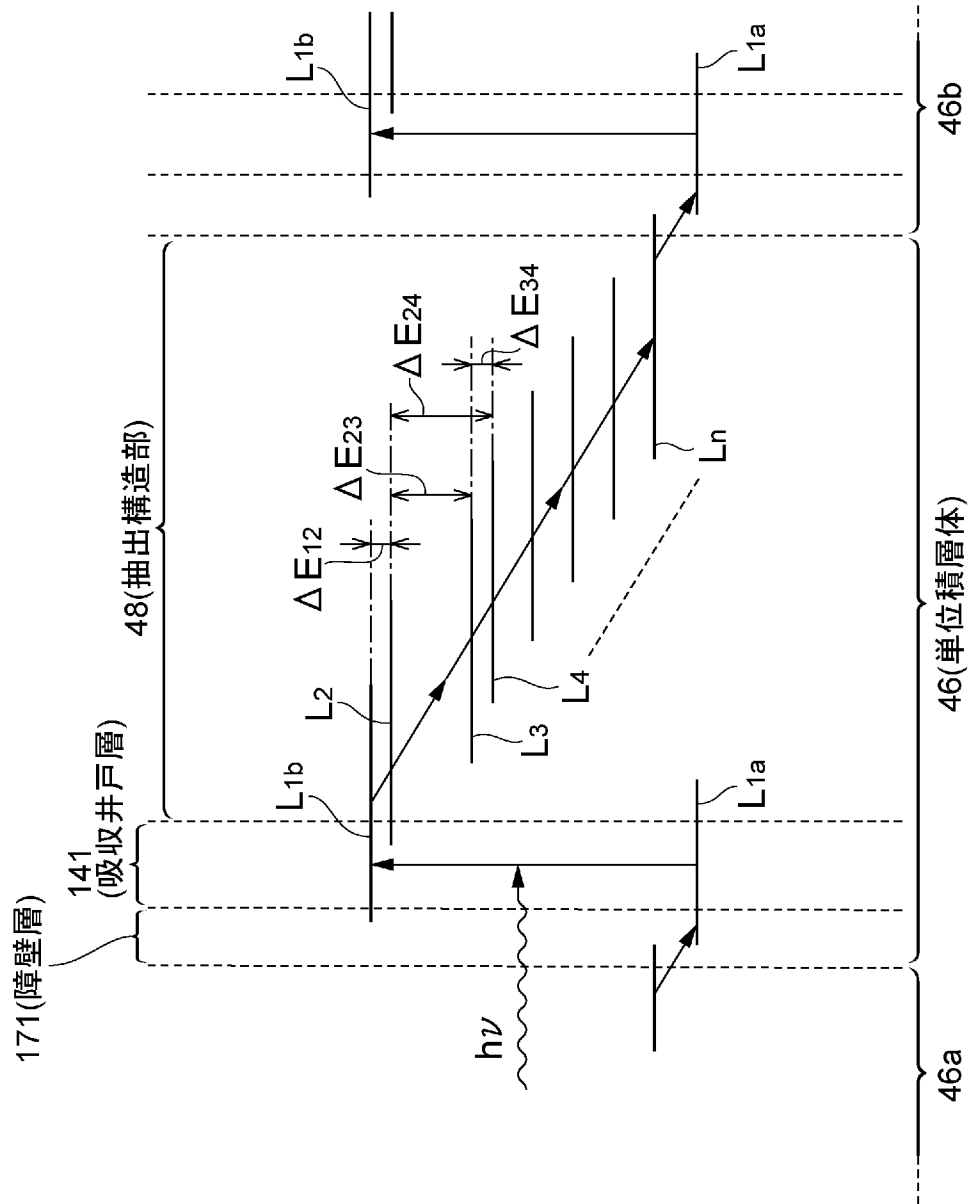
[図3]



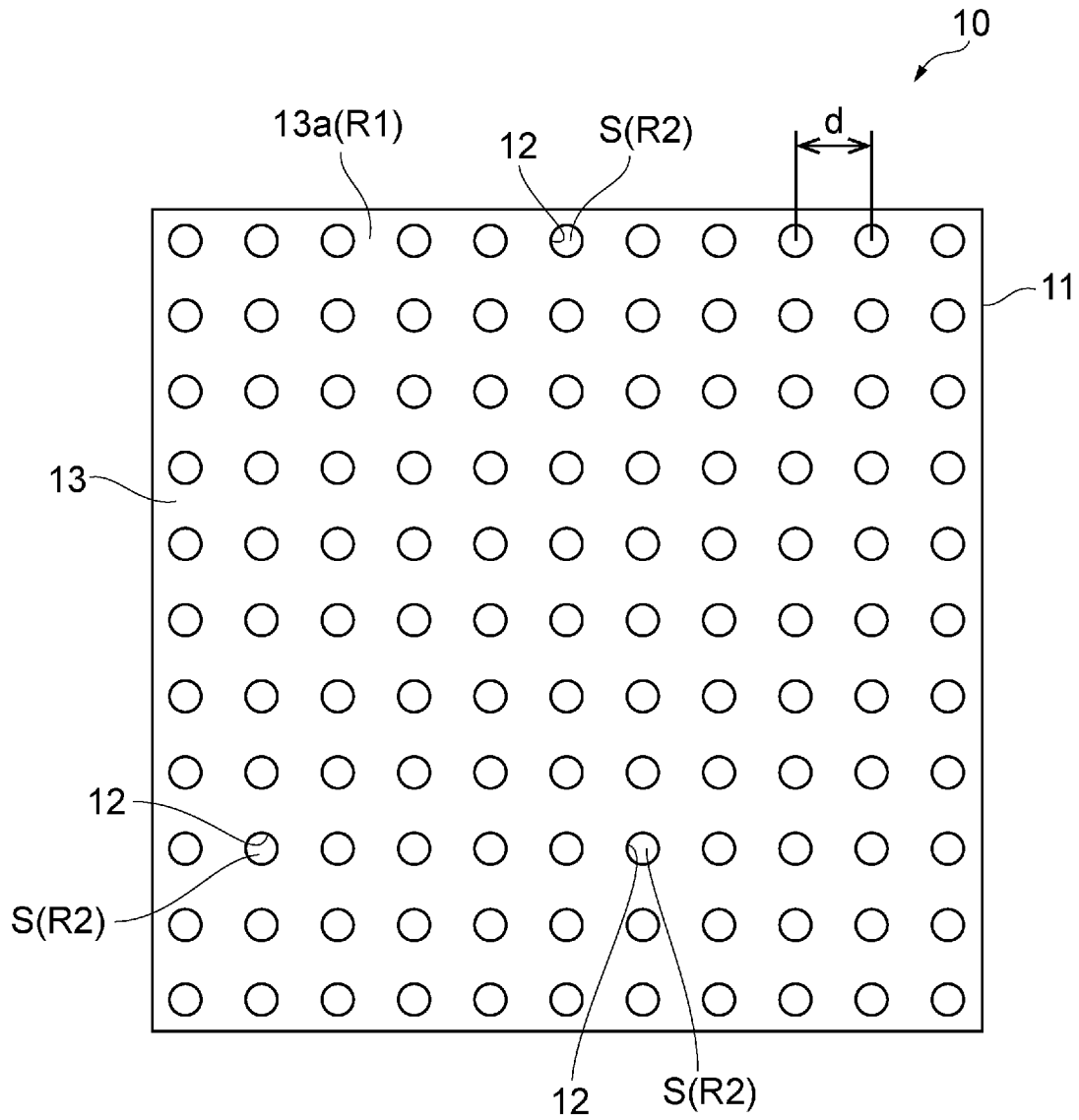
[図4]



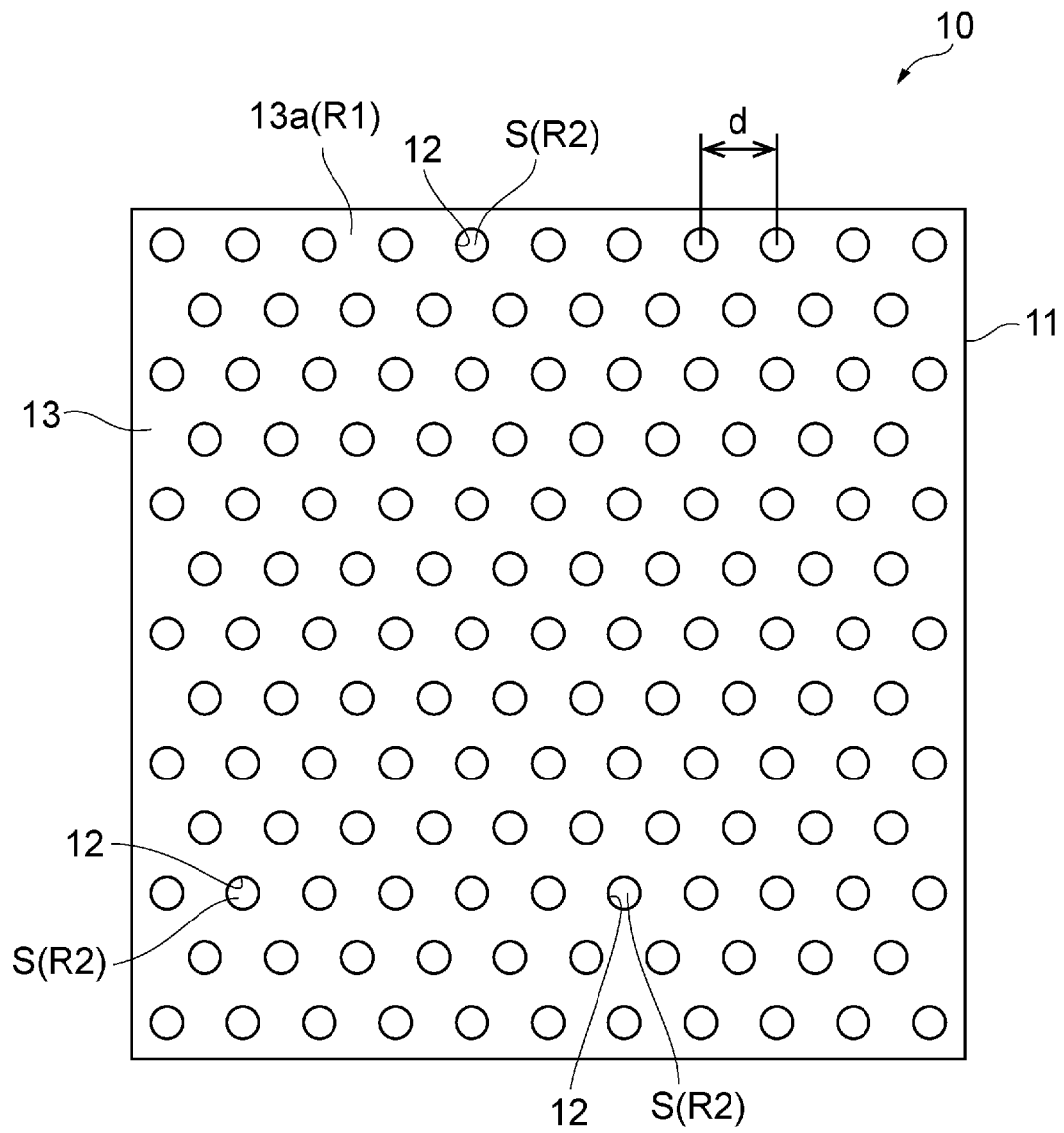
[図5]



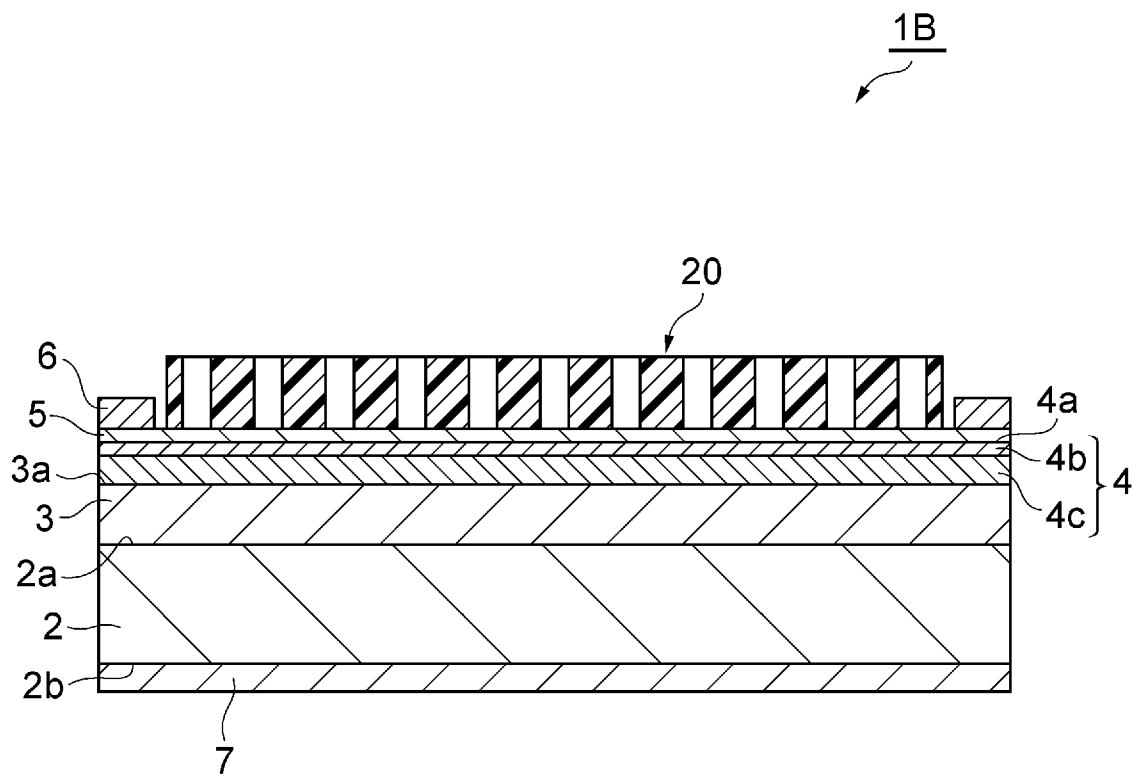
[図6]



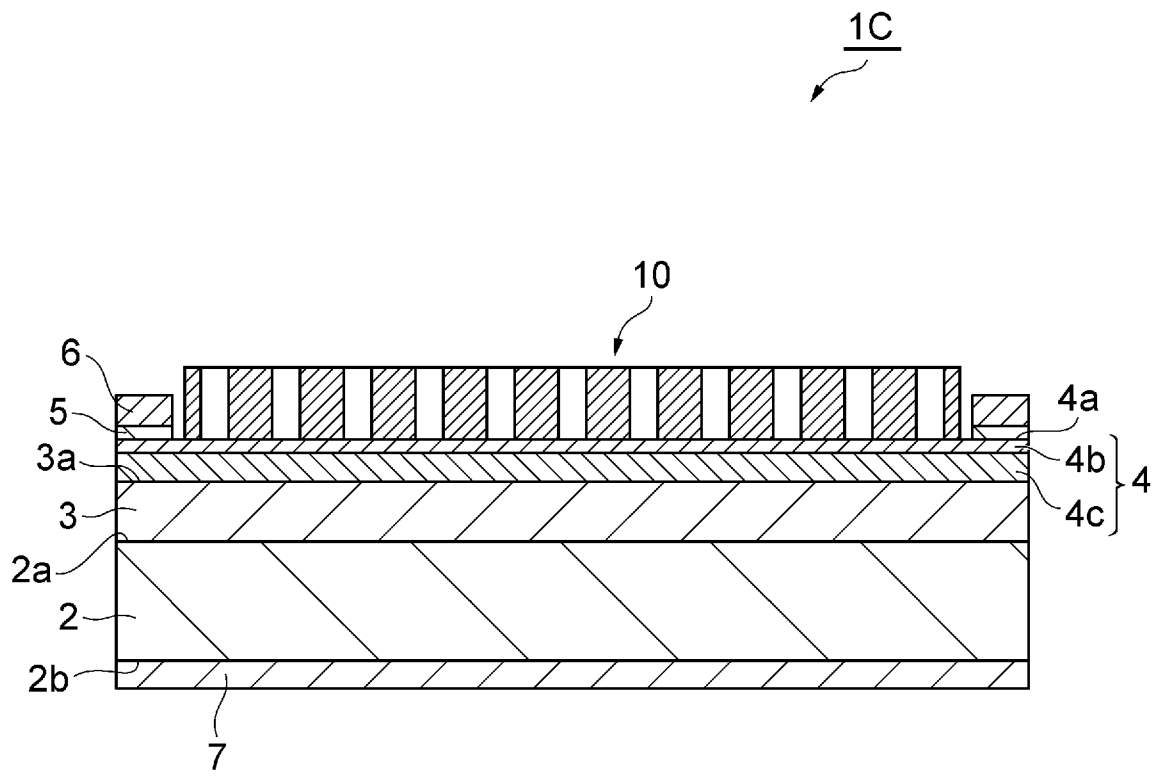
[図7]



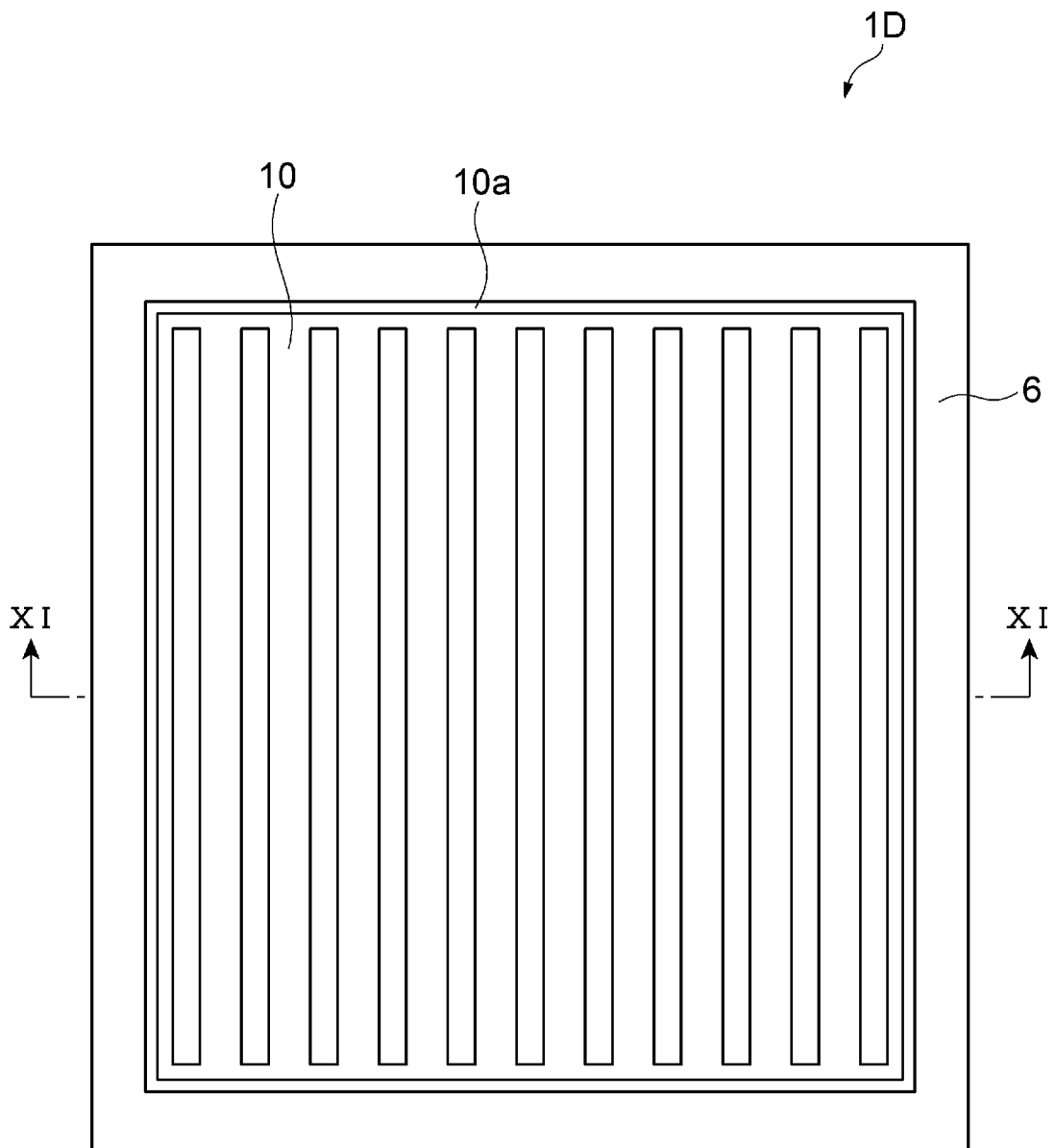
[図8]



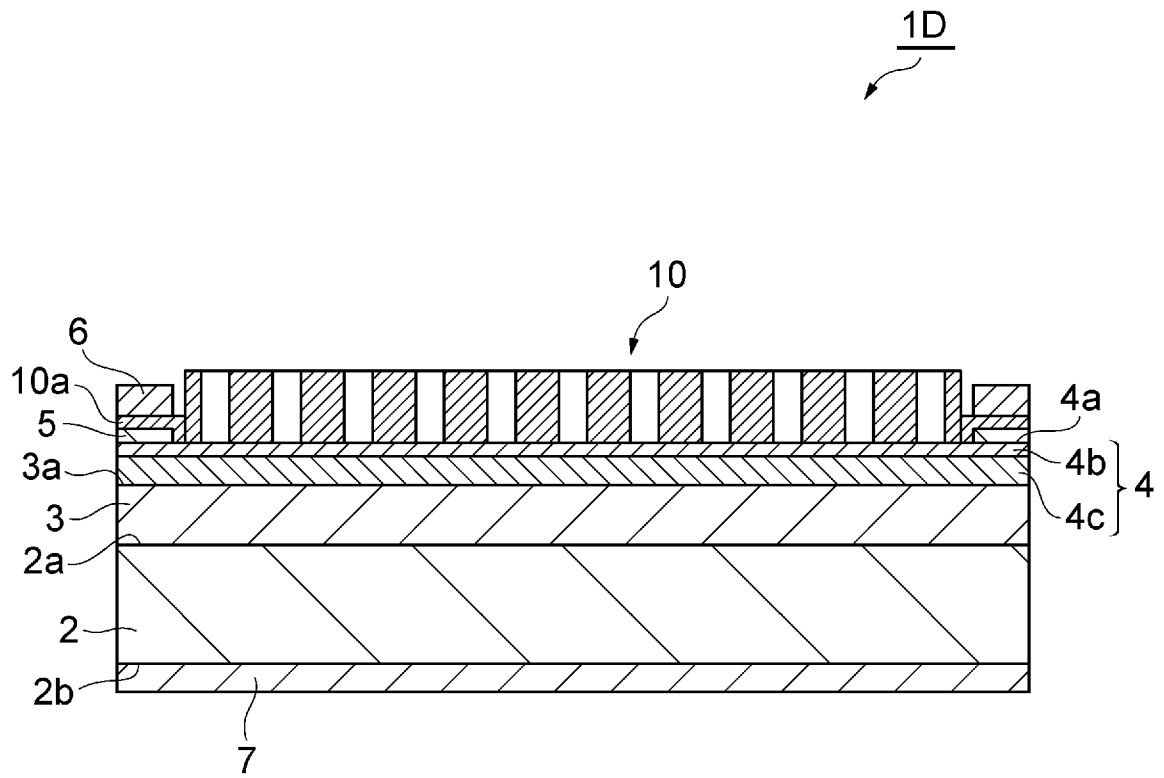
[図9]



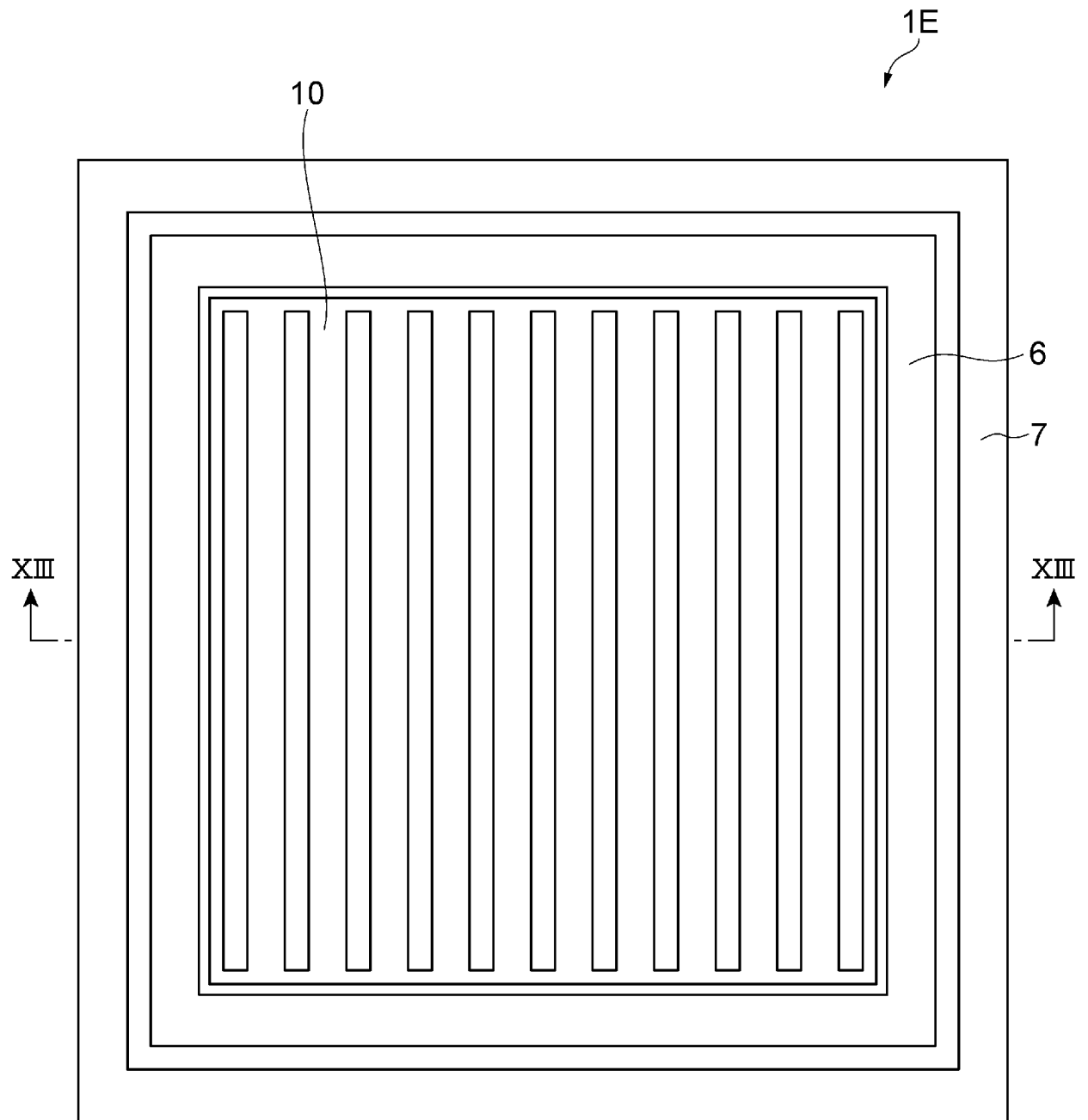
[図10]



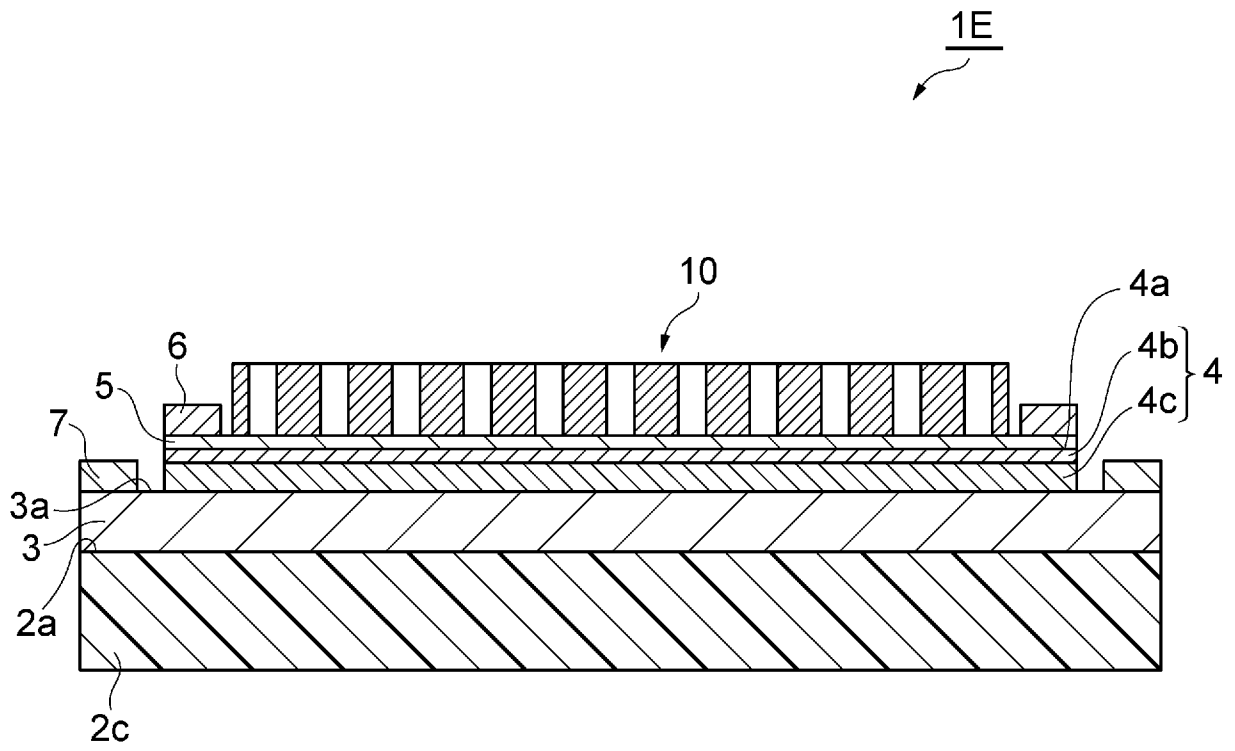
[図11]



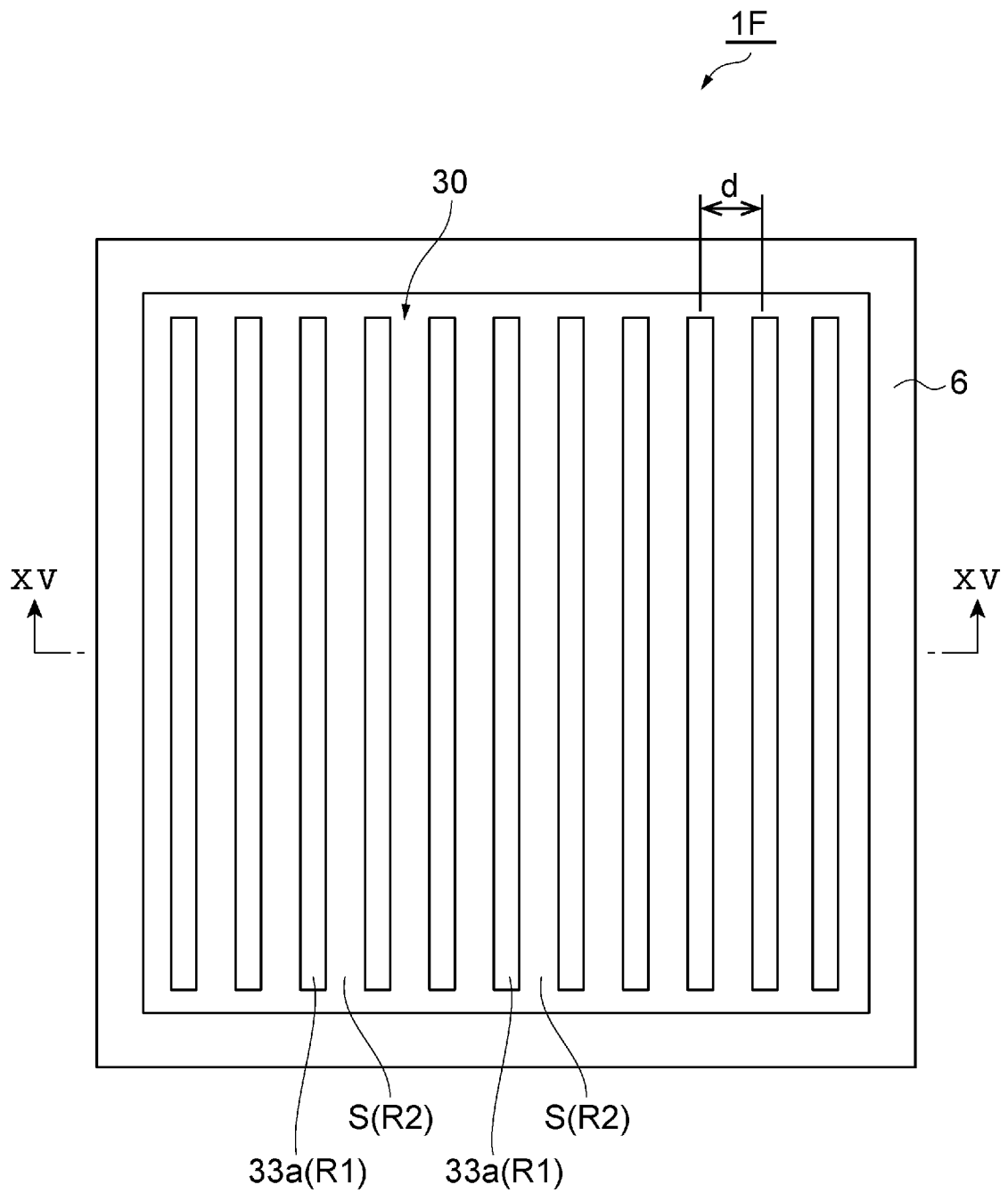
[図12]



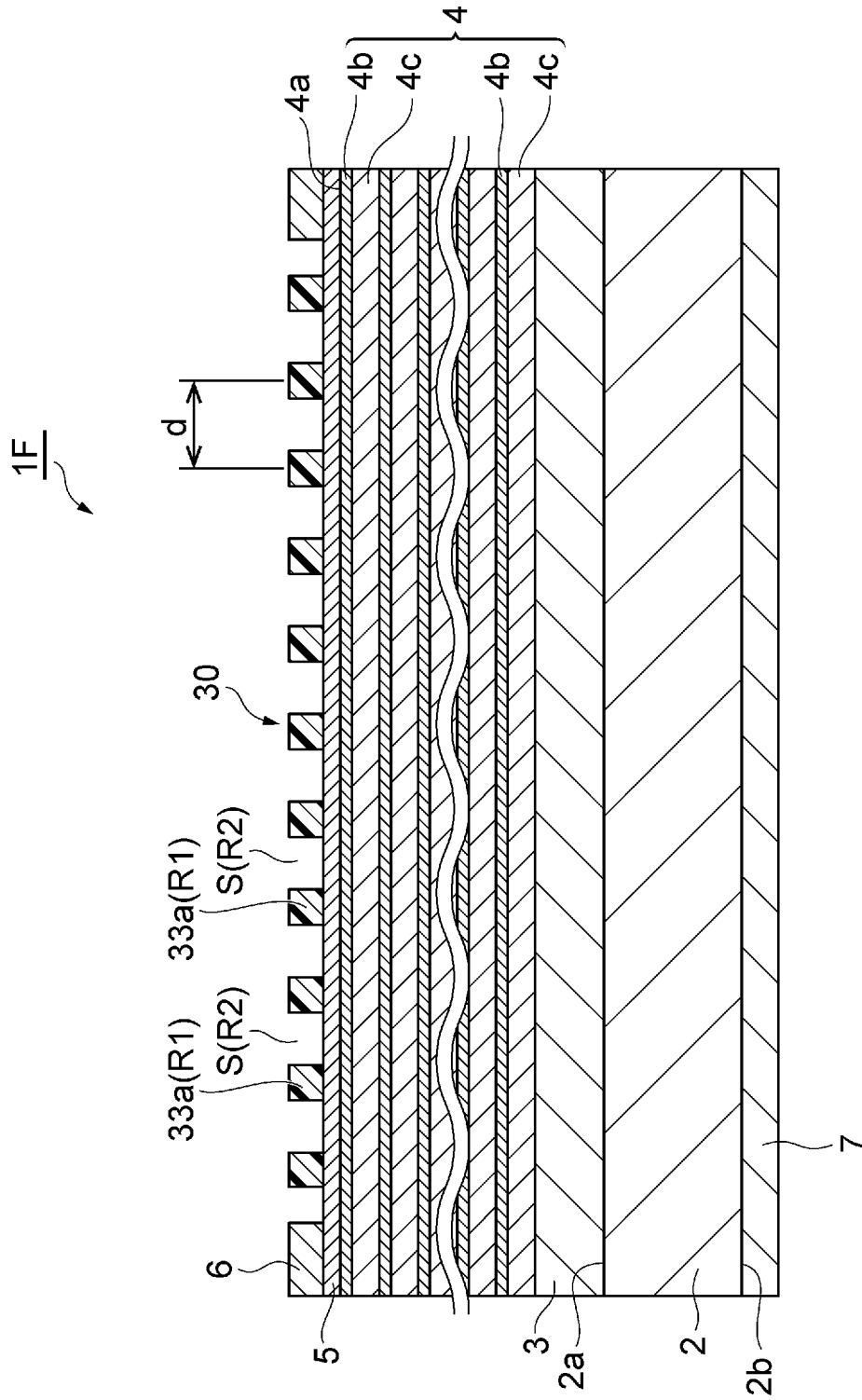
[図13]



[図14]

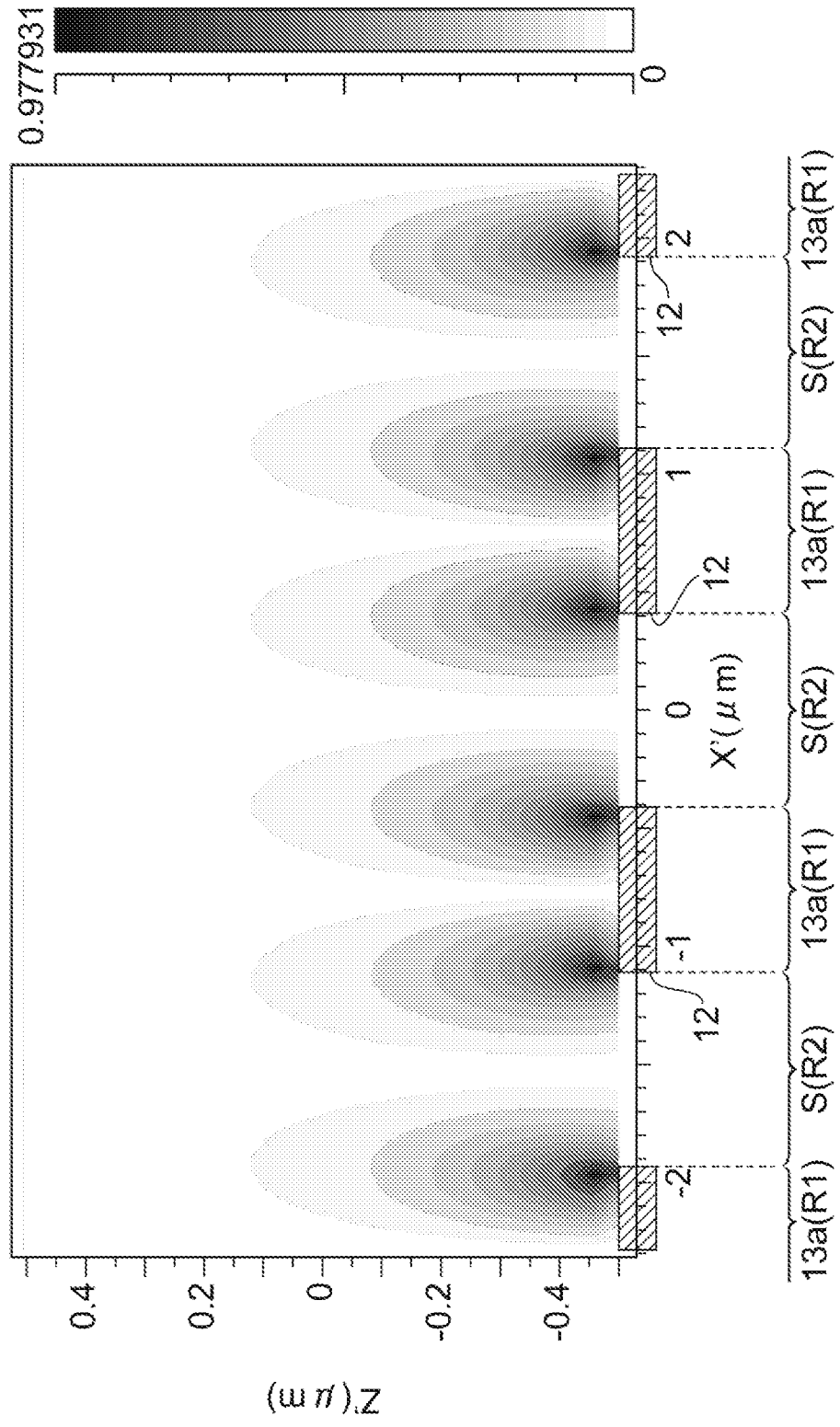


[図15]

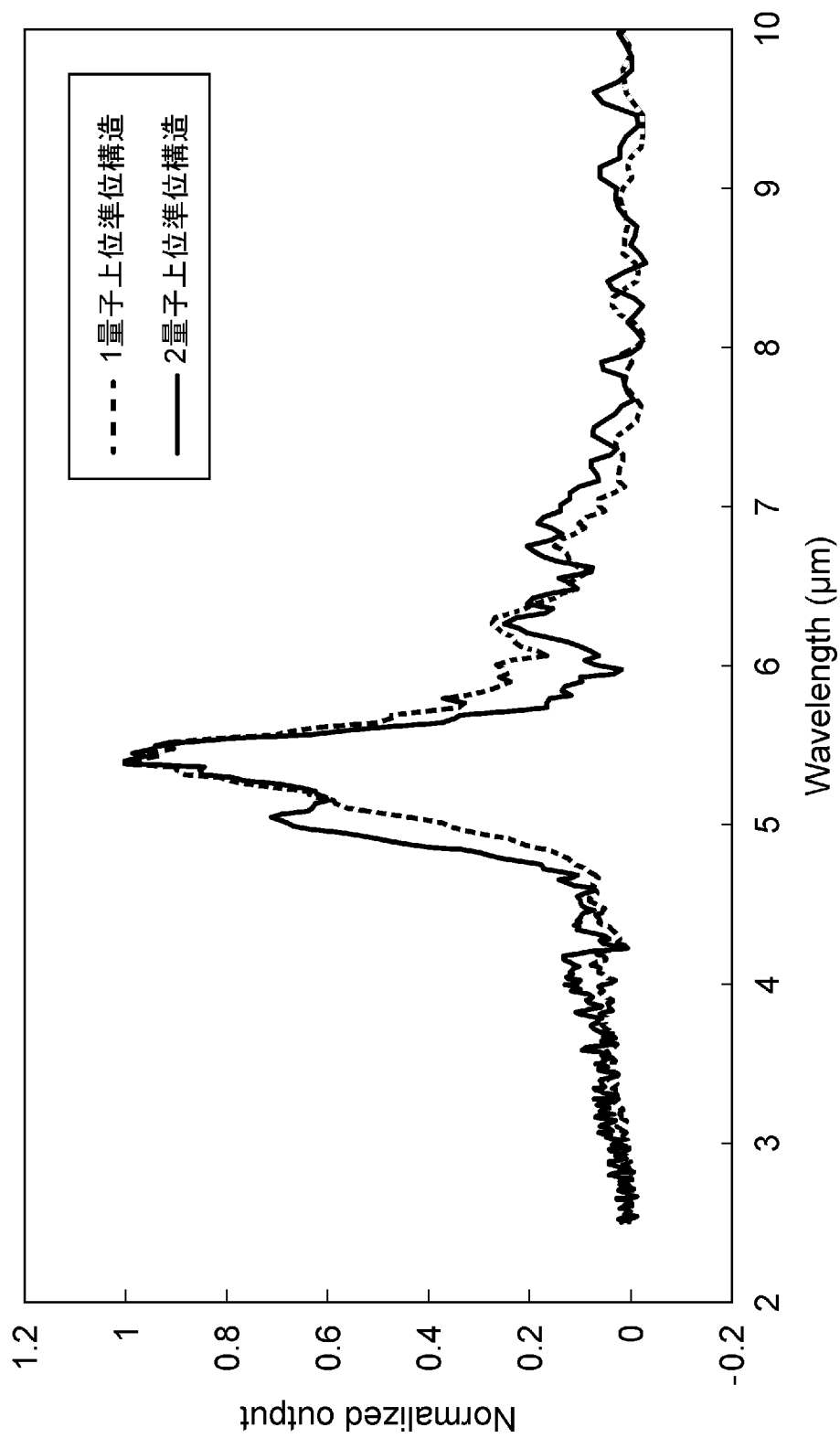


[圖16]

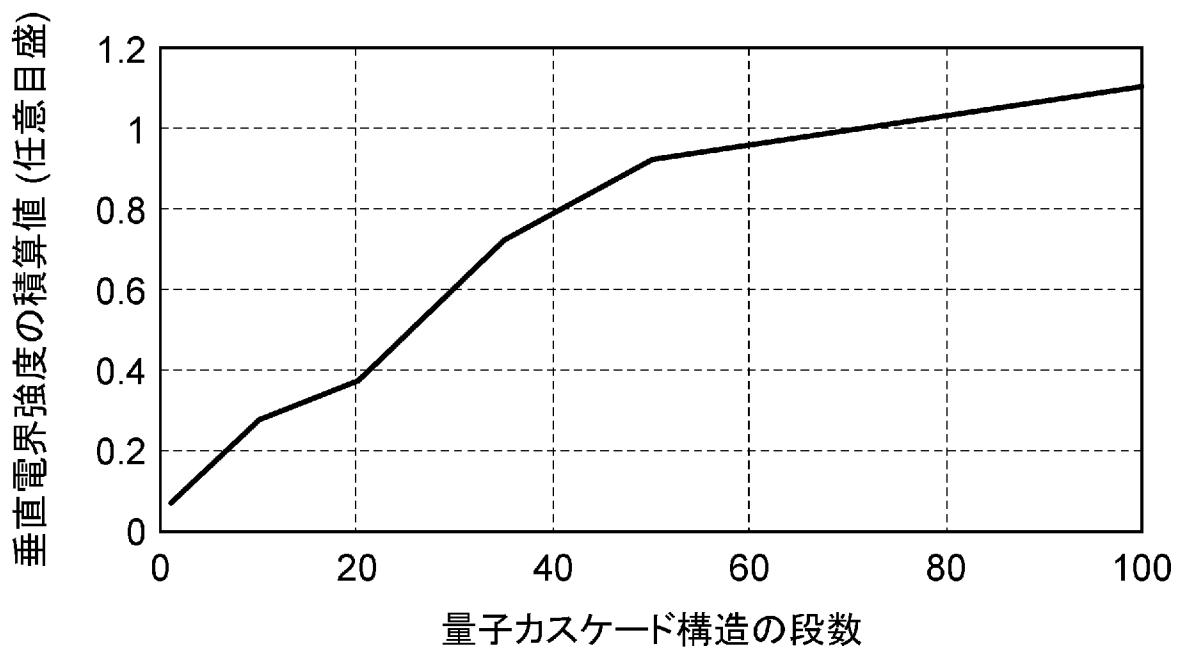
E_z @ Freq=0.1925 μm^{-1} [Mon#2(0,0,1)]



[図17]



[図18]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/063182

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01J1/02(2006.01) i, H01L31/10(2006.01) i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L31/00-31/0392, 31/08-31/119, G01J1/02

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

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

Scitation, JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2012-83238 A (NEC Corp.), 26 April 2012 (26.04.2012), entire text; all drawings (Family: none)	1-5, 7-11 6
X A	S. C.Lee, S.Krishna, and S. R. Brueck, "Quantum dot infrared photodetector enhanced by surface plasma wave excitation," OPTICS EXPRESS, 2009. 12.02, Vol.17, No.25, p.23160-23168.	1-5, 7-11 6
X A	Wei Wu, Alireza Bonakdar, and Hooman Mohseni, "Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity," Applied Physics Letters, 2010.04.22, vol.96, p.161107- 1~3.	1-5, 7-11 6

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

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

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

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

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

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

"T" 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
27 May, 2013 (27.05.13)

Date of mailing of the international search report
04 June, 2013 (04.06.13)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/063182

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	JP 2005-159002 A (Seiko Epson Corp.), 16 June 2005 (16.06.2005), entire text; all drawings (Family: none)	6 1-5, 7-11
Y A	Shin-Yen Lin, Yau-Ren Tsai, and Si-Chen Lee, "High-performance InAs/GaAs quantum-dot infrared photodetectors with a single-sided Al _{0.3} Ga _{0.7} As blocking layer," Applied Physics Letters, 2001.02.16, Vol.78, No.18, p.2784-2786.	6 1-5, 7-11
A	G. Ariyawansa et al., "Bias-selectable tricolor tunneling quantum dot infrared photodetector for atmospheric windows," Applied Physics Letters, 2008.03.19, Vol.92, p.111104-1~3.	1-11

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01J1/02(2006.01)i, H01L31/10(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. H01L31/00-31/0392, 31/08-31/119, G01J1/02

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	1971-2013年
日本国実用新案登録公報	1996-2013年
日本国登録実用新案公報	1994-2013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)

Scitation, JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

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
X A	JP 2012-83238 A (日本電気株式会社) 2012.04.26, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-5, 7-11 6
X A	S. C. Lee, S. Krishna, and S. R. Brueck, "Quantum dot infrared photodetector enhanced by surface plasma wave excitation," OPTICS EXPRESS, 2009.12.02, Vol.17, No.25, p.23160-23168.	1-5, 7-11 6

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

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

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

国際調査を完了した日

27.05.2013

国際調査報告の発送日

04.06.2013

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)

佐藤 俊彦

2K

4753

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	Wei Wu, Alireza Bonakdar, and Hooman Mohseni, "Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity," Applied Physics Letters, 2010.04.22, vol.96, p.161107-1~3.	1-5,7-11 6
Y A	JP 2005-159002 A (セイコーエプソン株式会社) 2005.06.16, 全文、全図 (ファミリーなし)	6 1-5,7-11
Y A	Shin-Yen Lin, Yau-Ren Tsai, and Si-Chen Lee, "High-performance InAs/GaAs quantum-dot infrared photodetectors with a single-sided Al _{0.3} Ga _{0.7} As blocking layer," Applied Physics Letters, 2001.02.16, Vol.78, No.18, p.2784-2786.	6 1-5,7-11
A	G. Ariyawansa 他, "Bias-selectable tricolor tunneling quantum dot infrared photodetector for atmospheric windows," Applied Physics Letters, 2008.03.19, Vol.92, p.111104-1~3.	1-11