(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
2022年3月3日(03.03.2022)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2022/044447 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 31/0232 (2014.01) *H01L 27/144* (2006.01)
H01L 31/10 (2006.01) *H01L 27/146* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2021/018235

(22) 国際出願日： 2021年5月13日(13.05.2021)

(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 2020-141687 2020年8月25日(25.08.2020) JP

(71) 出願人:三菱電機株式会社(**MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION**) [JP/JP]; 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 小川 新平 (**OGAWA, Shimpei**); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 嶋谷 政彰(**SHIMATANI, Masaaki**); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 福島 昌一郎(**FUKUSHIMA, Shoichiro**); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP). 奥田 聡志(**OKUDA, Satoshi**); 〒1008310 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo (JP).

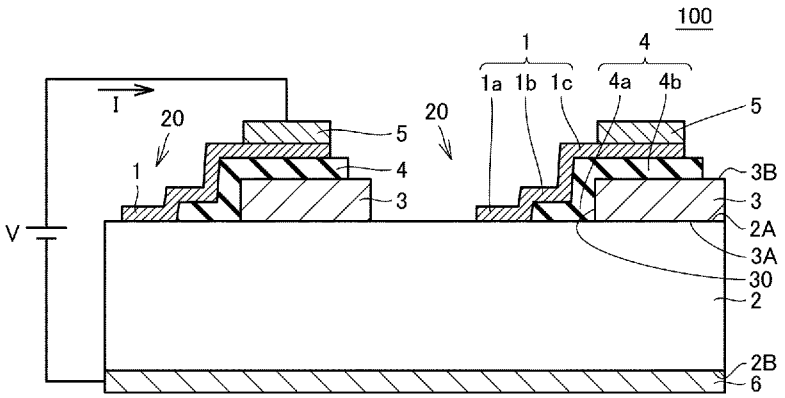
(74) 代理人:特許業務法人深見特許事務所(**FUKAMI PATENT OFFICE, P.C.**); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島三丁目2番4号 中之島フェスティバルタワー・ウエスト Osaka (JP).

(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, IT, 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,

(54) **Title:** ELECTROMAGNETIC WAVE DETECTOR AND ELECTROMAGNETIC WAVE DETECTOR ARRAY

(54) 発明の名称： 電磁波検出器および電磁波検出器アレイ

図1



(57) **Abstract:** This electromagnetic wave detector comprises at least one photoelectric conversion element and a plasmon filter (3) disposed to face the at least one photoelectric conversion element. The plasmon filter (3) has a plurality of periodically formed through-holes (30). The at least one photoelectric conversion element comprises: a semiconductor layer (2) having a region (20) which, in plan view, overlaps at least one of the plurality of through-holes; an insulating layer (4) formed to cover a part of the region (20); a two-dimensional material layer (1) disposed on another part of the region (20) and on the insulating layer (4), and being electrically connected to the other part of the region (20); a first electrode portion (5) electrically connected to the two-dimensional material layer (1); and a second electrode portion (6) electrically connected to the semiconductor layer (2).

WO 2022/044447 A1

[続葉有]

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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))

(57) 要約:電磁波検出器は、少なくとも１つの光電変換素子と、少なくとも１つの光電変換素子と対向するように配置されたプラズモンフィルタ（３）とを備える。プラズモンフィルタ（３）には、複数の貫通孔（３０）が周期的に形成されている。少なくとも１つの光電変換素子は、平面視において複数の貫通孔のうちの少なくとも１つの貫通孔と重なる領域（２０）を有する半導体層（２）と、領域（２０）の一部を覆うように形成された絶縁層（４）と、領域（２０）の他の一部および絶縁層（４）上に配置され、かつ領域（２０）の他の一部と電気的に接続されている二次元材料層（１）と、二次元材料層（１）と電気的に接続された第１電極部（５）と、半導体層（２）と電気的に接続された第２電極部（６）とを備える。

明　細　書

発明の名称 ： 電磁波検出器および電磁波検出器アレイ

技術分野

[0001]　本開示は、電磁波検出器および電磁波検出器アレイに関する。

背景技術

[0002]　従来、次世代の電磁波検出器に用いられる電磁波検出層の材料として、二次元材料層の一例である移動度が極めて高いグラフェンが知られている。グラフェンの吸収率は２．３％と低い。そのため、グラフェンを用いた電磁波検出器における高感度化手法が提案されている。たとえば、米国特許出願公開第２０１５／０２４３８２６号明細書（特許文献１）では、下記のような構造の検出器が提案されている。すなわち、上記特許文献１の検出器では、ｎ型半導体層上に２つ以上の誘電体層が設けられている。２つの誘電体層上および当該２つの誘電体層の間に位置するｎ型半導体層の表面部分上にグラフェン層が形成されている。グラフェン層とｎ型半導体層とはショットキー接合している。グラフェン層の両端に接続されたソース・ドレイン電極が誘電体層上に配置されている。ゲート電極はｎ型半導体層と接続されている。ゲート電極とソース電極またはドレイン電極との間に電圧を印加した場合には、上記ショットキー接合により、ＯＦＦ動作が可能となる。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：米国特許出願公開第２０１５／０２４３８２６号明細書

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004]　上述した従来の検出器は、グラフェン層と接触する半導体層のバンドギャップ以上のエネルギーを有する電磁波に感度を有する。言い換えると、上記検出器の検出波長は、半導体層のバンドギャップに対応する波長以下となる。そのため、上記検出器では、特定の波長帯域の電磁波のみを選択的に検出

することは困難である。

[0005] また、上記検出器では、ゲート電極とソース電極またはドレイン電極とに電圧を印加したショットキー動作時の検出器の感度は半導体層の量子効率に依存するため、検出器の高感度化が困難である。

[0006] 本開示の主たる目的は、上述した従来の検出器と比べて、特定の波長帯域の電磁波のみを選択的に検出できかつその検出感度が高い電磁波検出器および電磁波検出器アレイを提供することにある。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示に係る電磁波検出器は、少なくとも１つの光電変換素子と、少なくとも１つの光電変換素子と対向するように配置されたプラズモンフィルタとを備える。プラズモンフィルタには、複数の貫通孔が周期的に形成されている。少なくとも１つの光電変換素子は、平面視において複数の貫通孔のうちの少なくとも１つの貫通孔と重なる領域を有する半導体層と、領域の一部を覆うように形成された絶縁層と、領域の他の一部および絶縁層上に配置され、かつ領域の他の一部と電気的に接続されている二次元材料層と、二次元材料層と電気的に接続された第１電極部と、半導体層と電気的に接続された第２電極部とを備える。

発明の効果

[0008] 本開示によれば、上述した従来の検出器と比べて、特定の波長帯域の電磁波のみを選択的に検出できかつその検出感度が高い電磁波検出器および電磁波検出器アレイを提供できる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]実施の形態１に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図2]図１に示される電磁波検出器の平面図である。

[図3]図１に示される電磁波検出器のプラズモンフィルタの平面図である。

[図4]実施の形態２に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図5]実施の形態２に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。

[図6]実施の形態３に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図7]実施の形態４に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図8]実施の形態５に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタを示す平面図である。

[図9]実施の形態６に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタを示す平面図である。

[図10]実施の形態６に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタのさらに他の変形例を示す平面図である。

[図11]実施の形態７に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図12]実施の形態８に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図13]図１２に示される電磁波検出器の平面図である。

[図14]実施の形態９に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図15]実施の形態１０に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図16]実施の形態１１に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図17]実施の形態１２に係る電磁波検出器を示す平面図である。

[図18]図１７中の線分ＸＶＩＩＩ－ＸＶＩＩＩにおける断面図である。

[図19]実施の形態１３に係る電磁波検出器を示す平面図である。

[図20]図１９中の線分ＸＸ－ＸＸにおける断面図である。

[図21]実施の形態１３に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。

[図22]実施の形態１４に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図23]実施の形態１５に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図24]実施の形態１５に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。

[図25]実施の形態１６に係る電磁波検出器を示す断面図である。

[図26]実施の形態１９に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタの部分断面図である。

[図27]実施の形態２０に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタの部分平面図である。

[図28]図２７中の矢印ＸＸＶＩＩＩ－ＸＸＶＩＩＩから視た、プラズモンフィルタの部分断面図である。

[図29]実施の形態２１に係る電磁波検出器アレイを示す平面図である。

[図30]実施の形態２１に係る電磁波検出器アレイの変形例を示す平面図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、図面を参照して、本開示の実施の形態について説明する。図面は、模式的なものであり、機能又は構造を概念的に説明するものである。また、以下に説明する実施の形態により本開示が限定されるものではない。特記する場合を除いて、電磁波検出器の基本構成は全ての実施の形態において共通である。また、同一の符号を付したものは、上述のように同一又はこれに相当するものである。これは明細書の全文において共通する。

[0011] 本実施の形態に係る電磁波検出器が検出対象とする波長帯域は、特に制限されない。本実施の形態に係る電磁波検出器は、例えば、可視光、赤外光、近赤外光、紫外光、Ｘ線、テラヘルツ（ＴＨｚ）波、又はマイクロ波などの電磁波を検出する検出器である。なお、本発明の実施の形態において、これらの光及び電波を総称して電磁波と記載する。また、本実施の形態に係る電磁波検出器が検出対象とする波長帯域内の任意の波長を、検出波長とよぶ。

[0012] また、本実施の形態に係る電磁波検出器は、１つの波長帯域の電磁波のみを検出するように設けられていてもよいし、互いに異なる複数の波長帯域の電磁波を検出するように設けられていてもよい。言い換えると、本実施の形態に係る電磁波検出器の検出波長は、１つのみであってもよいし、複数であってもよい。

[0013] また、本実施の形態では、二次元材料層の一例であるグラフェンとしてｐ型グラフェン又はｎ型グラフェンの用語が用いられているが、真性状態のグラフェンよりも正孔が多いものをｐ型、電子が多いものをｎ型と呼ぶ。

[0014] また、本実施の形態では、二次元材料層の一例であるグラフェンの上に設ける接触層の材料について、ｎ型又はｐ型の用語が用いられているが、これらの用語は、例えば、ｎ型であれば電子供与性を有する材料、ｐ型であれば電子求引性を有する材料を示す。また、分子全体において電荷に偏りが見ら

れ、電子が支配的となるものをｎ型、正孔が支配的となるものをｐ型と呼ぶ。これらの接触層の材料は、有機物及び無機物のいずれか一方又はそれらの混合物を用いることができる。

[0015] また、金属表面と光との相互作用である表面プラズモン共鳴現象等のプラズモン共鳴現象、可視光域・近赤外光域以外での金属表面にかかる共鳴という意味での擬似表面プラズモン共鳴と呼ばれる現象、又は、波長以下の寸法の構造により特定の波長を操作するという意味でのメタマテリアル又はプラズモニックメタマテリアルと呼ばれる現象については、特にこれらを名称により区別せず、現象が及ぼす効果の面からは同等の扱いとする。ここでは、これらの共鳴を、表面プラズモン共鳴、プラズモン共鳴、又は、単に共鳴と呼ぶ。

[0016] また、表面プラズモン共鳴は、一般には金属と誘電体との界面に電磁波が伝搬あるいは局在する現象として表現される。しかし、近年では金属材料以外の、例えば酸化チタンおよびグラフェンなどにも表面プラズモン共鳴が生じることが見出されている。本実施の形態では、このような材料を区別することなく、検出波長の電磁波が入射したときに表面プラズモン共鳴が生じる（表面プラズモンが共鳴的に励起される）材料をプラズモン共鳴材料とよぶ。本実施の形態において、プラズモンフィルタの表面の少なくとも一部を構成する材料は、プラズモン共鳴材料を含む。

[0017] また、本実施の形態に係る電磁波検出器の動作時において、トンネル電流が生じない層を絶縁層とよび、トンネル電流が生じ得る層をバッファ層とよぶ。

[0018] また、本実施の形態において、二次元材料層を構成する材料は、原子が二次元面内に単層で配列され得る任意の材料であればよいが、例えばグラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド（ＴＭＤ：Transition Metal Dichalcogenide）、黒リン（Black Phosphorus）、シリセン（シリコン原子による二次元ハニカム構造）、およびゲルマネン（ゲルマニウム原子による二次元ハニカム構造）からなる群から選択される少なくとも１つを含んでいればよい。

遷移金属ダイカルコゲナイドとしては、例えば二硫化モリブデン（MoS_2）、二硫化タングステン（WS_2）、二セレン化タングステン（WSe_2）等が挙げられる。上記材料の少なくともいずれかにより構成されている二次元材料層は、後述するグラフェンにより構成されている二次元材料層と基本的に同様の効果を奏する。

[0019] 実施の形態１．

図１および図２に示されるように、実施の形態１に係る電磁波検出器１００は、複数の光電変換素子と、プラズモンフィルタ３とを備える。各光電変換素子は、二次元材料層１、半導体層２、絶縁層４、第１電極部５、および第２電極部６を主に備える。各光電変換素子は、１つの画素を構成し得る。各光電変換素子の二次元材料層１および第１電極部５は、他の光電変換素子のこれらと別体として設けられている。各光電変換素子の半導体層２および第２電極部６は、他の光電変換素子のこれらと一体として設けられている。各光電変換素子の絶縁層４は、例えば他の光電変換素子の絶縁層４と別体として設けられている。なお、各光電変換素子の絶縁層４は、例えば他の光電変換素子の絶縁層４と一体として設けられていてもよい。

[0020] プラズモンフィルタ３は、複数の光電変換素子の各々と対向するように配置されている。プラズモンフィルタ３は、後述する半導体層２の第１面２Ａと対向する第３面３Ａと、第３面３Ａとは反対側に位置する第４面３Ｂとを有している。第３面３Ａは、例えば半導体層２の第１面２Ａと接触している。第４面３Ｂは、絶縁層４と接触している。

[0021] プラズモンフィルタ３は、電磁波検出器１００が検出対象とする波長帯域内の電磁波のみを第４面３Ｂ側から第３面３Ａ側（半導体層２側）に透過するように設けられている。言い換えると、プラズモンフィルタ３は、検出波長の電磁波が入射したときに表面プラズモン共鳴が生じるように設けられている。プラズモンフィルタ３において表面プラズモンが励起される波長帯域と、半導体層２が感度を有する波長帯域には共通する波長域が存在する。一般的には、表面プラズモンが励起される波長帯域は半導体層２が感度を有す

る波長帯域より狭い場合が想定される。ただし、後述するように表面プラズモンが励起される波長帯域が広帯域化する場合にはその限りではない場合もある。

[0022] 図１～図３に示されるように、プラズモンフィルタ３には、第３面３Ａから第４面３Ｂに貫通する複数の貫通孔３０が形成されている。貫通孔３０の数は、例えば３以上である。複数の貫通孔３０は、例えば第３面３Ａに沿っておりかつ互いに交差する２つの方向に周期的に配列されている。周期的な配列とは、２以上の貫通孔３０からなる単位が周期的に配列していることを示す。複数の貫通孔３０の各々は、例えば等間隔に配列されている。なお、３以上の貫通孔３０からなる単位が周期的に配列していてもよい。また、複数の貫通孔３０は、第３面３Ａに沿った少なくとも１つの方向に互いに間隔を隔てて周期的に配置されていてもよい。

[0023] プラズモンフィルタ３の全表面を構成する材料は、例えば上述したプラズモン共鳴材料を含む。なお、プラズモンフィルタ３の表面の少なくとも一部を構成する材料が、プラズモン共鳴材料を含んでいればよい。例えば、プラズモンフィルタ３の少なくとも第４面３Ｂおよび複数の貫通孔３０の各々の内周面を構成する材料のみがプラズモン共鳴材料を含む。

[0024] 複数の貫通孔３０の各々の開口幅、深さ（プラズモンフィルタ３の厚さ）、および隣り合う２つの貫通孔３０の中心軸Ｃ間の間隔Ｐ（周期、図３参照）、ならびに上記プラズモン共鳴材料は、検出波長の電磁波が入射したときにプラズモンフィルタ３にて表面プラズモン共鳴が生じるように、検出波長に応じて任意に選択され得る。各貫通孔３０の開口幅は、例えば検出波長よりも短い。

[0025] 複数の貫通孔３０の平面形状は、検出波長の電磁波が入射したときにプラズモンフィルタ３にて表面プラズモン共鳴が生じる限りにおいて任意の形状であればよいが、例えば図３に示されるように円形である。なお、複数の貫通孔３０の平面形状は、例えば、正方形、長方形、楕円形、三角形、ブルズアイ形状（１つの円または環と、その周囲に配置されておりかつ同心の環と

からなる形状）、フラクタル形状、または十字形状であってもよい。複数の貫通孔３０の平面形状が十字形状である場合には、検出波長が異なる２以上の電磁波の各々がプラズモンフィルタ３に照射されたときに、表面プラズモン共鳴が生じる。また、複数の貫通孔３０の平面形状は、互いに異なっていてもよい。複数の貫通孔３０は、第１の貫通孔と、第１の貫通孔と平面形状が同じであるが第１の貫通孔と大きさが異なる第２の貫通孔とを有していてもよい。

[0026] 半導体層２は、第１面２Ａと、第１面２Ａとは反対側に位置する第２面２Ｂとを有している。図１および図２に示されるように、二次元材料層１、プラズモンフィルタ３、絶縁層４、および第１電極部５は、半導体層２の第１面２Ａ上に配置されている。第２電極部６は、半導体層２の第２面２Ｂ上に配置されている。電磁波検出器１００は、半導体層２に対してプラズモンフィルタ３が配置されている側から入射する電磁波を検出する。

[0027] 半導体層２は、平面視において複数の貫通孔３０と重なる複数の領域２０を有している。各領域２０は、第１面２Ａおよび第２面２Ｂを有した柱状の領域である。複数の領域２０以外の他の領域の第１面２Ａは、プラズモンフィルタ３の第３面３Ａと接触している。各領域２０の第１面２Ａは、後述する二次元材料層１の第１部分と接触している第１接触領域と、絶縁層４の一部と接触している第２接触領域と、平面視において二次元材料層１、プラズモンフィルタ３、および絶縁層４から露出している領域とを有している。第２面２Ｂの全面は、第２電極部６と接触している。

[0028] 半導体層２は、検出波長に感度を有している。すなわち、半導体層２は、半導体層２に検出波長の電磁波が入射したときに半導体層２内に光キャリアが生じるように設けられている。上述のように、半導体層２が感度を有する波長帯域と、プラズモンフィルタ３において表面プラズモンが励起される波長帯域には共通する波長域が存在する。

[0029] 半導体層２を構成する半導体材料は、検出波長に応じて任意に選択され得る。半導体層２を構成する材料は、任意の半導体材料であればよく、例えば

、ＩＶ族の任意の半導体材料、ＩＩＩ－Ｖ族の任意の化合物半導体材料、またはＩＩ－ＶＩ族の任意の化合物半導体材料を含む。半導体層２を構成する材料は、例えばシリコン（Ｓｉ）、ゲルマニウム（Ｇｅ）、水銀カドミウムテルル（ＨｇＣｄＴｅ）、アンチモン化インジウム（ＩｎＳｂ）、鉛セレン（ＰｂＳｅ）、鉛硫黄（ＰｂＳ）、カドミウム硫黄（ＣｄＳ）、窒化ガリウム（ＧａＮ）、シリコンカーバイド（ＳｉＣ）、リン化ガリウム（ＧａＰ）、ヒ化インジウムガリウム（ＩｎＧａＡｓ）、ヒ化ガリウム（ＧａＡｓ）、およびヒ化インジウム（ＩｎＡｓ）からなる群から選択される少なくとも１つを含んでいてもよい。半導体層２は、量子井戸および量子ドットの少なくともいずれかを有していてもよいし、このような量子構造が周期的に配置された超格子（例えばＴｙｐｅＩＩ超格子）を有していてもよい。半導体層２は、ｐｎ接合を有していてもよい。

[0030] なお、電磁波検出器１００の検出波長が複数である場合、半導体層２は、互いに異なる検出波長に感度を有する複数の半導体層の集合体として構成される。

[0031] 好ましくは、半導体層２の電気抵抗率が１００Ω・ｃｍ以下になるように、半導体層２には不純物がドーピングされている。半導体層２が高濃度にドーピングされることで、キャリアの半導体層２中での移動速度（読み出し速度）が速くなる。この結果、電磁波検出器の応答速度が向上する。

[0032] 絶縁層４は、上記領域２０の第１面２Ａの一部（上記第２接触領域）を覆うように形成されている。絶縁層４は、上記第２接触領域上からプラズモンフィルタ３の第４面３Ｂの一部上にまで延在している。言い換えると、絶縁層４は、上記第２接触領域上に配置されている部分４ａと、プラズモンフィルタ３上の配置されている部分４ｂとを有している。絶縁層４の部分４ａは、上記第２接触領域、プラズモンフィルタ３の貫通孔３０の内周面の一部、および後述する二次元材料層１の第２部分１ｂと接触している。絶縁層４の部分４ｂは、後述する二次元材料層１の第３部分１ｃ、およびプラズモンフィルタ３の第４面３Ｂの一部と接触している。部分４ｂは、部分４ａの上端

部と接続されている。図１に示されるように、絶縁層４は、ステップ状に形成されている。

[0033] 絶縁層４は、半導体層２と後述する二次元材料層１の第２部分および第１電極部５とを電気的に絶縁している。絶縁層４の厚さは、電磁波検出器１００の動作時において、二次元材料層１の第２部分および第１電極部５と半導体層２との間にトンネル電流が生じなければ特に制限されない。好ましくは、後述する光ゲート効果を高める観点で、絶縁層４の厚さは、可能な限り薄い。

[0034] 絶縁層４としては、例えば酸化シリコンからなる絶縁膜を用いることができる。なお、絶縁層４を構成する材料は、電気的絶縁性を有する任意の絶縁材料であればよく、上述した酸化シリコンに限定されない。たとえば、絶縁層４を構成する材料は、酸化シリコン、オルトケイ酸テトラエチル、窒化シリコン、酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、酸化ニッケル、ボロンナイトライド、およびシロキサン系のポリマー材料からなる群から選択される少なくとも１つを含んでいてもよい。例えば、ボロンナイトライドは原子配列がグラフェンと似ているため、グラフェンからなる二次元材料層１と接触しても電荷の移動度に悪影響を与えない。そのため、絶縁層４が電子移動度などの二次元材料層１の性能を阻害することを抑制する観点から、ボロンナイトライドは絶縁層４を構成する材料として好適である。

[0035] 二次元材料層１は、領域２０の上記第１接触領域からプラズモンフィルタ３上に配置された絶縁層４上にまで延在している。二次元材料層１は、上記領域２０の第１面２Ａの他の一部（上記第１接触領域）上に配置されている第１部分１ａと、絶縁層４の上記部分４ａ上に配置されている第２部分１ｂ、およびプラズモンフィルタ３および絶縁層４の上記部分４ｂ上に配置されている第３部分１ｃとを有している。二次元材料層１の第１部分１ａは、絶縁層４を介さずに、領域２０上に配置されている。第１部分１ａは、例えば半導体層２の上記第１接触領域と電気的に接続されている。好ましくは、第１部分１ａは、半導体層２とショットキー接合している。第２部分１ｂは、

半導体層２において生じた光キャリアによって電界効果が与えられるように設けられている。第１部分１ａおよび第３部分１ｃは、後述する光ゲート効果においてソース・ドレイン領域として作用する。第２部分１ｂは、後述する光ゲート効果においてチャネル領域として作用する。

[0036] 図１に示されるように、二次元材料層１は、ステップ状に形成されている。二次元材料層１のステップ数は、例えば、絶縁層４のステップ数よりも１つ多く、２つである。二次元材料層１の第１部分１ａは、二次元材料層１の長手方向の一方の端部を有している。二次元材料層１の第３部分１ｃは、二次元材料層１の長手方向の他方の端部を有している。

[0037] 二次元材料層１は、例えば、単層のグラフェンを用いることができる。単層のグラフェンは二次元炭素結晶の単原子層である。また、単層のグラフェンは六角形状に配置された各連鎖に炭素原子を有している。また、二次元材料層１は、単層グラフェンが２層以上積層した多層グラフェンとして構成されていてもよい。また、二次元材料層１として、ノンドープのグラフェン、またはｐ型又はｎ型の不純物がドープされたグラフェンが用いられてもよい。

[0038] 二次元材料層１に多層グラフェンを用いた場合、二次元材料層１の光電変換効率が増加し、電磁波検出器の感度は高くなる。二次元材料層１として用いられる多層グラフェンは、任意の２層のグラフェンにおける六方格子の格子ベクトルの向きが一致しなくてもよく、一致してもよい。例えば、２層以上のグラフェンを積層することで、二次元材料層１においてバンドギャップが形成される。この結果、光電変換される電磁波の波長選択効果を持たせることが可能である。なお、二次元材料層１を構成する多層グラフェンにおける層数が増加すると、チャネル領域でのキャリアの移動度は低下する。一方、この場合には二次元材料層１が基板などの下地構造からのキャリア散乱の影響を受けにくくなり、結果的にノイズレベルが低下する。そのため、二次元材料層１として多層グラフェンを用いた電磁波検出器は、光吸収が増加し、電磁波の検出感度を高めることができる。

[0039] また、二次元材料層１が第１電極部５と接触している場合、第１電極部５から二次元材料層１へキャリアがドープされる。例えば、第１電極部５の材料として金（Ａｕ）を用いた場合、二次元材料層１とＡｕとの仕事関数の差から、第１電極部５近傍の二次元材料層１に正孔がドープされる。この状態で電磁波検出器を電子伝導状態で駆動させると、第１電極部５から二次元材料層１にドープされた正孔の影響により、二次元材料層１のチャネル領域内に流れる電子の移動度が低下し、二次元材料層１と第１電極部５とのコンタクト抵抗が増加する。このコンタクト抵抗の増加により、電磁波検出器における電界効果による電子（キャリア）の移動度が低下し、電磁波検出器の性能低下が生じ得る。特に、二次元材料層１として単層グラフェンを用いた場合、第１電極部５から注入されるキャリアのドープ量が大きい。そのため、電磁波検出器における上記電子の移動度の低下は、二次元材料層１として単層グラフェンを用いた場合に特に顕著である。したがって、二次元材料層１をすべて単層グラフェンにより形成した場合、電磁波検出器の性能が低下する恐れがあった。

[0040] そこで、第１電極部５からのキャリアがドープされやすい二次元材料層１の上記第１部分１ａは、多層グラフェンにより構成されていてもよい。多層グラフェンは単層グラフェンに比べ、第１電極部５からのキャリアドーピングが小さい。そのため、二次元材料層１と第１電極部５との間のコンタクト抵抗の増加を抑制することができる。この結果、電磁波検出器における上述した電子の移動度の低下を抑制することができ、電磁波検出器の性能を向上させることができる。この場合、二次元材料層１の上記第２部分１ｂは、単層グラフェンにより構成されていてもよい。つまり、二次元材料層１のうち、ソース・ドレイン領域として作用し得る第１部分１ａおよび第３部分１ｃは多層グラフェンにより構成されており、かつチャネル領域として作用し得る第２部分１ｂは単層グラフェンにより構成されていてもよい。このようにすれば、二次元材料層１全体が単層グラフェンにより構成されている場合と比べて移動度が高く、二次元材料層１全体が多層グラフェンにより構成され

ている場合と比べてチャネル領域の移動度が高まるため、電磁波検出器１００の性能が向上する。

[0041] また、二次元材料層１としてはナノリボン状のグラフェン（以下、グラフェンナノリボンとも呼ぶ）を用いることもできる。その場合、二次元材料層１としては、たとえばグラフェンナノリボン単体、複数のグラフェンナノリボンを積層した複合体、又は、グラフェンナノリボンが平面上に周期的に配列された構造体のいずれかを用いることができる。例えば、二次元材料層１として、グラフェンナノリボンが周期的に配置された構造体を用いる場合、グラフェンナノリボンにおいて、プラズモン共鳴を発生させることができる。この結果、電磁波検出器の感度を向上させることができる。ここで、グラフェンナノリボンが周期的に配列された構造は、グラフェンメタマテリアルと呼ばれることもある。したがって、二次元材料層１としてグラフェンメタマテリアルを用いた電磁波検出器においても、上述した効果を得ることができる。

[0042] 第１電極部５は、絶縁層４の上記部分４ｂ上に配置されており、二次元材料層１の第３部分１ｃと電気的に接続されている。第１電極部５は、例えば二次元材料層１の第３部分１ｃ上に配置されている。平面視において、第１電極部５は、プラズモンフィルタ３、絶縁層４の部分４ｂ、および二次元材料層１の第３部分１ｃと重なるように配置されている。平面視において、第１電極部５は、例えば領域２０と重なるように配置されていない。第２電極部６は、半導体層２の第２面２Ｂ上に配置されている。

[0043] 第１電極部５および第２電極部６を構成する材料としては、導電体であれば任意の材料を用いることができる。第１電極部５および第２電極部６を構成する材料は、例えば金（Ａｕ）、銀（Ａｇ）、銅（Ｃｕ）、アルミニウム（Ａｌ）、ニッケル（Ｎｉ）、クロム（Ｃｒ）、およびパラジウム（Ｐｄ）からなる群から選択される少なくとも１つを含む。

[0044] また、第２電極部６と半導体層２との間に、図示しない密着層を形成してもよい。密着層は、第２電極部６と半導体層２との密着性を高めるものであ

る。密着層を構成する材料は、たとえばクロム（Ｃｒ）およびチタン（Ｔｉ）の少なくともいずれかを含む。

[0045] なお、二次元材料層１の第３部分１ｃおよび第１電極部５の相対的な位置関係は、両者が絶縁層４の上記部分４ｂ上において互いに電気的に接続されている限りにおいて、特に制限されない。第１電極部５は、例えば絶縁層４上であって二次元材料層１の第３部分１ｃよりも下に配置されていてもよい。この場合、第１電極部５と絶縁層４との間に、密着層を形成してもよい。密着層は、第１電極部５と絶縁層４との密着性を高めるものである。密着層を構成する材料は、たとえばＣｒおよびＴｉの少なくともいずれかを含む。

[0046] また、二次元材料層１上には、図示しない保護膜が形成されていてもよい。保護膜は、二次元材料層１、半導体層２、第１電極部５の周りを覆うように設けられてもよい。保護膜を構成する材料としては任意の材料を用いることができるが、例えば、保護膜として酸化シリコンからなる絶縁膜を用いることができる。保護膜を構成する材料としては、酸化物又は窒化物等の絶縁体、たとえば酸化シリコン、窒化シリコン、酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、ボロンナイトライドなどを用いてもよい。保護膜は、貫通孔３０を埋め込むように形成されていてもよい。この場合、プラズモン共鳴波長は保護膜の屈折率の効果により変化するが、波長選択性は変化しない。

[0047] 電磁波検出器１００では、各貫通孔３０を１つの検出単位として捉えることができ、その場合、光電変換素子の数は貫通孔３０の数と等しくなる。そのため、各光電変換素子から信号を適切に読み出すことで、電磁波検出器１００は画像センサを構成し得る。信号の読み出し方法は、例えば従来の画像センサにて一般的に用いられている方法であってもよい。

[0048] 隣り合う２つの貫通孔３０の中心間の間隔は、一定でなくてもよい。この場合、プラズモンフィルタ３が透過し得る電磁波の波長（共鳴波長）は、複数または広帯域化する。また、複数の貫通孔３０は、第１間隔を隔てて隣り合う第１の貫通孔群と、第１間隔とは異なる第２間隔を隔てて隣り合う第２の貫通孔群とを有していてもよい。

[0049] ＜電磁波検出器の製造方法＞

まず、半導体層２を準備する。半導体層２は、例えばシリコン等からなる平坦な基板として準備される。

[0050] 次に、半導体層２の第２面２Ｂ上に第２電極部６を形成する。具体的には、まず半導体層２の第１面２Ａ上に保護膜を形成する。保護膜としてはたとえばレジストを用いる。この状態で、半導体層２の第２面２Ｂ上に第２電極部６を成膜する。この時、半導体層２と第２電極部６との密着性を向上させるために、半導体層２の裏面に、第２電極部６より先に上述のように密着層を形成してもよい。なお、本工程は、半導体層２の第１面２Ａ上の構造を保護し得る限りにおいて、後述する各工程の後に実施してもよい。本工程後、第１面２Ａ上に形成した保護膜を除去する。

[0051] 次に、半導体層２の第１面２Ａ上にプラズモンフィルタ３を形成する。本工程の一例では、まず、上記プラズモン共鳴材料を第１面２Ａ上に成膜する。成膜方法は、特に制限されないが、例えばスパッタリング法または蒸着法である。次に、プラズモン共鳴材料からなる膜上に、写真製版またはＥＢ描画などを用いてレジストマスクを形成する。レジストマスクは、上記膜のうち、複数の貫通孔３０が形成されるべき領域のみを露出し、それ以外の領域を覆うように形成される。その後、ウェットエッチングやドライエッチングにより、レジストマスクをマスクとして当該膜を部分的に除去する。この結果、レジストマスク下に膜の一部が残存する。この膜の一部がプラズモンフィルタ３となる。その後、レジストマスクを除去する。このようにして、プラズモンフィルタ３が形成される。同時に、半導体層２には、平面視において複数の貫通孔３０と重なる複数の領域２０が形成される。

[0052] 本工程の他の例では、まず、半導体層２の第１面２Ａ上に写真製版またはＥＢ描画などを用いてレジストマスクを形成する。このレジストマスクには、半導体層２のうち、複数の領域２０以外の領域（言い換えると、プラズモンフィルタ３が形成されるべき領域）のみを露出し、複数の領域２０（言い換えると、複数の貫通孔３０が形成されるべき領域）を覆うように形成され

る。その後、レジストマスク上に、上記プラズモン共鳴材料を成膜する。当該膜の成膜方法も、特に制限されないが、例えばスパッタリング法または蒸着法である。このとき、当該膜はレジストマスクの開口部の内部から当該レジストマスクの上部表面にまで延在するように形成される。その後、レジストマスクを当該膜の一部と共に除去することで、レジストマスクの開口部に配置されていた膜の他の一部が半導体層２の複数の領域２０上に残存し、プラズモンフィルタ３となる。上述した方法は、一般的にはリフトオフと呼ばれる方法である。

[0053] 次に、半導体層２の第１面２Ａおよびプラズモンフィルタ３の第４面３Ｂ上に絶縁層４を形成する。具体的には、まず、絶縁層４となるべき絶縁膜を、半導体層２の第１面２Ａおよびプラズモンフィルタ３の第４面３Ｂ上に成膜する。成膜方法は、特に制限されない。例えば半導体層２を構成する材料がシリコンであり、絶縁層４を構成する材料が酸化シリコン（ＳｉＯ２）である場合、半導体層２の上記領域２０の一部が部分的に熱酸化されてもよい。また、成膜方法は、ＣＶＤ（Chemical Vapor Deposition）法またはスパッタ法であってもよい。次に、絶縁層４のとなるべき絶縁膜上に、写真製版またはＥＢ描画などを用いてレジストマスクを形成する。レジストマスクは、上記絶縁膜のうち、絶縁層４が形成されるべき領域のみを覆い、それ以外の領域を露出するように形成される。その後、ウェットエッチングやドライエッチングにより、レジストマスクをマスクとして当該絶縁膜を部分的に除去する。この結果、レジストマスク下に絶縁膜の一部が残存する。この絶縁膜の一部が絶縁層４となる。その後、レジストマスクを除去する。このようにして、絶縁層４が形成される。絶縁層４は、領域２０の第２接触領域上に配置されている部分４ａと、プラズモンフィルタ３の第４面３Ｂ上に配置されている部分４ｂとを有している。

[0054] 次に、各領域２０の第１接触領域および絶縁層４上に二次元材料層１を形成する。具体的には、まず二次元材料層１となるべき二次元材料膜を第１面２Ａ上に成膜する。成膜方法は、特に制限されないが、例えばエピタキシャ

ル成長法である。また、予めＣＶＤ法等により形成された二次元材料膜を第１面２Ａ上に転写して貼り付けてもよい。また、二次元材料層１を構成する材料がグラフェンを含む場合、機械的剥離法により高配向熱分解黒鉛（ＨＯＰＧ）から剥離されたグラフェンを第１面２Ａ上に転写して貼り付けてもよい。次に、写真製版またはＥＢ描画などを用いて二次元材料膜上にレジストマスクを形成する。レジストマスクは、二次元材料膜のうち、二次元材料層１が形成されるべき領域のみを覆うように形成される。その後、例えば酸素プラズマによるエッチングにより、レジストマスクをマスクとして当該二次元材料膜を部分的に除去する。この結果、レジストマスク下に二次元材料膜の一部が残存する。この二次元材料膜の一部が二次元材料層１となる。その後、レジストマスクを除去する。このようにして、二次元材料層１が形成される。二次元材料層１は、上記第１部分１ａ、上記第２部分１ｂ、および上記第３部分１ｃを有している。

[0055] 次に、第１電極部５を形成する。本工程の一例では、第１電極部５は上述したリフトオフ法により形成される。まず、第１面２Ａ上に写真製版またはＥＢ描画などを用いてレジストマスクを形成する。レジストマスクには、第１電極部５が形成されるべき領域に開口部が形成されている。その後、レジストマスク上に、第１電極部５となるべき金属などの膜を形成する。当該膜の形成には、蒸着法やスパッタリング法などを用いることができる。このとき、当該膜はレジストマスクの開口部の内部から当該レジストマスクの上部表面にまで延在するように形成される。その後、レジストマスクを当該膜の一部と共に除去することで、レジストマスクの開口部に配置されていた膜の他の一部が二次元材料層１の第３部分１ｃ上に残存し、第１電極部５となる。

[0056] 本工程の他の例では、第１面２Ａ上に第１電極部５となるべき金属膜などの膜を先に成膜する。その後、フォトリソグラフィ法によって当該膜上にレジストマスクを形成する。レジストマスクは、第１電極部５が形成されるべき領域を覆うように形成される一方、第１電極部５が形成されるべき領域以

外の領域には形成されない。その後、ウェットエッチングやドライエッチングにより、レジストマスクをマスクとして当該膜を部分的に除去する。この結果、レジストマスク下に膜の一部が残存する。この膜の一部が第１電極部５となる。その後、レジストマスクを除去する。このようにして、第１電極部５を形成してもよい。

[0057] 本工程では、好ましくは、第１電極部５となるべき膜の成膜の前に、二次元材料層１の第１部分１ａおよび第２部分１ｂを保護する保護膜を形成する。成膜前に保護膜を形成しておくことで、成膜時に第１部分１ａおよび第２部分１ｂに与えられるプロセスダメージを低減できる。

[0058] 以上の工程により、図１および図２に示した電磁波検出器１００が得られる。

＜電磁波検出器の動作原理＞

次に、本実施の形態に係る電磁波検出器の動作原理について説明する。

[0059] まず、図１に示すように、第１電極部５と第２電極部６との間に、電圧Ｖを印加する電源回路が電気的に接続され、第１電極部５、二次元材料層１、半導体層２、および第２電極部６が、この記載順に電気的に接続される。次に、第１電極部５および第２電極部６の間に電圧Ｖが印加される。好ましくは、電圧Ｖは、二次元材料層１と半導体層２とのショットキー接合に対して逆バイアスとなるように設定される。電圧Ｖが印加されることにより、第１電極部５と第２電極部６との間の電流経路の一部となる二次元材料層１には電流Ｉが流れる。電源回路には図示しない電流計が設置されており、当該電流計により二次元材料層１に流れる電流Ｉをモニターする。

[0060] 次に、電磁波検出器１００に対してプラズモンフィルタ３側から検出波長の電磁波が照射されると、プラズモンフィルタ３に表面プラズモン共鳴が生じる。表面プラズモン共鳴が生じると、共鳴波長における電磁界が増強されることにより、透過率が増強される。透過率は、ほぼ１００％に達し得る。さらに、プラズモンフィルタ３の各貫通孔３０の外周縁と半導体層２の第１面２Ａとが接触している領域では、入射電磁界を１とした場合に対して、電

磁界が数倍から数１０倍以上に増強される。このように半導体層２とプラズモンフィルタ３との接触界面の周辺領域で電磁界が増強されることにより、半導体層２における量子効率が向上する。

[0061] その結果、プラズモンフィルタ３により、検出波長の電磁波のみが半導体層２に選択的に入射しかつ半導体層２における量子効率が高められているために、半導体層２内には光電変換によって多数の光キャリア（電子正孔対）が生じる。

[0062] 光キャリアは、電圧Ｖを受けて二次元材料層１の第１部分１ａに注入され、電流Ｉに変化を生じさせる。電磁波照射に起因して電流Ｉに変化を引き起こす電流成分を光電流とよぶ。さらに、半導体層２において生じた光キャリアは、絶縁層４の部分４ａを介して二次元材料層１の第２部分１ｂに電界効果を与える。この結果、二次元材料層１の第２部分１ｂの抵抗値が変化し、二次元材料層１に流れる電流Ｉが変化する。この効果を、光ゲート効果とよぶ。

[0063] 電磁波検出器１００では、光電流が光ゲート効果によって増幅されることにより、電流Ｉが比較的大きく変化する。電流Ｉの変化を検出することにより、電磁波検出器１００は検出波長の電磁波を検出できる。

[0064] ここで、本実施の形態に係る電磁波検出器は、上述のような二次元材料層１での電流の変化を検出する構成に限定されるわけではなく、例えば、第１電極部５と第２電極部６との間に一定電流を流し、第１電極部５と第２電極部６間の電圧Ｖの変化（つまり二次元材料層１での電圧値の変化）を検出してもよい。

[0065] また、同じ電磁波検出器を２つ以上用いて電磁波を検出してもよい。たとえば、同じ電磁波検出器を２つ以上準備する。１つの電磁波検出器を、電磁波が照射されない遮蔽された空間に配置する。他の電磁波検出器を、測定対象である電磁波が照射される空間に配置する。そして、電磁波が照射される他の電磁波検出器の電流Ｉ又は電圧Ｖと、遮蔽された空間に配置された電磁波検出器の電流Ｉ又は電圧Ｖとの差分を検出する。このようにして、電磁波

を検出してもよい。

[0066] ＜作用効果＞

本実施の形態に係る電磁波検出器１００は、複数の光電変換素子と、プラズモンフィルタ３とを備える。プラズモンフィルタ３には、複数の貫通孔３０が周期的に形成されている。各光電変換素子は、半導体層２、絶縁層４、二次元材料層１、第１電極部５、および第２電極部６を主に備える。半導体層２は、平面視において１つの貫通孔３０と重なる領域２０を有する。絶縁層４は、領域２０の一部を覆うように形成されている。二次元材料層１は、領域２０の他の一部および絶縁層４上に配置され、かつ領域２０の上記他の一部と電気的に接続されている。第１電極部５は、二次元材料層１と電気的に接続されている。第２電極部６は、半導体層２と電気的に接続されている。

[0067] 電磁波検出器１００では、プラズモンフィルタ３を透過した電磁波のみが複数の光電変換素子の半導体層２に入射する。上述のように、プラズモンフィルタ３は、特定の波長の電磁波のみを透過させ、さらにその波長において半導体層２の量子効率を向上させる効果を奏する。そのため、電磁波検出器１００は、上述した特許文献１に記載の検出器と比べて、特定の波長帯域の電磁波のみを選択的に高い精度で検出できる。

[0068] さらに、電磁波検出器１００では、光電変換素子が、プラズモンフィルタ３の複数の貫通孔と重なる領域２０の他の一部および絶縁層４上に配置され、かつ領域２０の上記他の一部と電気的に接続されている二次元材料層１を含む。そのため、上述のように、電磁波検出器１００では、光電流が光ゲート効果によって増幅される。光ゲート効果は、光電変換材料の量子効率を直接的に増強するのではなく、電磁波入射による電流変化を大きくするため、等価的に電磁波入射による差分電流から算出した量子効率は１００％を超えることができる。

[0069] そのため、電磁波検出器１００に上記電磁波が入射されたときの電流Ｉの変化量は、上記光ゲート効果が奏されない上述した特許文献１に記載の検出

器に上記電磁波が入射したときの電流の変化量よりも大きい。したがって、電磁波検出器１００は、上述した特許文献１に記載の検出器と比較して、高感度である。

[0070] 二次元材料層１が、たとえば単層グラフェンである場合、二次元材料層１の厚みは原子層１層分と究極的に薄い。また、単層グラフェンにおけるキャリア移動度は従来半導体材料と比較して大きい。そのため、二次元材料層１では、従来の半導体材料と比較して、わずかな電位変化に対して大きな電流変化を生じる。例えば、半導体層２の電界が変化することによって二次元材料層１へ印加される電位は変化するが、この電位変化に起因する電流変化量は通常の半導体における電流変化量より大きくなる。具体的には、二次元材料層１における電子の移動度及び厚さなどから算出すると、二次元材料層１での上記電流変化量は、通常の半導体における電流変化量の数百倍～数千倍程度となる。このような電磁波検出器１００は、半導体層２で生じる光キャリアのみを検出する電磁波検出器と比べて、高感度である。

[0071] また、電磁波検出器１００では、二次元材料層１は、上記開口部において半導体層２の上記他の一部と電気的に接続され、具体的には半導体層２とショットキー接合している。二次元材料層１と半導体層２とがショットキー接合していることで、逆バイアス印加時には電流が流れず、電磁波検出器１００はＯＦＦ動作可能となる。

[0072] また、電磁波検出器１００では、二次元材料層１の長手方向の一端が、半導体層２の領域２０内に配置されている。そのため、二次元材料層１と半導体層２とが接触状態が比較的良好となり、電磁波照射によって生じた光キャリアの移動が二次元材料層１と半導体層２との接触界面で妨げられにくい。その結果、電磁波検出器１００の性能が向上する。また、光ゲート効果が光電流量を増幅させる効果として支配的である場合、電磁波検出器１００の感度は二次元材料層１と半導体層２との接触面積には大きく依存しない。よって光ゲート効果を用いる場合、画素の面積を低減でき、画素を小型化できる。一方、一般的な量子型赤外線センサは画素の面積を低減すると必然的に感

度が低下する。そのため暗電流の低減も困難である。

[0073] 実施の形態２.

図４に示されるように、実施の形態２に係る電磁波検出器１０１は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、プラズモンフィルタ３が半導体層２に対して絶縁層４、二次元材料層１、および第１電極部５とは反対側に配置されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0074] 図４に示されるように、絶縁層４、二次元材料層１、および第１電極部５は、半導体層２の第１面２Ａ上に配置されている。プラズモンフィルタ３および第２電極部６は、半導体層２の第２面２Ｂ上に配置されている。プラズモンフィルタ３は、第２電極部６上に配置されている。プラズモンフィルタ３は、第２電極部６に対して半導体層２とは反対側に配置されている。第２電極部６を構成する材料は、検出波長の電磁波を透過させる導電材料である。

[0075] 複数の領域２０以外の他の領域の第１面２Ａは、絶縁層４と接触している。各領域２０の第１面２Ａは、後述する二次元材料層１の第１部分と接触している第１接触領域と、絶縁層４の一部と接触している第２接触領域と、平面視において二次元材料層１、および絶縁層４から露出している領域とを有している。第２面２Ｂの全面は、第２電極部６と接触している。プラズモンフィルタ３の第３面３Ａは、第２電極部６と接触している。

[0076] 絶縁層４は、他の部材を介さずに、半導体層２の第１面２Ａ上に配置されている。絶縁層４において複数の領域２０以外の他の領域上に配置されている部分は、半導体層２の第１面２Ａに接触している。絶縁層４は、プラズモンフィルタ３上の配置されている部分を含まず、ステップ状に形成されていない。二次元材料層１は、領域２０の上記第２接触領域および絶縁層４上に配置されている。二次元材料層１において複数の領域２０以外の他の領域上に配置されている部分は、半導体層２の第１面２Ａに接触している絶縁層４上に配置されている。二次元材料層１は、上記第１接触領域上に配置されて

いる第１部分１ａと、絶縁層４上に配置されている第２部分１ｂとを含み、ステップ状に形成されているが、プラズモンフィルタ３上の配置されている第３部分を含まない。二次元材料層１のステップ数は、１である。第１電極部５は、二次元材料層１の第２部分１ｂと電気的に接続されている。

[0077] 電磁波検出器１０１の製造方法は、電磁波検出器１００の製造方法と基本的に同様の構成を備えるが、プラズモンフィルタ３を形成する工程を、第２電極部６を形成する工程後であって第１面２Ａを保護していた保護膜を除去する工程の前に実施する点で、電磁波検出器１００の製造方法と異なる。

[0078] 電磁波検出器１０１では、電磁波検出器１００と比べて、二次元材料層１のステップ数が少ないため、製造歩留まりおよび検出性能が向上し得る。例えば、半導体層２を構成する材料がＳｉを含む場合、絶縁層４はＳｉの熱酸化膜で構成され得る。このような電磁波検出器１０１では、ＣＶＤ法などにより成膜された絶縁層４を備える電磁波検出器１００と比べて、熱酸化膜の方が表面の凹凸も少なく、残留電荷も少ないことから、二次元材料層１の移動度を妨げることがないため、該移動度が向上し、電磁波検出器１０１の性能が向上する。

[0079] ＜変形例＞

図５に示されるように、電磁波検出器１０１の変形例である電磁波検出器１０２では、第２電極部６が、絶縁層４、二次元材料層１、および第１電極部５と同様に、半導体層２の第１面２Ａ上に配置されている。プラズモンフィルタ３は、半導体層２に対して絶縁層４、二次元材料層１、第１電極部５、および第２電極部６とは反対側に配置されている。第２電極部６は、半導体層２の第１面２Ａと接触している。第２電極部６は、例えば複数の領域２０以外の他の領域、および複数の領域２０のうちの一部の領域２０の各第１面２Ａと接触している。

[0080] 電磁波検出器１０２は、電磁波検出器１０１と基本的に同様の構成を備えているため、電磁波検出器１０１と同様の効果を奏することができる。

[0081] 実施の形態３．

図６に示されるように、実施の形態３に係る電磁波検出器１０３は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、プラズモンフィルタ３の表面の一部を構成する材料が、上述したプラズモン共鳴材料を含む点で、電磁波検出器１００とは異なる。言い換えると、電磁波検出器１０３は、プラズモンフィルタ３が、プラズモン共鳴材料により構成されている第１部材１０と、プラズモン共鳴材料により構成されていない第２部材１１とを含む点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0082] 第２部材１１は、例えば芯材として構成されている。第２部材１１は、半導体層２の第１面２Ａと接触している表面と、その他の表面とを有している。第１部材１０は、第２部材１１の上記その他の表面の全体を覆っている包材として構成されている。

[0083] 第２部材１１を構成する材料は、例えば誘電体材料を含む。第２部材１１を構成する材料は、例えば酸化シリコンおよび窒化シリコンの少なくともいずれかを含む。

[0084] 電磁波検出器１０３の製造方法は、電磁波検出器１００の製造方法と基本的に同様の構成を備えるが、プラズモンフィルタ３を形成する工程において、まず第２部材１１を成膜および加工した後に、第１部材１０を成膜する点で、電磁波検出器１００の製造方法と異なる。

[0085] この場合、プラズモンフィルタ３を形成する工程は、第２部材１１を成膜する工程、第２部材１１を加工する工程、および第１部材１０を成膜する工程のみによって、実施され得る。言い換えると、プラズモンフィルタ３を形成する工程では、プラズモン共鳴材料を加工する工程が不要とされ得る。一般的に、誘電体材料の加工は、プラズモン共鳴材料の加工と比べて、容易である。また、一般的に、誘電体材料のコストは、ＡｕおよびＡｇ等のコストよりも低い。

[0086] そのため、電磁波検出器１０３の製造コストは、電磁波検出器１００の製造コストと比べて、低い。

[0087] なお、電磁波検出器１０３は、プラズモン共鳴材料により構成されていない第２部材１１とを含む点を除き、電磁波検出器１０１または電磁波検出器１０２と同様の構成を備えていてもよい。

[0088] 実施の形態４.

図７に示されるように、実施の形態４に係る電磁波検出器１０４は、実施の形態３に係る電磁波検出器１０３と同様に、プラズモンフィルタ３が、プラズモン共鳴材料により構成されている第１部材１０と、プラズモン共鳴材料により構成されていない第２部材１１とを含む点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0089] 電磁波検出器１０４は、電磁波検出器１０３と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、第１部材１０および第２部材１１が複数の貫通孔３０の各孔軸方向に沿って積層されている点で、電磁波検出器１０３とは異なる。

[0090] プラズモンフィルタ３は、２以上の第１部材１０と、１以上の第２部材１１との積層体として構成されている。プラズモンフィルタ３は、例えば３つ以上の第１部材１０と、２つ以上の第２部材１１とにより構成されている。

[0091] 第１部材１０を構成する材料は、上記プラズモン共鳴材料である。第２部材１１を構成する材料は、誘電体材料である。第２部材１１を構成する材料は、例えば酸化シリコンおよび窒化シリコンの少なくともいずれかを含む。

[0092] 第１部材１０と第２部材１１とは、キャパシタンスを構成している。このようなプラズモンフィルタ３は、検出波長においてスプリットリング共振器またはハイパボリックメタマテリアルと同様に作用し得るため、検出波長において屈折率が負の値またはゼロとなり、その結果集光効果またはレンズ効果を奏する。その結果、電磁波検出器１０４における各貫通孔３０の開口面積は電磁波検出器１００における各貫通孔３０の開口面積よりも小さくされ得る。つまり、電磁波検出器１０４の画素、は電磁波検出器１００の画素よりも小型化され得る。そのため、外形の寸法が同等である電磁波検出器１０４と電磁波検出器１００とを比べると、電磁波検出器１０４は、電磁波検出

器１００と比べて、多くの画素を備えて高い分解能を有することができる。

[0093] なお、電磁波検出器１０４は、プラズモン共鳴材料により構成されている第１部材１０およびプラズモン共鳴材料により構成されていない第２部材１１を含む点を除き、電磁波検出器１０１または電磁波検出器１０２と同様の構成を備えていてもよい。

[0094] 実施の形態５．

実施の形態５に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、図８に示されるプラズモンフィルタ３の複数の貫通孔３０の周期Ｐが検出波長と等しいことが特定されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0095] 実施の形態５においては、周期Ｐが、プラズモンフィルタ３によって選択される波長帯域を決定する主要なパラメータとされている。検出波長が赤外線の波長帯域内にある場合、プラズモンフィルタ３の複数の貫通孔３０の各々の開口幅および深さ（プラズモンフィルタ３の厚さ）が検出波長の１／４程度である。

[0096] 複数の貫通孔３０の上記周期Ｐには、複数の貫通孔３０の各々の開口幅および深さと比べて、製造ばらつきが生じにくい。そのため、実施の形態５に係る電磁波検出器では、電磁波検出器１００と比べて、プラズモンフィルタ３の複数の貫通孔３０の各々の開口幅および深さにばらつきが生じた場合にも、検出波長の選択性能が当該ばらつきによって影響を受けにくい。

[0097] なお、上述のように、複数の貫通孔３０の各々の平面形状は、任意の形状であればよい。図８に示されるように、複数の貫通孔３０の各平面形状は、例えば正方形状であってもよい。

[0098] なお、実施の形態５に係る電磁波検出器は、プラズモンフィルタ３の複数の貫通孔３０の周期Ｐが検出波長と等しいことが特定されている点を除き、実施の形態２～４に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０４のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0099] 実施の形態６．

実施の形態６に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、図９および図１０に示されるように、複数の貫通孔３０の各平面形状が長手方向および短手方向を有していることが特定されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0100] 図９および図１０に示されるプラズモンフィルタ３では、各貫通孔３０の平面形状は、第３面３Ａに沿った１つの仮想直線のみに対して対称性を有している。言い換えると、各貫通孔３０の平面形状は、長手方向と短手方向とを有している。各貫通孔３０の長手方向は、例えば互いに並行である。各貫通孔３０の短手方向は、例えば互いに並行である。

[0101] このようなプラズモンフィルタ３では、検出波長の電磁波であって、各貫通孔３０の平面形状における長手方向と直交する電界を有する電磁波が照射されたときにのみ、表面プラズモン共鳴が生じる。つまり、図９および図１０に示されるプラズモンフィルタ３は、偏光選択性を有している。そのため、このようなプラズモンフィルタ３を備える電磁波検出器は、検出波長の電磁波のうち特定の偏光のみを検知できる。このような偏光を検出できる電磁波検出器は、人工物と自然物の判別、例えば海面に浮かんだ油の判別、砂漠における車両の判別、または夏場の人体と道路の判別を行うことができる。また、このような偏光を検出できる電磁波検出器は、分子の偏光特性の判別などにも利用できる。

[0102] 図１０に示されるように、各貫通孔３０の長手方向における周期Ｐは、例えば各貫通孔３０の短手方向における周期Ｐと等しくてもよい。また、各貫通孔３０の長手方向における周期Ｐは、例えば各貫通孔３０の短手方向における周期Ｐと異なっていてもよい。また、各貫通孔３０の短手方向において、複数の貫通孔３０の配列は非対称であってもよい。

[0103] なお、実施の形態６に係る電磁波検出器は、複数の貫通孔３０の各平面形状が長手方向および短手方向を有していることが特定されている点を除き、実施の形態２～５に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０４のいずれ

かと同様の構成を備えていてもよい。

[0104] 実施の形態７.

図１１に示されるように、実施の形態６に係る電磁波検出器１０５は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、複数の貫通孔３０の各内周面３Ｃが各貫通孔３０の各孔軸に対して傾斜している点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0105] 図１１に示されるように、プラズモンフィルタ３の断面形状は、例えばいわゆる順テーパー形状である。複数の貫通孔３０の各内周面３Ｃは、第３面３Ａに対して鋭角を成すとともに、第４面３Ｂに対して鈍角を成している。第３面３Ａに対して内周面３Ｃが成す角度（以下、傾斜角度）に応じて、共鳴波長の波長帯域、半値半幅、およびＱ値（Ｑｕａｌｉｔｙ　Ｆａｃｔｏｒ）が制御される。

[0106] 基本的には、上記傾斜角度が小さいほど、プラズモンフィルタ３が透過する電磁波の波長帯域は狭くなる。その結果、図１１に示される電磁波検出器１０５は、図１に示される電磁波検出器１００と比べて、電磁波の波長選択性（単色性）が高くなり、検出波長の電磁波をより高精度に検出できる。

[0107] また、プラズモンフィルタ３の断面形状は、例えばいわゆる逆テーパー形状であってもよい。複数の貫通孔３０の各内周面３Ｃは、第３面３Ａに対して鈍角を成すとともに、第４面３Ｂに対して鋭角を成していてもよい。基本的には、上記傾斜角度が大きいほど、プラズモンフィルタ３が透過する電磁波の波長帯域は広くなる。

[0108] なお、上記傾斜角度の波長帯域への寄与度は、複数の貫通孔３０の周期性が一次元的か二次元的であるか、および複数の貫通孔３０の各平面形状等に応じて変化する。

[0109] 実施の形態７に係る電磁波検出器は、複数の貫通孔３０の各平面形状が長手方向および短手方向を有していることが特定されている点を除き、実施の形態２～６に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０４のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0110] 実施の形態８.

図１２および図１３に示されるように、実施の形態８に係る電磁波検出器１０６は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同等の効果を奏するが、二次元材料層１の長手方向の端部が絶縁層４上に配置されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0111] 二次元材料層１の長手方向の端部は、例えばプラズモンフィルタ３上に配置されている絶縁層４上に配置されている。この場合、二次元材料層１は、第１部分１ａと、第１部分１ａを挟むように配置された２以上の第２部分１ｂおよび第３部分１ｃを有している。なお、二次元材料層１の長手方向の端部は、例えば領域２０上に配置されている絶縁層４上に配置されていてもよい。この場合、二次元材料層１は、第１部分１ａおよび第３部分１ｃと、第１部分１ａを挟むように配置された２以上の第２部分１ｂとを有している。

[0112] 実施の形態８に係る電磁波検出器は、二次元材料層１の長手方向の端部が絶縁層４上に配置されている点を除き、実施の形態２～７に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０５のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0113] 実施の形態９.

図１４に示されるように、実施の形態９に係る電磁波検出器１０７は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同等の効果を奏するが、貫通孔３０の内部において、二次元材料層１と半導体層２との間にバッファ層７が配置されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0114] バッファ層７は、二次元材料層１の第１部分１ａと半導体層２の領域２０とを電気的に接続している。具体的には、バッファ層７は、二次元材料層１の第１部分１ａと半導体層２の上記第１接触領域とが当該トンネル電流によって電気的に接続されるように、設けられている。バッファ層７を構成する材料は、電気的絶縁性を有する任意の材料であればよいが、例えばSiO_2、Si_3N_4、HfO_2、Al_2O_3、およびＢＮから成る群から選択される少なくと

も１つを含む。

[0115] バッファ層７は、領域２０のうち少なくとも第１接触領域上に配置されていればよいが、例えば第１接触領域および第２接触領域上に配置されている。バッファ層７は、例えば領域２０の一部を露出させるように設けられている。

[0116] バッファ層７の厚さは、例えば、検出波長の電磁波が入射したときに、二次元材料層１と半導体層２との間にトンネル電流が生じ得るように設定される。バッファ層７の厚さは、例えば厚さが１ｎｍ以上１０ｎｍ以下である。バッファ層７の厚さは、検出波長に応じて決定される。バッファ層７の作製方法は、任意の方法とされ得るが、例えばＡＬＤ（Ａｔｏｍｉｃ Ｌａｙｅｒ Ｄｅｐｏｓｉｔｉｏｎ）法、真空蒸着法、およびスパッタ法などから選択され得る。あるいは、バッファ層７は、半導体層２の表面を酸化または窒化することにより形成されてもよい。あるいは、バッファ層７は、半導体層２の表面に形成される自然酸化膜であってもよい。

[0117] 電磁波検出器１０７では、バッファ層７により半導体層２と二次元材料層１との接合界面での漏れ電流を抑制することで、バッファ層７を備えない電磁波検出器１００と比べて、暗電流が低減され得る。また、電磁波検出器１０７では、バッファ層７の膜厚を半導体層２から二次元材料層１へトンネル注入が生じる程度の厚さとすることで、二次元材料層１に大きな光電流が注入され、感度が高い。

[0118] なお、バッファ層７の厚さは、二次元材料層１と半導体層２との間にトンネル電流を形成することが可能な厚さよりも厚く、かつ絶縁層４の厚さよりも薄くてもよい。この場合、半導体層２にて生じた光キャリアは二次元材料層１に注入されず、光ゲート効果のみが生じる。バッファ層７が絶縁層４より薄ければ、絶縁層４と接触している二次元材料層１と、バッファ層７と接触している二次元材料層１との間に、キャリア密度の勾配が生じる。その結果、二次元材料層１の移動度が向上するため、感度が高くなる。

[0119] 実施の形態９に係る電磁波検出器１０７は、各貫通孔３０の内部において

、二次元材料層１と半導体層２との間にバッファ層７が配置されている点を除き、実施の形態２～８に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０６のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0120] 実施の形態１０.

図１５に示されるように、実施の形態１０に係る電磁波検出器１０８は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、各貫通孔３０の内部において、二次元材料層１と半導体層２との間に接続導電体８が配置されている点で、電磁波検出器１００と異なっている。

[0121] 接続導電体８は、二次元材料層１の第１部分１ａと半導体層２の領域２０とを電気的に接続する。二次元材料層１の第１部分１ａは、半導体層２の上記第１接触領域と、接続導電体８を介して電気的に接続されている。

[0122] 接続導電体８は半導体層２とオーミック接合していることが望ましい。また、接続導電体８は電磁波検出器が検出する電磁波の波長において高い透過率を示すことが望ましい。

[0123] 接続導電体８は、領域２０のうち少なくとも第１接触領域上に配置されていればよいが、例えば第１接触領域および第２接触領域上に配置されている。接続導電体８は、例えば領域２０の一部を露出させるように設けられている。

[0124] 電磁波検出器１０８では、二次元材料層１と半導体層２との間に接続導電体８が設けられることにより、電磁波検出器１００と比べて、二次元材料層１と半導体層２との間のコンタクト抵抗を低減でき、また二次元材料層１と半導体層２との接合がショットキー接合である場合に問題となる光電流の減衰を抑制できる。

[0125] また、電磁波検出器１０８では、接続導電体８の厚みと絶縁層４の厚みとが実質的に同じである、つまり接続導電体８の上面の位置が絶縁層４の上面の位置と実質的に同じであるのが好ましい。この場合、二次元材料層１が折れ曲がることなく水平に形成されるため、二次元材料層１でのキャリアの移

動度が向上する。光ゲート効果は移動度に比例するため、電磁波検出器の検出感度が向上する。

[0126] 実施の形態１０に係る電磁波検出器１０８は、各貫通孔３０の内部に接続導電体８が形成されている点を除き、実施の形態２～８に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０６のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0127] 実施の形態１１．

図１６に示されるように、実施の形態１１に係る電磁波検出器１０９は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、半導体層２が第１導電型を有する第１半導体部分２１と第１半導体部分２１と接合され、第２導電型を有する第２半導体部分２２とを含み、第１半導体部分２１と第２半導体部分２２との接合界面が各領域２０内に配置されている点で、電磁波検出器１００と異なっている。

[0128] 第１半導体部分２１および第２半導体部分２２は、第１面２Ａに沿って並んで配置されている。第１半導体部分２１は、第２半導体部分２２と逆のキャリアでドーピングされている。すなわち、第１半導体部分２１と第２半導体部分２２とは、ｐｎ接合している。第１半導体部分２１、第２半導体部分２２、および第１半導体部分２１と第２半導体部分２２とのｐｎ接合界面２３の各々の少なくとも一部は、領域２０内に配置されている。

[0129] 第１半導体部分２１および第２半導体部分２２を構成する材料は、例えば同じ半導体材料である。

[0130] 図１６に示されるように、第１半導体部分２１と第２半導体部分２２とのｐｎ接合界面２３は二次元材料層１の第１部分１ａと接触するように配置されている。そのため、電磁波が照射されたときに第１半導体部分２１と第２半導体部分２２とのｐｎ接合界面２３で発生した光キャリアは二次元材料層１に容易に取り出され得る。さらに、ｐｎ接合界面２３上の二次元材料層１の導電率は、光キャリアにより生じたｐｎ接合での局所電界変化の影響を受けて、変化する。この結果、電磁波検出器の検出感度が向上する。

[0131] なお、第１半導体部分２１および第２半導体部分２２を構成する材料は、

異なる半導体材料であってもよい。この場合、電磁波検出器１０９が複数の共鳴波長が存在するように設けられたプラズモンフィルタ３をさらに備えていれば、該電磁波検出器１０９は複数かつ狭い波長帯域の電磁波を検出できる。

[0132] 実施の形態１１に係る電磁波検出器１０９は、各貫通孔３０の内部に接続導電体８が形成されている点を除き、実施の形態２～９に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０８のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0133] 実施の形態１２.

図１７および図１８に示されるように、実施の形態１２に係る電磁波検出器１１０は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同等の効果を奏するが、１つの二次元材料層１が複数の領域２０の各々の上記第１接触領域と電気的に接続されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。なお、図１８では、第１電極部５および第２電極部６に接続される電気配線は省略されている。

[0134] １つの二次元材料層１は、例えば隣り合う２つの領域２０の各々と電気的に接続されている。なお、１つの二次元材料層１は、隣り合う３つ以上の領域２０の各々と電気的に接続されていてもよい。

[0135] また、図１８に示される絶縁層４では、貫通孔３０に対して一方の側に位置する部分のみがステップ状に設けられているが、絶縁層４の貫通孔３０に対する一方の側に位置する部分および他方の側に位置する部分がいずれもステップ状に設けられていてもよい。異なる観点から言えば、図１８に示される二次元材料層１では、貫通孔３０に対して一方の側に位置する部分のステップ数が他方の側に位置する部分のステップ数よりも多いが、二次元材料層１の貫通孔３０に対する一方の側に位置する部分および他方の側に位置する部分の各ステップ数が等しくてもよい。

[0136] 電磁波検出器１１０では、電磁波検出器１００と比べて、１つの二次元材料層１が電気的に接続されている領域２０の数が多いため、１つの二次元材料層１が半導体層２から受け取る光キャリアの量が多くなる。その結果、電

磁波検出器１１０の感度は、電磁波検出器１００の感度と比べて高くなる。

[0137] 実施の形態１２に係る電磁波検出器１１０は、１つの二次元材料層１が複数の領域２０の各々の上記第１接触領域と電気的に接続されている点を除き、実施の形態２～１０に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１０９のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0138] 実施の形態１３．

図１９および図２０に示されるように、実施の形態１３に係る電磁波検出器１１１は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同等の効果を奏するが、第１電極部５および絶縁層４の構成が電磁波検出器１００と異なっている。

[0139] 電磁波検出器１１１では、絶縁層４および第１電極部５が環状に形成されており、二次元材料層１の上記第１部分が絶縁層４および第１電極部５よりも内側に配置されている。

[0140] 電磁波検出器１１１では、電磁波検出器１００と比べて、二次元材料層１を介して半導体層２から取り出される光電流が増加するため、検出感度は高い。

[0141] なお、図１９および図２０では、二次元材料層１の第３部分１ｃが第１電極部５上に配置されているが、二次元材料層１の第３部分１ｃは第１電極部５よりも下に配置されていてもよい。

[0142] ＜変形例＞

図２１に示されるように、電磁波検出器１１１の変形例としての電磁波検出器１１２では、二次元材料層１が、第１電極部５のうち貫通孔３０に対して一方の側に位置する第１電極部５の一部分と電気的に接続されているとともに、貫通孔３０に対して他方の側に位置する第１電極部５の他の一部分と電気的に接続されている。

[0143] 電磁波検出器１１２は、電磁波検出器１１１と基本的に同様の構成を備えているため、電磁波検出器１１１と同様の効果を奏することができる。

[0144] なお、電磁波検出器１１１および電磁波検出器１１２では、第１電極部５

の平面形状はＣ字状であってもよい。言い換えると、平面視において、第１電極部５の端部間は貫通孔３０の周方向において間隔を隔てて配置されていてもよい。また、平面視において、第１電極部５の端部間は貫通孔３０の径方向において間隔を隔てて配置されていてもよい。

[0145] 実施の形態１３に係る電磁波検出器１１１，１１２は、絶縁層４および第１電極部５が環状に形成されている点を除き、実施の形態２～１２に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１１０のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0146] 実施の形態１４．

図２２に示されるように、実施の形態１４に係る電磁波検出器１１３は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的には同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、絶縁層４の厚さが領域２０から第１電極部５に近づくにつれて変化している点で、電磁波検出器１００と異なる。

[0147] 図２２に示されるように、絶縁層４の厚さは、領域２０から第１電極部５に近づくにつれて厚くなっている。絶縁層４は、半導体層２の第１面２Ａに対して傾斜している傾斜面４Ｃを有している。第１面２Ａに対して傾斜面４Ｃが成す傾斜角度は、鋭角である。傾斜面４Ｃの少なくとも一部は、領域２０上に配置されている。

[0148] 二次元材料層１は、傾斜面４Ｃ上を延在している。具体的には、二次元材料層１の第２部分１ｂは、傾斜面４Ｃ上に配置されている。

[0149] 傾斜面４Ｃを有する絶縁層４は、任意の方法により形成され得る。たとえば、半導体層２を傾けて絶縁膜を成膜することにより、傾斜面４Ｃを有する絶縁層４を形成してもよい。あるいは、半導体層２を傾けた状態で、当該半導体層２上に予め形成された絶縁層４をドライエッチングすることにより、傾斜面４Ｃを有する絶縁層４を形成してもよい。

[0150] 電磁波検出器１１３では、絶縁層４の厚さに勾配が設けられていることで、半導体層２に電磁波が照射された場合に、二次元材料層１中における電界変化の程度に局所的な変化が生じる。つまり、半導体層２に電磁波が照射さ

れ、二次元材料層１に電界変化が与えられる際に、絶縁層４の厚さの変化に応じて当該電界変化の程度が局所的に変わる。これにより、二次元材料層１中のキャリアの移動度が向上し、電磁波検出器の検出感度が向上する。

[0151] 実施の形態１４に係る電磁波検出器１１３は、絶縁層４の厚さが領域２０から第１電極部５に近づくにつれて変化している点を除き、実施の形態２～１３に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１１２のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0152] 実施の形態１５.

図２３に示されるように、実施の形態１５に係る電磁波検出器１１４は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的には同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、半導体層２と二次元材料層１との間に空隙Ｖが形成されている点で、電磁波検出器１００と異なる。

[0153] 光ゲート効果においてソース領域として作用する二次元材料層１の第１部分１ａは、接続導電体８を介して、半導体層２の上記第１接触領域と電気的に接続されている。接続導電体８の厚さは、プラズモンフィルタ３の厚さと絶縁層４の厚さとの和と等しいことが好ましい。この場合、二次元材料層１は、接続導電体８上から絶縁層４上にまで、平面状に延びている。なお、半導体層２の上記第１接触領域は、二次元材料層１と接触しておらず、接続導体８と接触している。

[0154] 光ゲート効果においてソース領域として作用する二次元材料層１の第２部分１ｂは、空隙Ｖに面している部分と、絶縁層４と接している部分とを有している。この場合、電磁波入射時に半導体層２において生じた光キャリアは、絶縁層４の部分４ａまたは空隙Ｖを介して二次元材料層１の第２部分１ｂに電界効果を与える。つまり、この構成においても光ゲート効果が生じる。二次元材料層１と半導体層２が直接接していないため二次元材料層１の移動度の低下が生じない。よって、電磁波検出器としての性能も向上する。

[0155] ＜変形例＞

図２４に示されるように、電磁波検出器１１４の変形例としての電磁波検

出器１１５では、半導体層２が、凸部２４を有している。凸部２４は、プラズモンフィルタ３の貫通孔３０の内部、すなわち領域２０上に配置されている。二次元材料層１は、凸部２４と接触している。凸部２４は、半導体層２において二次元材料層１の第１部分と接触している上記第１接触領域を有している。凸部２４の高さは、図２４に示すようにプラズモンフィルタ３の厚さと絶縁層４の厚さとの和と等しいことが好ましい。なお、凸部２４は、上述した製造方法の半導体層２を準備する工程において、半導体層２をフォトリソグラフィおよびドライエッチングなどで加工することによって形成され得る。プラズモンフィルタ３は、凸部２４が形成された半導体層２上に形成され得る。

[0156] この構成においても、光ゲート効果が生じる。さらに、空隙Ｖの部分では二次元材料層１と絶縁層４が直接接していないため二次元材料層１の移動度の低下が生じない。よって、電磁波検出器としての性能も向上する。

[0157] 実施の形態１５に係る電磁波検出器１１４，１１５は、半導体層２と二次元材料層１との間に空隙Ｖが形成されている点を除き、実施の形態２～１４に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１１３のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0158] 実施の形態１６．

図２５に示されるように、実施の形態１６に係る電磁波検出器１１６は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層１と接触している少なくとも１つ以上の接触層９をさらに備えている点で、電磁波検出器１００と異なっている。

[0159] 接触層９は、例えば二次元材料層１上に配置されている。接触層９は、二次元材料層１と接触することで、二次元材料層１に正孔又は電子を供給することが可能な材料により構成されている。接触層９により二次元材料層１に任意に正孔又は電子をドーピングすることができる。

[0160] 接触層９としては、例えば、ポジ型フォトレジストと呼ばれる、キノンジ

アジト基を有する感光剤とノボラック樹脂とを含有する組成物を用いることができる。また、接触層９を構成する材料としては、例えば、極性基を有する材料を用いることができる。例えば、当該材料の一例である電子求引基を有する材料は、二次元材料層１の電子密度を減少させる効果を持つ。また、当該材料の一例である電子供与基を有する材料は、二次元材料層１の電子密度を増加させる効果を持つ。電子求引基を有する材料としては、例えば、ハロゲン、ニトリル、カルボキシル基、又は、カルボニル基等を有する材料が挙げられる。また、電子供与基を有する材料としては、例えば、アルキル基、アルコール、アミノ基、又は、ヒドロキシル基等を有する材料が挙げられる。また、上記以外にも極性基によって分子全体において電荷の偏りが生じる材料も、接触層９の材料として用いることができる。

[0161] また、有機物、金属、半導体、絶縁体、２次元材料、又は、これら材料のいずれかの混合物においても、分子内で電荷の偏りが生じて極性を生じる材料であれば、接触層９の材料として用いることができる。ここで、無機物からなる接触層９と二次元材料層１とを接触させた場合、二次元材料層１がドーピングされる導電型は、二次元材料層１の仕事関数よりも接触層９の仕事関数が大きい場合はｐ型、小さい場合はｎ型である。それに対して、接触層９が有機物の場合、当該接触層９を構成する材料である有機物が明確な仕事関数を有していない。そのため、二次元材料層１に対してｎ型ドープになるのか、ｐ型ドープになるのかは、接触層９に用いる有機物の分子の極性によって、接触層９の材料の極性基を判断することが好ましい。

[0162] 例えば、接触層９として、ポジ型フォトレジストと呼ばれる、キノンジアジト基を有する感光剤とノボラック樹脂とを含有する組成物を用いる場合、二次元材料層１においてフォトリソグラフィ工程によりレジストを形成した領域がｐ型二次元材料層領域となる。これにより、二次元材料層１の表面上に接触するマスク形成処理が不要となる。この結果、二次元材料層１に対するプロセスダメージの低減及びプロセスの簡素化が可能となる。

[0163] 電磁波検出器１１６は、二次元材料層１と接触している接触層９をさらに

備えている。上述した通り、接触層９の材料として、例えば、電子求引基を有する材料、又は、電子供与基を有する材料を用いることで、二次元材料層１の状態（導電型）を意図的にｎ型又はｐ型とすることができる。この場合、第１電極部５および半導体層２からのキャリアドーピングの影響を考慮せず、二次元材料層１のキャリアドーピングを制御することができる。この結果、電磁波検出器の性能を向上させることができる。

[0164] また、接触層９を、二次元材料層１の上部表面における第１電極部５側または半導体層２側のどちらか一方にのみ形成することで、二次元材料層１中に電荷密度の勾配が形成される。この結果、二次元材料層１中のキャリアの移動度が向上し、電磁波検出器を高感度化することが出来る。

[0165] また、二次元材料層１上に複数の接触層９を形成してもよい。接触層９の数は３以上であってもよく、任意の数とすることができる。複数の接触層９を第１電極部５と半導体層２との間に位置する二次元材料層１上に形成してもよい。その場合、複数の接触層９の材料は、同じ材料でも異なる材料でもよい。

[0166] また、電磁波検出器１１６において、接触層９の膜厚は、電磁波が二次元材料層１に照射された場合に、光電変換を行うことができるよう十分薄い方が好ましい。一方、接触層９から二次元材料層１にキャリアがドーピングされる程度の厚さを有するように接触層９を形成することが好ましい。接触層９は、分子又は電子などのキャリアが二次元材料層１に導入されれば任意の構成としても良い。たとえば、二次元材料層１を溶液に浸漬させて、分子レベルで二次元材料層１にキャリアを供給することで、固体の接触層９を二次元材料層１上に形成しないで、二次元材料層１にキャリアをドーピングしてもよい。

[0167] また、接触層９の材料として、上述した材料以外にも、極性変換を生じる材料を用いてもよい。その場合、接触層９が極性変換すると、変換の際に生じた電子又は正孔が、二次元材料層１に供給される。そのため、接触層９が接触している二次元材料層１の部分に電子又は正孔のドーピングが生じる。

そのため、接触層９を取り除いても、接触層９と接触していた二次元材料層１の当該部分は、電子又は正孔がドーピングされたままの状態となる。したがって、接触層９として、極性変換を生じる材料を用いた場合、一定の時間が経過した後に接触層９を二次元材料層１上から取り除いてもよい。この場合、接触層９が存在している場合より二次元材料層１の開口部面積が増加する。このため、電磁波検出器の検出感度を向上させることができる。ここで、極性変換とは、極性基が化学的に変換する現象であり、例えば、電子求引基が電子供与基に変化する、または電子供与基が電子求引基に変化する、または極性基が非極性基に変化する、または非極性基が極性基に変化する、といった現象を意味する。

[0168] また、接触層９が電磁波照射によって極性変換を生じる材料により形成されてもよい。この場合、特定の電磁波の波長において極性変換を生じる材料を接触層９の材料として選択することで、特定の電磁波の波長の電磁波照射時のみ接触層９で極性変換を生じさせ、二次元材料層１へのドーピングを行うことができる。この結果、二次元材料層１に流入する光電流を増大させることができる。

[0169] また、電磁波照射によって酸化還元反応を生じる材料を接触層９の材料として用いてもよい。この場合、酸化還元反応時に生じる電子又は正孔を二次元材料層１にドーピングすることができる。

[0170] 実施の形態１６に係る電磁波検出器１１６は、二次元材料層１と接触している少なくとも１つ以上の接触層９をさらに備えている点を除き、実施の形態２～１５に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１１５のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0171] 実施の形態１７.

実施の形態１７に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、二次元材料層１が乱層構造部分を含む点で、電磁波検出器１００と異なる。

[0172] 本実施の形態に係る電磁波検出器では、二次元材料層１においてチャネル

領域に対応する領域が乱層構造部分となっている。ここで、乱層構造とは、グラフェンが複数積層された領域であって、積層されたグラフェン同士の格子が不整合な状態で積層された構造を意味する。なお、二次元材料層１の全体が乱層構造であってもよいし、一部のみが乱層構造となっていてもよい。

[0173] 乱層構造部分の作製方法としては任意の方法を用いることができる。たとえば、ＣＶＤ法で作製した単層のグラフェンを複数回転写し、多層グラフェンを積層することで乱層構造部分を形成してもよい。また、グラフェン上に、エタノールまたはメタンなどを炭素源としてＣＶＤ法によりグラフェンを成長して乱層構造部分を形成しても良い。二次元材料層１において絶縁層４との接触領域を乱層構造とすることで、二次元材料層１におけるキャリアの移動度が向上する。ここで、通常の積層グラフェンは、Ａ－Ｂ積層と呼ばれ、積層したグラフェン同士の格子が整合した状態で積層される。しかし、ＣＶＤ法により作製したグラフェンは多結晶であり、グラフェン上に更にグラフェンを複数回転写した場合、またはＣＶＤ法を用いて下地のグラフェン上にグラフェンを積層した場合は、積層されたグラフェン同士の格子が不整合な状態である乱層構造となる。

[0174] 乱層構造のグラフェンは、層間の相互作用の影響が少なく、単層グラフェンと同等の性質を持つ。さらに、二次元材料層１は下地となる絶縁層４でのキャリア散乱の影響を受けて移動度が低下する。しかし、乱層構造のグラフェンは絶縁層４と接触するグラフェンはキャリア散乱の影響を受けるが、当該グラフェン上に乱層構造で積層された上層のグラフェンは、下地の絶縁層４のキャリア散乱の影響を受けにくくなる。また、乱層構造のグラフェンでは、層間の相互作用の影響が少ないため、導電率も向上する。以上より、乱層構造のグラフェンではキャリアの移動度を向上させることができる。この結果、電磁波検出器の感度を向上させることができる。

[0175] また、乱層構造のグラフェンは絶縁層４上に存在する二次元材料層１の部分のみに適用しても良い。たとえば、二次元材料層１において半導体層２との接触領域や第１電極部５との接触領域については乱層構造ではないグラフ

ェン、たとえば単層のグラフェンを用いてもよい。この場合、第１電極部５および半導体層２と二次元材料層１とのコンタクト抵抗を増大させることなく、二次元材料層１に対する絶縁層４のキャリア散乱の影響を抑制することが出来る。

[0176] 実施の形態１７に係る電磁波検出器は、二次元材料層１が乱層構造部分を含む点を除き、実施の形態２～１６に係る電磁波検出器１０１～電磁波検出器１１６のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0177] 実施の形態１８.

実施の形態１８に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、半導体層２、絶縁層４、および接触層９の少なくともいずれかを構成する材料が、電磁波の照射により特性が変化し二次元材料層１に電位の変化を与える材料に特定されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。

[0178] 半導体層２、絶縁層４、および接触層９の各々を構成する材料が、電磁波の照射により特性が変化し二次元材料層１に電位の変化を与える材料であってもよい。また、半導体層２、絶縁層４、および接触層９のいずれかを構成する材料のみが、電磁波の照射により特性が変化し二次元材料層１に電位の変化を与える材料であってもよい。また、半導体層２、絶縁層４、および接触層９のうちの２つの構成材料のみが、電磁波の照射により特性が変化し二次元材料層１に電位の変化を与える材料であってもよい。

[0179] 半導体層２は、例えば、半導体材料、ｐｎ接合材料、金属－半導体接合材料、金属－絶縁物－半導体接合材料、およびペロブスカイト材料（結晶構造がペロブスカイト構造である材料）からなる群から選択される少なくとも１つにより構成されている。

[0180] 接触層９は、量子ドット、液晶材料、フラーレン、およびペロブスカイト材料からなる群から選択される少なくとも１により構成されている。

[0181] 絶縁層４は、例えば強誘電体材料および希土類酸化物の少なくともいずれかにより構成されている。例えば、強誘電体材料として、電磁波による分極

効果（焦電効果）を有する強誘電体材料を用いる場合、電磁波の照射により、強誘電体材料に分極の変化が生じる。この結果、二次元材料層１に電位の変化を与えることができる。

[0182] なお、接触層９が上記のように二次元材料層１に電位の変化を与える材料で構成されている場合、接触層９は、必ずしも二次元材料層１に直接接触している必要はない。接触層９は、例えば絶縁膜を介して二次元材料層１の上面又は下面上に接触するように設けられていてもよい。

[0183] なお、実施の形態１８に係る電磁波検出器は、半導体層２、絶縁層４、および接触層９の少なくともいずれかを構成する材料が、電磁波の照射により特性が変化し二次元材料層１に電位の変化を与える材料に特定されている点を除き、実施の形態２～１７に係る電磁波検出器のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0184] 実施の形態１９.

実施の形態１９に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、複数の貫通孔３０の各内周面３Ｃの断面形状が階段形状（ステップ形状）である点で、電磁波検出器１００とは異なる。図２６では、実施の形態１９に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタ３の１つの貫通孔３０の周辺構造のみが図示されており、プラズモンフィルタ３の他の貫通孔３０の周辺構造および他の部材の図示が省略されている。

[0185] 図２６に示されるように、内周面３Ｃは、複数（例えば２つ）のステップ面３Ｄと、複数（例えば３つ）のテラス面３Ｅとを有している。各ステップ面３Ｄは、例えば貫通孔３０の孔軸に沿って延びている。各テラス面３Ｅは、貫通孔３０の孔軸と交差しており、平面視において環形状を有している。平面視において、各テラス面３Ｅの中心は、例えば互いに重なっている。平面視において、各テラス面３Ｅの中心は、例えば貫通孔３０の中心と重なっている。各テラス面３Ｅは、例えば貫通孔３０の孔軸と直交している。各ステップ面３Ｄの寸法は、例えば互いに等しい。各テラス面３Ｅの寸法は、例

えば互いに等しい。各貫通孔３０の中心に対する径方向において、最も外側に位置するステップ面３Ｄ（最上段のステップ面３Ｄ）の上端部は、第４面３Ｂの内周端部に接続されている。絶縁層４および二次元材料層１は、プラズモンフィルタ３の複数のステップ面３Ｄ、複数のテラス面３Ｅ、および第４面３Ｂ上に配置されている。

[0186] 複数の貫通孔３０のうち少なくとも１つの貫通孔３０が、図２６に示される構造を有していればよいが、例えばプラズモンフィルタ３の複数の貫通孔３０の各々が図２６に示される構造を有している。

[0187] 実施の形態１９に係る電磁波検出器では、電磁波検出器１００と比べて、電磁波がプラズモンフィルタ３に照射されたときにプラズモンフィルタ３において高次の回折が起こりにくいため、プラズモンフィルタ３を透過する電磁波の強度が増強され得る。

[0188] 断面視において、各ステップ面３Ｄは、順テーパー形状を有していてもよい。言い換えると、各ステップ面３Ｄは、貫通孔３０の中心から離れるにつれて、第３面３Ａからの距離が長くなるように、傾斜していてもよい。

[0189] 実施の形態１９に係る電磁波検出器は、複数の貫通孔３０の各内周面３Ｃの断面形状が階段形状（ステップ形状）である点を除き、実施の形態２～１８に係る電磁波検出器のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0190] 実施の形態２０．

実施の形態２０に係る電磁波検出器は、実施の形態１に係る電磁波検出器１００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、プラズモンフィルタ３の第４面３Ｂに１つの貫通孔３０を囲む複数の溝部３１（堀り込み）が形成されている点で、電磁波検出器１００とは異なる。図２７および図２８は、実施の形態２０に係る電磁波検出器のプラズモンフィルタ３の１つの貫通孔３０の周辺構造のみが図示されており、プラズモンフィルタ３の他の貫通孔３０の周辺構造および他の部材の図示が省略されている。

[0191] 図２７に示されるように、平面視において、複数（例えば２つ）の溝部３１の各中心は、互いに重なっている。平面視において、各溝部３１の中心は

、例えば１つの貫通孔３０の中心と重なっている。異なる観点から言えば、平面視において、プラズモンフィルタ３の第４面３Ｂは、いわゆるブルズアイ構造を有している。

[0192] 図２８に示されるように、第４面３Ｂは、複数（例えば３つ）の頂面３Ｆと、複数（例えば４つ）の壁面３Ｇと、複数（例えば２つ）の底面３Ｈとを有している。各溝部３１は、２つの壁面３Ｇと、１つの底面３Ｈとを有している。各溝部３１の２つの壁面３Ｇは、貫通孔３０の孔軸に対する径方向において、互いに対向している。各壁面３Ｇの上端部は、各頂面３Ｆの内周端部または外周端部に接続されている。各壁面３１Ａの下端部は、各底面３Ｈの内周端部または外周端部に接続されている。各壁面３Ｇは、例えば貫通孔３０の孔軸に沿って延びている。各頂面３Ｆおよび各底面３Ｈは、例えば貫通孔３０の孔軸と直交している。貫通孔３０の中心に対する径方向において最も内側に位置する頂面３Ｆの内周端部は、内周面３Ｃの上端部に接続されている。絶縁層４および二次元材料層１は、プラズモンフィルタ３の複数の頂面３Ｆ、複数の壁面３Ｇ、および複数の底面３Ｈ上に配置されている。第１電極部５は、例えば貫通孔３０の中心に対する径方向において最も外側に位置する頂面３Ｆ上に配置されている。

[0193] 平面視において、各溝部３１は、１つの貫通孔３０のみを囲んでいる。平面視において、各溝部３１は、隣り合う２つの貫通孔３０を囲んでいない。

[0194] 複数の貫通孔３０のうち少なくとも１つの貫通孔３０が、図２７および図２８に示される構造を有していればよいが、例えば複数の貫通孔３０の各々が図２７および図２８に示される構造を有している。

[0195] 実施の形態２０に係る電磁波検出器では、溝部３１が形成された第４面３Ｂに電磁波が入射すると、プラズモンフィルタ３にて伝搬型の表面プラズモン共鳴が生じる。表面プラズモン共鳴は、複数の溝部３１が形成されている第４面３Ｂを伝搬して貫通孔３０に導かれるため、プラズモンフィルタ３を透過する電磁波の強度が増強され得る。

[0196] さらに、実施の形態２０に係る電磁波検出器では、検出波長が複数の溝部

３１の形状（複数の溝部３１の周期、各溝部３１の寸法など）によって決定されるため、複数の溝部３１が形成されていない電磁波検出器１００と比べて検出波長の設定の自由度が高い。

[0197] プラズモンフィルタ３には、少なくとも１つの溝部３１が形成されていればよい。溝部３１の数は、１であってもよい。また、溝部３１の数は、３以上であってもよい。上記径方向に隣り合う２つの溝部３１間の間隔は、例えば互いに等しい。このようにすれば、波長選択性（単色性）が高められる。一方で、上記径方向に隣り合う溝部３１間の間隔は、互いに異なっていてもよい。このようにすれば、プラズモンフィルタ３を透過する電磁波の波長帯域が広くなる。

[0198] 断面視において、各壁面３Ｇは、順テーパー形状を有していてもよい。言い換えると、各壁面３Ｇは、貫通孔３０の中心から離れるにつれて、第３面３Ａからの距離が長くなるように、傾斜していてもよい。

[0199] 実施の形態２０に係る電磁波検出器は、プラズモンフィルタ３の第４面３Ｂに貫通孔３０を囲む少なくとも１つの溝部３１が形成されている点を除き、実施の形態２～１９に係る電磁波検出器のいずれかと同様の構成を備えていてもよい。

[0200] 実施の形態２１．

図２９に示されるように、実施の形態２１に係る電磁波検出器アレイ３００は、複数の電磁波検出器２００の集合体である。各電磁波検出器２００は、実施の形態１～実施の形態２０に係る電磁波検出器１００～１１６のいずれかである。

[0201] 図２９に示される電磁波検出器アレイ３００では、複数の電磁波検出器２００が二次元に周期的に配列されている。なお、複数の電磁波検出器２００は、一次元に周期的に配列されていてもよい。また、複数の電磁波検出器２００の配置は周期的ではなく、異なる間隔で配置してもよい。

[0202] 図２９に示される電磁波検出器アレイ３００では、電磁波検出器２００が、２×２のマトリックス状に配置されている。ただし、配置される電磁波検

出器２００の数はこれに限定されない。たとえば、複数の電磁波検出器２００を３以上×３以上のマトリックス状に配置してもよい。

[0203] また、複数の電磁波検出器２００がアレイ状に配置されている電磁波検出器アレイでは、各電磁波検出器２００の二次元材料層１が互いに分離されていれば、第２電極部６は共通電極としてもよい。第２電極部６が共通電極である電磁波検出器アレイでは、各電磁波検出器２００の第２電極部６が互いに独立している電磁波検出器アレイと比べて、画素の配線を少なくすることができ、解像度が高くなる。

[0204] なお、各電磁波検出器２００同士を分離するために、半導体層２トレンチ構造などの電流遮断構造が形成されていてもよい。

[0205] 電磁波検出器アレイ３００は、アレイ状に複数の電磁波検出器２００を配列することで画像センサとしても使用できる。各電磁波検出器２００の検出波長は、互いに同じであってもよいが、互いに異なっていてもよい。

[0206] また、電磁波検出器アレイ３００は、各電磁波検出器２００からの信号を読み出すように構成された読み出し回路を含んでいてもよい。各電磁波検出器２００は、読み出し回路上に配置されてもよい。読み出し回路の読み出し形式は、例えば、ＣＴＡＩ（Capacitive Transimpedance Amplifier）型である。読み出し回路は、他の読み出し形式であってもよい。

[0207] また、電磁波検出器アレイ３００は、各電磁波検出器２００の第１電極部５と読み出し回路とを電気的に接続するバンプを含んでいてもよい。各電磁波検出器２００と読み出し回路とがバンプによって接続される構造は、ハイブリッド接合と呼ばれる。ハイブリッド接合は、量子型赤外線センサにおいては一般的な構造である。この場合、各電磁波検出器２００は、例えば第１電極部５と電気的に接続されているパッドをさらに備え、各バンプは該パッドと電気的に接続される。バンプの材料は、例えば、インジウム（Ｉｂ）などの導電性材料である。パッドの材料は、アルミニウムシリコン（Ａｌ－Ｓｉ）系合金、ニッケル（Ｎｉ）、金（Ａｕ）などの導電性材料である。

[0208] ＜変形例＞

図３０に示される電磁波検出器アレイ３０１は、電磁波検出器アレイ３００と基本的に同様の構成を備え、同様の効果を奏するが、複数の電磁波検出器として種類の異なる電磁波検出器２００、２０１，２０２，２０３を備えている点で、電磁波検出器アレイ３００とは異なる。各電磁波検出器２００、２０１，２０２，２０３は、実施の形態１～実施の形態２０に係る電磁波検出器１００～１１６のいずれかである。

[0209] 電磁波検出器アレイ３０１では、互いに異なる種類の電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３がマトリックス状に配置されている。

[0210] 図３０では、電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３が２×２のマトリックス状に配置されているが、配置される電磁波検出器の数はこれに限定されない。また、本実施の形態では、種類の異なる電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３を二次元に周期的に配列したが、一次元に周期的に配列してもよい。また、種類の異なる電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３を周期的ではなく異なる間隔で配置してもよい。

[0211] 電磁波検出器アレイ３０１では、実施の形態１～２０のいずれかに係る、種類の異なる電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３を、一次元又は二次元のアレイ状に配置することで、画像センサとしての機能を持たせることができる。例えば、電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３として、それぞれ検出波長の異なる電磁波検出器を用いてもよい。具体的には、実施の形態１～２０のいずれかに係る電磁波検出器からそれぞれ異なる検出波長選択性を有する電磁波検出器を準備し、アレイ状に並べてもよい。この場合、電磁波検出器集合体は、少なくとも２つ以上の異なる波長の電磁波を検出することができる。

[0212] このように異なる検出波長を有する電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３をアレイ状に配置することにより、可視光域で用いるイメージセンサと同様に、たとえば紫外光、赤外光、テラヘルツ波、電波の波長域などの任意の波長域において、電磁波の波長を識別できる。この結果、たとえば波長の相違を色の相違として示した、カラー化した画像を得ることができる。

[0213] また、各電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３の各半導体層２は、検出波長の異なる材料により構成されていてもよい。たとえば、検出波長が可視光の波長である半導体材料と、検出波長が赤外線の波長である半導体材料とを上記構成材料として用いてもよい。この場合、例えば、当該電磁波検出器を車載センサに適用した時に、昼間は可視光画像用カメラとして電磁波検出器を使用できる。さらに、夜間は赤外線カメラとしても電磁波検出器を使用できる。このようにすれば、電磁波の検出波長によって、画像センサを有するカメラを使い分ける必要が無い。

[0214] また、イメージセンサ以外の電磁波検出器の用途としては、たとえば少ない画素数でも、物体の位置検出を行うことが可能な位置検出用センサとして当該電磁波検出器を用いることができる。たとえば、電磁波検出器集合体の構造により、上記のように検出波長の異なる電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３を用いれば、複数波長の電磁波の強度を検出する画像センサが得られる。これにより、従来、ＣＭＯＳイメージセンサなどで必要であったカラーフィルタを用いることなく、複数の波長の電磁波を検出し、カラー画像を得ることができる。

[0215] さらに、検出する偏光が異なる電磁波検出器２００，２０１，２０２，２０３をアレイ化することにより、偏光識別イメージセンサを形成することもできる。例えば、検知する偏光角度が０°、９０°、４５°、１３５°である４つの画素を一単位として、当該一単位の電磁波検出器を複数配置することで偏光イメージングが可能になる。偏光識別イメージセンサによって、例えば、人工物と自然物の識別、材料識別、赤外波長域における同一温度物体の識別、物体間の境界の識別、又は、等価的な分解能の向上などが可能になる。

[0216] 以上より、上述のように構成された本実施の形態に係る電磁波検出器集合体は、広い波長域の電磁波を検出することができる。また、本実施の形態に係る電磁波検出器集合体は、異なる波長の電磁波を検出することができる。

[0217] 今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものでは

ないと考えられるべきである。矛盾のない限り、今回開示された実施の形態の少なくとも２つを組み合わせてもよい。本開示の範囲は、上記した説明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すべての変更が含まれることを意図される。

符号の説明

[0218] １　二次元材料層、１ａ　第１部分、１ｂ　第２部分、１ｃ　第３部分、２　半導体層、２Ａ　第１面、２Ｂ　第２面、３　プラズモンフィルタ、３Ａ　第３面、３Ｂ　第４面、３Ｃ　内周面、４　絶縁層、４Ｃ　傾斜面、４ａ，４ｂ　部分、５　第１電極部、６　第２電極部、７　バッファ層、８　接続導電体、９　接触層、１０　第１部材、１１　第２部材、２０　領域、２１　第１半導体部分、２２　第２半導体部分、２３　接合界面、２４　凸部、３０　貫通孔、１００，１０１，１０２，１０３，１０４，１０５，１０６，１０７，１０８，１０９，１１０，１１１，１１２，１１３，１１４，１１５，１１６，２００，２０１，２０２，２０３　電磁波検出器、３００，３０１　電磁波検出器アレイ。

請求の範囲

[請求項1] 少なくとも１つの光電変換素子と、

前記少なくとも１つの光電変換素子と対向するように配置されたプラズモンフィルタとを備え、

前記プラズモンフィルタには、複数の貫通孔が周期的に形成されており、

前記少なくとも１つの光電変換素子は、

平面視において前記複数の貫通孔のうちの少なくとも１つの貫通孔と重なる領域を有する半導体層と、

前記領域の一部を覆うように形成された絶縁層と、

前記領域の他の一部および前記絶縁層上に配置され、かつ前記領域の前記他の一部と電気的に接続されている二次元材料層と、

前記二次元材料層と電気的に接続された第１電極部と、

前記半導体層と電気的に接続された第２電極部とを備える、電磁波検出器。

[請求項2] 前記少なくとも１つの光電変換素子において、

前記半導体層は、平面視において前記複数の貫通孔のうちの２以上の貫通孔の各々と重なる複数の領域を有し、

前記二次元材料層は、前記複数の領域の各々の前記他の一部と電気的に接続されている、請求項１に記載の電磁波検出器。

[請求項3] 前記プラズモンフィルタは、前記半導体層に対して、前記絶縁層、前記二次元材料層、および前記第１電極部と同じ側に配置されており、

前記絶縁層は、前記領域の一部上から前記プラズモンフィルタの一部上にまで延在しており、

前記二次元材料層は、前記領域の前記他の一部から前記プラズモンフィルタ上に配置された前記絶縁層上にまで延在しており、

前記第１電極部は、前記プラズモンフィルタ上に配置された前記絶

縁層上に配置されている、請求項１または２に記載の電磁波検出器。

[請求項4] 前記プラズモンフィルタは、前記半導体層に対して、前記絶縁層、前記二次元材料層、および前記第１電極部とは反対側に配置されている、請求項１または２に記載の電磁波検出器。

[請求項5] 前記プラズモンフィルタの表面の少なくとも一部を構成する材料は、電磁波が入射したときに表面プラズモン共鳴が生じる材料である、請求項１～４のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項6] 前記プラズモンフィルタは、芯材と、前記芯材の表面の少なくとも一部上に配置された包材とを含み、

前記包材を構成する材料は、電磁波が入射したときに表面プラズモン共鳴が生じる材料である、請求項５に記載の電磁波検出器。

[請求項7] 前記プラズモンフィルタは、前記複数の貫通孔の各々の孔軸方向に沿って積層された第１部材と第２部材とを含み、

前記第１部材を構成する材料は、電磁波が入射したときに表面プラズモン共鳴が生じる材料であり、

前記第２部材を構成する材料は、誘電体である、請求項５に記載の電磁波検出器。

[請求項8] 前記プラズモンフィルタにおいて表面プラズモンが励起される波長帯域は、前記半導体層が感度を有する波長帯域よりも狭い、請求項１～７のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項9] 前記複数の貫通孔は、少なくとも一方向に沿って周期的に配列されている、請求項１～８のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項10] 前記半導体層は、検出波長に感度を有し、

前記複数の貫通孔の周期は、前記検出波長と等しい、請求項９に記載の電磁波検出器。

[請求項11] 前記複数の貫通孔の各内周面は、前記複数の貫通孔の各孔軸に対して傾斜している、請求項１～１０のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項12] 前記複数の貫通孔の各内周面の断面形状は、階段形状である、請求項１～１１のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項13] 平面視において、前記プラズモンフィルタの前記表面には、前記複数の貫通孔の１つの貫通孔を囲む少なくとも１つの溝部が形成されている、請求項１～１２のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項14] 前記二次元材料層の端部は、前記領域上に配置されている、請求項１～１３のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項15] 前記半導体層の前記領域と前記二次元材料層との間に配置されたバッファ層をさらに備える、請求項１～１４のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項16] 前記バッファ層は、前記二次元材料層と前記半導体層との間にトンネル電流を形成することが可能な厚さを有する、請求項１５に記載の電磁波検出器。

[請求項17] 前記半導体層の前記領域と前記二次元材料層とを電気的に接続する接続導電体をさらに備える、請求項１～１４のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項18] 前記半導体層は、

第１導電型を有する第１半導体部分と、

前記第１半導体部分と接合され、第２導電型を有する第２半導体部分とを含み、

前記第１半導体部分と前記第２半導体部分との接合界面は、前記領域内に配置されている、請求項１～１７のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項19] 前記第１半導体部分の吸収波長は、前記第２半導体部分の吸収波長とは異なる、請求項１８に記載の電磁波検出器。

[請求項20] 平面視において、前記第１電極部は環状に形成されており、かつ前記領域は前記第１電極部よりも内側に配置されている、請求項１～１９のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項21] 前記絶縁層の厚みは、前記領域から前記第１電極部に近づくにつれて変化する、請求項１～２０のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項22] 前記半導体層と前記二次元材料層との間に空隙が形成されている、請求項１～２１のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項23] 前記二次元材料層に接触するように配置された接触層をさらに備える、請求項１～２２のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項24] 前記二次元材料層は、遷移金属ダイカルコゲナイド、グラフェン、黒リン、シリセン、ゲルマネン、グラフェンナノリボンおよびボロフェンからなるグループから選択されるいずれかの材料を含む、請求項１～２３のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項25] 前記二次元材料層は、乱層構造部分を含み、

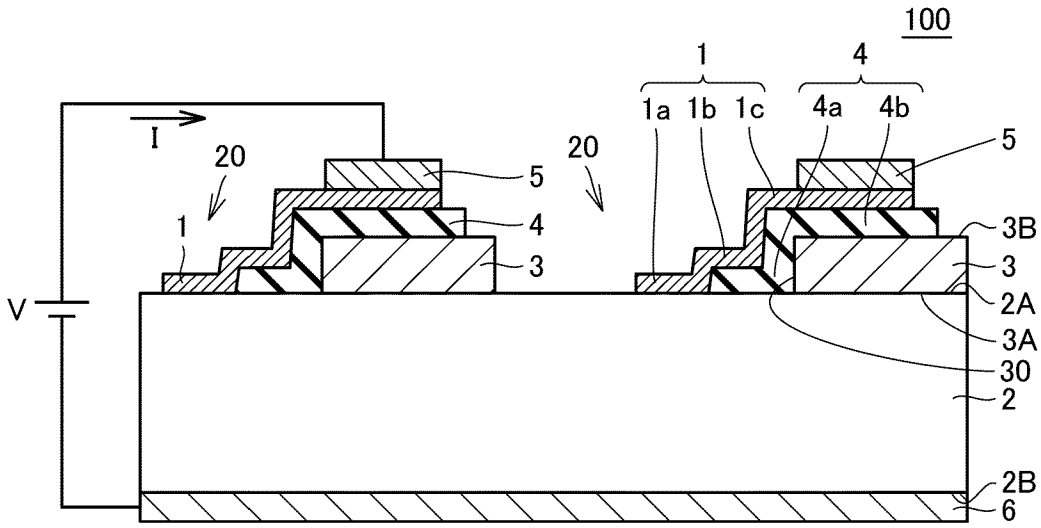
前記乱層構造部分は、少なくとも前記絶縁層上に配置されている、請求項１～２４のいずれか１項に記載の電磁波検出器。

[請求項26] 請求項１～２５のいずれか１項に記載の電磁波検出器を複数備え、

前記複数の電磁波検出器が、第１方向および第２方向の少なくともいずれかに沿って並んで配置されている、電磁波検出器アレイ。

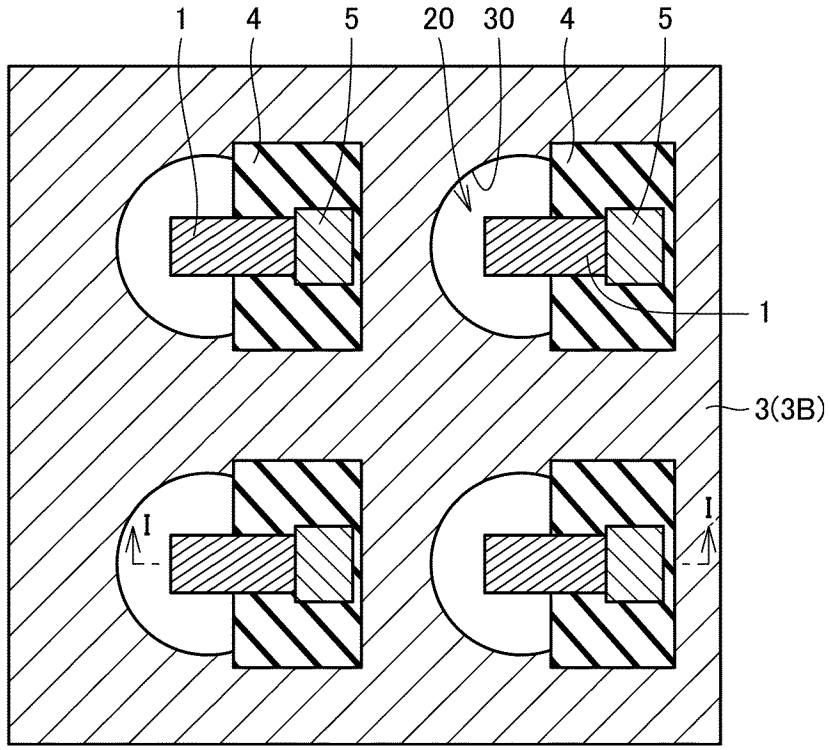
[図1]

図1


100
1
4
1a
1b
1c
4a
4b
I
20
20
5
4
3
1
V
3B
3
2A
3A
30
2
2B
6

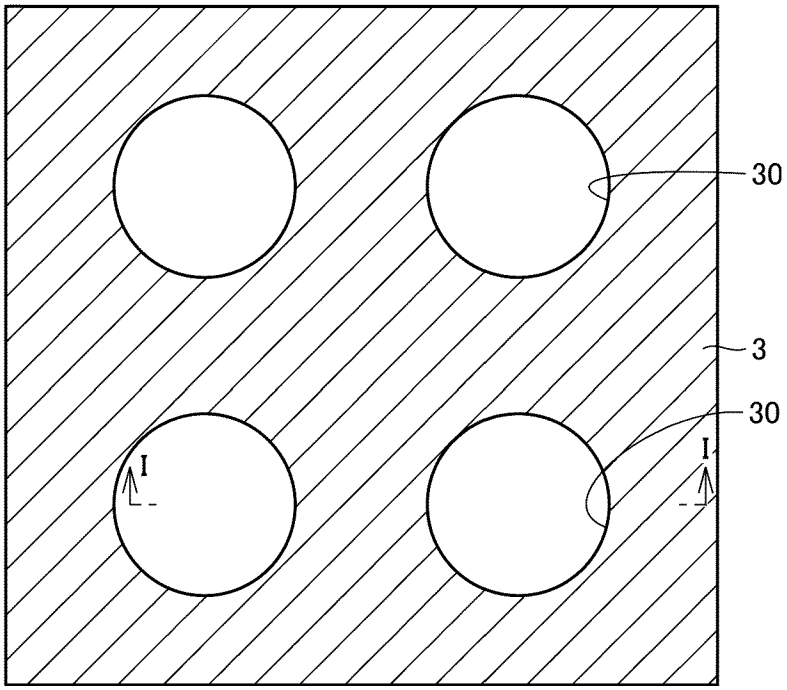
[図2]

図2


1
4
5
20
30
4
5
1
3(3B)
I
I

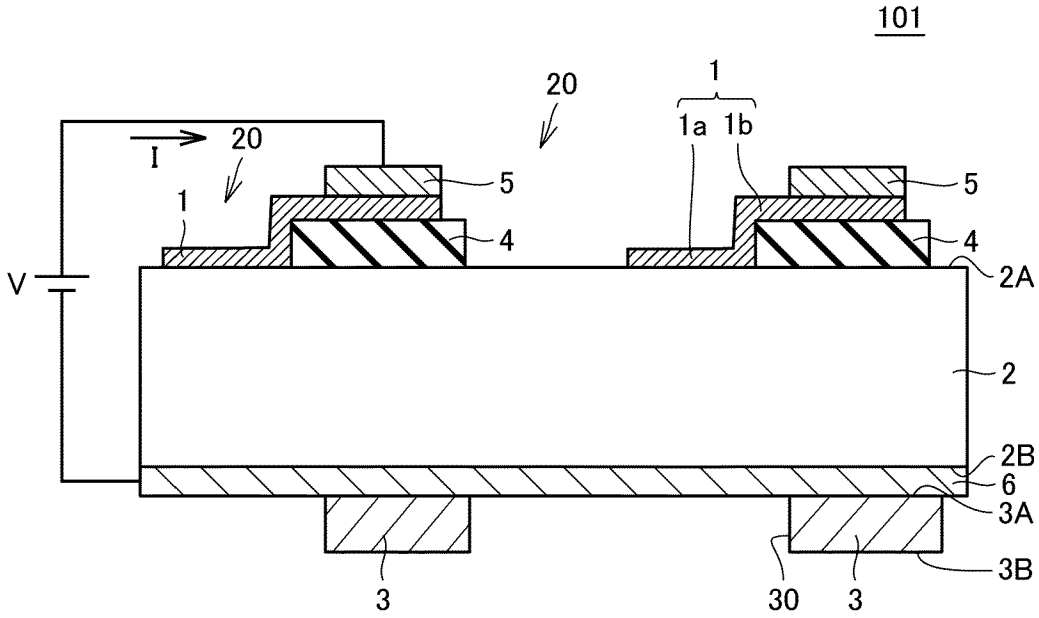
[図3]

図3



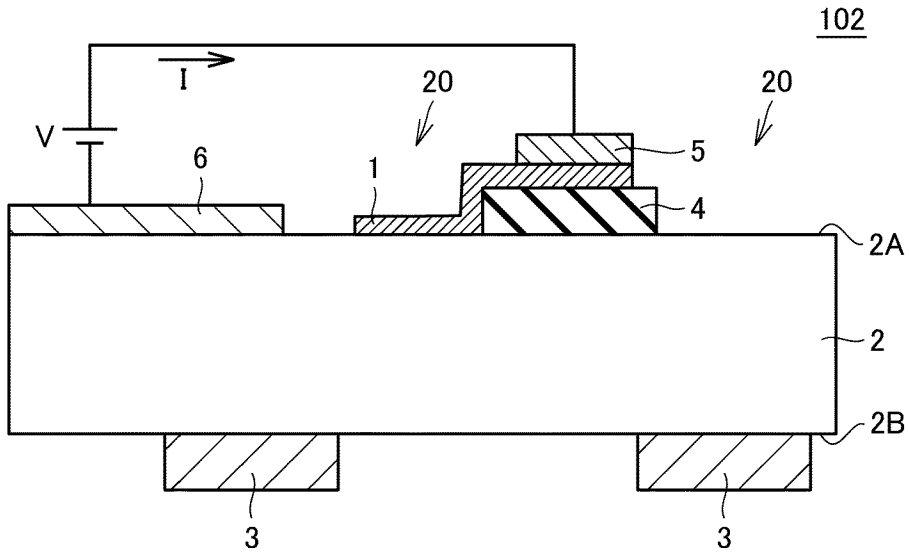
[図4]

図4



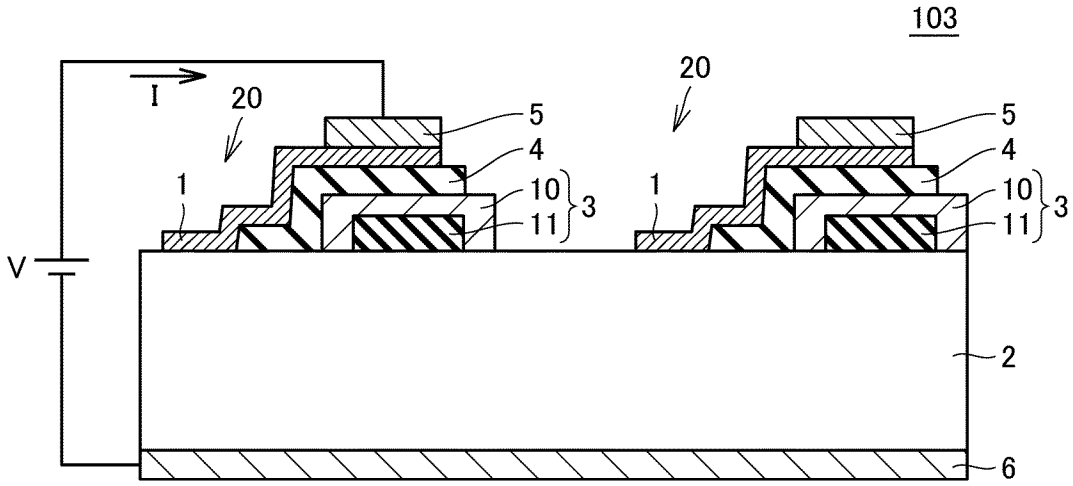
[図5]

図5



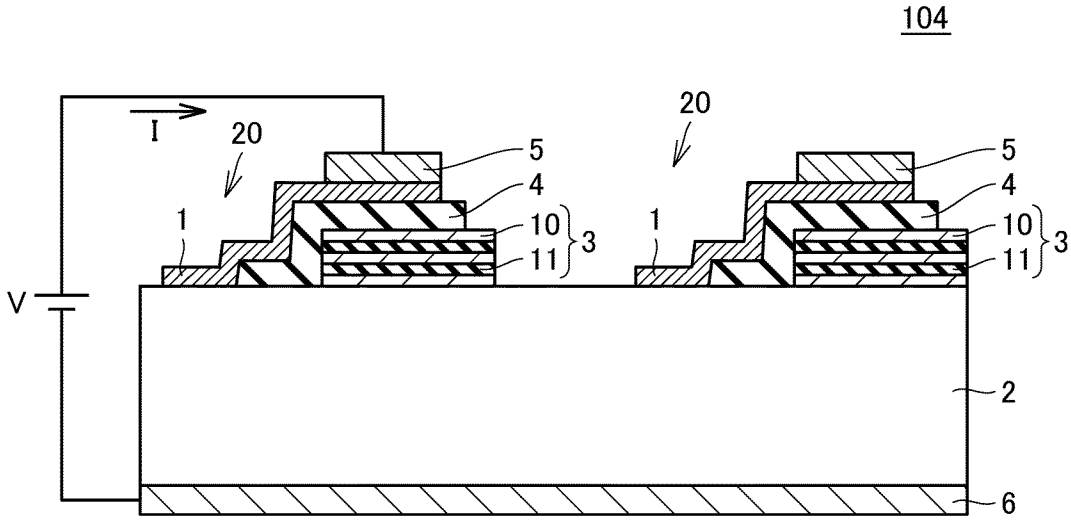
[図6]

図6



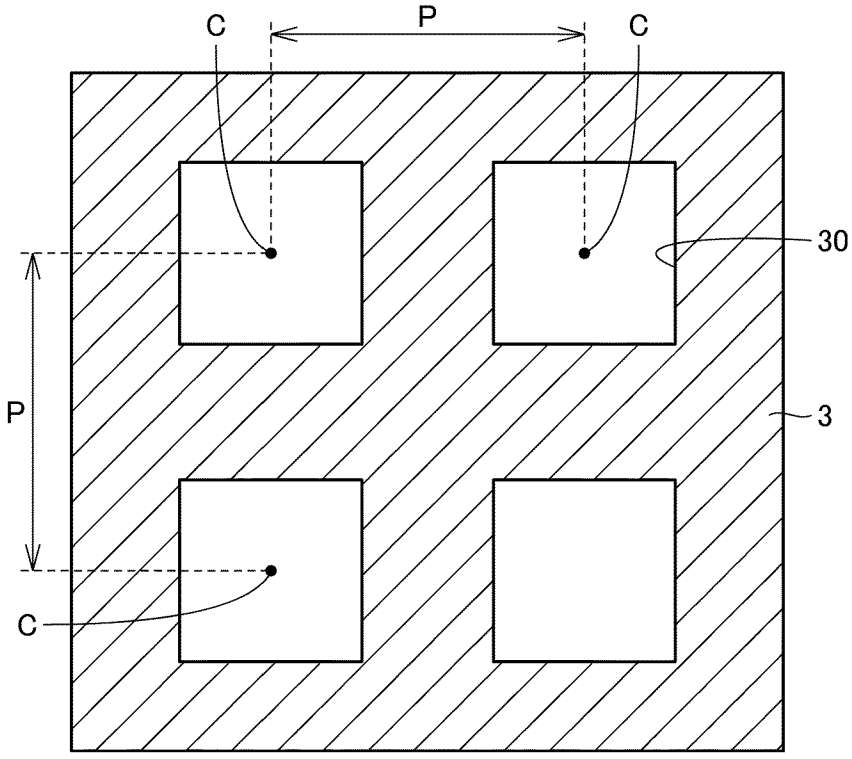
[図7]

図7



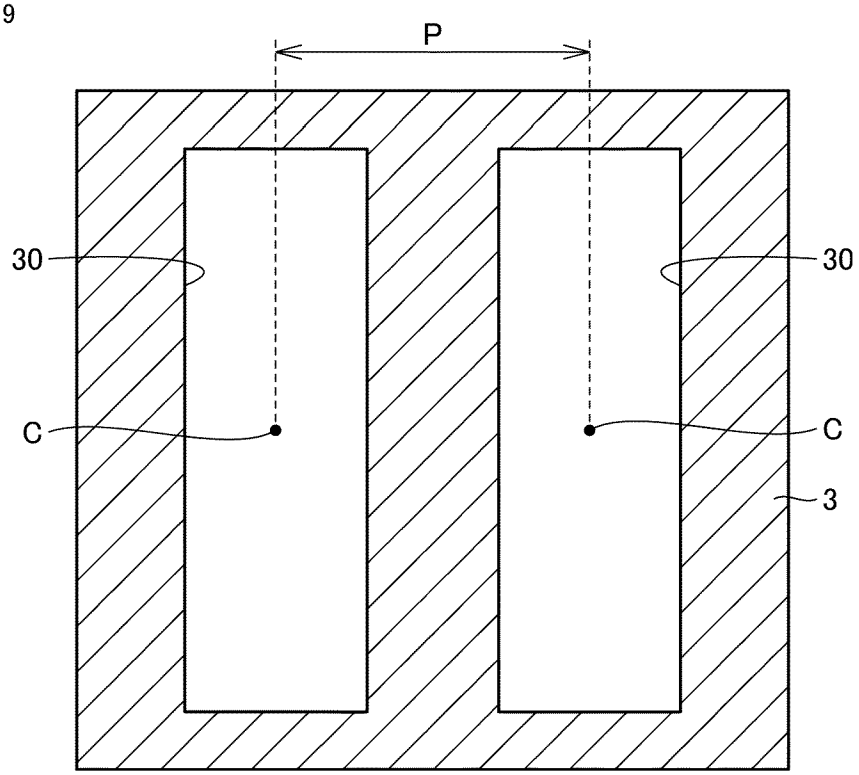
[図8]

図8



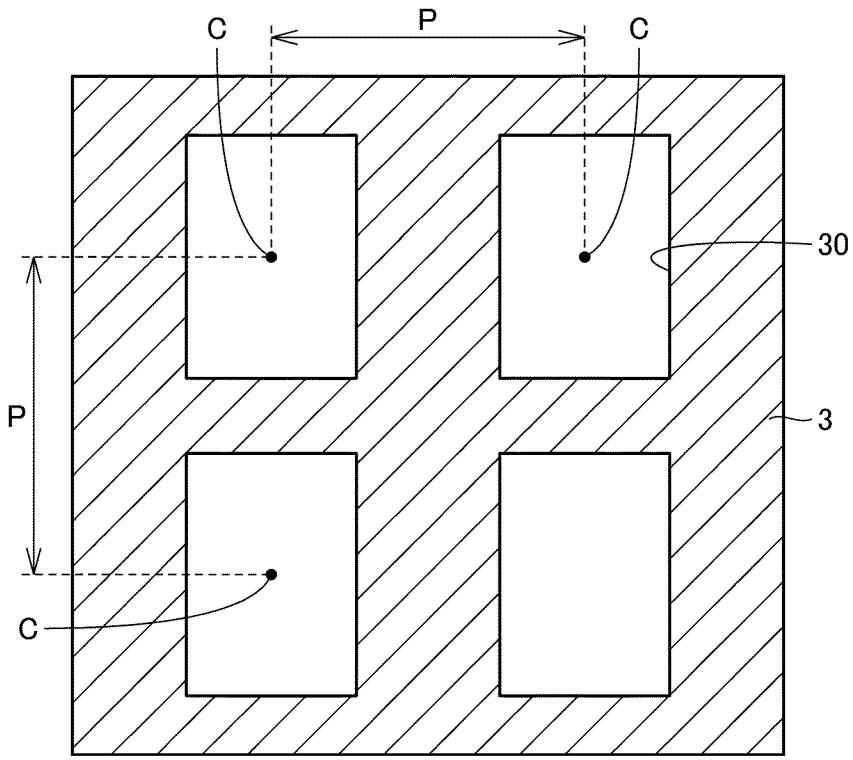
[図9]

図9



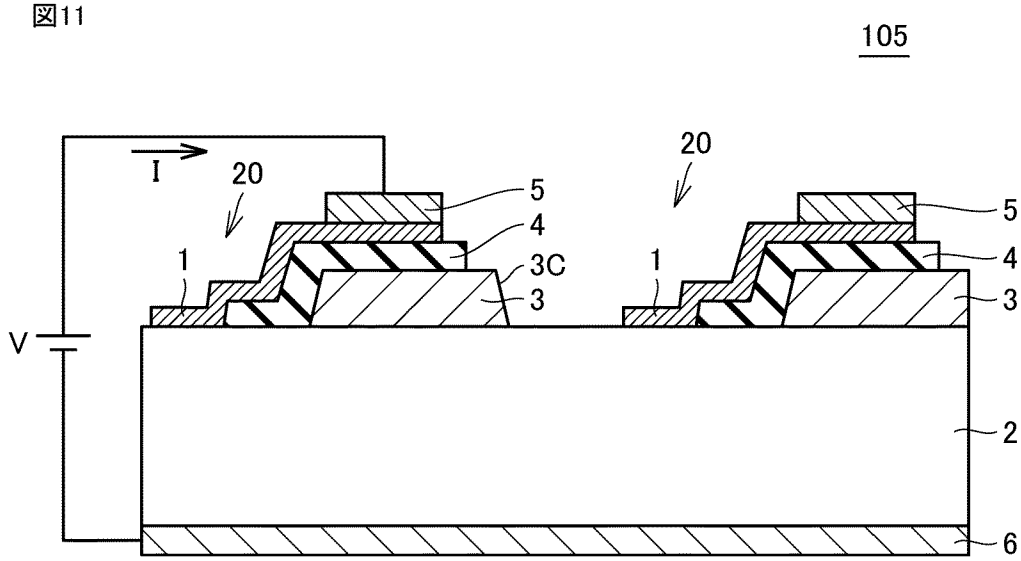
[図10]

図10



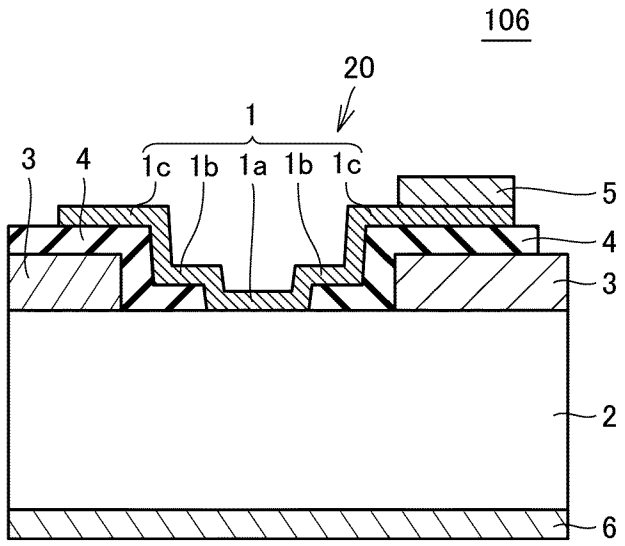
[図11]

図11



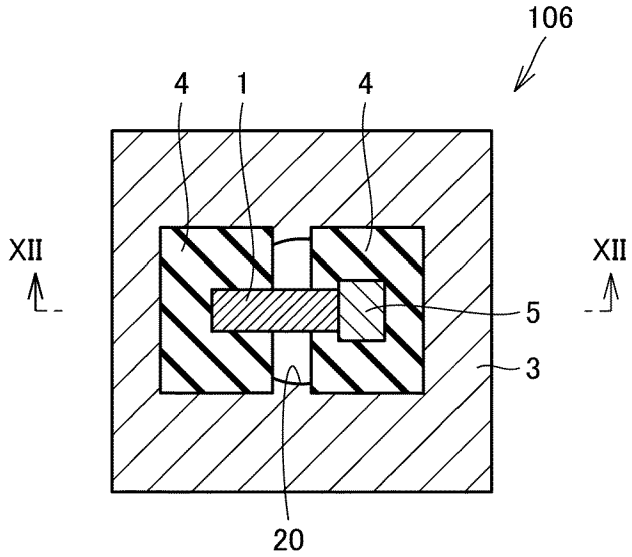
[図12]

図12



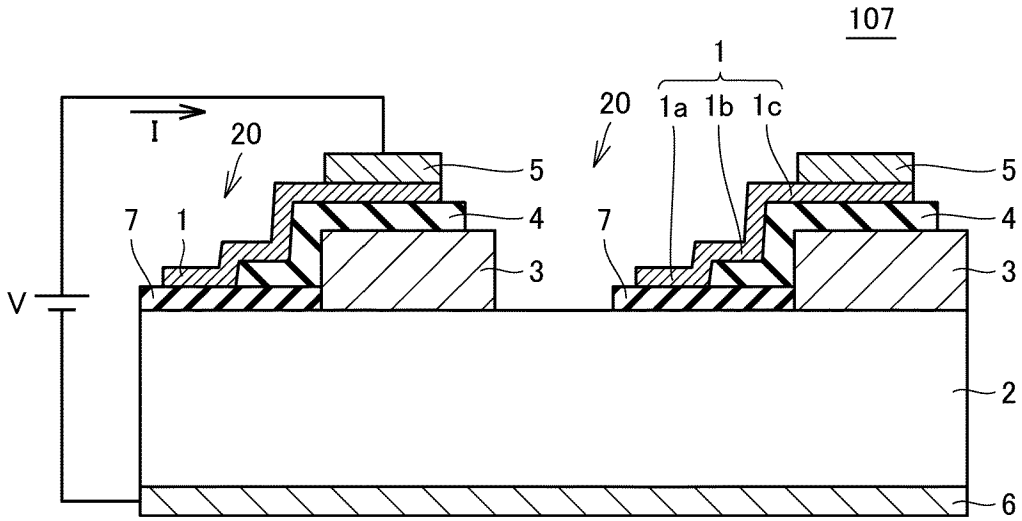
[図13]

図13



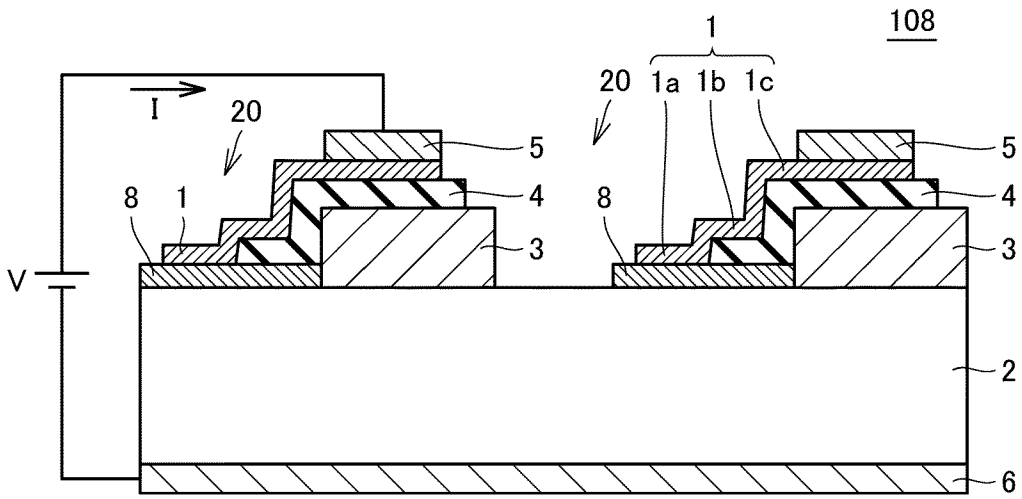
[図14]

図14



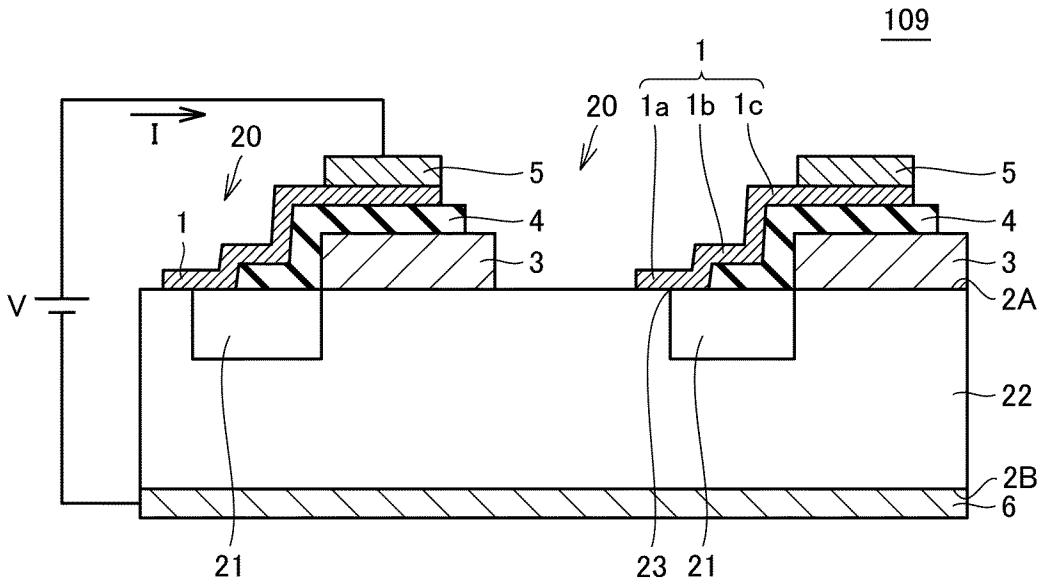
[図15]

図15



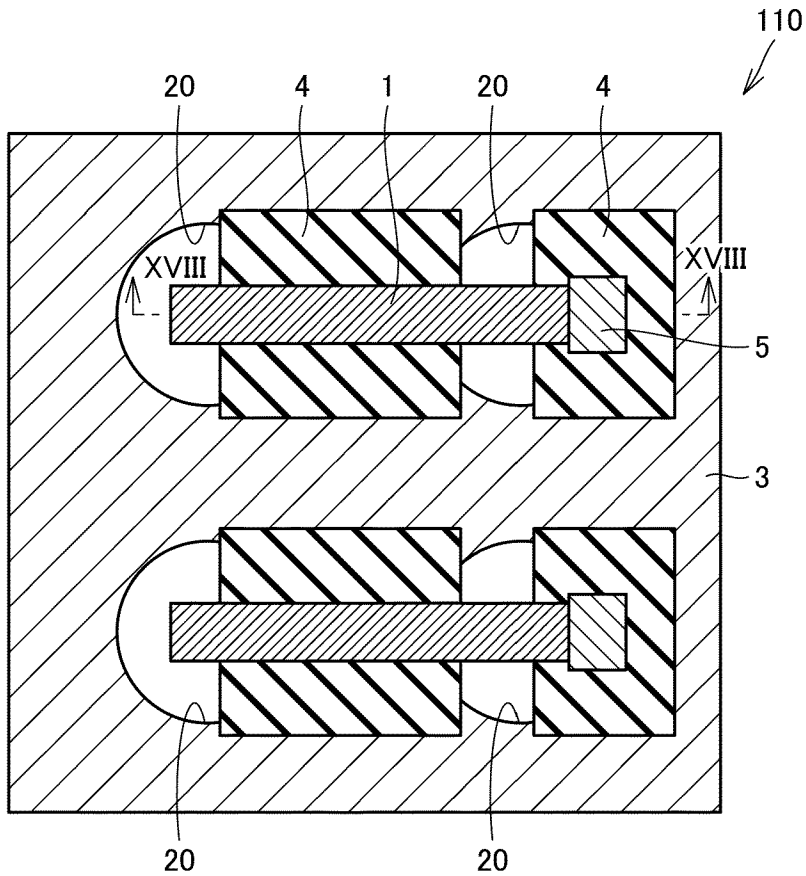
[図16]

図16



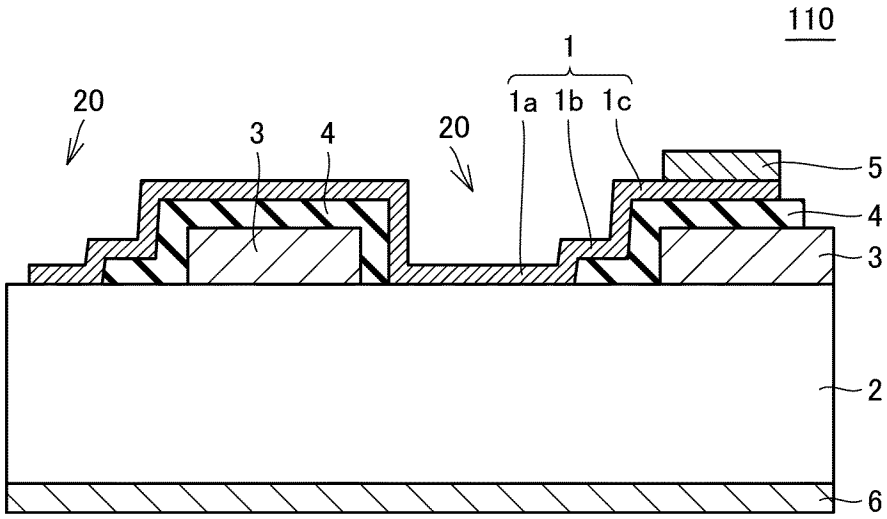
[図17]

図17



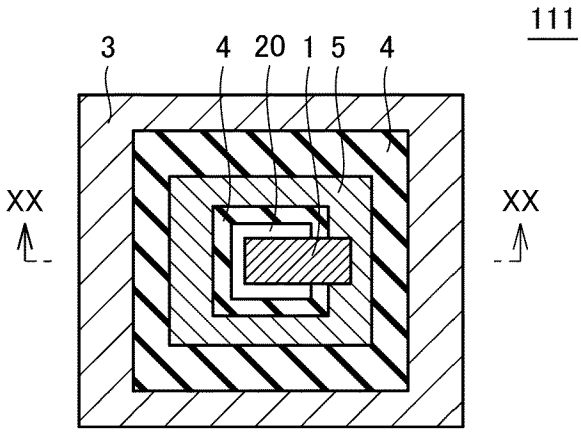
[図18]

図18



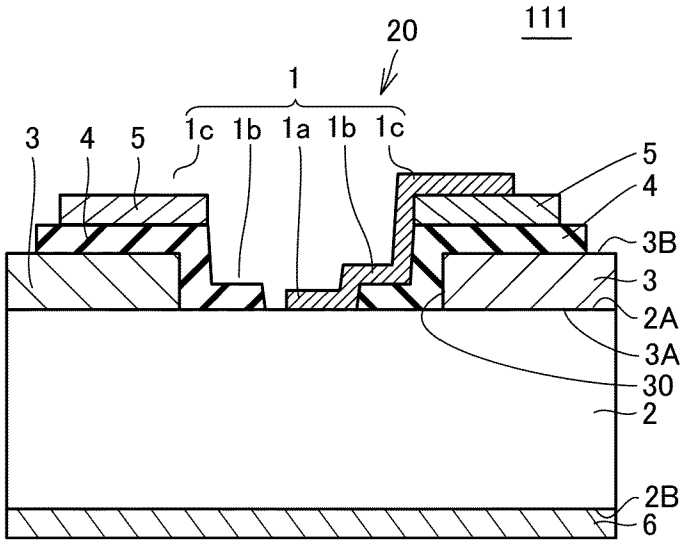
[図19]

図19



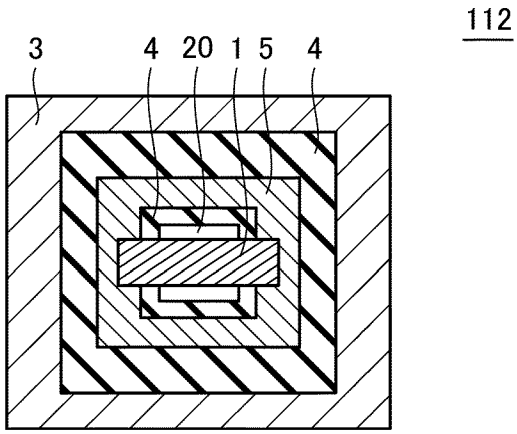
[図20]

図20



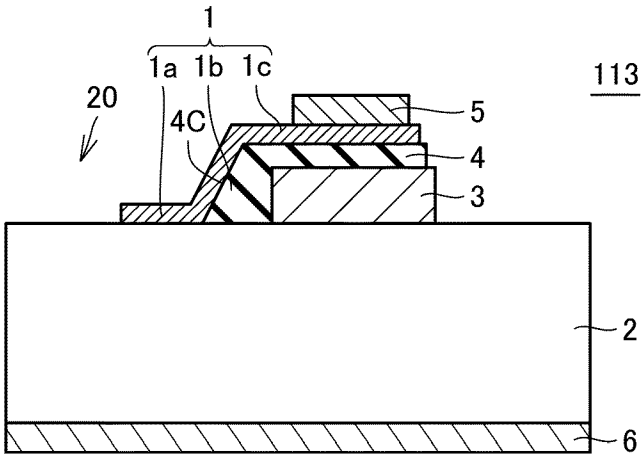
[図21]

図21



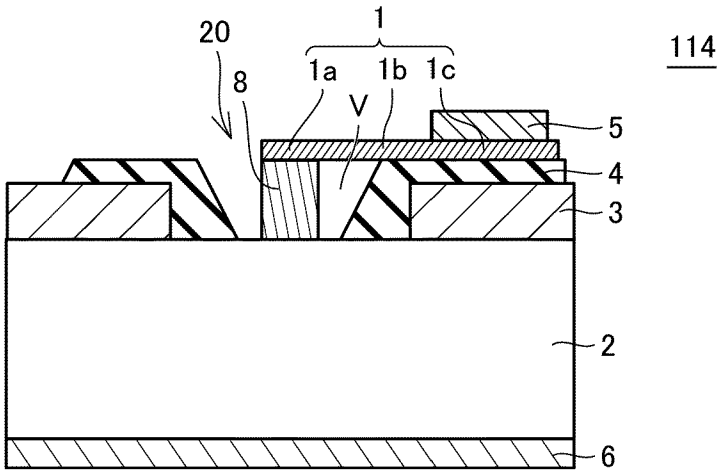
[図22]

図22



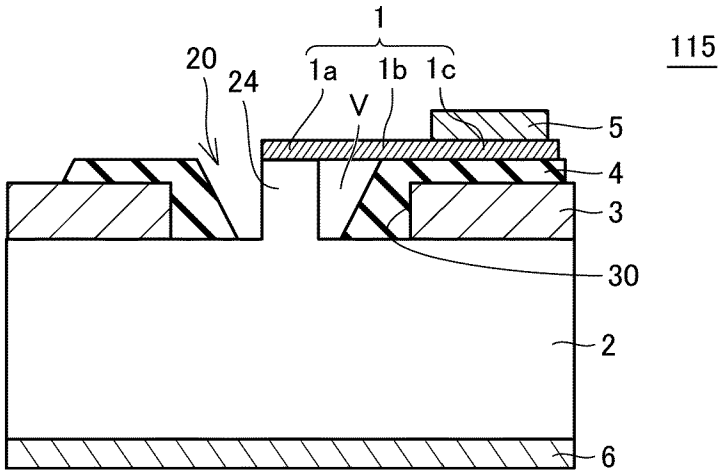
[図23]

図23



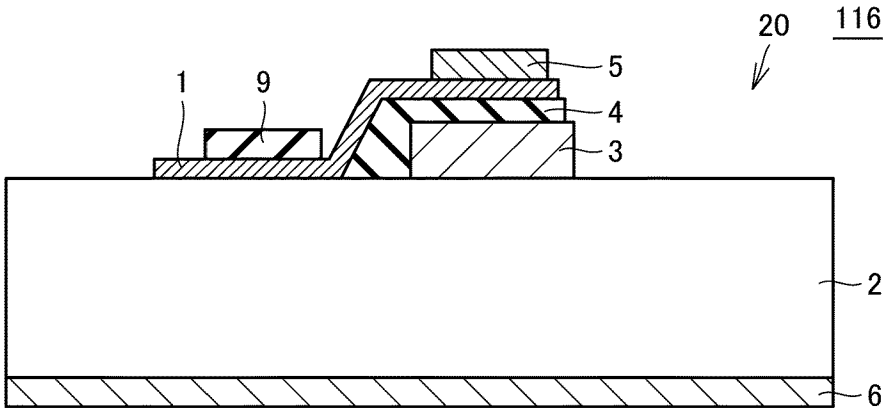
[図24]

図24



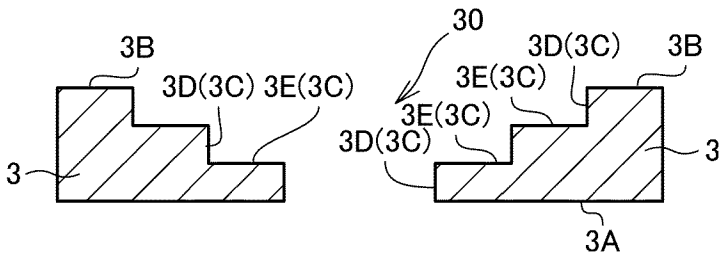
[図25]

図25



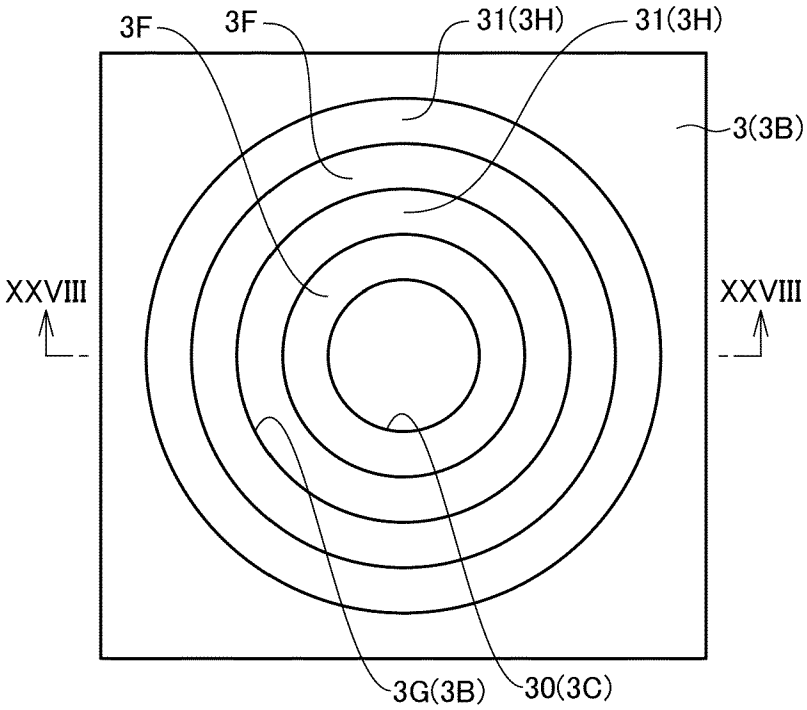
[図26]

図26



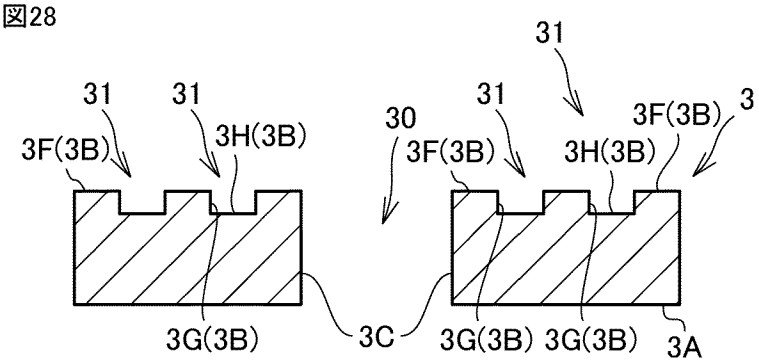
[図27]

図27



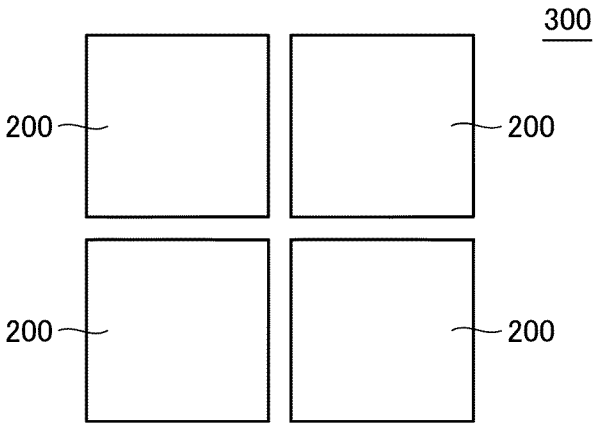
[図28]

図28



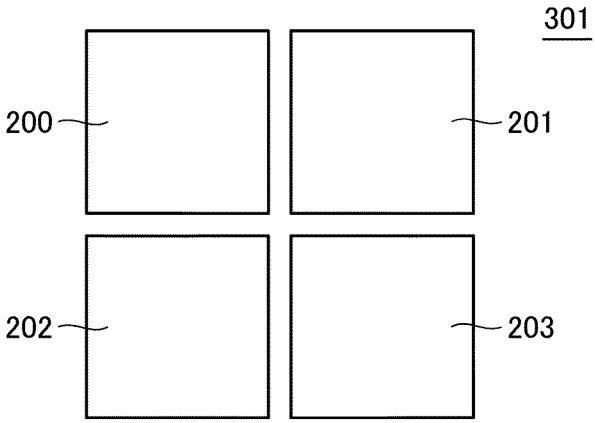
[図29]

図29



[図30]

図30



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/018235

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int. Cl. H01L31/0232(2014.01)i, H01L31/10(2006.01)i, H01L27/144(2006.01)i, H01L27/146(2006.01)i
FI: H01L31/02 D, H01L31/10 E, H01L31/10 A, H01L27/144 K, H01L27/146 D
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int. Cl. H01L31/02-31/0392, H01L31/08-31/119, H01L27/144, H01L27/146

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021
Registered utility model specifications of Japan 1996-2021
Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2020/0056992 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF MICHIGAN) 20 February 2020 (2020-02-20), entire text, all drawings	1-26
A	US 2018/0106933 A1 (UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA RESEARCH FOUNDATION, INC.) 19 April 2018 (2018-04-19), entire text, all drawings	1-26
A	CN 111341875 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 26 June 2020 (2020-06-26), entire text, all drawings	1-26

☒ 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	Date of mailing of the international search report
07.07.2021	20.07.2021
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/JP2021/018235

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 108305912 A (SHANGHAI INSTITUTE OF MICROSYSTEM AND INFORMATION TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 20 July 2018 (2018-07-20), entire text, all drawings	1-26

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2021/018235

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
US 2020/0056992 A1	20.02.2020	WO 2018/200377 A1 EP 3615471 A1	
US 2018/0106933 A1	19.04.2018	US 2019/0229223 A1	
CN 111341875 A	26.06.2020	(Family: none)	
CN 108305912 A	20.07.2018	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2021/018235

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

H01L 31/0232(2014.01)i; H01L 31/10(2006.01)i; H01L 27/144(2006.01)i; H01L 27/146(2006.01)i
FI: H01L31/02 D; H01L31/10 E; H01L31/10 A; H01L27/144 K; H01L27/146 D

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））

H01L31/02-31/0392; H01L31/08-31/119; H01L27/144; H01L27/146

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	１９７１－２０２１年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２１年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２１年

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	US 2020/0056992 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF MICHIGAN) 20.02.2020 (2020-02-20) 全文，全図	1-26
A	US 2018/0106933 A1 (UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA RESEARCH FOUNDATION, INC.) 19.04.2018 (2018-04-19) 全文，全図	1-26
A	CN 111341875 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 26.06.2020 (2020-06-26) 全文，全図	1-26
A	CN 108305912 A (SHANGHAI INSTITUTE OF MICROSYSTEM AND INFORMATION TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 20.07.2018 (2018-07-20) 全文，全図	1-26

☐ 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抵触するものではなく、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	国際調査報告の発送日
07.07.2021	20.07.2021

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
吉岡　一也 2K 4742
電話番号 03-3581-1101 内線 3255

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2021/018235

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
US 2020/0056992 A1	20.02.2020	WO 2018/200377 A1	
		EP 3615471 A1	
US 2018/0106933 A1	19.04.2018	US 2019/0229223 A1	
CN 111341875 A	26.06.2020	（ファミリーなし）	
CN 108305912 A	20.07.2018	（ファミリーなし）	