

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7562054号
(P7562054)

(45)発行日 令和6年10月4日(2024.10.4)

(24)登録日 令和6年9月26日(2024.9.26)

(51)国際特許分類 F I
H 0 1 L 31/10 (2006.01) H 0 1 L 31/10 E
H 0 1 L 31/10 A

請求項の数 12 (全32頁)

(21)出願番号	特願2024-543362(P2024-543362)	(73)特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86)(22)出願日	令和5年12月20日(2023.12.20)	(74)代理人	110001195 弁理士法人深見特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2023/045632	(72)発明者	岩川 学 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
審査請求日	令和6年7月22日(2024.7.22)	(72)発明者	福島 昌一郎 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
早期審査対象出願		(72)発明者	嶋谷 政彰 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
		(72)発明者	小川 新平

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 電磁波検出器及び電磁波検出器アレイ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1面と、前記第1面とは反対側に位置する第2面とを有する受光素子を備え、
前記受光素子は、前記第1面を有する第1半導体層と、前記第2面を有する第2半導体層とを有し、
前記第1面上に配置されており、かつ第1開口部が形成された第1絶縁層と、
前記第1開口部において前記第1半導体層と電氣的に接続され、前記第1開口部上から前記第1絶縁層上にまで延在する第1二次元材料層と、
前記第1半導体層を介さずに前記第1二次元材料層と電氣的に接続されている第1電極と、
前記第2面上に配置されており、かつ第2開口部が形成された第2絶縁層と、
前記第2開口部において前記第2半導体層と電氣的に接続され、前記第2開口部上から前記第2絶縁層上にまで延在する第2二次元材料層と、
前記第2半導体層を介さずに前記第2二次元材料層と電氣的に接続されている第2電極とを備え、
前記第1半導体層は、前記第1面とは反対側に位置する第3面をさらに有し、
前記第2半導体層は、前記第2面とは反対側に位置する第4面をさらに有し、
前記第3面と前記第4面とが互いに重なるように積層されており、
前記第1半導体層と前記第2半導体層との間に挟まれており、前記第1半導体層及び前記第2半導体層の各々と電氣的に接続されているバリア層をさらに備え、

前記バリア層は、前記第 1 半導体層の少数キャリアが前記第 1 半導体層から前記第 2 半導体層に流入することを妨げず、前記第 1 半導体層の多数キャリアが前記第 1 半導体層から前記第 2 半導体層に流入することを妨げる物性を有する、電磁波検出器。

【請求項 2】

前記第 2 半導体層は、前記第 1 半導体層とは異なる導電性を有している、請求項 1 に記載の電磁波検出器。

【請求項 3】

前記第 1 半導体層及び前記第 2 半導体層は、互いに同じ導電性を有している、請求項 1 に記載の電磁波検出器。

【請求項 4】

前記第 2 二次元材料層は、前記第 1 二次元材料層とは異なる導電性を有している、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 5】

前記第 1 二次元材料層と前記第 1 半導体層とに挟み込まれている第 1 トンネル絶縁層及び前記第 2 二次元材料層と前記第 2 半導体層とに挟み込まれている第 2 トンネル絶縁層の少なくともいずれかをさらに備える、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 6】

前記第 1 半導体層と前記第 1 二次元材料層との間を電氣的に接続する第 1 接続導電体及び前記第 2 半導体層と前記第 2 二次元材料層との間を電氣的に接続する第 2 接続導電体の少なくともいずれかをさらに備える、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 7】

前記第 1 電極、前記第 1 二次元材料層、前記第 2 電極、及び前記第 2 二次元材料層の少なくともいずれかの表面には、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンが設けられている、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 8】

平面視において、前記第 1 電極の面積は、前記第 1 開口部の面積よりも小さい、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 9】

平面視において、前記第 2 電極の面積は、前記第 1 電極の面積よりも大きい、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 10】

前記第 1 二次元材料層及び前記第 2 二次元材料層の少なくともいずれかは、乱層構造部分を含む、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 11】

前記第 1 二次元材料層及び前記第 2 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、ワイル半金属、グラフェンナノリボンおよびポ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 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 12】

請求項 1 ~ 3 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は、前記第 1 面に沿った方向に並んで配置されている、電磁波検出器アレイ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、電磁波検出器及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

10

20

30

40

50

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。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】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】

しかしながら、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状態は、検出器の感度は半導体層の量子効率に依存する。そのため、十分な光キャリアの増幅ができず、検出器の高感度化が困難である。

20

【0005】

本開示では、上記検出器と比べて検出感度が高める技術が提案される。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示に係る電磁波検出器は、第1面と第1面とは反対側に位置する第2面とを有する第1半導体層と、第1面上に配置されており、かつ第1開口部が形成された第1絶縁層と、第1開口部において第1半導体層と電気的に接続され、第1開口部上から第1絶縁層上にまで延在する第1二次元材料層と、第1半導体層を介さずに第1二次元材料層と電気的に接続されている第1電極と、第3面と第3面とは反対側に位置する第4面とを有する第2半導体層と、第3面上に配置されており、かつ第2開口部が形成された第2絶縁層と、第2開口部において第2半導体層と電気的に接続され、第2開口部上から第2絶縁層上にまで延在する第2二次元材料層と、第2半導体層を介さずに第2二次元材料層と電気的に接続されている第2電極とを備える。第1半導体層及び第2半導体層は、第2面と第4面とが互いに重なるように積層されている。

30

【発明の効果】

【0007】

本開示にしたがうと、上記検出器と比べて検出感度が高めることができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】実施の形態1に係る電磁波検出器100の断面模式図である。

40

【図2】実施の形態1に係る電磁波検出器100の平面模式図である。

【図3】実施の形態1に係る電磁波検出器100の底面模式図である。

【図4】実施の形態1に係る電磁波検出器の製造方法を説明するためのフローチャートである。

【図5】実施の形態2に係る電磁波検出器101の断面模式図である。

【図6】実施の形態3に係る電磁波検出器102の断面模式図である。

【図7】実施の形態4に係る電磁波検出器103の断面模式図である。

【図8】実施の形態5に係る電磁波検出器104の平面模式図である。

【図9】実施の形態5に係る電磁波検出器104の断面模式図である。

【図10】実施の形態5に係る電磁波検出器104の変形例の平面模式図である。

50

【図 1 1】実施の形態 5 に係る電磁波検出器 1 0 4 の変形例の断面模式図である。

【図 1 2】実施の形態 6 に係る電磁波検出器 1 0 5 の平面模式図である。

【図 1 3】実施の形態 6 に係る電磁波検出器 1 0 5 の断面模式図である。

【図 1 4】実施の形態 7 に係る電磁波検出器 1 0 6 の平面模式図である。

【図 1 5】実施の形態 7 に係る電磁波検出器 1 0 6 の底面模式図である。

【図 1 6】実施の形態 7 に係る電磁波検出器 1 0 6 の断面模式図である。

【図 1 7】実施の形態 8 に係る電磁波検出器 1 0 7 の断面模式図である。

【図 1 8】実施の形態 9 に係る電磁波検出器アレイを説明するための平面模式図である。

【図 1 9】実施の形態 9 に係る電磁波検出器アレイの変形例を示す平面模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、実施の形態について図に基づいて説明する。なお、以下では、同一または相当する部分に同一の符号を付すものとし、重複する説明は繰り返さない。

【0010】

以下に説明される実施の形態において、図は模式的なものであり、機能または構造を概念的に説明するものである。また、以下に説明される実施の形態により本開示が限定されるものではない。特記される場合を除いて、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、同一の符号が付されたものは、上述のように同一また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】

以下に説明される実施の形態では、電磁波として、可視光または赤外光を検出する方式の電磁波検出器の構成が説明されるが、本開示の電磁波検出器が検出する電磁波は可視光および赤外光に限定されない。以下に説明される実施の形態は、可視光および赤外光に加えて、例えば、X線、紫外光、近赤外光、テラヘルツ（THz）波、マイクロ波などの電波を検出する検出器としても有効である。なお、以下に説明される実施の形態では、これらの光および電波を総称して電磁波と記載する。

【0012】

以下では、二次元材料層の材料として、グラフェンを例に説明を行っているが、二次元材料層を構成する材料はグラフェンに限られない。たとえば、二次元材料層の材料としては、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八ニカム構造）、ゲルマネン（ゲルマニウム原子による二次元八ニカム構造）等の材料を適用することができる。遷移金属ダイカルコゲナイドとしては、たとえば、 MoS_2 、 WS_2 、 WSe_2 等の遷移金属ダイカルコゲナイドが挙げられる。

【0013】

これらの材料は、グラフェンと類似の構造を有しており、原子を二次元面内に単層で配列することが可能な材料である。したがって、これらの材料を二次元材料層に適用した場合においても、二次元材料層にグラフェンを適用した場合と同様の作用効果を得ることができる。

【0014】

二次元材料層は、単層に配列された二次元材料（例えば単層グラフェン）により構成されていてもよい。二次元材料層は、多層に配列された二次元材料（例えば多層グラフェン）により構成されていてもよい。後者の二次元材料層では、光電変換効率が増加し、電磁波検出器の感度は高くなる。また、後者の二次元材料層にはバンドギャップが形成される。その結果、後者の二次元材料層は、予め定められた波長域の電磁波が二次元材料層に入射したときにのみ二次元材料層において光電変換が行われるように、設けられ得る。また、二次元材料層中に含まれる二次原材料の層数が増加すると、チャネル領域でのキャリアの移動度は低下するが、当該二次元材料層は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、多層に配列された二次元材料を含む二次元材料層を備える電磁波検出器では、電磁波の検出感度を高められる

10

20

30

40

50

。なお、二次元材料層中において互いに積層されている複数のグラフェンのうち、任意の2層のグラフェン間の六方格子の格子ベクトルの向きは、互いに一致していてもよいし、一致していなくてもよい。

【0015】

二次元材料層が多層グラフェンにより構成されている場合、積層方位角度が自然状態のグラファイトに見られるAB積層のみではなく、乱層積層でもよい。乱層積層はランダム積層、turbostratic grapheneとも呼ばれる。乱層構造部分の作製方法は、適宜に決められてもよい。例えば、CVD法で作製された単層のグラフェンが複数回転写され、多層グラフェンが積層されることで乱層構造部分が形成されてもよい。また、グラフェン上にエタノールまたはメタンなどが炭素源として配置され、グラフェンがCVD法によって成長することで乱層構造部分が形成されてもよい。また、積層方位角度がモアレを生じる角度であってもよい。この場合、フラットバンドが形成され、広い範囲の波長域において入射光と結合することができるため、光検出器効率が向上する。さらに積層方位角度によってモアレポテンシャルを形成することにより、特定の波長域を選択的に検出することができる。

10

【0016】

また、以下では、二次元材料層について、p型又はn型との用語が用いられる場合がある。以下の実施の形態では、真性状態の二次元材料層よりも正孔が多いものをp型、真性状態の二次元材料層よりも電子が多いものをn型と呼ぶ。二次元材料層は、不純物がドーブされていない真性であってもよいし、p型又はn型の導電性を有していてもよい。

20

【0017】

また、以下では、二次元材料層に接する部材の材料について、n型又はp型の用語が用いられる場合がある。ここでは、例えば、n型材料とは電子供与性を有する材料、p型材料とは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型と呼ぶ場合もある。これらの材料としては、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。

【0018】

また、二次元材料層が電極と接触している場合、電極から二次元材料層へキャリアがドーブされる。例えば、電極の材料として金(Au)を用いた場合、二次元材料層とAuとの仕事関数の差から、電極近傍の二次元材料層に正孔がドーブされる。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、電極から二次元材料層にドーブされた正孔の影響により、二次元材料層のチャンネル領域内に流れる電子の移動度が低下し、二次元材料層と電極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るおそれがある。特に、二次元材料層が単層グラフェンにより構成されている場合、二次元材料層が多層グラフェンにより構成されている場合と比べて、電極から注入されるキャリアのドーブ量が大きい。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、二次元材料層の全体が単層グラフェンにより構成されている場合、電磁波検出器の性能が低下するおそれがある。そこで、二次原材料層のうち少なくとも電極との接触領域は、多層グラフェンにより構成されていてもよい。多層グラフェンでは、単層グラフェンに比べて、電極からのキャリアドーピングが小さくなる。そのため、二次元材料層と電極との間のコンタクト抵抗の増加を抑制できる。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できる。

30

40

【0019】

また、二次元材料層は、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)を含んでいてもよい。二次元材料層は、例えば、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(例えば、グラフェンメタマテリアル)のいずれかであってもよい

50

。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として構成されている二次元材料層では、プラズモン共鳴が発生し得る。この結果、電磁波検出器の感度を向上できる。

【 0 0 2 0 】

なお、本明細書では、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。本明細書では、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。

10

【 0 0 2 1 】

本明細書において、絶縁層と表記されるものは、トンネル電流が生じない厚さを有する絶縁膜の層である。

【 0 0 2 2 】

実施の形態 1 .

図 1 は、実施の形態 1 に係る電磁波検出器 1 0 0 の断面模式図である。図 1 には、電磁波検出器 1 0 0 の典型的な電氣的接続も示されている。図 2 は、図 1 に示される電磁波検出器 1 0 0 の平面模式図である。図 3 は、図 1 に示される電磁波検出器 1 0 0 の底面模式図である。

20

【 0 0 2 3 】

図 1 ~ 図 3 に示されるように、電磁波検出器 1 0 0 は、第 1 二次元材料層 1 1 と、第 1 電極 2 1 と、第 2 電極 2 2 と、第 1 絶縁層 3 1 と、第 2 絶縁層 3 2 と、受光素子 4 0 とを主に備える。

【 0 0 2 4 】

受光素子 4 0 は、第 1 面 4 1 A と、第 1 面 4 1 A とは反対側に位置する第 2 面 4 2 A とを有する。受光素子 4 0 は、第 1 面 4 1 A を有する第 1 半導体層 4 1 と、第 2 面 4 2 A を有する第 2 半導体層 4 2 とを含む。

【 0 0 2 5 】

第 1 半導体層 4 1 は、第 1 面 4 1 A とは反対側に位置する第 3 面 4 1 B をさらに有している。第 1 二次元材料層 1 1、第 1 電極 2 1、及び第 1 絶縁層 3 1 は、第 1 面 4 1 A 上に配置されている。以下では、第 1 二次元材料層 1 1、第 1 電極 2 1、及び第 1 絶縁層 3 1 の各々について、それぞれに対して第 1 半導体層 4 1 とは反対側に位置する部分を、各々の上部と記載し、それぞれに対して第 1 半導体層 4 1 側に位置する部分を、各々の下部と記載する。第 1 面 4 1 A と直交する方向から第 1 面 4 1 A を見る視点、又は第 2 面 4 2 A と直交する方向から第 2 面 4 2 A を見る視点を、平面視と記載する。

30

【 0 0 2 6 】

第 2 半導体層 4 2 は、第 2 面 4 2 A とは反対側に位置する第 4 面 4 2 B をさらに有している。第 2 二次元材料層 1 2、第 2 電極 2 2、及び第 2 絶縁層 3 2 は、第 2 面 4 2 A 上に配置されている。以下では、第 2 二次元材料層 1 2、第 2 電極 2 2、及び第 2 絶縁層 3 2 の各々について、それぞれに対して第 2 半導体層 4 2 とは反対側に位置する部分を、各々の上部と呼び、それぞれに対して第 2 半導体層 4 2 側に位置する部分を、各々の下部と呼ぶ。

40

【 0 0 2 7 】

第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 は、第 3 面 4 1 B と第 4 面 4 2 B とが互いに重なるように積層されている。第 3 面 4 1 B は、第 4 面 4 2 B と対向している。例えば、第 3 面 4 1 B の全面が第 4 面 4 2 B の全面と重なっている。なお、第 3 面 4 1 B は第 4 面 4 2 B の少なくとも一部と重なっていればよい。

【 0 0 2 8 】

受光素子 4 0 は、電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の電磁波に感度を有し、検出波長の電

50

磁波が照射されたときに光電変換が行われる素子である。

【 0 0 2 9 】

電磁波検出器 1 0 0 の受光素子 4 0 は、p n 接合フォトダイオードを含む。第 2 半導体層 4 2 の第 4 面 4 2 B は、第 1 半導体層 4 1 の第 3 面 4 1 B と接触している。第 1 半導体層 4 1 は、第 1 導電型を有している。第 2 半導体層 4 2 は、第 1 導電型とは異なる第 2 導電型を有している。例えば、第 1 半導体層 4 1 の第 1 導電型が p 型であり、第 2 半導体層 4 2 の第 2 導電型が n 型であってもよい。第 1 半導体層 4 1 の第 1 導電型が n 型であり、第 2 半導体層 4 2 の第 2 導電型が p 型であってもよい。第 1 半導体層 4 1 の第 3 面 4 1 B と第 2 半導体層 4 2 の第 4 面 4 2 B との界面には、p n 接合が形成される。

【 0 0 3 0 】

なお、受光素子 4 0 は、p i n フォトダイオード、ショットキーフォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、又はフォトトランジスタを含んでいてもよい。

【 0 0 3 1 】

第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 を構成する材料は、電磁波検出器 1 0 0 の検出波長に応じて任意に選択され得る。第 1 半導体層 4 1 を構成する材料は、第 2 半導体層 4 2 を構成する材料と同じであってもよい。第 1 半導体層 4 1 を構成する材料は、第 2 半導体層 4 2 を構成する材料と異なってもよい。後者の場合、電磁波検出器 1 0 0 において多波長の検知が可能となる。

【 0 0 3 2 】

第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 を構成する材料は、例えば、S i、ゲルマニウム (G e)、I I I - V 族又は I I - V 族半導体などの化合物半導体、水銀カドミウムテルル (H g C d T e)、インジウムアンチモン (I n S b)、鉛セレン (P b S e)、鉛硫黄 (P b S)、カドミウム硫黄 (C d S)、窒化ガリウム (G a N)、シリコンカーバイド (S i C)、リン化ガリウム (G a P)、ヒ化インジウムガリウム (I n G a A s)、ヒ化インジウム (I n A s)、又は、量子井戸又は量子ドットを含む基板、T y p e I I 超格子などの材料の単体又はそれらを組み合わせた材料である。

【 0 0 3 3 】

電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 0 . 1 μ m 以上 0 . 6 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、G a P を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 0 . 2 μ m 以上 1 . 1 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、S i を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 0 . 8 μ m 以上 1 . 8 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、G e を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 0 . 7 μ m 以上 2 . 5 5 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、I n G a A s を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 1 . 0 μ m 以上 3 . 1 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、I n A s を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 1 . 0 μ m 5 . 5 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、I n S b を含んでいてもよい。電磁波検出器 1 0 0 の検出波長の範囲が 2 . 0 μ m 以上 1 6 . 0 μ m 以下である場合、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の少なくともいずれかを構成する材料は、H g C d T e を含んでいてもよい。

【 0 0 3 4 】

第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々の電気抵抗率が 1 0 0 \cdot c m 以下になるように、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々に不純物がドーピングされることが好ましい。第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々が高濃度にドーピングされることで、キャリアの第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々中での移動速度 (読み出し速度) が速くなる。この結果、電磁波検出器 1 0 0 の応答速度が向上する。

【 0 0 3 5 】

10

20

30

40

50

第1半導体層41及び第2半導体層42の各々の厚さは、10µm以下であることが好ましい。第1半導体層41及び第2半導体層42の各々の厚さを薄くすることで、pn接合界面と第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12との間の距離が短くなり、pn接合界面で発生した光キャリアの失活が少なくなる。この結果、電磁波検出器を高感度化できる。

【0036】

第1絶縁層31は、第1半導体層41の第1面41A上に配置されている。第1絶縁層31の下部表面は、第1半導体層41の第1面41Aに接触している。第1絶縁層31の上部表面は、例えば、後述する第1二次元材料層11の第3部分11c及び第1電極21の各々の下部表面と接触している。第1絶縁層31には、第1開口部31Aが形成されている。第1開口部31Aは、第1面41Aの一部を露出させる。

10

【0037】

第2絶縁層32は、第2半導体層42の第2面42A上に配置されている。第2絶縁層32の下部表面は、第2半導体層42の第2面42Aに接触している。第2絶縁層32の上部表面は、例えば、後述する第2二次元材料層12の第6部分12c及び第2電極22の各々の下部表面と接触している。第2絶縁層32には、第2開口部32Aが形成されている。第2開口部32Aは、第2面42Aの一部を露出させる。

【0038】

第1絶縁層31及び第2絶縁層32を構成する材料は、電気絶縁性を有する任意の材料であればよいが、例えば酸化ケイ素(SiO₂)を含む。第1絶縁層31を構成する材料は、例えば、SiO₂、オルトケイ酸テトラエチル(Si(OC₂H₅)₄)、窒化ケイ素(Si₃N₄)、酸化ハフニウム(HfO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化ニッケル(NiO)、窒化ボロン(BN)(ボロンナイトライド)、及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いずれかを含む。例えば、窒化ボロンの原子配列はグラフェンのそれと似ているため、窒化ボロンがグラフェンからなる二次元材料層と接しても電荷の移動度に悪影響を与えない。そのため、第1絶縁層31及び第2絶縁層32が電子移動度などの第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の性能を阻害することを抑制する観点から、窒化ボロンは第1絶縁層31及び第2絶縁層32を構成する材料に好適である。

20

【0039】

第1絶縁層31の厚さは、第1二次元材料層11の第1絶縁層31上に位置する領域(後述する第2部分11b及び第3部分11c)及び第1電極21と第1半導体層41との間にトンネル電流が生じない限りにおいて、特に制限されない。後述する光ゲート効果を高めて第1二次元材料層11に生じる電界変化の程度を大きくする観点から、第1絶縁層31の厚さは、可能な限り薄いことが好ましい。

30

【0040】

第2絶縁層32の厚さは、第2二次元材料層12の第2絶縁層32上に位置する領域(後述する第5部分12b及び第6部分12c)及び第2電極22と第2半導体層42との間にトンネル電流が生じない限りにおいて、特に制限されない。後述する光ゲート効果を高めて第2二次元材料層12に生じる電界変化の程度を大きくする観点から、第2絶縁層32の厚さは、可能な限り薄いことが好ましい。

40

【0041】

第1電極21は、第1絶縁層31の上部表面上に配置されている。第1電極21は、例えば第1二次元材料層11の下部に形成されている。第2電極22は、第2絶縁層32の上部表面上に配置されている。第2電極22は、例えば第2二次元材料層12の下部に形成されている。なお、第1電極21は、第1二次元材料層11の上部に形成されていてもよい。第2電極22は、第2二次元材料層12の上部に形成されていてもよい。第1電極21は、例えば第1面41Aと直交する方向において第2電極22と重なるように配置されている。なお、第1電極21は、第1面41Aと直交する方向において第2電極22と重ならないように配置されていてもよい。

50

【 0 0 4 2 】

第1電極21および第2電極22を構成する材料は、導電性を有する任意の材料であればよいが、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)、及びパラジウム(Pd)からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。また、第1電極21と第1絶縁層31との間、及び第2電極22と第2絶縁層32との間の少なくともいずれかには、これらの間の密着性を高めるための図示しない密着層が形成されていてもよい。密着層を構成する材料は、特に制限されないが、例えばクロム(Cr)及びチタン(Ti)の少なくともいずれかを含んでいてもよい。

【 0 0 4 3 】

図2に示されるように、平面視において、第1電極21の面積は、例えば第1開口部31Aの面積と同等あるいはそれよりも大きい。図3に示されるように、平面視において、第2電極22の面積は、例えば第2開口部32Aの面積と同等あるいはそれよりも大きい。

10

【 0 0 4 4 】

図1に示されるように、第1組の第1電極21及び第2電極22間には、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12にバイアス電圧Vを印加するための電源回路が電氣的に接続される。電源回路は、電圧源PWと、電流計IMとを含んでいる。電圧源PWは、第1電極21及び第2電極22間に上記バイアス電圧Vを印加する。電流計IMは、第1電極21及び第2電極22間に上記バイアス電圧Vが印加されたときに流れる電流Iを検出する。

【 0 0 4 5 】

第1二次元材料層11は、第1開口部31Aにおいて第1半導体層41と電氣的に接続されている。第1二次元材料層11は、第1開口部31A上から第1絶縁層31上にまで延在する。

20

【 0 0 4 6 】

第2二次元材料層12は、第2開口部32Aにおいて第2半導体層42と電氣的に接続されている。第2二次元材料層12は、第2開口部32A上から第2絶縁層32上にまで延在する。

【 0 0 4 7 】

第1二次元材料層11は、第1半導体層41と電氣的に接続されている第1部分11aと、第1電極21と電氣的に接続されている第2部分11bと、第1部分11aと第2部分11bとの間を電氣的に接続している第3部分11cとを有している。第2部分11b及び第3部分11cは、第1絶縁層31上に配置されている。第3部分11cは、例えば第1絶縁層31の上部表面と接触している。第1二次元材料層11において、第3部分11cは、電界効果トランジスタのチャンネルとして作用する。第1二次元材料層11において、第1部分11a及び第2部分11bは、電界効果トランジスタのソース及びドレインとして作用する。第1二次元材料層11の上部表面には、例えば第1電極21及び第1絶縁層31に起因した凹凸が形成されている。

30

【 0 0 4 8 】

第1部分11aは、例えば第1二次元材料層11の一端を含む。第2部分11bは、例えば第1二次元材料層11の他端を含む。第1二次元材料層11の上記一端は、例えば第1絶縁層31の第1開口部31Aの内周面と接触している。なお、第1二次元材料層11は、第1部分11aに対して第3部分11cとは反対側に位置し、第1絶縁層31上に配置されており、かつ第1二次元材料層11の上記一端を含む部分をさらに有していてもよい。

40

【 0 0 4 9 】

第2二次元材料層12は、第2半導体層42と電氣的に接続されている第4部分12aと、第2電極22と電氣的に接続されている第5部分12bと、第4部分12aと第5部分12bとの間を電氣的に接続している第6部分12cとを有している。第1二次元材料層11の第2部分11b及び第3部分11cは、第1絶縁層31上に配置されている。第3部分11cは、例えば第1絶縁層31の上部表面と接触している。第2二次元材料層1

50

2において、第6部分12cは、電界効果トランジスタのチャンネルとして作用する。第2二次元材料層12において、第4部分12a及び第5部分12bは、電界効果トランジスタのソース及びドレインとして作用する。第2二次元材料層12の上部表面には、例えば第2電極22及び第2絶縁層32に起因した凹凸が形成されている。

【0050】

第4部分12aは、例えば第2二次元材料層12の一端を含む。第5部分12bは、例えば第2二次元材料層12の他端を含む。第2二次元材料層12の上記一端は、例えば第2絶縁層32の第2開口部32Aの内周面と接触している。なお、第2二次元材料層12は、第4部分12aに対して第6部分12cとは反対側に位置し、第2絶縁層32上に配置されており、かつ第2二次元材料層12の上記一端を含む部分をさらに有していてもよい。

10

【0051】

第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々は、検出波長の電磁波に感度を有しており、検出波長の電磁波が入射したときに、光電変換が行われるように設けられている。第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の少なくともいずれかは、検出波長の電磁波が入射したときにのみ光電変換が行われるように設けられていてもよい。

【0052】

第1二次元材料層11の第1部分11a、第2部分11b、及び第3部分11cの各々の厚みは、例えば互いに等しい。第2二次元材料層12の第4部分12a、第5部分12b、及び第6部分12cの各々の厚みは、例えば互いに等しい。第1二次元材料層11の第1部分11a、第2部分11b、及び第3部分11cの各々の厚みは、例えば第2二次元材料層12の第4部分12a、第5部分12b、及び第6部分12cの各々の厚みと等しい。第1二次元材料層11の第1部分11a、第2部分11b、及び第3部分11cの各々の厚みは、互いに異なってもよい。第2二次元材料層12の第4部分12a、第5部分12b、及び第6部分12cの各々の厚みは、互いに異なってもよい。第1二次元材料層11の第1部分11a、第2部分11b、及び第3部分11cの各々の厚みは、第2二次元材料層12の第4部分12a、第5部分12b、及び第6部分12cの各々の厚みと異なってもよい。

20

【0053】

電磁波検出器100は、例えば、第3面41B及び第4面42Bの界面を鏡映面とする対称性を有している。上記界面に対して第1半導体層41側に位置する部分が、当該界面に対して第2半導体層42側に位置する部分と、鏡像対称の関係を有している。平面視において、第1二次元材料層11の第1部分11a、第2部分11b、及び第3部分11cの各々は、例えば第2二次元材料層12の第4部分12a、第5部分12b、及び第6部分12cの各々と重なるように配置されている。平面視において、第1開口部31Aは、例えば第2開口部32A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21は、例えば第2電極22と重なるように配置されている。

30

【0054】

第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々は、例えばp型またはn型の導電性を有する。第1二次元材料層11の導電性は、例えば第1半導体層41の導電性とは異なっている。第1半導体層41の導電性がn型である場合、第1二次元材料層11の導電性は例えばp型である。第1半導体層41の導電性がp型である場合、第1二次元材料層11の導電性は例えばn型である。なお、第1二次元材料層11の導電性は、例えば第1半導体層41の導電性と同じであってもよい。第1半導体層41の導電性がn型である場合、第1二次元材料層11の導電性はn型であってもよい。第1半導体層41の導電性がp型である場合、第1二次元材料層11の導電性はp型であってもよい。第2二次元材料層12の導電性も、第2半導体層42の導電性と異なってもよいし、同じであってもよい。

40

【0055】

第1二次元材料層11の導電性は、例えば第2二次元材料層12の導電性と同じである

50

。なお、第1二次元材料層11の導電型は、例えば第2二次元材料層12の導電型と異なっているとしてもよい。

【0056】

第1二次元材料層11の二次元面は、第1二次元材料層11の上面に沿っている。第1二次元材料層11の二次元面が第1二次元材料層11の上面に対して成す角度の絶対値は、 0° 以上 10° 以下である。第1二次元材料層11の二次元面は、例えば第1二次元材料層11の上面と平行である。

【0057】

第2二次元材料層12の二次元面は、第2二次元材料層12の上面に沿っている。第2二次元材料層12の二次元面が第2二次元材料層12の上面に対して成す角度の絶対値は、 0° 以上 10° 以下である。第2二次元材料層12の二次元面は、例えば第2二次元材料層12の上面と平行である。

10

【0058】

第2二次元材料層12の二次元面は、第1二次元材料層11の二次元面に沿って延びている。第2二次元材料層12の二次元面は、例えば第1二次元材料層11の二次元面と平行である。

【0059】

第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々は、上述のように、単層グラフェン又は多層グラフェンにより構成されていてもよい。第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の少なくともいずれかは、乱層構造部分を含んでいてもよい。

20

【0060】

<電磁波検出器100の製造方法>

図4は、実施の形態1に係る電磁波検出器100の製造方法の一例を説明するためのフローチャートである。図4を参照しながら、図1～図3に示される電磁波検出器100の製造方法の一例を説明する。

【0061】

第1に、第2半導体層42を準備する工程(S1)が実施される。この工程(S1)では、例えばSi等からなる平坦な基板として第2半導体層42が準備される。第2半導体層42の表面上には、保護膜が形成されていてもよい。

【0062】

第2に、第1半導体層41を形成する工程(S2)が実施される。この工程(S2)では、第1半導体層41が第2半導体層42上に形成される。保護膜が第2半導体層42の表面上に形成されている場合、当該保護膜が除去された後、第1半導体層41が形成される。第1半導体層41は、例えばエピタキシャル成長により成膜されてもよい。この場合、第1半導体層41は、第2半導体層42の第4面42B上に成膜される。第1半導体層41は、第2半導体層42に対するイオン注入などにより不純物をドーピングすることによって形成されてもよい。

30

【0063】

第3に、第1絶縁層31を形成する工程(S3)が実施される。この工程(S3)では、第1絶縁層31が第1半導体層41上に形成される。第1絶縁層31は、例えばCVD (Chemical Vapor Deposition) 法及びスパッタ法の少なくともいずれかにより成膜されてもよい。第1半導体層41を構成する材料がSiである場合、第1絶縁層31は、例えば第1半導体層41の第1面41Aを部分的に熱酸化することにより形成された酸化シリコン(SiO₂)であってもよい。

40

【0064】

第4に、第1電極21を形成する工程(S4)が実施される。この工程(S4)では、第1電極21が第1絶縁層31上に形成される。第1電極21を構成する材料は、たとえば金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、アルミニウム(Al)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)等の金属を用いる。この時、第1電極21と第1絶縁層31との密着性を向上させるために、第1絶縁層31と第1電極21との間に密着層を形成してもよい。密着

50

層を構成する材料としては、たとえばクロム（Cr）またはチタン（Ti）等を用いることができる。

【0065】

第1電極21の形成方法としては、たとえば以下のようなプロセスを用いることができる。まず、第1絶縁層31の表面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21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21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第1絶縁層31の表面上に残存し、第1電極21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。

10

【0066】

第1電極21の形成方法として、他の方法を用いてもよい。たとえば、第1絶縁層31の表面上に第1電極21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21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21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21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21を形成してもよい。

20

【0067】

第5に、第1開口部31Aを形成する工程（S5）が実施される。この工程（S5）では、第1開口部31Aが第1絶縁層31に形成される。具体的には、第1絶縁層31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絶縁層31の第1開口部31A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、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第1絶縁層31を部分的に除去し、第1開口部31Aを形成する。次にレジストマスクを除去する。なお、上記工程（S5）は工程（S4）より先に実施してもよい。

30

【0068】

第6に、第1二次元材料層11を形成する工程（S6）が実施される。この工程（S6）では、第1二次元材料層11が、第1電極21、第1絶縁層31、及び第1半導体層41において第1開口部31A内に露出する部分の全体を覆うように形成される。第1二次元材料層11は、任意の方法により形成してもよい。たとえば、第1二次元材料層11をエピタキシャル成長によって形成しても良いし、予めCVD法を用いて形成した第1二次元材料層11を第1電極21、第1絶縁層31および第1半導体層41の一部上に転写して貼り付けてもよい。あるいは、スクリーン印刷などを用いて第1二次元材料層11を形成してもよい。また、機械剥離などで剥離した第1二次元材料層11を上述した第1電極21等の上に転写してもよい。次に、写真製版などを用いて第1二次元材料層11の上にレジストマスクを形成する。レジストマスクは、第1二次元材料層11を残存させる領域を覆うように形成される一方、第1二次元材料層11を残存させない領域には形成されない。その後、レジストマスクをマスクとして用いて、酸素プラズマにより第1二次元材料層11をエッチングにより部分的に除去する。これにより、不要な二次元材料層の部分を除去し、図1～図3に示すような第1二次元材料層11を形成する。その後、レジストマスクを除去する。

40

【0069】

第7に、第2絶縁層32を形成する工程（S7）が実施される。この工程（S7）では、第2絶縁層32が第2半導体層42上に形成される。第2絶縁層32は、例えばCVD法及びスパッタ法の少なくともいずれかにより成膜されてもよい。第2半導体層42を構

50

成する材料がSiである場合、第2絶縁層32は、例えば第2半導体層42の第2面42Aを部分的に熱酸化することにより形成されたSiO₂であってもよい。

【0070】

第8に、第2電極22を形成する工程(S8)が実施される。この工程(S8)では、第2絶縁層32上に第2電極22が形成される。第1電極21を構成する材料は、たとえば金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、アルミニウム(Al)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)等の金属を用いる。この時、第1電極21と第1絶縁層31との密着性を向上させるために、第1絶縁層31と第1電極21との間に密着層を形成してもよい。密着層を構成する材料としては、たとえばクロム(Cr)またはチタン(Ti)等を用いることができる。第2電極22の形成方法は、上述した第1電極21の形成方法と同様に選択され得る。

10

【0071】

第9に、第2開口部32Aを形成する工程(S9)が実施される。この工程(S9)では、第2開口部32Aが第2絶縁層32に形成される。具体的には、第2絶縁層32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2絶縁層32の第2開口部32A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、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第2絶縁層32を部分的に除去し、第2開口部32Aを形成する。次にレジストマスクを除去する。なお、上記工程(S9)は工程(S8)より先に実施してもよい。

【0072】

第10に、第2二次元材料層12を形成する工程(S10)が実施される。この工程(S10)では、第2二次元材料層12が、第2電極22、第2絶縁層32、及び第2半導体層42において第2開口部32A内に露出する部分の全体を覆うように形成される。第2二次元材料層12は、任意の方法により形成してもよい。たとえば、第2二次元材料層12をエピタキシャル成長によって形成しても良いし、予めCVD法を用いて形成した第2二次元材料層12を第2電極22、第2絶縁層32および第2半導体層42の一部上に転写して貼り付けてもよい。あるいは、スクリーン印刷などを用いて第2二次元材料層12を形成してもよい。また、機械剥離などで剥離した第2二次元材料層12を上述した第2電極22等の上に転写してもよい。次に、写真製版などを用いて第2二次元材料層12の上にレジストマスクを形成する。レジストマスクは、第2二次元材料層12を残存させる領域を覆うように形成される一方、第2二次元材料層12を残存させない領域には形成されない。その後、レジストマスクをマスクとして用いて、酸素プラズマにより第2二次元材料層12をエッチングにより部分的に除去する。これにより、不要な二次元材料層の部分除去し、図1および図2に示すような第2二次元材料層12を形成する。その後、レジストマスクを除去する。

20

30

【0073】

以上の工程(S1~S10)により、図1~図3に示される電磁波検出器100が得られる。なお、上述した製造方法では第1電極21の上に第1二次元材料層11を形成したが、第1絶縁層31上に予め第1二次元材料層11を形成し、当該第1二次元材料層11の一部上に重なるように第1電極21を形成してもよい。ただし、この構造を用いる場合は、第1電極21の形成時に、第1二次元材料層11に対してプロセスダメージを与えないように注意が必要である。たとえば、第1二次元材料層11において第1電極21が重ねて形成される領域以外を保護膜などで予め覆った状態で、第1電極21を形成する、といった対応が考えられる。なお、第2二次元材料層においても同様である。

40

【0074】

<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。

【0075】

まず、図1に示すように、第1電極21と第2電極22との間に、バイアス電圧Vを印加する電源回路が電氣的に接続されている。第1電極21と第2電極22との間に電圧V

50

が印加されると、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12には電流Iが流れる。電源回路に含まれる電流計IMは、第1二次元材料層11、第2二次元材料層12に流れる電流Iをモニターする。

【0076】

上記状態において、第1半導体層41および第2半導体層42からなる受光素子40に電磁波が照射されると、受光素子40のpn接合において光電変換が発生し、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12に光電流が流れる。

【0077】

また、受光素子40は、第1絶縁層31を介して第1二次元材料層11に電界変化を与え、さらに第2絶縁層32を介して第2二次元材料層12に電界変化を与える。この結果、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々に対して擬似的にゲート電圧が印加された状態となり、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々の抵抗値が変化する。これを光ゲート効果と呼ぶ。第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々における抵抗値の変化により、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12を流れる電流Iが変化する。この電流Iの変化を検出することによって、電磁波検出器100に照射された電磁波を検出することができる。

10

【0078】

また、たとえば受光素子40を構成する第1半導体層41がn型材料からなり、第2半導体層42がp型材料からなる場合、電圧Vを調整し、受光素子40を逆バイアス動作させることで、電流Iをゼロにすることができる。すなわち、電磁波検出器100ではOFF動作が可能となる。このとき、光照射時にのみ受光素子40に電流が流れるため、光照射時にのみ電流Iを検出することが出来る。

20

【0079】

ここで、電磁波検出器100は、上述のような第1二次元材料層11、第2二次元材料層12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21と第2電極22との間に一定電流を流し、第1電極21と第2電極22間の電圧Vの変化（つまり二次元材料層での電圧値の変化）を検出してもよい。

【0080】

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。

30

【0081】

<電磁波検出器100の動作>

次に、電磁波検出器100の具体的な動作について説明する。ここでは、第2半導体層42としてp型シリコンを用い、第1半導体層41としてn型シリコンを用いた場合について説明する。

【0082】

図1に示すように、受光素子40に対して逆バイアスとなるように電圧を印加すると、第1半導体層41と第2半導体層42との接合界面の近傍には空乏層が形成される。電磁波検出器の検出波長の範囲は、受光素子40の構成材料に応じて決定される。上述した構成の受光素子40を有する電磁波検出器の検出波長は0.2μm以上1.1μm以下である。

40

【0083】

上記検出波長の電磁波が受光素子40に入射すると、空乏層において電子正孔対が発生する。発生した電子正孔対（光キャリア）は第1電極21および第2電極22から光電流として取り出される。

【0084】

50

このとき、第1絶縁層31の直下領域で発生した光キャリアにより、第1絶縁層31を介して第2二次元材料層11に電界変化が生じる。さらに第2絶縁層32の直下領域で発生した光キャリアにより、第2絶縁層32を介して第2二次元材料層12に電界変化が生じる。これは前述した光ゲート効果である。上述のように、第2二次元材料層12を構成する二次元材料(例えばグラフェン)は移動度が高く、わずかな電界変化に対して大きな変位電流を得ることが出来る。そのため、受光素子40における光電変換により第2二次元材料層12及び第1二次元材料層11を経由して第1電極21から取り出した光電流は、光ゲート効果により大きく増幅される。このため、電磁波検出器100では、シリコンの量子効率を超える高感度化が可能となる。

【0085】

このとき、受光素子40はキャリア拡散長が短くなるように設計することが好ましい。キャリア拡散長が短くなることで、受光素子40における光キャリアのキャリア寿命が短くなる。この結果、光ゲート効果による増幅の遅延が解消され、受光素子40の光電変換により発生する光キャリアと光ゲート効果による増幅を分離でき、電磁波検出器100の高速応答化が可能となる。

【0086】

<電磁波検出器100の効果>

上述のように、電磁波検出器100によれば、検出波長の電磁波が受光素子40に入射すると、光ゲート効果により、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々を流れる電流が大きく増幅され得る。具体的には、第1絶縁層31の直下領域で発生した光キャリアによって第1二次元材料層11に電界変化が生じ、第1二次元材料層11を流れる電流が大きく増幅されるとともに、第2絶縁層32の直下領域で発生した光キャリアによって第2二次元材料層12に電界変化が生じ、第2二次元材料層12を流れる電流が大きく増幅される。そのため、電磁波検出器100の検出感度は、従来の半導体電磁波検出器あるいは光ゲート効果を適用していないグラフェン電磁波検出器と比べて高められており、さらには第2二次元材料層12及び第2半導体層42を備えない電磁波検出器と比べても高められている。

【0087】

光ゲート効果を利用することで、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12における検出電流の取り出し効率は大幅に向上する。光ゲート効果は、受光素子40における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、電磁波の入射に伴う電流変化(差分電流)を増幅する。そのため、等価的に電磁波の入射に伴う電流変化から算出した量子効率は100%を超えることができる。よって、電磁波検出器100は、従来の半導体電磁波検出器あるいは光ゲート効果を適用していないグラフェン電磁波検出器と比較して、高感度に電磁波の検出を行うことができる。

【0088】

電磁波検出器100では、第1半導体層41の第3面41Bが第2半導体層42の第4面42Bと接触しており、第2半導体層42の導電型が第1半導体層41の導電型とは異なっている。つまり、第1半導体層41と第2半導体層42とがpn接合している。そのため、電圧Vを調整して受光素子40を逆バイアス動作させることにより、検出対象の電磁波が照射されていない状態での電流Iをゼロにすることができる。すなわち、電磁波検出器100では、OFF動作が可能となり、検出対象の電磁波が照射されたときのみ電流Iが検出される。

【0089】

電磁波検出器100では、検出対象の電磁波が入射したときに、受光素子40において発生する上記電流に加えて、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12の各々の光電変換効率に起因する光電流も生じ得る。そのため、電磁波検出器100では、電磁波が入射することにより、上述した受光素子40で生じた電流及び光ゲート効果に伴う電流の増幅分に加え、第1二次元材料層11及び第2二次元材料層12各々の光電変換効率に起因する光電流も検出できる。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 0 】

以上のように、電磁波検出器 1 0 0 では、量子効率が 1 0 0 % 以上、感度は通常の 1 0 0 倍以上となり得る。

【 0 0 9 1 】

電磁波検出器 1 0 0 では、第 1 二次元材料層 1 1 の導電型が第 2 二次元材料層 1 2 の導電型と異なってもよい。この場合、光ゲート効果によって引き起こされる第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々の抵抗値の変化を最適化することが可能となる。

【 0 0 9 2 】

第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の少なくともいずれかが乱層構造部分を含んでいる場合、当該乱層構造部分におけるキャリアの移動度が高くなるため、検出感度が向上する。

10

【 0 0 9 3 】

実施の形態 2 .

実施の形態 2 に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態 1 と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態 1 と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【 0 0 9 4 】

< 電磁波検出器 1 0 1 の構成 >

図 5 は、実施の形態 2 に係る電磁波検出器 1 0 1 の断面模式図である。図 5 に示されるように、電磁波検出器 1 0 1 は、バリア層 5 0 をさらに備える。バリア層 5 0 は、第 1 半導体層 4 1 と第 2 半導体層 4 2 との間に挟まれており、第 3 面 4 1 B 及び第 4 面 4 2 B の各々と接触している。バリア層 5 0 は、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々と電気的に接続されている。第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々は、例えば、受光素子 4 0 にバイアスを印加するためのコンタクト層として作用するとともに、検出対象の電磁波を吸収する光吸収層として作用する。

20

【 0 0 9 5 】

第 1 半導体層 4 1 の導電型は、例えば第 2 半導体層 4 2 の導電型と等しい。第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々の導電型は、例えば p 型である。なお、第 1 半導体層 4 1 及び第 2 半導体層 4 2 の各々の導電型は、n 型であってもよい。

30

【 0 0 9 6 】

バリア層 5 0 は、検出波長の電磁波が受光素子 4 0 に入射したときに第 1 半導体層 4 1 にて生じた光キャリア（電子正孔対）のうち第 1 半導体層 4 1 の少数キャリア（例えば第 1 半導体層 4 1 の導電型が p 型の場合には電子）が第 1 半導体層 4 1 から第 2 半導体層 4 2 に流入することを妨げず、第 2 半導体層 4 2 において熱励起により生じたキャリアであって第 1 半導体層 4 1 の多数キャリア（例えば第 1 半導体層 4 1 の導電型が p 型の場合には正孔）が第 2 半導体層 4 2 から第 1 半導体層 4 1 に流入することを妨げる物性を有する。

【 0 0 9 7 】

バリア層 5 0 を構成する材料およびバリア層 5 0 の厚みは、バリア層 5 0 が上記物性を有するように選択される。

40

【 0 0 9 8 】

第 1 半導体層 4 1 の導電型が p 型である場合、バリア層 5 0 を構成する材料は、第 1 半導体層を構成する材料と比べて、電子親和力およびイオン化ポテンシャルが大きく、かつバンドギャップが大きい材料である。バリア層 5 0 を構成する材料は、例えば酸化スズ（ SnO_2 ）、酸化亜鉛（ ZnO ）、および酸化チタン（ TiO_2 ）の少なくともいずれかを含む。

【 0 0 9 9 】

第 1 半導体層 4 1 の導電型が n 型である場合、バリア層 5 0 を構成する材料は、第 1 半導体層 4 1 を構成する材料と比べて、電子親和力およびイオン化ポテンシャルが小さく、かつバンドギャップが大きい材料である。バリア層 5 0 を構成する材料は、例えば酸化二

50

ッケル (NiO) および酸化マンガン (MnO) の少なくともいずれかを含む。

【0100】

バリア層50は、第1絶縁層31及び第2絶縁層32の各々よりも薄いことが好ましい。バリア層50の厚みは、例えば1nm以上100nm以下である。

【0101】

電磁波検出器101は、例えば、第1二次元材料層11を介さずに第1半導体層41と電氣的に接続されている第3電極23と、第2二次元材料層12を介さずに第2半導体層42と電氣的に接続されている第4電極24とをさらに備えている。第3電極23は、第1半導体層41とオーミック接合している。第4電極24は、第2半導体層42とオーミック接合している。

10

【0102】

電磁波検出器101の製造方法では、電磁波検出器100の製造方法における第1半導体層41を形成する工程の前に、バリア層50を第2半導体層42の第4面42B上に形成する工程が実施されればよい。

【0103】

<電磁波検出器101の動作>

電磁波検出器101では、第1電極21と第2半導体層42との間に電源回路が電氣的に接続される。電源回路は、例えば、第1電極21と第4電極24との間に接続される。電源回路は、第1電極21と第2半導体層42との間に電圧Vを印加する電源と、電源回路を流れる電流Iを測定する電流計とを含む。さらに電磁波検出器101では、第1半導体層41と第2電極22とが電氣的に接続される。例えば、第3電極23と第2電極22とが電氣的に接続される。

20

【0104】

電圧Vの正負は、バリア層50と第1半導体層41との接合部に逆バイアスが印加されるように、第1半導体層41の導電型(ドーピング型)に応じて選択される。

【0105】

第1半導体層41の導電型がp型であれば、図5に示されるように、第1電極21の電位が第2半導体層42の電位よりも低くなるように、電圧が印加される。これにより、電磁波検出器101は、検出波長の電磁波を検出可能な状態とされる。この場合、バリア層50は、第1半導体層41に生じた電子が第2半導体層42に流入することを妨げない。一方で、バリア層50は、第2半導体層42において熱励起により生じた正孔が第1半導体層41に流入することを妨げる。つまり、バリア層50は、正孔障壁層として作用し得る。

30

【0106】

具体的には、バリア層50は、検出波長の電磁波が照射されていない状態(暗状態)では、第2半導体層42において熱励起された正孔が第1半導体層41に流入することを妨げる。バリア層50は、検出波長の電磁波が照射されている状態では、第1半導体層41において生成された電子正孔対(光キャリア)の電子が第2半導体層42に流入することを妨げない。検出波長の電磁波が照射されている状態では、第1半導体層41において生成された電子正孔対のうちの電子が第2半導体層42側に引き寄せられる。バリア層50の伝導帯の底のエネルギーは、第1半導体層41の伝導帯の底のエネルギーよりも低く、かつ第2半導体層42の伝導帯の底のエネルギーはバリア層50の伝導帯の底のエネルギーよりも低い。そのため、第1半導体層41において生じた電子は、バリア層50に妨げられることなく、第2半導体層42に注入される。第1半導体層41から第2半導体層42に注入された電子は、第2半導体層42において生成された電子正孔対のうちの電子とともに、光電流として取り出される。光電流は、電流Iの変化として検出される。

40

【0107】

なお、バリア層50の価電子帯の頂上のエネルギーは、第1半導体層41及び第2半導体層42の各々の価電子帯の頂上のエネルギーよりも低い。そのため、第2半導体層42において生成された電子正孔対のうちの正孔は、第2二次元材料層12及び第2電極22

50

を経て第1半導体層41に流入し、第1半導体層41において生成された電子正孔対のうちの正孔とともに、第1二次元材料層11を経て外部に排出される。

【0108】

また、第1半導体層41の導電型がn型であれば、第1電極21の電位が第2半導体層42の電位よりも高くなるように、電圧が印加される。これにより、電磁波検出器101は、検出波長の電磁波を検出可能な状態とされる。この場合、バリア層50は、第1半導体層41に生じた正孔が第2半導体層42に流入することを妨げない。一方で、バリア層50は、第2半導体層42において熱励起により生じた電子が第1半導体層41に流入することを妨げる。つまり、バリア層50は、電子障壁層として作用し得る。

【0109】

<変形例>

電磁波検出器101において、第1半導体層41の導電型は、第2半導体層42の導電型と異なってもよい。第1半導体層41の導電型がp型であって、第2半導体層42の導電型がn型であってもよい。この場合にも、バリア層50は、正孔障壁層として作用し得る。第1半導体層41の導電型がn型であって、第2半導体層42の導電型がp型であってもよい。この場合にも、バリア層50は、電子障壁層として作用し得る。

【0110】

電磁波検出器101において、バリア層50は、検出波長の電磁波が受光素子40に入射したときに第2半導体層42にて生じた光キャリア（電子正孔対）のうち第2半導体層42の少数キャリア（例えば第2半導体層42の導電型がp型の場合には電子）が第2半導体層42から第1半導体層41に流入することを妨げず、第1半導体層41において熱励起により生じたキャリアであって第2半導体層42の多数キャリア（例えば第2半導体層42の導電型がp型の場合には正孔）が第1半導体層41から第2半導体層42に流入することを妨げる物性を有していてもよい。

【0111】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0112】

<電磁波検出器101の効果>

電磁波検出器101によれば、第1半導体層41及び第2半導体層42の各々の導電型の組み合わせによらず、バリア層50が正孔障壁層又は電子障壁層として作用するため、暗電流を抑制しながらも、光キャリアを効率的に取り出すことができる。

【0113】

実施の形態3.

実施の形態3に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態1と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態1と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【0114】

<電磁波検出器102の構成>

図6は、実施の形態3に係る電磁波検出器102の断面模式図である。図6に示されるように、電磁波検出器102は、第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62をさらに備えている。第1トンネル絶縁層61は、第1二次元材料層11と第1半導体層41とに挟み込まれている。第2トンネル絶縁層62は、第2二次元材料層12と第2半導体層42とに挟み込まれている。

【0115】

第1トンネル絶縁層61は、第1絶縁層31の第1開口部31Aの内部に配置されている。第2トンネル絶縁層62は、第2絶縁層32の第2開口部32Aの内部に配置されている。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々の厚みは、検出対象とする電磁波が電磁波検出器102に入射したときに、第1二次元材料層11と第1半導体層41との間及び第2二次元材料層12と第2半導体層42との間にトンネル電流が生じるように設定されている。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々の

10

20

30

40

50

厚みは、例えば 1 nm 以上 10 nm 以下である。

【0116】

第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々を構成する材料は、電氣的絶縁性を有する任意の材料であればよいが、たとえば、アルミナおよび酸化ハフニウムなどの金属酸化物、または酸化シリコンおよび窒化シリコンなどの半導体を含む酸化物、ならびにボロンナイトライドなどの窒化物からなる群から選択される少なくとも1つを含む。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々の作製方法としては任意の方法を用いることができる。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々は、たとえば、ALD (Atomic Layer Deposition) 法、真空蒸着法、スパッタ法などを用いて作製され得る。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々は、第1半導体層41の第1面41A又は第2半導体層42の第2面42Aを酸化または窒化することによっても形成され得る。第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々は、自然酸化膜であってもよい。

10

【0117】

なお、電磁波検出器102は、第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の少なくともいずれかをさらに備えていればよい。

【0118】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0119】

<電磁波検出器102の効果>

20

電磁波検出器102は、第1二次元材料層11と第1半導体層41との間に配置されている第1トンネル絶縁層61を備えるため、第1半導体層41と第1二次元材料層11との接合界面での漏れ電流が抑制され、暗電流が低減され得る。さらに電磁波検出器102は、第2二次元材料層12と第2半導体層42との間に配置されている第2トンネル絶縁層62をさらに備えるため、第2半導体層42と第2二次元材料層12との接合界面での漏れ電流が抑制され、暗電流が低減され得る。

【0120】

第1トンネル絶縁層61及び第2トンネル絶縁層62の各々の厚さは、検出対象とする電磁波が電磁波検出器102に入射したときに、第1二次元材料層11と第1半導体層41との間及び第2二次元材料層12と第2半導体層42との間にトンネル電流が生じるように設定されている。このようにすれば、検出対象とする電磁波が電磁波検出器102に入射したときに、第1半導体層41と第1二次元材料層11との間及び第2半導体層42と第2二次元材料層12との間に比較的大きな光電流が流入し得るため、電磁波検出器102の感度が高まる。

30

【0121】

実施の形態4.

実施の形態4に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態1と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態1と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【0122】

<電磁波検出器102の構成>

40

図7は、実施の形態4に係る電磁波検出器103の断面模式図である。図7に示されるように、電磁波検出器103は、第1接続導電体71及び第2接続導電体72をさらに備えている。第1接続導電体71は、第1二次元材料層11と第1半導体層41との間を電氣的に接続する。第2接続導電体72は、第2二次元材料層12と第2半導体層42との間を電氣的に接続する。

【0123】

好ましくは、第1接続導電体71は、第1半導体層41とショットキー接合している。好ましくは、第2接続導電体72は、第2半導体層42とショットキー接合している。

【0124】

50

<変形例>

第1接続導電体71の厚みは、第1絶縁層31の厚みと等しくてもよい。この場合、第1二次元材料層11は、第1絶縁層31の上面から第1接続導電体71の上面にまで、屈曲することなく平面状に延びている。同様に、第2接続導電体72の厚みは、第2絶縁層32の厚みと等しくてもよい。この場合、第2二次元材料層12は、第2絶縁層32の上面から第2接続導電体72の上面にまで、屈曲することなく平面状に延びている。

【0125】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0126】

<電磁波検出器103の効果>

電磁波検出器103では、第1半導体層41と第1二次元材料層11とが第1接続導電体71を介して電氣的に接続されているため、第1接続導電体71を備えていない場合と比べて、第1二次元材料層11と第1半導体層41との間のコンタクト抵抗が低減され得る。

【0127】

また、第1接続導電体71が第1半導体層41とショットキー接合していれば、暗電流が低減され得る。

【0128】

第1接続導電体71の厚みが第1絶縁層31の厚みと同等であれば、第1二次元材料層11の第1部分11a及び第3部分11cの各々の二次元面が同じ方向に延びるため、第1二次元材料層11においてキャリアの移動度が向上する。第1二次元材料層11に対する光ゲート効果は第1二次元材料層11におけるキャリアの移動度に比例する。そのため、電磁波検出器103の検出感度は、電磁波検出器100と比べて向上し得る。

【0129】

実施の形態5.

実施の形態5に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態1と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態1と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【0130】

<電磁波検出器104の構成>

図8は、実施の形態5に係る電磁波検出器104の平面模式図である。図9は、図8中の矢印IX-IXから見た断面模式図である。図8及び図9に示されるように、電磁波検出器104には、第1電極21及び第2電極22の各々の表面に複数の凹凸部81, 82が形成されている。複数の凹凸部81, 82の各々は、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンを構成している。つまり、第1電極21及び第2電極22の各々の表面に、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンが設けられている。

【0131】

第1電極21の表面に形成されている複数の凹凸部81は、例えば第1電極21と、第1電極21の上部表面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の導電体とによって形成されている。第2電極22の表面に形成されている複数の凹凸部82は、例えば第2電極22と、第2電極22の上部表面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の導電体とによって形成されている。導電体を構成する材料は、表面プラズモン共鳴が生じる材料である。導電体を構成する材料は、たとえば金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)、アルミニウム(Al)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、及びパラジウム(Pd)からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。

【0132】

複数の凹凸部81, 82を形成する方法は、特に制限されないが、例えば、第1電極21及び第2電極22と同様に形成されてもよい。

【0133】

10

20

30

40

50

複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、第 1 電極 2 1 又は第 2 電極 2 2 がドライエッチングまたはウェットエッチング等によって部分的に除去されることにより形成されていてもよい。

【 0 1 3 4 】

複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、第 1 電極 2 1 又は第 2 電極 2 2 の各表面に表面プラズモン共鳴が生じるパターン 8 0 として形成されている。

【 0 1 3 5 】

複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、例えば、一次元の周期構造、又は二次元の周期構造を有する。複数の凹凸部 8 1 , 8 2 の一次元の周期構造又は二次元の周期構造は、第 1 二次元材料層 1 1 または第 2 二次元材料層 1 2 の二次元面に沿った周期構造である。一次元の周期構造を有する複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、例えば第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々の二次元面に沿った任意の方向において周期的に配列している。二次元の周期構造を有する複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、例えば平面視において、正方格子又は三角格子等の格子点に対応する位置に配列している。

10

【 0 1 3 6 】

複数の凹凸部 8 1 , 8 2 は、非周期構造を有していてもよい。平面視における複数の凹凸部 8 1 , 8 2 の配列は、非対称性を有していてもよい。

【 0 1 3 7 】

平面視において、複数の凹凸部 8 1 , 8 2 の凸部の平面形状は、円形状、三角形状、四角形状、多角形状、又は、楕円形状等の任意の形状であってもよい。

【 0 1 3 8 】

< 変形例 >

電磁波検出器 1 0 4 では、第 1 電極 2 1、第 1 二次元材料層 1 1、第 2 電極 2 2、及び第 2 二次元材料層 1 2 の少なくともいずれかの表面に、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンが設けられていればよい。第 1 電極 2 1、第 1 二次元材料層 1 1、第 2 電極 2 2、及び第 2 二次元材料層 1 2 の少なくともいずれかの表面に、複数の凹凸部が設けられていればよい。平面視において、複数の凹凸部は、周期的構造又は非周期構造を有していればよい。

20

【 0 1 3 9 】

図 1 0 及び図 1 1 に示されるように、電磁波検出器 1 0 4 では、第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々の表面に複数の凹凸部 9 1 , 9 2 が形成されていてもよい。複数の凹凸部 9 1 , 9 2 の各々は、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンを構成している。つまり、第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々の表面に、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンが設けられている。

30

【 0 1 4 0 】

複数の凹凸部 9 1 は、例えば第 1 二次元材料層 1 1 と、第 1 二次元材料層 1 1 の上部表面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の導電体とによって形成されている。複数の凹凸部 9 2 は、例えば第 2 二次元材料層 1 2 と、第 2 二次元材料層 1 2 の上部表面上に互いに間隔を空けて配置されている複数の導電体とによって形成されている。複数の導電体の各々は、第 1 二次元材料層 1 1 又は第 2 二次元材料層 1 2 の上部表面に接している。複数の導電体の各々は、例えば第 1 二次元材料層 1 1 の第 3 部分 1 1 c 又は第 2 二次元材料層 1 2 の第 6 部分 1 2 c に接している。

40

【 0 1 4 1 】

第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の少なくともいずれかが複数の凹部又は凸部を有し、当該複数の凹部又は凸部が複数の凹凸部 9 1 , 9 2 を構成していてもよい。第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々は高い導電率を有しているため、第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々において表面プラズモン共鳴が生じ得る。このため、上述された導電体により構成されている複数の凹凸部 8 1 , 8 2 及び複数の凹凸部 9 1 , 9 2 と同様に、複数の凹部または凸部によって構成されている複数の凹凸部 9 1 , 9 2 によっても、第 1 二次元材料層 1 1 及び第 2 二次元材料層 1 2 の各々

50

において表面プラズモン共鳴が生じ得る。

【0142】

電磁波検出器104では、電磁波検出器104では、第1電極21、第1二次元材料層11、第2電極22、及び第2二次元材料層12の各々の表面に、複数の凹凸部が形成されていてもよい。言い換えると、電磁波検出器104は、複数の凹凸部81、82と、複数の凹凸部91、92とが同時に形成されていてもよい。

【0143】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0144】

<電磁波検出器104の効果>

電磁波検出器104では、第1電極21、第1二次元材料層11、第2電極22、及び第2二次元材料層12の少なくともいずれかの表面に、検出対象の電磁波が入射したときに表面プラズモンが共鳴的に励起されるパターンが設けられている。そのため、電磁波検出器104では、検出対象の電磁波だけが受光素子40に入射するため、検出対象の電磁波に対する検出感度が高まる。

【0145】

例えば、複数の凹凸部81、82、91、92が一次元の周期構造を有していれば、表面プラズモン共鳴が生じる偏光を有する電磁波のみを検出でき、当該電磁波に対する検出感度が高まる。複数の凹凸部81、82、91、92が二次元の周期構造を有していれば、表面プラズモン共鳴が生じる波長を有する電磁波のみを検出でき、当該電磁波に対する検出感度が高まる。複数の凹凸部81、82、91、92が非周期構造を有している場合にも、複数の凹凸部81、82、91、92が一次元の周期構造を有する場合と同様に、照射される電磁波に応じて複数の凹凸部81、82、91、92に偏光依存性が生じ、特定の偏光を有する電磁波のみが検出され得る。

【0146】

実施の形態6。

実施の形態6に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態1と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態1と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【0147】

<電磁波検出器105の構成>

図12は、実施の形態6に係る電磁波検出器105の平面模式図である。図13は、図12中の矢印XIII-XIIIから見た断面模式図である。図12及び図13に示されるように、電磁波検出器105では、平面視において、第1電極21の面積は、第1開口部31Aの面積よりも小さい。第1面41Aの面積に対する第1電極21の面積の比率は、例えば0.3以下である。好ましくは、第1面41Aの面積に対する第1電極21の面積の比率は、例えば0.1以下である。

【0148】

平面視において、第2電極22の面積は、第2開口部32Aの面積よりも小さい。第2面42Aの面積に対する第2電極22の面積の比率は、例えば0.3以下である。好ましくは、第2面42Aの面積に対する第2電極22の面積の比率は、例えば0.1以下である。

【0149】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0150】

<電磁波検出器105の効果>

電磁波検出器105では、第1電極21の面積が第1開口部31Aの面積よりも小さいため、第1電極21の面積が第1開口部31Aの面積と同等以上である場合と比べて、第1面41Aを通過して第2面42Aに到達する光の量が増えるため、出力が増加する。

【0151】

10

20

30

40

50

実施の形態 7 .

実施の形態 7 に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態 1 と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態 1 と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【 0 1 5 2 】

< 電磁波検出器 1 0 6 の構成 >

図 1 4 は、実施の形態 7 に係る電磁波検出器 1 0 6 の平面模式図である。図 1 5 は、実施の形態 7 に係る電磁波検出器 1 0 6 の底面模式図である。図 1 6 は、図 1 4 及び図 1 5 中の矢印 X V I - X V I から視た断面模式図である。図 1 4 ~ 図 1 6 に示されるように、電磁波検出器 1 0 6 では、平面視において第 2 電極 2 2 の面積が第 1 電極 2 1 の面積よりも大きい。平面視において、第 2 電極 2 2 の面積は、例えば第 1 電極 2 1 の面積の 2 倍以上である。第 1 電極 2 1 の面積は、例えば第 1 開口部 3 1 A の面積よりも小さい。第 2 電極 2 2 の面積は、例えば第 2 開口部 3 2 A の面積と同等あるいはそれよりも大きい。

10

【 0 1 5 3 】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【 0 1 5 4 】

< 電磁波検出器 1 0 6 の効果 >

電磁波検出器 1 0 6 では、第 2 電極 2 2 の面積が第 1 電極 2 1 の面積よりも大きいため、第 1 面 4 1 A 側から受光素子 4 0 に入射して受光素子 4 0 を透過した電磁波は、第 2 電極 2 2 によって反射する。第 2 電極 2 2 によって反射した電磁波は、第 2 面 4 2 A 側から再び受光素子 4 0 に入射する。このため、受光素子 4 0 には、第 1 面 4 1 A 及び第 2 面 4 2 A の各々の側から電磁波が入射する。これにより、受光素子 4 0 の電磁波の吸収率が增加するため、出力が増加する。

20

【 0 1 5 5 】

実施の形態 8 .

実施の形態 8 に係る電磁波検出器は、特に説明しない限り、上記の実施の形態 1 と同一の構成、動作原理、および作用効果を有している。したがって、上記の実施の形態 1 と同一の構成には同一の符号を付し、説明を繰り返さない。

【 0 1 5 6 】

< 電磁波検出器 1 0 7 の構成 >

図 1 7 は、実施の形態 8 に係る電磁波検出器 1 0 7 の平面模式図である。図 1 7 に示されるように、電磁波検出器 1 0 7 は、第 3 面 4 1 B 及び第 4 面 4 2 B の界面を鏡映面とする対称性を有していない。上記界面に対して第 1 半導体層 4 1 側に位置する部分が、当該界面に対して第 2 半導体層 4 2 側に位置する部分と、鏡像対称の関係を有していない。平面視において、第 1 二次元材料層 1 1 の第 1 部分 1 1 a は、第 2 二次元材料層 1 2 の第 4 部分 1 2 a と重ならないように配置されている。平面視において、第 1 開口部 3 1 A は、第 2 開口部 3 2 A と重ならないように配置されている。平面視において、第 1 電極 2 1 は、第 2 電極 2 2 と重ならないように配置されている。

30

【 0 1 5 7 】

本実施の形態に係る電磁波検出器の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

40

【 0 1 5 8 】

実施の形態 9 .

図 1 8 は、実施の形態 9 に係る電磁波検出器アレイの平面模式図である。図 1 9 は、実施の形態 9 に係る電磁波検出器の変形例を示す平面模式図である。

【 0 1 5 9 】

図 1 8 に示される電磁波検出器アレイ 2 0 0 は、電磁波検出器集合体であって、検出素子として複数の電磁波検出器 3 0 0 を備える。複数の電磁波検出器 3 0 0 の各々は、実施の形態 1 ~ 8 の電磁波検出器 1 0 0 ~ 1 0 7 のいずれかである。例えば、各電磁波検出器 3 0 0 は、電磁波検出器 1 0 0 であってもよい。図 1 8 に示される電磁波検出器アレイ 2 0 0 では、複数の電磁波検出器 3 0 0 の各々が二次元方向にアレイ状に配置されている。

50

なお、複数の電磁波検出器 300 の各々は、一次元方向に並ぶように配置されていてもよい。

【0160】

図 18 に示されるように、電磁波検出器アレイ 200 は 4 つの電磁波検出器 300 を備え、4 つの電磁波検出器 300 は 2 × 2 のアレイ状に配置されている。ただし、電磁波検出器アレイ 200 は、任意の数の電磁波検出器 300 を備えていればよく、例えば 9 つ以上の電磁波検出器 300 を備えていてもよい。複数の電磁波検出器 100 は、3 以上 × 3 以上のアレイ状に配置されていてもよい。

【0161】

また、電磁波検出器アレイ 200 において、複数の電磁波検出器 300 は、非周期的に配置されていてもよい。

10

【0162】

また、電磁波検出器アレイ 200 では、複数の電磁波検出器 300 の各々が 1 つの検出素子として機能し得る限りにおいて、各電磁波検出器 300 の構成部材は共通化されていてもよい。

【0163】

複数の電磁波検出器 300 の各々は、例えば電磁波検出器アレイ 200 において 1 つの画素を成している。この場合、電磁波検出器アレイ 200 は、例えば複数の電磁波検出器 300 の各々を 1 つの画素とする画像センサとして使用され得る。

【0164】

複数の電磁波検出器 300 の各々は、実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 以外の他の実施形態に係る電磁波検出器であってもよい。

20

【0165】

図 19 に示される電磁波検出器アレイ 201 は、基本的には図 18 に示した電磁波検出器アレイ 200 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、互いに異なる構成を有する複数の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 を備えている点で、電磁波検出器アレイ 200 とは異なっている。複数の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 の各々は、実施の形態 1 ~ 8 の電磁波検出器 100 ~ 107 のいずれかである。例えば、電磁波検出器 300 は電磁波検出器 100 であり、電磁波検出器 301 は電磁波検出器 101 であり、電磁波検出器 302 は電磁波検出器 102 であり、電磁波検出器 303 は電磁波検出器 103 であってもよい。

30

【0166】

図 19 に示される電磁波検出器アレイ 201 では、互いに異なる複数種類の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 が一次元又は二次元のアレイ状に配置されていることで、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 300, 301, 302, 303 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 ~ 8 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が準備され、それらがアレイ状に配列されていてもよい。この場合、電磁波検出器アレイ 201 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。

40

【0167】

このように異なる検出波長を有する電磁波検出器 300, 301, 302, 303 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。

【0168】

複数種類の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 の各々の第 1 半導体層 41 及び第 2 半導体層 42 の少なくともいずれかを構成する材料は、互いに異なる波長域に感度を有する材料とされてもよい。たとえば、電磁波検出器 300 の第 1 半導体層 41 を構成

50

する材料は検出波長が可視光の波長である半導体材料とし、電磁波検出器 301 の第 1 半導体層 41 を構成する材料は検出波長が赤外線波長の半導体材料としてもよい。このような電磁波検出器アレイ 201 は、例えば車載センサに好適である。このような電磁波検出器アレイ 201 は、昼間は可視光画像用カメラの画像センサとして、夜間は赤外線カメラの画像センサとして、機能し得る。よって、上記のような電磁波検出器アレイ 201 を画像センサとして備えるカメラによれば、検出波長に応じて使い分けられる必要がない。

【0169】

互いに異なる検出波長を有する複数の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 を備える電磁波検出器アレイ 201 は、互いに異なる波長を有する複数の電磁波を検出することができる画像センサとして用いられ得る。これにより、従来、CMOS (Complementary MOS) センサ等で必要とされていたカラーフィルタを用いることなく、互いに異なる波長を有する複数の電磁波を検出することができる。また、電磁波の波長の違いを色の違いとして示した、カラー化された画像を得ることができる。

10

【0170】

さらに、検出する偏光が異なる電磁波検出器 300, 301, 302, 303 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。

20

【0171】

図 19 に示される電磁波検出器アレイ 201 においても、複数の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 の配列は特に制限されない。複数の電磁波検出器 300, 301, 302, 303 は、周期的又は非周期的に配列され得る。

【0172】

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。

【0173】

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。本開示の範囲は上記した説明ではなくて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が意図される。

30

【符号の説明】

【0174】

11 第 1 二次元材料層、11a 第 1 部分、11b 第 2 部分、11c 第 3 部分、12 第 2 二次元材料層、12a 第 4 部分、12b 第 5 部分、12c 第 6 部分、21 第 1 電極、22 第 2 電極、23 第 3 電極、24 第 4 電極、31 第 1 絶縁層、31A 第 1 開口部、32 第 2 絶縁層、32A 第 2 開口部、40 受光素子、41 第 1 半導体層、41A 第 1 面、41B 第 3 面、42 第 2 半導体層、42A 第 2 面、42B 第 4 面、50 バリア層、61 第 1 トンネル絶縁層、62 第 2 トンネル絶縁層、71 第 1 接続導電体、72 第 2 接続導電体、80 パターン、81, 82, 91, 92 凹凸部、100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 300, 301, 302, 303 電磁波検出器、200, 201 電磁波検出器アレイ。

40

【要約】

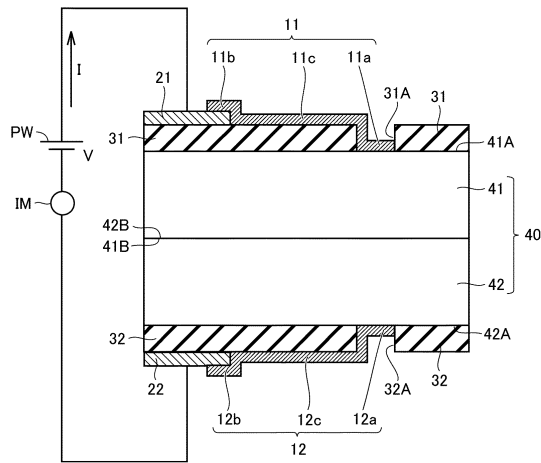
電磁波検出器（100）は、受光素子（40）を備える。受光素子は、第1半導体層（41）と第2半導体層（42）とを有する。第1半導体層の第3面（41B）と第2半導体層の第4面（42B）とが互いに重なるように積層されている。電磁波検出器は、第1開口部（31A）上から第1絶縁層（31）上にまで延在する第1二次元材料層（11）と、第1半導体層を介さずに第1二次元材料層と電氣的に接続されている第1電極（21）と、第2開口部（32A）上から第2絶縁層（32）上にまで延在する第2二次元材料層（12）と、第2半導体層を介さずに第2二次元材料層と電氣的に接続されている第2電極（22）とを備える。

【図面】

【図1】

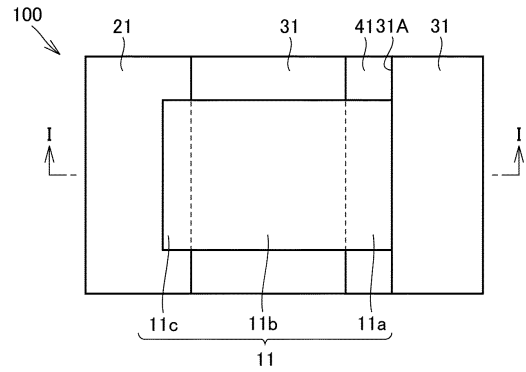
図1

100



【図2】

図2



10

20

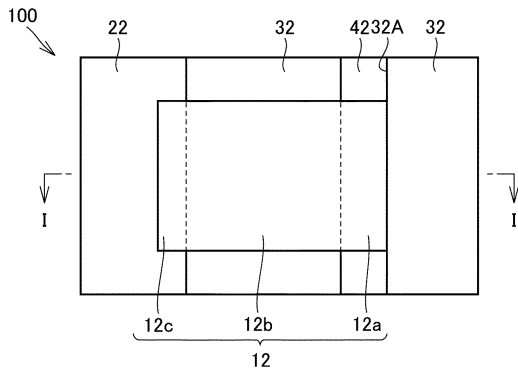
30

40

50

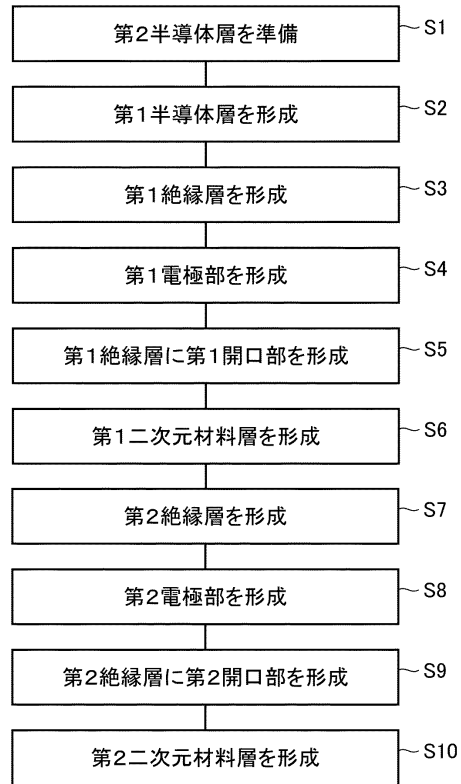
【 図 3 】

図3



【 図 4 】

図4

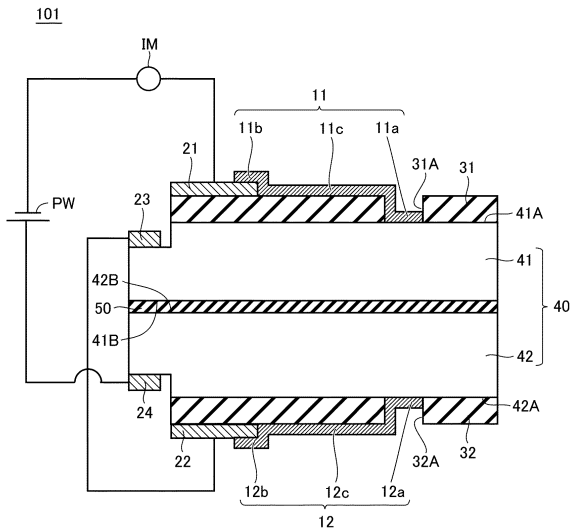


10

20

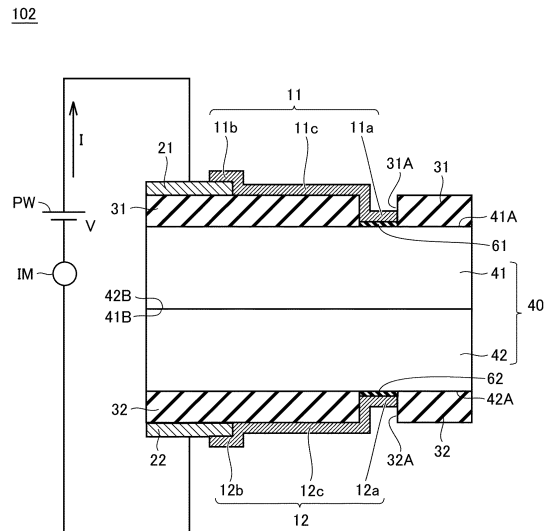
【 図 5 】

図5



【 図 6 】

図6



30

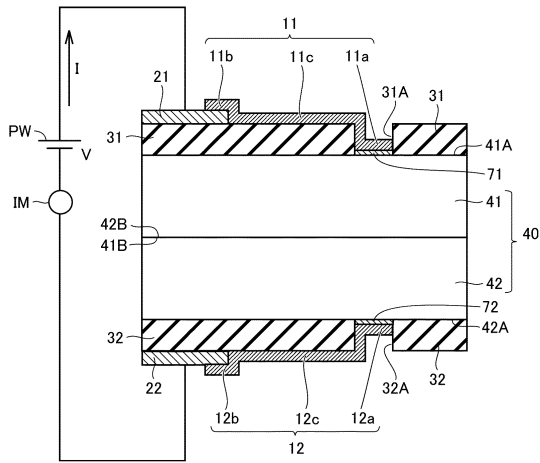
40

50

【 図 7 】

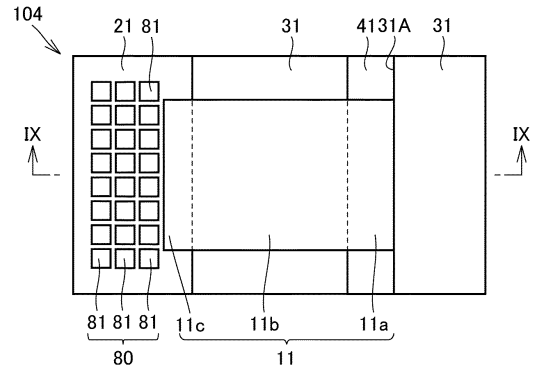
図7

103



【 図 8 】

図8

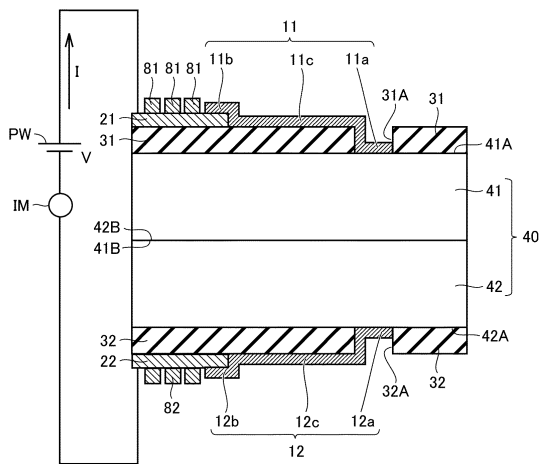


10

【 図 9 】

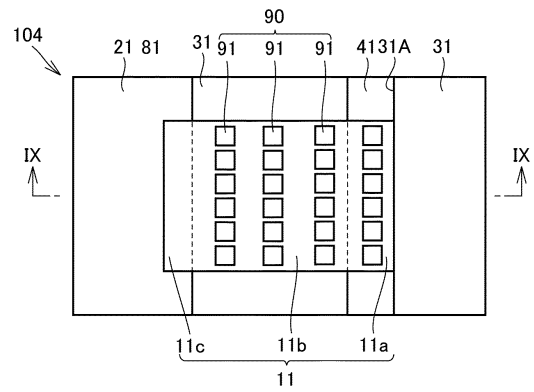
図9

104



【 図 10 】

図10



20

30

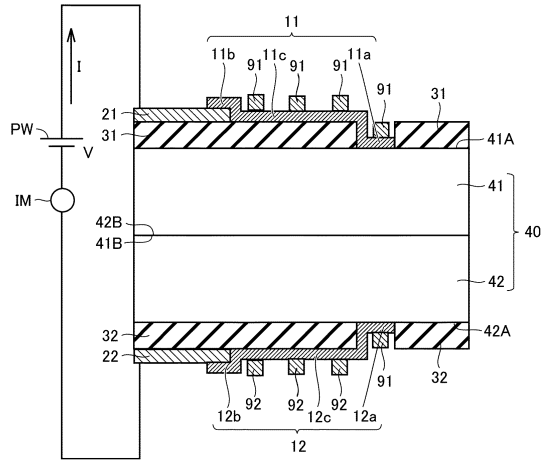
40

50

【 図 1 1 】

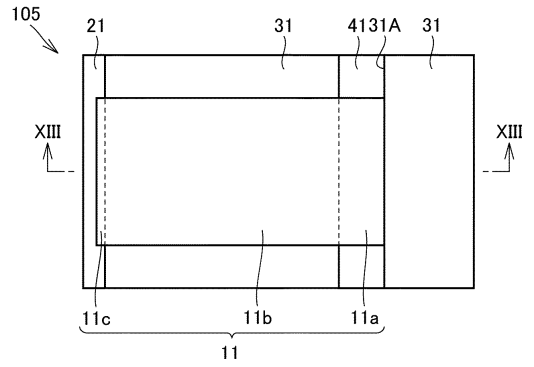
図11

104



【 図 1 2 】

図12

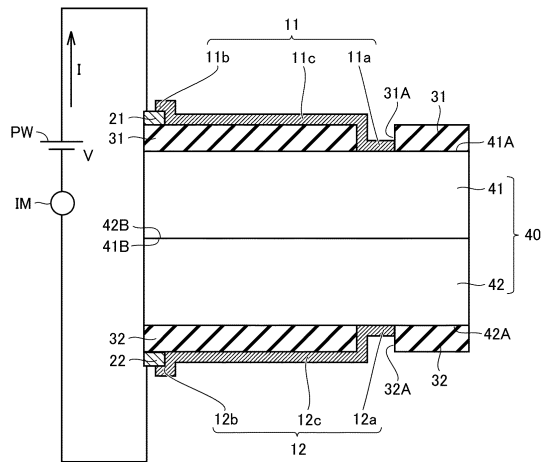


10

【 図 1 3 】

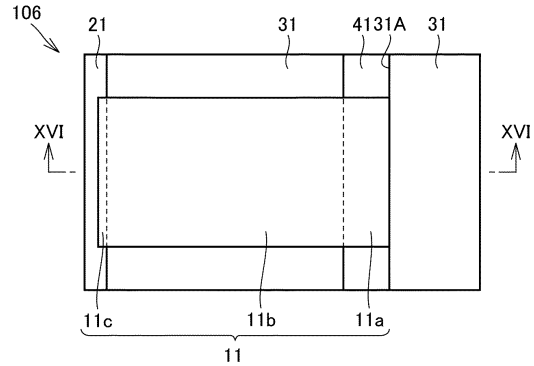
図13

105



【 図 1 4 】

図14



20

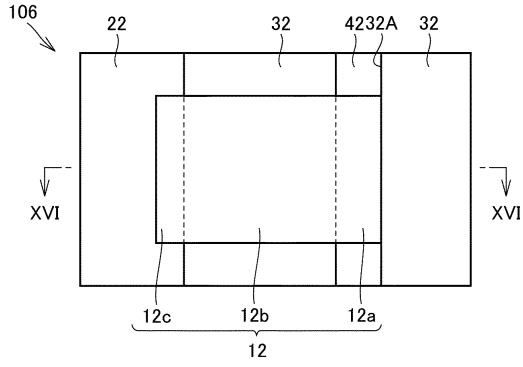
30

40

50

【 15 】

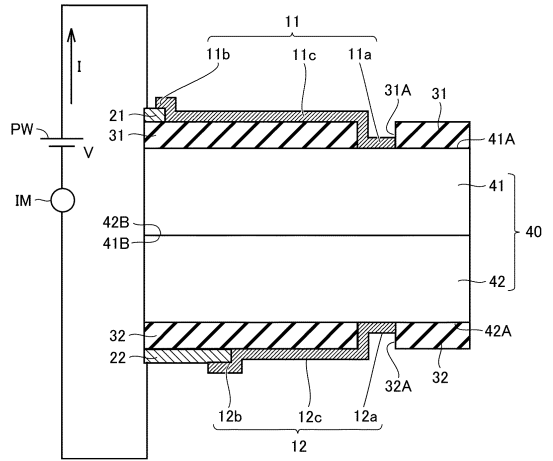
15



【 16 】

16

106

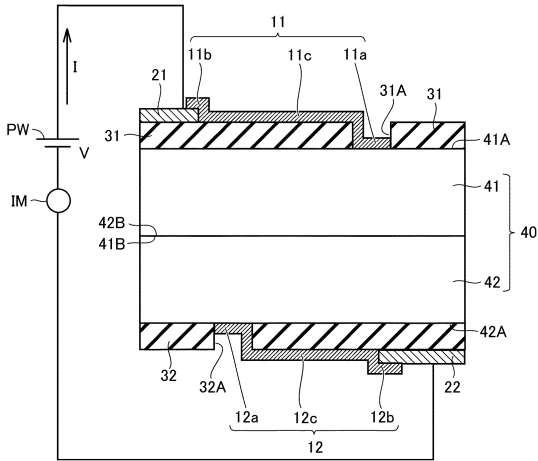


10

【 17 】

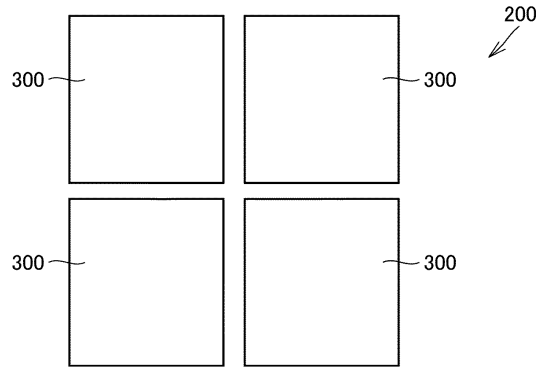
17

107



【 18 】

18



20

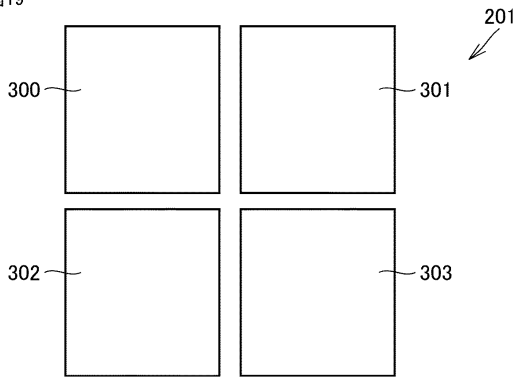
30

40

50

【 図 19 】

図19



10

20

30

40

50

フロントページの続き

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

審査官 佐竹 政彦

- (56)参考文献 国際公開第2021/002070(WO, A1)
国際公開第2021/124609(WO, A1)
米国特許出願公開第2017/0256667(US, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 31/08 - 31/119