

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7123282号
(P7123282)

(45)発行日 令和4年8月22日(2022.8.22)

(24)登録日 令和4年8月12日(2022.8.12)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 L 31/10 (2006.01)

H 0 1 L 31/10

E

G 0 1 J 1/02 (2006.01)

G 0 1 J 1/02

B

H 0 1 L 27/144 (2006.01)

G 0 1 J 1/02

Q

H 0 1 L 27/144

K

請求項の数 25 (全51頁)

(21)出願番号 特願2022-505342(P2022-505342)

(86)(22)出願日 令和3年8月24日(2021.8.24)

(86)国際出願番号 PCT/JP2021/030923

審査請求日 令和4年1月25日(2022.1.25)

(31)優先権主張番号 特願2020-178997(P2020-178997)

(32)優先日 令和2年10月26日(2020.10.26)

(33)優先権主張国・地域又は機関

日本国(JP)

(出願人による申告)平成30年度、防衛装備庁、安全保障技術研究推進制度委託事業／グラフェン等2次元機能性原子薄膜を用いた光検知素子の基礎研究、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願早期審査対象出願

(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

(74)代理人 110001195弁理士法人深見特許事務所

(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

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 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

(72)発明者 奥田 聡志

東京都千代田区丸の内二丁目7番3号

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 電磁波検出器および電磁波検出器アレイ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体層と、

前記半導体層に電氣的に接続された二次元材料層と、

前記二次元材料層に電氣的に接続された第1電極部と、

前記半導体層を介して前記二次元材料層に電氣的に接続された第2電極部と、

前記第1電極部、前記第2電極部および前記半導体層の少なくともいずれかと電氣的に接続された強誘電体層とを備え、

前記強誘電体層は、電磁波照射により前記強誘電体層内に分極変化をしたときに前記第1電極部と前記第2電極部との間の抵抗が変化するように配置され、

前記二次元材料層に対して前記強誘電体層から生じる電界が遮蔽され、前記二次元材料層のフェルミレベルは前記強誘電体層から生じた電界の電界効果によって変化しないように構成されている、電磁波検出器。

【請求項2】

前記強誘電体層と前記二次元材料層の間には、前記第1電極部、前記第2電極部および前記半導体層の少なくともいずれかが挟み込まれている、請求項1に記載の電磁波検出器。

【請求項3】

前記半導体層上に配置され、かつ開口部が形成された絶縁膜をさらに備え、

前記二次元材料層は、前記開口部において前記半導体層に電氣的に接続され、かつ前記開口部上から前記絶縁膜まで延在している、請求項1または2に記載の電磁波検出器。

【請求項 4】

前記第 1 電極部は、平面視において環状を有しており、

前記半導体層は、前記第 1 電極部よりも内側において前記絶縁膜から露出しており、

前記二次元材料層は、前記第 1 電極部よりも内側において前記半導体層に電氣的に接続されている、請求項 3 に記載の電磁波検出器。

【請求項 5】

前記絶縁膜と前記二次元材料層との間に空隙が設けられている、請求項 3 または 4 に記載の電磁波検出器。

【請求項 6】

電圧計および電流計の少なくともいずれかをさらに備え、

前記二次元材料層、前記第 1 電極部、前記第 2 電極部および前記半導体層は、前記第 1 電極部、前記二次元材料層、前記半導体層および前記第 2 電極部の順に電氣的に接続されており、

前記電圧計および前記電流計の少なくともいずれかが前記第 1 電極部と前記第 2 電極部との間に流れる電流の電圧および電流の少なくともいずれかの変化を検出することで電磁波を検出するように構成された、請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 7】

トンネル絶縁層をさらに備え、

前記トンネル絶縁層は、前記二次元材料層と前記半導体層とに挟み込まれている、請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 8】

接続導電体をさらに備え、

前記二次元材料層は、前記接続導電体を介して前記半導体層に電氣的に接続されている、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】

前記二次元材料層は、前記半導体層上に配置された複数の第 1 部分を含み、

前記複数の第 1 部分は、互いに間隔を空けて配置されている、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】

前記二次元材料層は、前記第 1 電極部上に配置された複数の第 2 部分を含み、

前記複数の第 2 部分は、互いに間隔を空けて配置されている、請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 11】

前記強誘電体層は、第 1 強誘電体部分および第 2 強誘電体部分を含み、

前記第 1 強誘電体部分および前記第 2 強誘電体部分の各々は、前記二次元材料層および前記半導体層に電氣的に接続されている、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】

前記第 1 強誘電体部分が吸収可能な電磁波の波長は、前記第 2 強誘電体部分が吸収可能な電磁波の波長とは異なっている、請求項 11 に記載の電磁波検出器。

【請求項 13】

前記第 1 強誘電体部分の分極率は、前記第 2 強誘電体部分の分極率とは異なっている、請求項 11 または 12 に記載の電磁波検出器。

【請求項 14】

前記半導体層は、第 1 半導体部と、前記第 1 半導体部とは異なる導電性を有する第 2 半導体部とを含み、

前記第 1 半導体部は、前記第 2 半導体部に接合されている、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】

前記二次元材料層は、乱層構造部分を含む、請求項 1 ～ 14 のいずれか 1 項に記載の電

10

20

30

40

50

磁波検出器。

【請求項 16】

接触層をさらに備え、

前記接触層は、前記二次元材料層に接触するように配置されている、請求項 1～15 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 17】

導電体をさらに備え、

前記導電体は、前記二次元材料層に接触するように配置されている、請求項 1～16 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 18】

前記導電体は、複数の導電部分を含み、

前記複数の導電部分は、互いに間隔を空けて配置されている、請求項 17 に記載の電磁波検出器。

【請求項 19】

基板部をさらに備え、

前記二次元材料層、前記第 1 電極部、前記第 1 電極部および前記強誘電体層は、前記基板部上に配置されている、請求項 1～18 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 20】

前記強誘電体層と接触している第 3 電極部をさらに備え、

前記第 3 電極部と前記第 1 電極部または前記第 2 電極部間から電気信号を取り出すことを特徴とする、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】

前記二次元材料層は、グラフェン、遷移金属ダイカルゴゲナイト、黒リン、シリセン、グラフェンナノリボンおよびボロフェンからなる群から選択されるいずれかの材料を含む、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】

薄膜誘電体層をさらに備え、

前記薄膜誘電体層は、前記二次元材料層と前記半導体層とに挟み込まれており、かつ電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている、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】

熱電材料層をさらに備え、

前記熱電材料層は、前記二次元材料層と前記半導体層とに挟み込まれており、かつ電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている、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】

発熱材料層をさらに備え、

前記発熱材料層は、前記強誘電体層と接触するように配置されている、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】

請求項 1～24 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、第 1 方向および前記第 1 方向に交差する第 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。

【発明の詳細な説明】

【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ものである。

【背景技術】

【0002】

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

10

20

30

40

50

あるグラフェンが知られている。グラフェンは、極めて高い移動度を有している。グラフェンの吸収率は、2.3%と低い。このため、二次元材料層としてグラフェンが用いられ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。

【0003】

例えば、米国特許出願公開2015/0243826号明細書（特許文献1）では、下記のような構造を有する検出器が提案されている。すなわち、米国特許出願公開2015/0243826号明細書では、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。ゲート電極がn型半導体層に接続されている。

10

【0004】

上記検出器では、チャネルとしてのグラフェン層にソース・ドレイン電極を介して電圧が印加される。この結果、n型半導体層で発生した光キャリアが増幅されるため検出器の感度が向上する。また、ゲート電極とソース電極またはドレイン電極とに電圧が印加された場合は、グラフェンとn型半導体層とのショットキー接続によってOFF動作が可能となる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】米国特許出願公開2015/0243826号明細書

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記公報に記載された検出器（電磁波検出器）では、半導体層に電磁波が照射されることによって生じた光キャリアによって電磁波が検出される。このため、検出器の感度は半導体層の量子効率に依存する。半導体層の量子効率は、電磁波の波長によっては十分に高くない。したがって、電磁波検出器の検出感度は、不十分である。

【0007】

本開示は上記課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、感度を向上させることができる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である。

30

【課題を解決するための手段】

【0008】

本開示の電磁波検出器は、半導体層と、二次元材料層と、第1電極部と、第2電極部と、強誘電体層とを備えている。二次元材料層は、半導体層に電氣的に接続されている。第1電極部は、二次元材料層に電氣的に接続されている。第2電極部は、半導体層を介して二次元材料層に電氣的に接続されている。強誘電体層は、第1電極部、第2電極部および半導体層の少なくともいずれかと電氣的に接続されている。電磁波検出器は、二次元材料層に対して強誘電体層から生じる電界が遮蔽されるように構成されている。または、強誘電体層は、二次元材料層と平面視で重ならないように配置されている。

【発明の効果】

40

【0009】

本開示の電磁波検出器によれば、強誘電体層は、第1電極部、第2電極部および半導体層の少なくともいずれかと電氣的に接続されている。強誘電体層の焦電効果は、電磁波の波長に依存しない。このため、電磁波検出器の感度は、半導体層の量子効率に依存しない。よって、半導体層の量子効率が低下する波長であっても、電磁波検出器の感度が低下することが抑制される。したがって、電磁波検出器の感度が向上する。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】実施の形態1に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図2】実施の形態1に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

50

【図 3】実施の形態 1 の第 1 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 4】実施の形態 1 の第 2 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 5】実施の形態 1 の第 3 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 6】実施の形態 1 の第 4 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 7】実施の形態 2 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

【図 8】実施の形態 2 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

10

【図 9】実施の形態 2 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 10】実施の形態 2 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 11】実施の形態 3 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 12】実施の形態 3 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 13】実施の形態 4 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 14】実施の形態 5 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 15】実施の形態 6 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

【図 16】図 15 の X V I - X V I 線における断面図である。

【図 17】図 15 の X V I I - X V I I 線における断面図である。

【図 18】実施の形態 6 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

20

【図 19】実施の形態 6 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 20】実施の形態 7 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

【図 21】実施の形態 7 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 22】実施の形態 8 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 23】実施の形態 9 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 24】実施の形態 9 の第 1 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 25】実施の形態 9 の第 2 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 26】実施の形態 10 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

30

【図 27】実施の形態 11 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 28】実施の形態 11 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

【図 29】実施の形態 11 の第 1 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す上面図である。

【図 30】実施の形態 11 の第 2 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 31】実施の形態 12 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 32】実施の形態 13 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 33】実施の形態 14 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 34】実施の形態 15 に係る電磁波検出器アレイの構成を概略的に示す上面図である。

40

【図 35】実施の形態 15 の変形例に係る電磁波検出器アレイの構成を概略的に示す上面図である。

【図 36】実施の形態 16 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 37】実施の形態 17 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 38】実施の形態 18 に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【図 39】実施の形態 18 の第 1 の変形例に係る電磁波検出器の構成を概略的に示す断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

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

50

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。

【0012】

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。

【0013】

以下に説明される実施の形態では、可視光または赤外光を検出する場合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光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、本開示の実施の形態において、これらの光および電波を総称して電磁波と記載する。

【0014】

また、本実施の形態では、グラフェンとしてp型グラフェンおよびn型グラフェンの用語が用いられる場合がある。以下の実施の形態では、真性状態のグラフェンよりも正孔が多いものがp型グラフェンと呼ばれ、真性状態のグラフェンよりも電子が多いものがn型グラフェンと呼ばれる。つまり、n型の材料は、電子供与性を有する材料である。また、p型の材料は、電子求引性を有する材料である。

【0015】

また、分子全体において電荷に偏りが見られる場合に電子が支配的になるものがn型と呼ばれる場合もある。分子全体において電荷に偏りが見られる場合に正孔が支配的になるものがp型と呼ばれる場合もある。二次元材料層の一例であるグラフェンに接触する部材の材料には、有機物および無機物のいずれか一方または有機物および無機物の混合物が用いられてもよい。

【0016】

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、可視光域および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、または、波長以下の寸法の構造により波長を操作するという意味でのメタマテリアルまた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、または、単に共鳴と呼ぶ。

【0017】

また、以下に説明する実施の形態では、二次元材料層の材料として、グラフェンを例に説明が行われているが、二次元材料層の材料はグラフェンに限られない。例えば、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ハニカム構造）、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）等の材料が適用され得る。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（MoS₂）、二硫化タングステン（WS₂）、二セレン化タングステン（WSe₂）等の遷移金属ダイカルコゲナイドが挙げられる。

【0018】

より好ましくは、二次元材料層は、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）、グラフェンナノリボンおよびボロフェンからなる群から選択されるいずれかの材料を含んでいる。

【0019】

これらの材料は、グラフェンと類似の構造を有している。これらの材料では、原子が二次元面内に単層で配列されている。したがって、これらの材料が二次元材料層に適用された場合においても、二次元材料層にグラフェンが適用された場合と同様の作用効果が得られる。

【0020】

また、本実施の形態において、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物の層である。

【0021】

実施の形態1.

＜電磁波検出器100の構成＞

図1～図6を用いて、実施の形態1に係る電磁波検出器100の構成を説明する。図1は、図2のI-I線における断面図である。

【0022】

図1に示されるように、電磁波検出器100は、半導体層4と、二次元材料層1と、第1電極部2aと、第2電極部2bと、強誘電体層5とを含んでいる。二次元材料層1、第1電極部2a、第2電極部2bおよび半導体層4は、第1電極部2a、二次元材料層1、半導体層4および第2電極部2bの順に電氣的に接続されている。本実施の形態において、電磁波検出器100は、絶縁膜3をさらに含んでいる。また、電磁波検出器100は、電圧計VMおよび後述される電流計IM（図5参照）の少なくともいずれかをさらに含んでいる。図1に示される電磁波検出器100は、電圧計VMをさらに含んでいる。

【0023】

図1に示されるように、半導体層4は、第1面4aおよび第2面4bを有している。第2面4bは、第1面4aに対向している。二次元材料層1、第1電極部2a、絶縁膜3および強誘電体層5は、第1面4a側に配置されている。第2電極部2bは、第2面4b側に配置されている。第1面4a側は、天面側と呼ばれる。第2面4b側は、底面側と呼ばれる。

【0024】

二次元材料層1は、半導体層4に電氣的に接続されている。二次元材料層1は、第1電極部2a、絶縁膜3および半導体層4上に配置されている。すなわち、二次元材料層1は、第1電極部2a、絶縁膜3および半導体層4に接触している。二次元材料層1は、第1部分1aと、第2部分1bと、第3部分1cとを含んでいる。第1部分1aは、半導体層4上に配置されている。第1部分1aは、半導体層4に電氣的に接続されている。第2部分1bは、第1電極部2a上に配置されている。第2部分1bは、第1電極部2aに電氣的に接続されている。第3部分1cは、第1部分1aおよび第2部分1bを電氣的に接続している。第1部分1aおよび第2部分1bは、第3部分1cによって繋がっている。本実施の形態において、第3部分1cは、絶縁膜3上に配置されている。

【0025】

第1部分1a、第2部分1bおよび第3部分1cの厚みは、互いに等しくてもよい。二次元材料層1が半導体層4に重ねられた方向に沿って、第1部分1aの天面側の表面と半導体層4の第1面4aとの距離は、第2部分1bの天面側の表面と半導体層4の第1面4aとの距離より近い。図示されないが、二次元材料層1の表面には、第1部分1a、第2部分1bおよび第3部分1cに起因した凹凸が形成されている。

【0026】

第1電極部2aは、二次元材料層1に電氣的に接続されている。第1電極部2aは、半導体層4を介さずに二次元材料層1に電氣的に接続されている。本実施の形態において、第1電極部2aは、二次元材料層1に直接接続されている。第1電極部2aは、二次元材料層1の底面側に配置されている。また、図示されないが、第1電極部2aは、二次元材料層1の天面側に配置されていてもよい。

【0027】

第2電極部2bは、半導体層4を介して二次元材料層1に電氣的に接続されている。第

10

20

30

40

50

2電極部2bは、半導体層4に接触している。図1に示された電磁波検出器100では、第2電極部2bは、半導体層4の第2面4bの全面を覆っている。第2電極部2bが第2面4bの全面を覆っている電磁波検出器100は、検出対象である電磁波が第1面4a側（天面側）のみから電磁波検出器100に入射する場合に好適である。また、第1面4a側（天面側）から電磁波検出器100に入射した電磁波は、強誘電体層5および半導体層4を透過した後、第2電極部2bによって反射する。第2電極部2bによって反射した電磁波は、第2面4b側（底面側）から再び強誘電体層5に入射する。このため、強誘電体層5には、第1面4a側および第2面4b側の各々から電磁波が入射する。これにより、強誘電体層5の電磁波の吸収率が向上する。

【0028】

また、図示されないが、第2電極部2bは、半導体層4の全面を覆ってなくてもよい。すなわち、第2電極部2bは、半導体層4の一部に接触していればよい。例えば、第2電極部2bは、第1面4a、第2面4bおよび第1面4aと第2面4bとに交差する方向に延びる側面のうちいずれかの一部と接触していればよい。半導体層4の第2面4bが第2電極部2bから露出している場合、電磁波検出器100は、第2面4b側から入射した電磁波を検出可能である。

【0029】

絶縁膜3は、半導体層4上に配置されている。絶縁膜3は、半導体層4の天面側に配置されている。絶縁膜3には、開口部OPが形成されている。開口部OPは、絶縁膜3を貫通している。半導体層4は、開口部OPにおいて絶縁膜3から露出している。すなわち、半導体層4は、開口部OPにおいて絶縁膜3に覆われていない。半導体層4の第1面4aは、開口部OPにおいて絶縁膜3に覆われていない。

【0030】

二次元材料層1は、開口部OPにおいて半導体層4に電氣的に接続されている。二次元材料層1は、開口部OP上から絶縁膜3まで延在している。本実施の形態において、二次元材料層1は、開口部OP上から絶縁膜3上まで延在している。二次元材料層1の第1部分1aは、開口部OP内において、半導体層4の第1面4a上に配置されている。好ましくは、二次元材料層1は、開口部OPにおいてショットキー接合によって半導体層4に接合されている。二次元材料層1の第1部分1aは、開口部OPにおいて半導体層4に接合されている。絶縁膜3は、二次元材料層1の第2部分1bおよび第3部分1cと半導体層4とを半導体層4とを隔てている。

【0031】

二次元材料層1の第1端は、開口部OP内に配置されている。二次元材料層1の第2端は、第2電極部2b上に配置されている。なお、二次元材料層1の第1端および第2端は、二次元材料層1の長手方向における端部である。図1において、二次元材料層1の第1端は、半導体層4の面内方向における開口部OPの中央に対して第1電極部2aとは反対側に配置されており、かつ二次元材料層1の第2端は、開口部OPの中央に対して第1電極部2a側に配置されている。図示されないが、二次元材料層1の第1端および第2端の各々が開口部OPの中央に対して第1電極部2a側に配置されてもよい。

【0032】

また、図1において二次元材料層1は、開口部OPにおいて半導体層4の第1面4aの一部を露出するように配置されている。図示されないが、二次元材料層1は、半導体層4の第1面4aの全面を覆うように配置されていてもよい。

【0033】

絶縁膜3は、第3面3aおよび第4面3bを有している。第3面3aは、半導体層4の第1面4aに接触している。第4面3bは、第3面3aに対向している。第4面3bの少なくとも一部は、二次元材料層1に接触している。すなわち、絶縁膜3は、二次元材料層1に対して底面側に配置されている。第1電極部2aは、絶縁膜3の第4面3b上に配置されている。第1電極部2aは、開口部OPから離れた位置に配置されている。

【0034】

10

20

30

40

50

強誘電体層 5 は、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかと電氣的に接続されている。本実施の形態において、強誘電体層 5 は、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 に電氣的に接続されている。図 1 では、強誘電体層 5 上には、絶縁膜 3 が配置されている。すなわち、強誘電体層 5 は、絶縁膜 3 によって覆われている。強誘電体層 5 は、半導体層 4 上に配置されている。強誘電体層 5 は、半導体層 4 に接触している。強誘電体層 5 は、第 1 電極部 2 a と半導体層 4 との間に配置されている。

【0035】

強誘電体層 5 は、電磁波検出器 100 の検出対象となる電磁波の波長（検出波長）に感度を有している。このため、強誘電体層 5 に検出波長を有する電磁波が照射された場合には、強誘電体層 5 において分極が変化する。すなわち、強誘電体層 5 に検出波長を有する電磁波が照射された場合には、強誘電体層 5 に焦電効果が生じる。分極が変化する方向（分極方向）は、二次元材料層 1 に分極により生じた光キャリアが注入される方向であることが好ましい。本実施の形態において、電磁波検出器 100 に電磁波が照射される方向は、第 1 電極部 2 a および第 2 電極部 2 b が重なる方向（紙面上下方向）である。

【0036】

本実施の形態において、強誘電体層 5 は、強誘電体層 5 内の分極が変化したときに第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の抵抗が変化するよう配置されている。これにより、電界は、第 1 電極部 2 a および第 2 電極部 2 b が重なる方向（紙面上下方向）に沿って生じる。

【0037】

強誘電体層 5 は、強誘電体層 5 において生じた光キャリアを二次元材料層 1 に注入するように構成されている。なお、光キャリアが二次元材料層 1 に注入されるとは、光キャリアが絶縁膜 3 を介せずに二次元材料層 1 に注入されるということである。強誘電体層 5 から生じた光キャリアは、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかを通して二次元材料層 1 に注入される。

【0038】

好ましくは、強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに対して順バイアス方向に電圧が印加されるよう配置されている。例えば、半導体層 4 に p 型材料が用いられかつ二次元材料層は n 型材料が用いられた場合には、電磁波の照射によって強誘電体層 5 から第 1 電極部 2 a には正孔が注入されかつ強誘電体層 5 から第 2 電極部 2 b には電子が注入されるよう、強誘電体層 5 が配置されることが好ましい。また、半導体層 4 に n 型材料が用いられかつ二次元材料層は p 型材料が用いられた場合には、電磁波の照射によって強誘電体層 5 から第 1 電極部 2 a には電子が注入されかつ強誘電体層 5 から第 2 電極部 2 b には正孔が注入されるよう、強誘電体層 5 が配置されることが好ましい。

【0039】

なお、強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに対して逆バイアス方向に電圧が印加されるよう配置されてもよい。この場合、逆バイアスが印加された際に電磁波の照射によって半導体層 4 の飽和領域と降伏領域とが切り替わるように動作することで、暗電流が低減される。

【0040】

電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1 に対して強誘電体層 5 から生じる電界が遮蔽されるよう構成されている。または、強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と平面視で重ならないよう配置されている。

【0041】

実施の形態 1 において、電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1 に対して強誘電体層 5 から生じる電界が遮蔽されるよう構成されている。電界は、導体によって遮蔽される。このため、強誘電体層 5 によって生じた電界は、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかによって遮蔽される。

【0042】

強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分と二次元材料層 1 とは、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかを挟み込んでいる。好ましくは、強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分の全面と二次元材料層 1 との間には、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかが挟み込まれている。図 1 に示される電磁波検出器 100 では、強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分と二次元材料層 1 とは、第 1 電極部 2 a を挟み込んでいる。このため、強誘電体層 5 によって生じた電界は、第 1 電極部 2 a によって遮蔽される。

【0043】

強誘電体層 5 は、好ましくは、二次元材料層 1 に接触していない。二次元材料層 1 と強誘電体層 5 との接触抵抗は、大きい。このため、仮に二次元材料層 1 と強誘電体層 5 とが接触した場合、強誘電体層 5 の分極変化によって生じた電界が二次元材料層 1 のフェルミレベルを著しく変化させることで電磁波検出器 100 の特性が変化する可能性がある。

【0044】

なお、強誘電体層 5 が二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されている場合については、実施の形態 2 において説明される。

【0045】

電圧計 VM は、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に電氣的に接続されている。電圧計 VM は、電磁波が電磁波検出器 100 に照射されることによって生じた電圧変化を検出するための電圧計 VM である。電磁波検出器 100 は、電圧計 VM が第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に流れる電流の電圧の変化を検出することで電磁波を検出するように構成されている。

【0046】

図 2 に示されるように、平面視における二次元材料層 1 の端部の形状は、矩形状である。二次元材料層 1 の端部の形状は、矩形状に限られず、三角形状、
形形状等であってもよい。また、図示されないが、二次元材料層 1 の端部の形状が
形形状である場合には、第 1 部分 1 a は、半導体に電氣的に接続された複数の端部を有していてもよい。図 2 では、二次元材料層 1 の端部の全体が半導体層 4 に接触している。このため、二次元材料層 1 の端部の全体が第 1 部分 1 a として構成されている。図示されないが、二次元材料層 1 の端部の一部が半導体層 4 に接触し、二次元材料層 1 の端部の他の部分が絶縁膜 3 に接触していてもよい。すなわち、二次元材料層 1 の端部の一部が第 1 部分 1 a として構成され、二次元材料層 1 の端部の他の部分が第 3 部分 1 c として構成されていてもよい。

【0047】

図 3 に示されるように、強誘電体層 5 は、第 2 電極部 2 b 上に配置されていてもよい。強誘電体層 5 は、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 に挟み込まれている。強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分と二次元材料層 1 とは、半導体層 4 を挟み込んでいる。このため、強誘電体層 5 によって生じた電界は、半導体層 4 によって遮蔽される。半導体層 4 によって電界が遮蔽される場合、半導体層 4 の濃度が高いことが望ましい。また、半導体層 4 によって電界が遮蔽される場合、半導体層 4 の導電率が高いことが望ましい。また、半導体層 4 によって電界が遮蔽される場合、半導体層 4 が厚いことが望ましい。

【0048】

図 4 に示されるように、強誘電体層 5 は、第 1 電極部 2 a に対して二次元材料層 1 とは反対側で二次元材料層 1 に直接接続されていてもよい。強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分と二次元材料層 1 とは、第 1 電極部 2 a を挟み込んでいる。強誘電体層 5 によって生じた電界は、第 1 電極部 2 a によって遮蔽される。

【0049】

図 5 に示されるように、電磁波検出器 100 は、電流計 IM をさらに含んでもよい。電流計 IM は、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に電氣的に接続されている。電流計 IM は、電磁波が電磁波検出器 100 に照射されることによって生じた電流変化を検出するための電流計 IM である。電磁波検出器 100 は、電流計 IM が第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に流れる電流の変化を検出することで電磁波を検出するように構成

10

20

30

40

50

されている。

【0050】

図6に示されるように、電磁波検出器100は、電源PWをさらに含んでもよい。電源PWは、第1電極部2aと第2電極部2bとに電氣的に接続されている。電源PWは、第1電極部2aおよび第2電極部2bに電圧V1を印加するように構成されている。これにより、第1電極部2aおよび第2電極部2bの間には、電流I1が流れる。

【0051】

次に、二次元材料層1、第1電極部2a、第2電極部2b、絶縁膜3、半導体層4および強誘電体層5の構成について詳細に説明する。

【0052】

<二次元材料層1の構成>

二次元材料層1は、例えば、単層のグラフェンである。単層のグラフェンは、二次元炭素結晶の単原子層である。グラフェンは、六角形状に配置された複数の連鎖の各々にそれぞれ配置された複数の炭素原子を有している。グラフェンの吸収率は、2.3%と低い。具体的には、グラフェンの白色光の吸収率は、2.3%である。なお、本実施の形態において、白色光は、可視光線の波長を有する光が均等に混ざった光である。また、二次元材料層1は、複数のグラフェン層が積層された多層グラフェンであってもよい。多層グラフェン中のグラフェンのそれぞれの六方格子の格子ベクトルの向きは、一致していてもよいし、異なってもよい。また、多層グラフェン中のグラフェンのそれぞれの六方格子の格子ベクトルの向きは、完全に一致していてもよい。また、二次元材料層1は、p型またはn型の不純物がドーピングされたグラフェンであってもよい。

【0053】

例えば、2層以上のグラフェン層が積層されることによって、二次元材料層1にバンドギャップが形成される。すなわち、積層されたグラフェン層の数を変更することによって、バンドギャップの大きさを調整することができる。これにより、二次元材料層1は、光電変換の対象となる電磁波（検出波長）を選択する波長選択効果を有することができる。また、例えば、多層グラフェンのグラフェン層の数が増加すると、チャネル領域での移動度が低下する。一方で、多層グラフェンのグラフェン層の数が増加すると、基板からのキャリア散乱の影響が抑制されるため、電磁波検出器100のノイズが低下する。このため、多層グラフェンが用いられた二次元材料層1を有する電磁波検出器100では、光吸収が増加されるため、電磁波の検出感度が向上する。

【0054】

また、二次元材料層1としてナノリボン状のグラフェン（グラフェンナノリボン）が用いられてもよい。二次元材料層1は、グラフェンナノリボン単体であってもよい。二次元材料層1の構造は、複数のグラフェンナノリボンが積層された構造であってもよい。二次元材料層1の構造は、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であってもよい。二次元材料層1の構造がグラフェンナノリボンが周期的に配列された構造である場合、グラフェンナノリボンにおいてプラズモン共鳴を発生するため、電磁波検出器100の感度が向上する。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。つまり、二次元材料層1としてグラフェンメタマテリアルが用いられた電磁波検出器100では、上述の効果が得られる。

【0055】

二次元材料層1の端部はグラフェンナノリボンであってもよい。この場合、グラフェンナノリボンはバンドギャップを有するため、グラフェンナノリボンと半導体部分との接合領域においてショットキー接合が形成される。

【0056】

二次元材料層1の第2部分1bが第1電極部2aに接触することによって、第1電極部2aから二次元材料層1にキャリアがドーピングされる。例えば、二次元材料層1がグラフェンであり第1電極部2aが金（Au）である場合、キャリアは正孔である。グラフェンの仕事関数と金（Au）の仕事関数との差によって、第1電極部2aに接している第2部分

10

20

30

40

50

1 bに正孔がドーピングされる。第2部分1 bに正孔がドーピングされた状態において、電磁波検出器100が電子伝導状態で駆動すると、正孔の影響によって、チャンネル内に流れる電子の移動度が低下する。このため、二次元材料層1と第1電極部2 aとのコンタクト抵抗が増加する。特に、二次元材料層1の全ての領域が単層グラフェンによって形成されている場合、第1電極部2 aから二次元材料層1に注入されるキャリアの量（ドーピング量）が大きい。このため、電磁波検出器100の電界効果の移動度の低下は、顕著である。したがって、二次元材料層1の全ての領域が単層グラフェンによって形成されている場合、電磁波検出器100の性能は低下する。

【0057】

また、多層グラフェンに第1電極部2 aからドーピングされるキャリアの量は、単層グラフェンに第1電極部2 aからドーピングされるキャリアの量よりも小さい。このため、キャリアがドーピングされやすい第1部分1 aおよび第2部分1 bが多層グラフェンから形成されることによって、二次元材料層1と第1電極部2 a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。これにより、電磁波検出器100の電界効果の移動度の低下を抑制することができるため、電磁波検出器100の性能を向上させることができる。

【0058】

<第1電極部2 aおよび第2電極部2 bの構成>

第1電極部2 aおよび第2電極部2 bの材料は、導電体であれば任意の材料であってよい。第1電極部2 aおよび第2電極部2 bの材料は、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）の少なくともいずれかを含んでいてもよい。第1電極部2 aと絶縁膜3との間または第2電極部2 bと半導体層4との間に、図示されない密着層が設けられていてもよい。密着層は、密着性を高めるように構成されている。密着層の材料は、例えば、クロム（Cr）またはチタン（Ti）等の金属材料を含んでいる。

【0059】

<絶縁膜3の構成>

絶縁膜3の材料は、例えば、酸化ケイ素（SiO₂）である。絶縁膜3の材料は、酸化ケイ素に限られず、例えば、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）、シロキサン系のポリマー材料であってもよい。例えば、窒化ボロン（BN）の原子配列は、グラフェンの原子配列と似ている。このため、窒化ボロン（BN）がグラフェンからなる二次元材料層1に接触する場合、二次元材料層1の電子移動度の低下が抑制される。よって、窒化ボロン（BN）は、二次元材料層1の下に配置される下地膜としての絶縁膜3に好適である。

【0060】

絶縁膜3の厚さは、第1電極部2 aが半導体層4に対して電氣的に絶縁され、かつトンネル電流が第1電極部2 aと半導体層4との間に生じない限りにおいて、特に制限されない。また、絶縁層は、二次元材料層1の下方に配置されていなくてもよい。

【0061】

<半導体層4の構成>

半導体層4の材料は、例えば、珪素（Si）等の半導体材料である。具体的には、半導体層4は、不純物がドーピングされたシリコン基板等である。

【0062】

半導体層4は、多層構造であってもよい。また、半導体層4は、pn接合フォトダイオード、pin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であってもよい。また、半導体層4は、フォトトランジスタであってもよい。

【0063】

本実施の形態においては半導体層4を構成する材料がシリコン基板である場合が説明されたが、半導体層4の材料は他の材料であってもよい。半導体層4の材料は、例えば、ケイ素（Si）、ゲルマニウム（Ge）、III-V族半導体またはII-V族半導体など

10

20

30

40

50

の化合物半導体、テルル化カドミウム水銀（ HgCdTe ）、アンチモン化イリジウム（ 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 ）、ヒ化インジウム（ InAs ）である。半導体層 4 は、量子井戸または量子ドットを含む基板であってもよい。半導体層 4 の材料は、 Type II 超格子であってもよい。半導体層 4 の材料は、上記の材料の単体であってもよいし、上記の材料を組み合わせた材料であってもよい。

【0064】

半導体層 4 は、抵抗率が $100\ \Omega \cdot \text{cm}$ 以下になるように不純物がドーピングされることが望ましい。半導体層 4 が高濃度にドーピングされることで半導体層 4 内における光キャリアの読み出し速度（移動速度）が向上するため、電磁波検出器 100 の応答速度が向上する。

【0065】

半導体層 4 の厚みは、 $10\ \mu\text{m}$ 以下であることが望ましい。半導体層 4 の厚みが小さくなることで、光キャリアの失活が小さくなる。

【0066】

<強誘電体層 5 の構成>

強誘電体層 5 の材料は、検出波長を有する電磁波が強誘電体層 5 に入射した際に分極が生じる材料であれば適宜に決められてもよい。強誘電体層 5 の材料は、例えば、チタン酸バリウム（ BaTiO_3 ）、ニオブ酸リチウム（ LiNbO_3 ）、タンタル酸リチウム（ LiTaO_3 ）、チタン酸ストロンチウム（ SrTiO_3 ）、チタン酸ジルコン酸鉛（ PZT ）、タンタル酸ビスマス酸ストロンチウム（ SBT ）、ビスマスフェライト（ BFO ）、酸化亜鉛（ ZnO ）、酸化ハフニウム（ HfO_2 ）および有機ポリマーであるポリフッ化ビニリデン系強誘電体（ PVDF 、 P(VDF-TrFE) 、 P(VDF-TrFE-CTFE) ）等の少なくともいずれかを含む。また、強誘電体層 5 は、異なる複数の強誘電体材料が積層または混合されることで構成されていてもよい。

【0067】

強誘電体層 5 の材料は、焦電効果を奏する焦電体であれば、上記の材料に限られない。具体的には、強誘電体層 5 の材料は、強誘電体層 5 の内部の熱エネルギーの変化に対して分極変化が生じる強誘電体であればよい。なお、焦電効果において電磁波は単に熱源として作用する。このため、焦電効果には、基本的に波長依存性はない。よって、強誘電体層 5 には、基本的に波長依存性はない。したがって、強誘電体層 5 は、広帯域の電磁波に感度を有する。

【0068】

強誘電体層 5 の材料は、自発分極を有する材料であってもよい。強誘電体層 5 の材料が自発分極を有する材料である場合には、電磁波の照射によって強誘電体層 5 の温度が上昇することで自発分極が減少する。このため、強誘電体層 5 から二次元材料層 1 および半導体層 4 に注入される光キャリアは減少する。

【0069】

好ましくは、強誘電体層 5 は、強誘電体層 5 内における誘電分極の変化速度が可能な限り速くなるように構成されている。具体的には、強誘電体層 5 の厚さ（膜厚）は、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に電圧を印加可能な範囲で薄いことが望ましい。

【0070】

強誘電体層 5 の厚さは、電磁波が二次元材料層 1 に照射された際に、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に可能な限り大きい電圧が印加される厚さであることが望ましい。また、強誘電体層 5 の分極方向は、特に制限されないが、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に電圧が印加される方向であることが望ましい。

【0071】

強誘電体層 5 上には、図示されない保護膜が設けられていてもよい。図示されない保護膜は、二次元材料層 1、第 1 電極部 2a および半導体層 4 を覆うように設けられていても

10

20

30

40

50

よい。保護膜の材料は、例えば、酸化物または窒化物等の絶縁体である。保護膜の材料は、例えば、酸化ケイ素（ SiO_2 ）、窒化ケイ素（ SiN ）、酸化ハフニウム（ HfO_2 ）、酸化アルミニウム（ Al_2O_3 ）、窒化ボロン（ BN ）（ボロンナイトライド）等である。

【0072】

電磁波検出器100は、図示されないモット絶縁体をさらに含んでいてもよい。図示されないモット絶縁体は、光が照射されることによって光誘起相転移が生じることで温度等の物性が変化するように構成されている。図示されないモット絶縁体は、強誘電体層5と接触している。

【0073】

＜電磁波検出器100の製造方法＞

次に、図1を用いて、実施の形態1に係る電磁波検出器100の製造方法を説明する。

【0074】

電磁波検出器100の製造方法は、準備工程、第2電極部形成工程、強誘電体層形成工程、絶縁膜形成工程、第1電極部形成工程、開口部形成工程、二次元材料層形成工程を含んでいる。

【0075】

まず、準備工程が実施される。準備工程では、図1に示されるように、ケイ素（ Si ）等を含む平坦な半導体基板が半導体層4として準備される。半導体基板の材料は、予め定められた検出波長に感度を有している材料である。

【0076】

続いて、第2電極部形成工程が実施される。第2電極部形成工程では、半導体層4の第1面4aに保護膜が形成される。保護膜は、例えば、レジストである。半導体層4の第1面4aが保護膜によって保護された状態で、半導体層4の第2面4bに第2電極部2bが成膜される。第2電極部2bが成膜される前に、第2電極部2bが成膜される半導体層4の第2面4bの領域に図示されない密着層が形成されてもよい。なお、第2電極部形成工程は、半導体層4の第1面4aが保護膜によって保護されている限り、強誘電体層形成工程から二次元材料層1形成工程までのいずれの工程の後に実施されてもよい。

【0077】

続いて、強誘電体層形成工程が実施される。強誘電体層形成工程では、半導体層4上に強誘電体層5が形成される。強誘電体層を形成する方法は、適宜に決められてもよい。例えば、強誘電体層5がポリマー系材料によって形成される場合、スピコート法等によってポリマー膜が形成された後にフォトリソグラフィ法によってポリマー膜が加工されることで、強誘電体層5が形成される。強誘電体層5の材料がポリマー系材料とは異なる材料である場合には、スパッタ、蒸着または金属有機物分解法（MODコート法、MOD：Metal Organic Composition）、ALD（Atomic Layer Deposition）法等によって強誘電体層5が形成された後に、フォトリソグラフィ法によって強誘電体層5がパターンニングされる。また、リフトオフと呼ばれる方法が用いられてもよい。リフトオフと呼ばれる方法では、レジストマスクがマスクとして用いられることで強誘電体層5が成膜された後に、レジストマスクが除去される。

【0078】

続いて、絶縁膜形成工程が実施される。絶縁膜形成工程では、半導体層4および強誘電体層5の表面上に絶縁膜3が形成される。例えば、半導体層4の材料がケイ素（ Si ）である場合、絶縁膜3は熱酸化した酸化ケイ素（ SiO_2 ）であってもよい。また、絶縁膜3の成膜方法は、CVD（Chemical Vapor Deposition）法またはスパッタリング法であってもよい。

【0079】

続いて、第1電極部形成工程が実施される。第1電極部形成工程では、絶縁膜3上に第1電極部2aが形成される。第1電極部2aが形成される前に、第1電極部2aが形成される絶縁膜3の領域に密着層が形成されてもよい。

10

20

30

40

50

【0080】

第1電極部2aの形成方法として、例えば、以下のプロセスが用いられる。まず、絶縁膜3上に写真製版または電子線（EB：Electron Beam）描画などによってレジストマスクが形成される。第1電極部2aが形成されるレジストマスクの領域には、開口した部分が形成される。その後、レジストマスク上に、第1電極部2aとなる金属などの膜が形成される。当該膜の形成には、蒸着法またはスパッタリング法などが用いられる。このとき、当該膜はレジストマスクの開口領域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、レジストマスクが当該膜の一部と共に除去される。レジストマスクの開口領域に配置されていた膜の他の一部が絶縁膜3上に残存し、第1電極部2a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

【0081】

第1電極部2aの形成方法として、他の方法が用いられてもよい。例えば、絶縁膜3上に第1電極部2aとなる金属膜などの膜が先に成膜される。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が形成される。レジストマスクは、第1電極部2aが形成される領域を覆うように形成される一方、第1電極部2aが形成される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または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が部分的に除去される。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2aとなる。その後、レジストマスクが除去される。このようにして、第1電極部2aが形成されてもよい。

【0082】

続いて、開口部形成工程が実施される。開口部形成工程では、絶縁膜3に開口部OPが形成される。具体的には、絶縁膜3上に写真製版または電子線描画などによって図示されないレジストマスクが形成される。絶縁膜3の開口部OPが形成されるレジストマスクの領域に開口した部分が形成されている。その後、レジストマスクをエッチングマスクとして絶縁膜3がエッチングされる。エッチングの手法は、上記ウェットエッチングおよび上記ドライエッチングのいずれかから適宜に選択され得る。エッチング後に、レジストマスクが除去される。なお、開口部形成工程は、第1電極部形成工程よりも前に実施されてもよい。

20

【0083】

続いて、二次元材料層形成工程が実施される。二次元材料層形成工程では、第1電極部2a、絶縁膜3および開口部OPの内部において露出する半導体層4が二次元材料層1によって覆われるように二次元材料層1が形成される。二次元材料層1の形成方法は、特に制限されない。二次元材料層1は、例えばエピタキシャル成長によって形成されてもよいし、スクリーン印刷法によって形成されてもよい。また、二次元材料層1は、予めCVD法により成膜された二次元材料膜が転写されて貼り付けられることによって形成されてもよい。二次元材料層1は、機械剥離等により剥離されたフィルム状の二次元材料膜が転写されて貼り付けられることによって形成されてもよい。

30

【0084】

二次元材料層1が形成された後、写真製版などによって二次元材料層1の上にレジストマスクが形成される。レジストマスクは、二次元材料層1が形成される領域を覆うとともに、それ以外の領域を露出するように形成される。その後、レジストマスクをエッチングマスクとして二次元材料層1がエッチングされる。エッチングの手法は、例えば酸素プラズマによるドライエッチングである。その後、レジストマスクが除去される。これにより、図1に示される二次元材料層1が形成される。

40

【0085】

以上の工程によって、電磁波検出器100が製造される。

なお、上述された製造方法では第1電極部2aの上に二次元材料層1が形成されたが、絶縁膜3上に二次元材料層1が形成された後に当該二次元材料層1の一部上に重なるように第1電極部2aが形成されてもよい。ただし、第1電極部2aの形成時に、二次元材料層1が第1電極部2aの形成プロセスによって損傷しないように注意する必要がある。例

50

例えば、二次元材料層 1 において第 1 電極部 2 a が重ねられる領域の他の領域が保護膜等によって予め覆われた状態で第 1 電極部 2 a が形成されることで、第 1 電極部 2 a の形成プロセスによって損傷することが抑制される。

【0086】

＜電磁波検出器 100 の動作原理＞

次に、図 1 を用いて、実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 の動作原理を説明する。

【0087】

図 1 に示されるように、まず、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に電圧計 V M または電流計 I M (図 5 参照) が電氣的に接続される。第 1 電極部 2 a、二次元材料層 1、半導体層 4 および第 2 電極部 2 b が順に電氣的に接続される。電圧計 V M または電流計 I M (図 5 参照) によって二次元材料層 1 に流れる電流の電圧または電流が計測される。なお、バイアス電圧は二次元材料層 1 に印加されなくてもよい。バイアス電圧が二次元材料層 1 に印加されない場合、電圧が印加されていないため暗電流がゼロになる。すなわち、電磁波検出器 100 は、OFF 動作を行う。

【0088】

次に、強誘電体層 5 に電磁波が照射される。強誘電体層 5 の焦電効果によって、強誘電体層 5 の内部に誘電分極の変化が生じる。これにより、半導体層 4 に強誘電体層 5 から電荷が注入される。このため、電磁波検出器 100 に対して擬似的にバイアス電圧が印加される。よって、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の抵抗が変化する。二次元材料層 1 内のフェルミレベルが変化することで電磁波検出器 100 の抵抗が変化する現象は、光バイアス効果と呼ばれる。第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の抵抗の変化によって、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の電圧および電流が変化する。電圧および電流の変化のいずれかが検出されることによって、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。

【0089】

第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間にさらに電圧が印加されてもよい。好ましくは、電圧は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とのショットキー接合に対して順バイアスになるように設定される。電圧が印加されることによって、第 1 電極部 2 a との第 2 電極部 2 b との間に配置された二次元材料層 1 には電流が流れる。なお、第 1 電極部 2 a から第 2 電極部 2 b までは電流が流れる経路となるため、二次元材料層 1 も電流が流れる経路となる。例えば、半導体層 4 を構成する半導体が p 型材料の珪素 (S i) からなり、二次元材料層 1 が n 型材料のグラフェンからなる場合、二次元材料層 1 と半導体層 4 とはショットキー接合によって接合される。これにより、ショットキー接合に対して順バイアスが印加されるように電圧が調整されることで、強誘電体層 5 の誘電分極が微小である場合であっても、電流の変化量を増幅することができる。

【0090】

また、電磁波が強誘電体層 5 に照射されることで、焦電効果によって強誘電体層 5 の誘電分極が変化するため、二次元材料層 1 または半導体層 4 のフェルミレベルが変調する。このため、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間のエネルギー障壁が低下する。これにより、電磁波検出器 100 に電磁波が照射された時にのみ電流が半導体層 4 を流れるため、電磁波検出器 100 に電磁波が照射された時にのみ電流を検出することができる。

【0091】

また、電磁波検出器 100 は、上記のような電流の変化が検出される構成に限定されない。例えば、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に一定の電流が流された状態で、電磁波検出器 100 に電磁波が照射されたときの第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の電圧の変化が検出されてもよい。なお、電磁波検出器 100 に電磁波が照射されたときの第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の電圧の変化は、二次元材料層 1 での電圧の変化である。

【0092】

また、上述された電磁波検出器 100 が第 1 の電磁波検出器として配置され、第 1 の電

磁波検出器と同じ構成を有する第2の電磁波検出器がさらに配置されてもよい。第1の電磁波検出器は、電磁波が照射される空間に配置される。第2の電磁波検出器は、電磁波が遮蔽された空間に配置される。第1の電磁波検出器の電流と第2の電磁波検出器の電流との差分が検出されることで検出されてもよい。第1の電磁波検出器の電圧と第2の電磁波検出器の電圧との差分が検出されることで検出されてもよい。

【0093】

＜電磁波検出器100の動作＞

次に、図1を用いて、実施の形態1に係る電磁波検出器100の具体的な動作について説明する。なお、半導体層4としてp型珪素（Si）、二次元材料層1としてグラフェン、強誘電体層5としてニオブ酸リチウム（LiNbO₃）が用いられた場合について説明される。

10

【0094】

二次元材料層1と半導体層4とのショットキー接合に対して電圧計VMが接続される。電磁波検出器100の検出波長は、ニオブ酸リチウム（LiNbO₃）の吸収波長に応じて定まる。

【0095】

検出波長を有する電磁波が強誘電体層5に入射することで、焦電効果によって強誘電体層5において誘電分極の変化が生じる。強誘電体層5における分極変化によって、電磁波検出器100内において電圧変化が生じる。これは、上述された光バイアス効果による現象である。二次元材料層1を構成するグラフェンにおけるキャリアの移動度が大きいいため、わずかな電圧変化に対して大きな変位電流が得られる。このため、強誘電体層5の焦電効果によって二次元材料層1のフェルミレベルは大きく変化する。これにより、二次元材料層1と半導体層4とのエネルギー障壁が低下する。よって、第1電極部2aと第2電極部2bとの間には、大きな電圧変化または電流変化が生じる。以上より、強誘電体層5の焦電効果によって、電磁波検出器100における電圧変化および電流変化が生じる。

20

【0096】

さらに、強誘電体層5の誘電分極の変化速度が可能な限り短く設定されている場合には、電磁波が電磁波検出器100に入射してから二次元材料層1において抵抗の変化が生じるまでの時間が短くなる。これにより、光バイアス効果によるキャリアの増幅の遅延が抑制されるため、電磁波検出器100の応答速度が大きくなる。

30

【0097】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器100の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0098】

＜作用効果＞

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0099】

本実施の形態に係る電磁波検出器100によれば、図1に示されるように、強誘電体層5は、第1電極部2a、第2電極部2bおよび半導体層4の少なくともいずれかと電氣的に接続されている。強誘電体層5の焦電効果によって、電磁波検出器100における電圧変化および電流変化が生じる。強誘電体層5の焦電効果は、電磁波の波長に依存しない。このため、電磁波検出器100の感度は、半導体層4の量子効率に依存しない。よって、半導体層4の量子効率が低下する波長であっても、電磁波検出器100の感度が低下することが抑制される。したがって、電磁波検出器100の感度が向上する。具体的には、量子効率100%を超える高感度化が可能となる。

40

【0100】

より詳細には、焦電効果による強誘電体層5における分極に起因した二次元材料層1における電流の変化量は、通常の半導体における電流の変化量よりも大きい。特に、二次元材料層1では、通常の半導体と比較して、小さな電圧変化に対して大きな電流変化が生じる。例えば、二次元材料層1として単層のグラフェンが用いられた場合、二次元材料層1

50

の厚みは原子層 1 層分であるため極めて薄い。また、単層のグラフェンにおける電子の移動度は大きい。この場合、二次元材料層 1 における電子の移動度および厚み等から算出される二次元材料層 1 での電流の変化量は、通常の半導体における電流の変化量の数百倍から数千倍程度である。なお、上記の強誘電体層 5 の焦電効果によって電磁波検出器 100 に擬似的にバイアス電圧が印加されることで二次元材料層 1 のフェルミレベルが大きく変化し、二次元材料層 1 と半導体層 4 とのエネルギー障壁が変化する効果は、光バイアス効果と呼ばれる。

【0101】

光バイアス効果によって、二次元材料層 1 における検出電流の取り出し効率は大幅に向上する。光バイアス効果は、通常の半導体のように光電変換材料の量子効率を直接的に増強するものではなく、電磁波の入射による電流の変化量を大きくするものである。このため、電磁波の入射による差分電流から算出された電磁波検出器 100 の量子効率は、100%を超えることができる。よって、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 による電磁波の検出感度は、半導体電磁波検出器または光バイアス効果が適用されていないグラフェン電磁波検出器と比較して、高い。

【0102】

図 1 に示されるように、電磁波検出器 100 では、二次元材料層 1 に対して強誘電体層 5 から生じる電界が遮蔽されている。より具体的には、強誘電体層 5 の二次元材料層 1 に向かい合う部分と二次元材料層 1 とは、第 1 電極部 2 a、第 2 電極部 2 b および半導体層 4 の少なくともいずれかを挟み込んでいるため、二次元材料層 1 に対して強誘電体層 5 から生じる電界が遮蔽されている。すなわち、二次元材料層 1 に電界効果が及ぶことが抑制されている。仮に強誘電体層 5 から生じる電界が二次元材料層 1 に対して遮蔽されない場合、二次元材料層 1 のフェルミレベルは強誘電体層 5 から生じた電界の電界効果によって著しく変化する。このため、電磁波検出器 100 の特性が変化することで電磁波検出器 100 の検出感度が低下する可能性がある。本実施の形態では、二次元材料層 1 に対して強誘電体層 5 から生じる電界が遮蔽されているため、電磁波検出器 100 の検出感度の低下を抑制することができる。

【0103】

図 1 に示されるように、二次元材料層 1 は、開口部 OP において半導体層 4 に電氣的に接続されている。二次元材料層 1 は、開口部 OP において半導体層 4 にショットキー接合によって接合されている。このため、二次元材料層 1 に逆バイアスが印加された際には二次元材料層 1 に電流が流れない。すなわち、二次元材料層 1 に暗電流が流れることを抑制することができる。よって、電磁波検出器 100 は、OFF 動作が可能となる。また、二次元材料層 1 に順バイアスが印加された際には、小さな電圧変化で大きな電流変化を得ることができる。このため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。これにより、電磁波検出器 100 の感度の向上と電磁波検出器 100 の OFF 動作とを両立することができる。

【0104】

図 1 に示されるように、絶縁膜 3 には、開口部 OP が形成されている。このため、電磁波検出器 100 は、開口部 OP を通って半導体層 4 に入射した電磁波も同時に検出することができる。半導体層 4 に電磁波が入射することで、半導体層 4 に光キャリアが生じる。光キャリアは、二次元材料層 1 を通って第 1 電極部 2 a に出力される。二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 に配置された部分（第 3 部分 1 c）を有している。このため、半導体層 4 で生じた光キャリアによる電界変化が絶縁膜 3 を介して二次元材料層 1 に印加される。二次元材料層 1 が第 3 部分 1 c を有していない場合と比べて、光ゲート効果による二次元材料層 1 の導電率がさらに大きく変調されやすい。このため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0105】

また、電磁波検出器 100 に電磁波が照射された際の電流の変化量は、二次元材料層 1 における光電変換によって生じた光電電流による変化を含んでいる。このため、電磁波検出器 100 に電磁波が照射されることで、上記の光バイアス効果、光ゲート効果および光

10

20

30

40

50

電変換が生じる。よって、電磁波検出器 100 は、光バイアス効果、光ゲート効果および光電変換による電流の変化を検出することができる。したがって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0106】

図 1 に示されるように、電磁波検出器 100 は、電圧計 VM および電流計 IM の少なくともいずれかが第 1 電極部 2a と第 2 電極部 2b との間に流れる電流の電圧および電流の少なくともいずれかの変化を検出することで電磁波を検出するように構成されている。このため、電圧計 VM および電流計 IM の少なくともいずれかを用いて電磁波を検出することができる。

【0107】

二次元材料層 1 は、グラフェン、遷移金属ダイカルゴゲナイト、黒リン、シリセン、グラフェンナノリボンおよびボロフェンからなる群から選択されるいずれかの材料を含んでいる。このため、本実施の形態の作用効果を確実に得ることができる。

【0108】

強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに対して順バイアス方向に電圧が印加されるように配置されている。小さな電圧変化に対して大きな光電流を得ることができる。このため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0109】

半導体層 4 に珪素 (Si) が用いられてもよい。このため、半導体層 4 中に読出回路を形成することができる。これにより、電磁波検出器 100 の外部に他の回路をさらに形成する必要をなくすることができる。

【0110】

実施の形態 2.

次に、図 7 ~ 図 10 を用いて、実施の形態 2 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 2 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。図 9 は、図 7 の I X - I X 線における断面図である。図 10 は、図 8 の X - X 線における断面図である。

【0111】

図 7 および図 8 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されている。すなわち、強誘電体層 5 は、平面視において二次元材料層 1 に対してずれて配置されている。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、強誘電体層 5 が二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されている点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。なお、本実施の形態において、平面視とは、第 1 電極部 2a から第 2 電極部 2b (図 9 および図 10 参照) に向かう方向に沿って電磁波検出器 100 を見ることである。

【0112】

強誘電体層 5 に生じる電界は、第 1 電極部 2a から第 2 電極部 2b に向かう方向に沿って生じる。すなわち、強誘電体層 5 に生じる電界は、平面視の方向に沿って生じる。

【0113】

強誘電体層 5 が二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されていれば、図 9 に示されるように、強誘電体層 5 は第 1 電極部 2a 上に配置されていてもよい。強誘電体層 5 が二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されていれば、図 10 に示されるように、強誘電体層 5 は半導体層 4 上に配置されていてもよい。

【0114】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0115】

<作用効果>

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 7 および図 8 に示されるように、

10

20

30

40

50

強誘電体層 5 は、二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されている。このため、強誘電体層 5 に生じた電界が二次元材料層 1 に及ぶことを抑制することができる。すなわち、二次元材料層 1 に電界効果が及ぶことが抑制されている。仮に強誘電体層 5 から生じる電界が二次元材料層 1 に対して遮蔽されない場合、二次元材料層 1 のフェルミレベルは強誘電体層 5 から生じた電界の電界効果によって著しく変化する。このため、電磁波検出器 100 の特性が変化することで電磁波検出器 100 の検出感度が低下する可能性がある。本実施の形態では、二次元材料層 1 と平面視で重ならないように配置されているため、電磁波検出器 100 の検出感度の低下を抑制することができる。

【0116】

実施の形態 3 .

次に、図 11 および図 12 を用いて、実施の形態 3 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 3 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。

【0117】

図 11 および図 12 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、第 3 電極部 2c をさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、電磁波検出器 100 が第 3 電極部 2c をさらに含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。第 3 電極部 2c は、第 1 電極部 2a および第 2 電極部 2b のいずれかとで強誘電体層 5 を挟み込んでいる。第 3 電極部 2c は、強誘電体層 5 に接触している。電磁波検出器 100 は、第 3 電極部 2c から出力された検出信号を検出するように構成されている。すなわち、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、第 3 電極部 2c と第 1 電極部 2a または第 2 電極部 2b 間から電気信号を取り出すことを特徴としている。強誘電体層 5 の分極方向は、電極が形成された面に対して直交していることが好ましい。電磁波検出器 100 が電源 PW (図 6 参照) を含んでいる場合には、電源 PW (図 6 参照) によって第 3 電極部 2c に電圧が印加されてもよい。

【0118】

図 11 では、強誘電体層 5 は、第 1 電極部 2a に対して半導体層 4 とは反対側に配置されている。第 3 電極部 2c は、強誘電体層 5 に対して第 1 電極部 2a とは反対側に配置されている。このため、第 3 電極部 2c は、第 1 電極部 2a とで強誘電体層 5 を挟み込んでいる。好ましくは、第 3 電極部 2c は、第 1 電極部 2a とで強誘電体層 5 を直接挟み込んでいる。

【0119】

図 12 では、強誘電体層 5 は、第 2 電極部 2b に対して半導体層 4 とは反対側に配置されていてもよい。第 3 電極部 2c は、強誘電体層 5 に対して第 2 電極部 2b とは反対側に配置されていてもよい。このため、第 3 電極部 2c は、第 2 電極部 2b とで強誘電体層 5 を挟み込んでいる。好ましくは、第 3 電極部 2c は、第 2 電極部 2b とで強誘電体層 5 を直接挟み込んでいる。

【0120】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0121】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0122】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 11 および図 12 に示されるように、第 3 電極部 2c は、第 1 電極部 2a および第 2 電極部 2b のいずれかで半導体層 4 を挟み込んでいる。このため、電磁波検出器 100 は、第 3 電極部 2c と第 1 電極部 2a または第 2 電極部 2b 間から電気信号を取り出すことを特徴としている。よって、強誘電体層 5 の分極変化によって生じた電荷を、第 3 電極部 2c を介して効率的に取り出すことが

10

20

30

40

50

できる。よって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。また、検出信号は、強誘電体層 5 および第 3 電極部 2c を通ってから出力される。強誘電体層 5 は高い絶縁性能を有しているため、電磁波検出器 100 の暗電流を低減することができる。このため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。また、第 3 電極に電圧を印加することで強誘電体層 5 の分極を制御することができる。これにより、電磁波の照射による分極変化を大きくすることができる。このため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0123】

実施の形態 4.

次に、図 13 を用いて、実施の形態 4 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 4 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。

【0124】

図 13 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、トンネル絶縁層 6 をさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、電磁波検出器 100 がトンネル絶縁層 6 をさらに含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。トンネル絶縁層 6 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。トンネル絶縁層 6 は、半導体層 4 と第 1 部分 1a とを電氣的に接続している。このため、本実施の形態において、第 1 部分 1a は、トンネル絶縁層 6 を介して半導体層 4 に接続されている。トンネル絶縁層 6 は、開口部 OP の内部に配置されている。

【0125】

トンネル絶縁層 6 は、検出波長を有する電磁波が二次元材料層 1 および強誘電体層 5 に入射した際に二次元材料層 1 と半導体層 4 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している。トンネル絶縁層 6 は、例えば、1 nm 以上 10 nm 以下の厚さを有する絶縁層である。絶縁層は、例えば、アルミナ（酸化アルミニウム）または酸化ハフニウム（ HfO_2 ）などの金属酸化物、酸化ケイ素（ SiO_2 ）または窒化ケイ素（ Si_3N_4 ）などの半導体を含む酸化物、窒化ホウ素（BN）等の窒化物の少なくともいずれか 1 つを含む。

【0126】

トンネル絶縁層 6 の作製方法は、適宜に決められてもよいが、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。また、トンネル絶縁層 6 は、半導体層 4 の表面を酸化または窒化させることにより形成されてもよい。また、トンネル絶縁層 6 は、半導体層 4 の表面に形成される自然酸化膜であってもよい。

【0127】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0128】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0129】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 13 に示されるように、トンネル絶縁層 6 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。トンネル絶縁層 6 は、検出波長を有する電磁波が二次元材料層 1 および強誘電体層 5 に入射した際に二次元材料層 1 と半導体層 4 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している。このため、電磁波の入射によってトンネル電流が生じる。よって、半導体層 4 およびトンネル絶縁層 6 を通って二次元材料層 1 に注入される光電流の注入効率が向上する。これにより、二次元材料層 1 に大きな光電流が注入される。したがって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。また、トンネル絶縁層 6 によって、二次元材料層 1 と半導体層 4 との接合界面における漏れ電流を抑制することができる。これにより、暗電流を低減することができ

る。

【0130】

実施の形態5.

次に、図14を用いて、実施の形態5に係る電磁波検出器100の構成を説明する。実施の形態5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。

【0131】

図14に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器100は、接続導電体CCをさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器100は、電磁波検出器100が接続導電体CCをさらに含んでいる点で実施の形態1に係る電磁波検出器100とは異なっている。二次元材料層1は、接続導電体CCを介して半導体層4に電氣的に接続されている。接続導電体CCは、開口部OPの内部に配置されている。

【0132】

接続導電体CCの上面には、二次元材料層1が重ねられている。接続導電体CCの下面は、半導体層4の第1面4aに電氣的に接続されている。二次元材料層1は、接続導電体CCの上面に電氣的に接続されている。接続導電体CCの上面の位置は、絶縁膜3の上面の位置と同じである。二次元材料層1は、絶縁膜3の上面から接続導電体CCの上面上まで、屈曲することなく平面状に延びている。

【0133】

接続導電体CCと二次元材料層1とのコンタクト抵抗は、二次元材料層1と半導体層4とのコンタクト抵抗よりも小さい。接続導電体CCと半導体層4とのコンタクト抵抗は、二次元材料層1と半導体層4とのコンタクト抵抗よりも小さい。接続導電体CCと二次元材料層1とのコンタクト抵抗および接続導電体CCと半導体層4とのコンタクト抵抗の和は、二次元材料層1と半導体層4とのコンタクト抵抗よりも小さい。

【0134】

電磁波が接続導電体CCを通して強誘電体層5に入射する場合には、接続導電体CCは、電磁波が検出する電磁波の波長（検出波長）において高い透過率を有していることが望ましい。

【0135】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器100の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0136】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0137】

本実施の形態に係る電磁波検出器100によれば、図14に示されるように、二次元材料層1は、接続導電体CCを介して半導体層4に電氣的に接続されている。接続導電体CCと二次元材料層1とのコンタクト抵抗および接続導電体CCと半導体層4とのコンタクト抵抗の和は、二次元材料層1と半導体層4とのコンタクト抵抗よりも小さい。このため、二次元材料層1と半導体層4とが直接接合される場合よりも、コンタクト抵抗を低減することができる。よって、電磁波の検出信号の減衰を抑制することができる。したがって、電磁波検出器100の感度が向上する。また、接続導電体CCと半導体層4とがショットキー接合によって接合されるため、暗電流を抑制することができる。

【0138】

接続導電体CCの上面の位置は、絶縁膜3の上面の位置と同じであることが好ましい。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。このため、電磁波検出器100の検出感度を向上させることができる。

【0139】

実施の形態 6 .

次に、図 1 5 ~ 図 1 7 を用いて、実施の形態 6 に係る電磁波検出器 1 0 0 の構成を説明する。実施の形態 6 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 4 0 】

図 1 5 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 では、二次元材料層 1 は、複数の第 1 部分 1 a を含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 は、二次元材料層 1 が複数の第 1 部分 1 a を含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。複数の第 1 部分 1 a は、半導体層 4 上に配置されている。複数の第 1 部分 1 a は、互いに間隔を空けて配置されている。

10

【 0 1 4 1 】

本実施の形態において、開口部 O P は、第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 を含んでいる。第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 は、互いに間隔を空けて配置されている。第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 の各々は、絶縁膜 3 を貫通している。半導体層 4 は、第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 の各々において絶縁膜 3 から露出している。二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 上から第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 の各々の内部まで延在している。二次元材料層 1 は、第 1 開口領域 O P 1、第 2 開口領域 O P 2 および第 3 開口領域 O P 3 において半導体層 4 に接触している。

20

【 0 1 4 2 】

電磁波検出器 1 0 0 は、1 つの画素として構成されている。例えば、電磁波検出器 1 0 0 は四角形の平面形状を有する 1 つの画素として構成されている。電磁波が強誘電体層 5 に入射する際に、第 1 電極部 2 a の面積が可能な限り小さいことが望ましい。このため、第 1 電極部 2 a は、半導体層 4 の四隅のうち第 1 の角に配置されている。また、第 1 開口領域 O P 1 は、半導体層 4 の四隅のうち第 2 の角に配置されている。第 2 開口領域 O P 2 は、半導体層 4 の四隅のうち第 3 の角から第 4 の角にわたって配置されている。これにより、第 1 電極部 2 a による電磁波の減衰が抑制され、かつ二次元材料層 1 と強誘電体層 5 との接触面積が増加する。よって、二次元材料層 1 において強誘電体層 5 の分極変化（焦電効果）による影響を受ける領域が大きくなるため、電磁波検出器 1 0 0 の感度が向上する。なお、第 1 電極部 2 a の面積および開口部 O P の面積は、可能な限り小さいことが望ましい。

30

【 0 1 4 3 】

図 1 6 に示されるように、複数の第 1 部分 1 a の第 1 の第 1 部分 1 a 1 は、第 1 開口領域 O P 1 において半導体層 4 に接触している。図 1 7 に示されるように、複数の第 1 部分 1 a の第 2 の第 1 部分 1 a 2 は、第 2 開口領域 O P 2 において半導体層 4 に接触している。複数の第 1 部分 1 a の第 3 の第 1 部分 1 a 3 は、第 3 開口領域 O P 3 において半導体層 4 に接触している。

【 0 1 4 4 】

40

次に、図 1 8 および図 1 9 を用いて、実施の形態 6 の第 1 の変形例に係る電磁波検出器 1 0 0 の構成を説明する。図 1 9 は、図 1 8 の X I X - X I X 線における断面図である。

【 0 1 4 5 】

本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 では、図 1 8 および図 1 9 に示されるように、二次元材料層 1 は、複数の第 2 部分 1 b を含んでいる。複数の第 2 部分 1 b は、第 1 電極部 2 a 上に配置されている。複数の第 2 部分 1 b は、互いに間隔を空けて配置されている。

【 0 1 4 6 】

本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 は、3 つの第 1 電極部 2 a を含んでいる。二次元材料層 1 は、3 つの第 2 部分 1 b を含んでいる。3 つの第 1 電極部 2 a は、半導体層 4 の四隅のうち第 1 から第 3 の角に配置されている。また、複数の第 2 部分 1 b は、第 1 の

50

第２部分１ｂ１、第２の第２部分１ｂ２および第３の第２部分１ｂ３を含んでいる。第１の第２部分１ｂ１、第２の第２部分１ｂ２および第３の第２部分１ｂ３の各々は、第１から第３の角にそれぞれ配置されている。

【０１４７】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器１００の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【０１４８】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【０１４９】

本実施の形態に係る電磁波検出器１００によれば、図１５に示されるように、複数の第１部分１ａは、互いに間隔を空けて配置されている。このため、第１部分１ａが単体である場合よりも、複数の第１部分１ａを通して第１電極部２ａと半導体層４との間を流れる光電流が二次元材料層１において局所的に流れることを抑制することができる。また、第１部分１ａが単体である場合よりも、二次元材料層１と半導体層４との接触面積を大きくすることが容易である。このため、二次元材料層１を流れる光電流が分散する。よって、強誘電体層５の焦電効果に起因して二次元材料層１において電流が流れる領域が大きくなる。したがって、電磁波検出器１００の検出感度が向上する。

【０１５０】

本実施の形態の第１の変形例に係る電磁波検出器１００によれば、図１９に示されるように、複数の第２部分１ｂは互いに間隔を空けて配置されている。このため、第２部分１ｂが単体である場合よりも、複数の第２部分１ｂを通して第１電極部２ａと半導体層４との間を流れる光電流が二次元材料層１において局所的に流れることを抑制することができる。また、第２部分１ｂが単体である場合よりも、二次元材料層１と半導体層４との接触面積を大きくすることが容易である。このため、二次元材料層１を流れる光電流が分散する。よって、強誘電体層５の焦電効果に起因して二次元材料層１において電流が流れる領域が大きくなる。したがって、電磁波検出器１００の検出感度が向上する。

【０１５１】

実施の形態７．

次に、図２０および図２１を用いて、実施の形態７に係る電磁波検出器１００の構成を説明する。実施の形態７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。

【０１５２】

図２０に示されるように、第１電極部２ａは、平面視において環状を有している。半導体層４は、第１電極部２ａよりも内側において絶縁膜３から露出している。二次元材料層１は、第１電極部２ａよりも内側において半導体層４に電氣的に接続されている。第１電極部２ａは、半導体層４の外周に配置されている。

【０１５３】

図２１に示されるように、開口部ＯＰは、第１電極部２ａよりも内側に配置されている。第１電極部２ａは、開口部ＯＰを取り囲むように絶縁膜３上に配置されている。二次元材料層１の第１部分１ａは、第１電極部２ａよりも内側において半導体層４に電氣的に接続されている。開口部ＯＰは、例えば、半導体層４の中央に配置されている。

【０１５４】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器１００の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【０１５５】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。図２０に示されるように、第１電極部２ａは、平面視において環状を有している。このため、第１電極部２ａによる電磁波の減衰

10

20

30

40

50

を最小限に抑えつつ、二次元材料層 1 において半導体層 4 からの電界変化の影響を受ける領域を広げることができる。よって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0156】

実施の形態 8.

次に、図 22 を用いて、実施の形態 8 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 8 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。

【0157】

図 22 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、半導体層 4 は、第 1 半導体部 41 と、第 2 半導体部 42 と含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、半導体層 4 が第 1 半導体部 41 および第 2 半導体部 42 を含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。なお、半導体層 4 は、図示されない第 3 半導体部をさらに含んでいてもよい。第 1 半導体部 41 は、第 2 半導体部 42 に接合されている。第 1 半導体部 41 は、第 2 半導体部 42 に p n 接合によって接合されている。このため、半導体層 4 の内部には、p n 接合が形成されている。

【0158】

第 1 半導体部 41 は、開口部 OP において絶縁膜 3 から露出している。第 1 半導体部 41 は、二次元材料層 1 を介して第 1 電極部 2a に電氣的に接続されている。第 1 半導体部 41 は、二次元材料層 1 および絶縁膜 3 に接触している。第 2 半導体部 42 は、第 1 半導体部 41 に対して二次元材料層 1 とは反対側に配置されている。第 2 半導体部 42 は、第 2 電極部 2b に電氣的に接続されている。なお、図 22 では、第 2 半導体部 42 は、第 1 半導体部 41 に積層されているが、第 1 半導体部 41 と第 2 半導体部 42 との位置関係はこれに限られない。

【0159】

第 2 半導体部 42 は、第 1 半導体部 41 とは異なる導電型を有している。第 1 半導体部 41 は、第 1 導電型を有している。第 2 半導体部 42 は、第 2 導電型を有している。第 1 導電型は、第 2 導電型とは逆の導電型である。例えば、第 1 半導体部 41 の導電型が n 型である場合、第 2 半導体の導電型は p 型である。これにより、半導体層 4 は、ダイオードとして構成されている。

【0160】

第 2 半導体部 42 は、第 1 半導体部 41 とは異なる吸収波長を有していてもよい。半導体層 4 は、強誘電体層 5 とは異なる波長に感度を有するダイオードとして構成されていてもよい。また、第 1 半導体部 41 および第 2 半導体部 42 は、強誘電体層 5 とは異なる波長に感度を有するダイオードとして構成されていてもよい。

【0161】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0162】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0163】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 22 に示されるように、第 1 半導体部 41 は、第 2 半導体部 42 に接合されている。このため、半導体層 4 の内部には p n 接合が形成されている。これにより、半導体層 4 がダイオードとして構成されている。よって、半導体層 4 に暗電流が流れることを抑制することができる。

【0164】

第 1 半導体部 41 および第 2 半導体部 42 は、強誘電体層 5 とは異なる波長に感度を有するダイオードとして構成されている場合、電磁波検出器 100 が検出可能な波長は、第 1 半導体部 41、第 2 半導体部 42 および強誘電体層 5 の各々がそれぞれ検出可能な波長

10

20

30

40

50

である。よって、電磁波検出器 100 は広帯域の波長を検出することができる。

【0165】

実施の形態 9.

次に、図 23 を用いて、実施の形態 9 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 9 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。

【0166】

図 23 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、強誘電体層 5 は、第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 を含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、強誘電体層 5 が第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 を含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 の各々は、二次元材料層 1 および半導体層 4 に電氣的に接続されている。

【0167】

第 1 強誘電体部分 51 は、半導体層 4、第 1 電極部 2a および第 2 電極部 2b のいずれかに接触して配置されている。本実施の形態において、第 1 強誘電体部分 51 は、第 2 電極部 2b 上に配置されている。第 2 強誘電体部分 52 は、第 1 強誘電体部分 51 に対して第 2 電極部 2b とは反対側で第 1 強誘電体部分 51 上に配置されている。このため、第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 は、積層されている。なお、第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 の配置は、これに限られない。

【0168】

第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 の材料は、熱エネルギーの変化に対して分極変化が生じる強誘電体であればよい。第 1 強誘電体部分 51 が吸収可能な電磁波の波長は、第 2 強誘電体部分 52 が吸収可能な電磁波の波長とは異なっている。

【0169】

次に、図 24 を用いて、実施の形態 9 に係る電磁波検出器 100 の第 1 の変形例の構成を説明する。

【0170】

図 24 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 は、半導体層 4 の面内方向に沿って並べられている。第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 は、半導体層 4、第 1 電極部 2a および第 2 電極部 2b のいずれかの上において互いに異なる領域に配置されている。

【0171】

本実施の形態の変形例は、第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 の各々が異なる領域に配置されている点で図 23 に示された電磁波検出器 100 と異なっている。

【0172】

第 1 強誘電体部分 51 は、平面視において二次元材料層 1 の第 1 部分 1a と重なるように配置されている。第 2 強誘電体部分 52 は、平面視において二次元材料層 1 の第 2 部分 1b および第 3 部分 1c と重なるように配置されている。

【0173】

第 1 強誘電体部分 51 の分極率は、第 2 強誘電体部分 52 の分極率とは異なっている。例えば、第 1 強誘電体部分 51 の分極率は、第 2 強誘電体部分 52 の分極率よりも高い。第 1 強誘電体部分 51 および第 2 強誘電体部分 52 の分極率は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1a、第 2 部分 1b および第 3 部分 1c の各々におけるフェルミレベルが最適となるように設計される。

【0174】

次に、図 25 を用いて、実施の形態 9 に係る電磁波検出器 100 の第 2 の変形例の構成を説明する。

【0175】

図 2 5 に示されるように、強誘電体層 5 は、第 1 強誘電体部分 5 1、第 2 強誘電体部分 5 2、第 3 強誘電体部分 5 3、第 4 強誘電体部分 5 4 および第 5 強誘電体部分 5 5 を含んでいる。電磁波検出器 1 0 0 は、第 3 電極部 2 c および第 4 電極部 2 d を含んでいる。第 1 強誘電体部分 5 1 は、第 1 電極部 2 a と第 3 電極部 2 c とに挟み込まれている。第 2 強誘電体部分 5 2 は、第 1 電極部 2 a と絶縁膜 3 とに挟み込まれている。第 3 強誘電体部分 5 3 は、第 2 電極部 2 b と半導体層 4 とに挟み込まれている。第 4 強誘電体部分 5 4 は、第 2 電極部 2 b と第 4 電極部 2 d とに挟み込まれている。第 5 強誘電体部分 5 5 は、開口部 O P において半導体層 4 上に配置されている。第 1 強誘電体部分 5 1、第 2 強誘電体部分 5 2、第 3 強誘電体部分 5 3、第 4 強誘電体部分 5 4 および第 5 強誘電体部分 5 5 の各々の分極方向は電磁波検出器 1 0 0 にバイアス電圧が印加される方向に沿っていることが好ましい。

10

【0 1 7 6】

なお、第 1 強誘電体部分 5 1、第 2 強誘電体部分 5 2、第 3 強誘電体部分 5 3、第 4 強誘電体部分 5 4 および第 5 強誘電体部分 5 5 の配置は上記の配置に限られない。

【0 1 7 7】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 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 7 8】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

20

【0 1 7 9】

本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 によれば、図 2 3 に示されるように、強誘電体層 5 は、第 1 強誘電体部分 5 1 および第 2 強誘電体部分 5 2 を含んでいる。このため、強誘電体層 5 が 1 つの強誘電体部分のみからなる場合よりも強誘電体層 5 の体積を容易に大きくすることができる。強誘電体層 5 の体積が大きいほど、強誘電体層 5 の分極変化が増加する。したがって、電磁波検出器 1 0 0 の感度が向上する。また、複数箇所に強誘電体部分が配置されているため、電磁波検出器 1 0 0 の電流経路における検出信号の減衰が小さくなる。このため、電磁波検出器 1 0 0 の感度が向上する。

【0 1 8 0】

第 1 強誘電体部分 5 1 が吸収可能な電磁波の波長は、第 2 強誘電体部分 5 2 が吸収可能な電磁波の波長とは異なっている。このため、電磁波検出器 1 0 0 は、第 1 強誘電体部分 5 1 および第 2 強誘電体部分 5 2 が吸収可能な電磁波の波長が同じである場合よりも、広帯域の波長を検出することができる。

30

【0 1 8 1】

本実施の形態の第 1 の変形例に係る電磁波検出器 1 0 0 によれば、図 2 4 に示されるように、第 1 強誘電体部分 5 1 の分極率は、第 2 強誘電体部分 5 2 の分極率とは異なっている。第 1 強誘電体部分 5 1 は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a に電氣的に接続されている。第 2 強誘電体部分 5 2 は、二次元材料層 1 の第 2 部分 1 b および第 3 部分 1 c に電氣的に接続されている。このため、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a、第 2 部分 1 b および第 3 部分 1 c の各々におけるフェルミレベルが最適になるように第 1 強誘電体部分 5 1 および第 2 強誘電体部分 5 2 のフェルミレベルを設計することができる。よって、電磁波検出器 1 0 0 の感度が向上する。

40

【0 1 8 2】

本実施の形態の第 2 の変形例に係る電磁波検出器 1 0 0 によれば、図 2 5 に示されるように、強誘電体層 5 は、第 1 強誘電体部分 5 1、第 2 強誘電体部分 5 2、第 3 強誘電体部分 5 3、第 4 強誘電体部分 5 4 および第 5 強誘電体部分 5 5 を含んでいる。このため、強誘電体層 5 が第 1 強誘電体部分 5 1 および第 2 強誘電体部分 5 2 のみからなる場合よりも、強誘電体層 5 の体積がさらに大きくなる。よって、強誘電体層 5 の分極変化がさらに大きくなる。したがって、電磁波検出器 1 0 0 の感度がさらに向上する。

【0 1 8 3】

50

実施の形態 10.

次に、図 26 を用いて、実施の形態 10 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 10 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。

【0184】

図 26 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、二次元材料層 1 は、乱層構造部分 1 T を含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1 が乱層構造部分 1 T を含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。乱層構造部分 1 T は、複数のグラフェン層のそれぞれの格子が不整合な状態で複数のグラフェン層が積層された構造である。なお、二次元材料層 1 は、二次元材料層 1 の一部として乱層構造部分 1 T を含んでいてもよいし、二次元材料層 1 の全体が乱層構造部分 1 T からなっているてもよい。本実施の形態に係る二次元材料層 1 の材料は、積層グラフェンである。

【0185】

図 26 では、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c は、乱層構造部分 1 T からなっている。すなわち、二次元材料層 1 のうち絶縁膜 3 上に配置された部分にのみ乱層構造のグラフェンが適用されている。また、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a および第 2 部分 1 b は、乱層構造部分 1 T を含まなくてもよい。つまり、二次元材料層 1 のうち第 1 電極部 2 a 上および半導体層 4 上に配置された部分は、乱層構造部分 1 T を含まなくてもよい。第 1 部分 1 a および第 2 部分 1 b は、例えば、単層のグラフェンからなってもよい。第 1 部分 1 a および第 2 部分 1 b が単層のグラフェンからなりかつ第 3 部分 1 c が乱層構造部分 1 T を含む場合、二次元材料層 1 と第 1 電極部 2 a とのコンタクト抵抗および二次元材料層 1 と半導体層 4 とのコンタクト抵抗が増加することを抑制でき、かつ二次元材料層 1 に対する絶縁膜 3 によるキャリア散乱を抑制することができる。また、図示されないが、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a および第 2 部分 1 b は、乱層構造部分 1 T であってもよい。

【0186】

乱層構造部分 1 T 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 1 T 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 1 T が形成されてもよい。

【0187】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0188】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0189】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 26 に示されるように、二次元材料層 1 は、乱層構造部分 1 T を含んでいる。このため、二次元材料層 1 におけるキャリア移動度を向上させることができる。よって、電磁波検出器 100 の感度を向上させることができる。

【0190】

より詳細には、乱層構造部分 1 T を含まない通常の積層グラフェンは、複数のグラフェンの各々の格子がそれぞれ整合した状態で積層される。この状態は、A-B 積層と呼ばれる。一方、乱層構造部分 1 T を含む積層グラフェンは、次のように形成される。CVD 法によって作成されたグラフェンは、多結晶を有する。このため、グラフェンの上にさらにグラフェンが複数回転写された場合、または CVD 法によって下地のグラフェンを核としてさらにグラフェンが積層された場合には、複数のグラフェンの各々の格子がそれぞれ不

整合な状態で積層される。すなわち、グラフェンに乱層構造部分 1 T が形成される。乱層構造部分 1 T を構成する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、下地となる絶縁膜 3 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、乱層構造部分 1 T において、絶縁膜 3 に接触するグラフェンは 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、下地の絶縁膜 3 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 はキャリアの移動度が向上する。この結果、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0191】

実施の形態 11.

次に、図 27 および図 28 を用いて、実施の形態 11 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 11 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。図 27 は、図 28 の X X V I I - X X V I I 線における断面図である。

【0192】

図 27 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、導電体 7 をさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、電磁波検出器 100 が導電体 7 をさらに含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。導電体 7 は、二次元材料層 1 に接触するように配置されている。導電体 7 は、電源回路等に接続されていない。すなわち、導電体 7 は、フローティング電極として構成されている。導電体 7 の材料は、電気が通る材料であれば適宜に決められてもよい。導電体 7 の材料は、例えば、金 (A u)、銀 (A g)、銅 (C u)、アルミニウム (A l)、ニッケル (N i)、クロム (C r)、パラジウム (P d) 等の金属材料である。導電体 7 の材料は、好ましくは、導電体 7 に表面プラズモン共鳴が生じる材料である。

【0193】

導電体 7 の形成方法は、適宜に決められてもよい。導電体 7 の形成方法は、例えば、実施の形態 1 において説明された第 1 電極部 2 a の製造方法と同じであってもよい。

【0194】

本実施の形態において、導電体 7 は、複数の導電部分 70 を含んでいる。複数の導電部分 70 は、互いに間隔を空けて配置されている。導電部分 70 の材料は、好ましくは、導電部分 70 に表面プラズモン共鳴が生じる材料である。複数の導電部分 70 の各々は、フローティング電極として構成されている。

【0195】

本実施の形態において、複数の導電部分 70 は、一次元 (図 28 参照) または二次元 (図 29 参照) の周期構造を有している。複数の導電部分 70 のうち隣り合う導電部分 70 同士は、好ましくは、複数の導電部分 70 の各々に表面プラズモン共鳴が生じる間隔を空けて配置されている。

【0196】

図 28 に示されるように、複数の導電部分 70 が一次元の周期構造を有していてもよい。複数の導電部分 70 のうち隣り合う導電部分 70 同士は、第 1 方向に沿って等間隔に配置されている。

【0197】

図 29 に示されるように、複数の導電部分 70 が二次元の周期構造を有していてもよい。複数の導電部分 70 のうち隣り合う導電部分 70 同士は、第 1 方向および第 2 方向に沿って等間隔に配置されている。第 2 方向は、第 1 方向に交差している。図 29 では、複数の導電部分 70 は、正方格子の格子点に対応する位置に配置されている。複数の導電部分 70 は、例えば、三角格子の格子点に対応する位置に配置されていてもよい。なお、図示されないが、複数の導電部分 70 の配置は、周期的な対称性を有する配列に限られない。

10

20

30

40

50

また、複数の導電部分 70 の配置は、平面視において、非対称性を有する配列であってもよい。図 28 および図 29 では、複数の導電部分 70 の平面形状は四角形状であるが、複数の導電部分 70 の形状はこれに限られない。複数の導電部分 70 の平面形状は、例えば、円形状、三角形形状等の多角形状であってもよいし、楕円形状等であってもよい。

【0198】

また、図 30 に示されるように、複数の導電部分 70 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に配置されていてもよい。また、図示されないが、二次元材料層 1 は、複数の凹部または複数の凸部を含んでいてもよい。複数の凹部は、周期的な構造または非対称な構造を有していてもよい。複数の凸部は、周期的な構造または非対称な構造を有していてもよい。

10

【0199】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0200】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0201】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 27 に示されるように、導電体 7 は、二次元材料層 1 に接触するように配置されている。このため、強誘電体層 5 において電磁波の照射によって生じた光キャリアが導電体 7 を通って移動することができる。導電体 7 内における光キャリアの寿命は、二次元材料層 1 内における光キャリアの寿命よりも長い。このため、光キャリアが導電体 7 を通って移動することにより光キャリアの寿命が長くなる。したがって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

20

【0202】

図 27 に示されるように、導電体 7 は、複数の導電部分 70 を含んでいる。複数の導電部分 70 は、互いに間隔を空けて配置されている。さらに、図 28 に示されるように、複数の導電部分 70 のうち隣り合う導電部分 70 同士は、第 1 方向に沿って等間隔に配置されている。また、導電部分 70 の材料は、導電部分 70 に表面プラズモン共鳴が生じる材料である。このため、電磁波検出器 100 は、導電部分 70 に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することができる。すなわち、電磁波検出器 100 に照射される電磁波に応じて複数の導電部分 70 に偏光依存性が生じる。

30

【0203】

図 29 に示されるように、複数の導電部分 70 のうち隣り合う導電部分 70 同士は、第 1 方向および第 2 方向に沿って等間隔に配置されている。また、導電部分 70 の材料は、導電部分 70 に表面プラズモン共鳴が生じる材料である。このため、電磁波検出器 100 は、導電部分 70 に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高い感度で検出することができる。

【0204】

図 30 に示されるように、複数の導電部分 70 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に配置されている。このため、二次元材料層 1 は、複数の導電部分 70 を覆っている。これにより、複数の導電部分 70 が二次元材料層 1 上に形成される必要がない。よって、複数の導電部分 70 が形成される際に二次元材料層 1 に損傷が生じることを抑制することができる。したがって、二次元材料層 1 においてキャリアの移動度が低下することを抑制することができる。

40

【0205】

図示されないが、複数の導電部分 70 の配置は、平面視において非対称性を有する配列であってもよい。この場合、電磁波検出器 100 は、導電部分 70 に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することができる。

【0206】

図示されないが、二次元材料層 1 は、複数の凹部または凸部を含んでいてもよい。複数

50

の凹部または凸部は、表面プラズモン共鳴が生じる間隔を空けて配置されている。二次元材料層 1 は高い導電率を有しているため、二次元材料層 1 において表面プラズモン共鳴が生じる。このため、上述された複数の導電部分 70 による表面プラズモン共鳴と同様に、複数の凹部または凸部によって二次元材料層 1 に表面プラズモン共鳴が生じる。これにより、電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1 に表面プラズモン共鳴が生じる偏光または周波数を有する電磁波のみを検出することができる。

【0207】

実施の形態 12.

次に、図 31 を用いて、実施の形態 12 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 12 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。

【0208】

図 31 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、接触層 8 をさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、電磁波検出器 100 が接触層 8 をさらに含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。接触層 8 は、二次元材料層 1 に接触するように配置されている。接触層 8 は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1a、第 2 部分 1b および第 3 部分 1c の各々に接触している。接触層 8 は、二次元材料層 1 に接触することで二次元材料層 1 に正孔または電子（キャリア）を供給するように構成されている。すなわち、接触層 8 は、二次元材料層 1 に正孔または電子をドーピングするように構成されている。

【0209】

図示されないが、接触層 8 は、第 1 部分 1a または第 2 部分 1b のいずれかの表面上にのみ形成されてもよい。これにより、二次元材料層 1 中に電荷密度の勾配が形成される。よって、二次元材料層 1 中のキャリアの移動度が向上するため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0210】

図示されないが、接触層 8 は、複数の接触部分を含んでいてもよい。複数の接触部分は、二次元材料層 1 上に積層されていてもよい。複数の接触部分は、二次元材料層 1 と第 1 電極部 2a との間において二次元材料層 1 上に積層されていてもよい。複数の接触部分のそれぞれの材料は、同じであってもよいし、違っていてもよい。

【0211】

接触層 8 の材料は、例えば、ポジ型フォトリソグレイスである。ポジ型フォトリソグレイスは、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である。また、接触層 8 の材料は、例えば、極性基を有する材料であってもよい。接触層 8 の材料は、より具体的には、極性基を有する材料の一例である電子求引基を有する材料であってもよい。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。電子求引基を有する材料は、例えば、ハロゲン、ニトリル、カルボキシル基、カルボニル基等を有する材料である。また、接触層 8 の材料は、例えば、極性基を有する材料の一例である電子供与基を有する材料であってもよい。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。電子供与基を有する材料は、例えば、アルキル基、アルコール、アミノ酸、ヒドロキシル基等を有する材料である。また、接触層 8 の材料は、分子全体で電荷の偏りが生じて極性を生じる限りにおいて、有機物、金属、半導体、絶縁体、二次元材料またはこれら材料のいずれかの混合物であってもよい。

【0212】

接触層 8 の材料が無機物である場合、二次元材料層 1 の仕事関数よりも接触層 8 の仕事関数が大きければ、二次元材料層 1 は p 型にドーピングされる。接触層 8 の材料が無機物である場合、二次元材料層 1 の仕事関数よりも接触層 8 の仕事関数が小さければ、二次元材料層 1 は n 型にドーピングされる。接触層 8 の材料が有機物である場合には、有機物は明確な仕事関数を有していない。このため、接触層 8 の材料を構成する有機物の分子の極

性によって、接触層 8 の材料の極性基を判断することで、二次元材料層 1 が n 型および p 型のいずれにドーピングされるかを判断することが望ましい。

【0213】

また、例えば、接触層 8 としてポジ型フォトリソグロ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 1 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 がマスクの形成プロセスによって損傷することを抑制することができる。また、プロセスの簡素化が可能となる。

【0214】

また、接触層 8 の材料は、接触層 8 に電磁波が照射されることで極性変換が生じる材料であってもよい。接触層 8 において極性変換が生じることで、極性変換の際に生じた電子または正孔が二次元材料層 1 に供給される。このため、接触層 8 が接触している二次元材料層 1 の部分に電子または正孔がドーピングされる。そのため、接触層 8 が取り除かれた後も、接触層 8 に接触していた二次元材料層 1 の部分は、電子また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 8 の材料として極性変換が生じる材料が用いられた場合、極性変換が生じた後に接触層 8 が二次元材料層 1 上から取り除かれてもよい。接触層 8 が配置されている場合よりも二次元材料層 1 の開口した部分の面積が増加する。このため、電磁波検出器 100 の検出感度を向上させることができる。なお、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。

【0215】

検出波長において極性変換が生じる材料が接触層 8 の材料として選択されることで、検出波長を有する電磁波が照射された時のみ接触層 8 で極性変換が生じる。これにより、検出波長を有する電磁波が照射された時のみ二次元材料層 1 へのドーピングが行われる。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。

【0216】

また、接触層 8 の材料は、接触層 8 に電磁波が照射されることによって酸化還元反応が生じる材料であってもよい。これにより、接触層 8 に酸化還元反応が生じた時に生じる電子また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。

【0217】

接触層 8 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 8 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 8 が形成されることが好ましい。

【0218】

接触層 8 の構成は、分子または電子などのキャリアが二次元材料層 1 に供給されれば適宜に決められてもよい。例えば、二次元材料層 1 が溶液に浸漬され、分子レベルで二次元材料層 1 にキャリアが供給されることで、固体の接触層 8 が二次元材料層 1 上に形成されることなく、二次元材料層 1 にキャリアがドーピングされてもよい。

【0219】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0220】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0221】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 31 に示されるように、接触層 8 は、二次元材料層 1 に接触するように配置されている。接触層 8 は、二次元材料層 1 に接触することで二次元材料層 1 に正孔または電子を供給するように構成されている。このため、二次元材料層 1 の導電性を n 型または p 型にすることができる。これにより、第 1 電

10

20

30

40

50

極部 2 a、半導体層 4 および強誘電体層 5 から二次元材料層 1 にキャリアがドーピングされる場合であっても、接触層 8 によって二次元材料層 1 の導電性を制御することができる。よって、電磁波検出器 100 の性能を向上させることができる。

【0222】

実施の形態 13.

次に、図 32 を用いて、実施の形態 13 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 13 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。

【0223】

図 32 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 では、絶縁膜 3 と二次元材料層 1 との間に空隙 G A P が設けられている。二次元材料層 1 は、空隙 G A P に面した表面を有している。つまり、二次元材料層 1 は、実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なり、絶縁膜 3 から離れて配置された部分を有している。開口部 O P において、半導体層 4 の表面の高さ位置は、第 1 電極部 2 a の表面の高さ位置と同一であることが好ましい。空隙 G A P は、第 1 電極部 2 a と半導体層 4 との間に設けられている。二次元材料層 1 は、第 1 電極部 2 a 上から空隙 G A P を跨いで半導体層 4 上に延在している。なお、二次元材料層 1 と絶縁層との間に空隙 G A P が設けられていれば、他の構成が採用されてもよい。

【0224】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0225】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0226】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 32 に示されるように、絶縁膜 3 と二次元材料層 1 との間に空隙 G A P が設けられている。このため、絶縁膜 3 と二次元材料層 1 との接触に伴うキャリアの散乱の影響を無くすることができる。この結果、二次元材料層 1 におけるキャリアの移動度の低下を抑制することができる。したがって、電磁波検出器 100 の感度を向上させることができる。

【0227】

実施の形態 14.

次に、図 33 を用いて、実施の形態 14 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 14 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。

【0228】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、図 33 に示されるように、電磁波検出器 100 は、基板部 S U B をさらに含んでいる。本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、電磁波検出器 100 が基板部 S U B をさらに含んでいる点で実施の形態 1 に係る電磁波検出器 100 とは異なっている。二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、第 1 電極部 2 a および強誘電体層 5 は、基板部 S U B 上に配置されている。基板部 S U B は、適宜に決められてもよい。基板部 S U B は、例えば、検出波長を有する電磁波を透過する材料によって構成されていてもよい。基板部 S U B は、例えば、読み出し回路であってもよい。

【0229】

なお、図 33 では、電磁波検出器 100 は絶縁膜 3 を含んでいるが、電磁波検出器 100 は絶縁膜 3 を含んでいなくてもよい。また、二次元材料層 1 は、図示されない別の基板部にさらに接していてもよい。なお、二次元材料層 1 が図示されない別の基板部に接している場合には、別の基板部は、絶縁体であることが好ましい。二次元材料層 1 が図示され

10

20

30

40

50

ない別の基板部に接していない場合には、絶縁膜 3 の材料は適宜に決められてもよく、半導体等であってもよい。

【0230】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0231】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0232】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 33 に示されるように、二次元材料層 1、第 1 電極部 2a、第 2 電極部 2b および強誘電体層 5 は、基板部 SUB 上に配置されている。基板部 SUB は、検出波長を透過する材料によって構成されている。このため、電磁波が基板側から基板部 SUB を通って強誘電体層 5 に入射することができる。これにより、電磁波検出器 100 は、基板部 SUB 側から基板部 SUB を通って強誘電体層 5 に入射した電磁波を検出することができる。すなわち、電磁波検出器 100 は、裏面照射によって動作することができる。

10

【0233】

基板部 SUB は、読み出し回路である場合、第 1 電極部 2a と基板部 SUB とが電氣的に接続されることで、電磁波検出器 100 が検出信号を読み出すことができる。

【0234】

20

実施の形態 15.

次に、図 34 を用いて、実施の形態 15 に係る電磁波検出器アレイ 200 の構成を説明する。

【0235】

図 34 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器アレイ 200 は、実施の形態 1～14 ならびに後述される実施の形態 16～18 に係る電磁波検出器 100 を複数有している。複数の電磁波検出器 100 は、第 1 方向 DR1 および第 1 方向 DR1 に交差する第 2 方向 DR2 の少なくともいずれかに沿って並んで配置されている。本実施の形態において、電磁波検出器アレイ 200 に含まれる複数の電磁波検出器 100 は、互いに同じ電磁波検出器 100 である。

30

【0236】

図 34 に図示された電磁波検出器アレイ 200 では、4 つの電磁波検出器 100 が 2×2 のアレイ状に配置されているが、配置される電磁波検出器 100 の数はこれに限定されない。例えば、9 つの電磁波検出器 100 が 3×3 のアレイ状に配置されてもよい。また、図 34 に示される電磁波検出器アレイ 200 は、複数の電磁波検出器 100 が二次元に周期的に配列されているが、複数の電磁波検出器 100 は 1 つの方向に沿って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 100 のうち隣り合う電磁波検出器 100 同士の間隔は等間隔であってもよいし、異なる間隔であってもよい。

【0237】

複数の電磁波検出器 100 の各々の半導体層 4 (図 1 参照) が互いに分離されていれば、複数の電磁波検出器 100 において 1 つの第 2 電極部 2b (図 1 参照) が共通電極として用いられてもよい。これにより、複数の第 2 電極部 2b が独立している場合よりも電磁波検出器アレイ 200 の配線を少なくすることができるため、電磁波検出器アレイ 200 の解像度を高めることができる。

40

【0238】

次に、図 35 を用いて、実施の形態 15 に係る電磁波検出器アレイ 200 の変形例の構成を説明する。

【0239】

図 35 に示されるように、電磁波検出器アレイ 200 に含まれる複数の電磁波検出器は、互いに異なる種類の電磁波検出器 101～104 である。互いに異なる種類の電磁波検

50

出器 101～104 がアレイ状（マトリックス状）に配置されている。複数の電磁波検出器 101～104 の各々は、互いに異なる検出波長をそれぞれ有していてもよい。具体的には、複数の電磁波検出器 101～104 の各々は、互いに異なる検出波長選択性を有していてもよい。

【0240】

複数の電磁波検出器 101～104 の各々の半導体層 4 または強誘電体層 5（図 1 参照）を構成する材料がそれぞれ互いに異なる検出波長を有している場合、例えば、検出波長が可視光の波長である半導体材料または強誘電体材料と、検出波長が赤外線波長の半導体材料または強誘電体材料とが用いられてもよい。例えば、当該電磁波検出器アレイ 200 が車載センサに適用された場合、電磁波検出器アレイ 200 は、昼間は可視光画像用カメラとして使用され得る。さらに、電磁波検出器アレイ 200 は、夜間は赤外線カメラとしても使用され得る。このようにすれば、電磁波の検出波長に応じて複数のカメラを使い分ける必要がない。

【0241】

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

本実施の形態に係る電磁波検出器アレイ 200 によれば、図 34 に示されるように、電磁波検出器アレイ 200 は、実施の形態 1～14 に係る電磁波検出器 100 を複数有している。このため、複数の電磁波検出器 100 の各々を検出素子とすることによって、電磁波検出器アレイ 200 に画像センサとしての機能を持たせることができる。

【0242】

本実施の形態に係る電磁波検出器アレイ 200 の変形例によれば、図 35 に示されるように、複数の電磁波検出器 101～104 の各々は、互いに異なる検出波長をそれぞれ有している。このため、電磁波検出器アレイ 200 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。

【0243】

これにより、電磁波検出器アレイ 200 は、可視光域で用いられるイメージセンサと同様に、例えば、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、例えば波長の相違を色の相違として示した、カラー化された画像を得ることができる。

【0244】

また、電磁波検出器アレイ 200 は、画像センサ以外のセンサとして用いられてもよい。電磁波検出器アレイ 200 は、例えば、少ない画素数であっても物体の位置を検出できる位置検出用センサとして用いられ得る。また、例えば、電磁波検出器アレイ 200 は、複数の波長において電磁波の強度を検出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：相補型 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、複数の電磁波を検出し、カラー化された画像を得ることができる。

【0245】

複数の電磁波検出器 101～104 の各々は、互いに異なる偏光を有する電磁波を検出するように構成されている。これにより、電磁波検出器アレイ 200 に偏光識別イメージセンサとしての機能を持たせることができる。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 100 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、材料の識別、赤外波長域においてそれぞれ同一温度を有する複数の物体の識別、複数の物体間の境界の識別、または、等価的な分解能の向上などが可能になる。

【0246】

以上のように、電磁波検出器アレイ 200 は、広い波長域の電磁波を検出することができる。また、電磁波検出器アレイ 200 は、異なる波長の電磁波を検出することができる。

【0247】

なお、各実施の形態において、絶縁膜 3、半導体層 4 および接触層 8 の少なくともいずれか 1 つの材料として、電磁波が照射されることで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が用いられてもよい。例えば、接触層 8 の材料として電磁波が照射されることで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が用いられる場合、接触層 8 は二次元材料層 1 に直接接触している必要はない。例えば、接触層 8 が電位の変化を二次元材料層 1 に与えることが可能である場合には、接触層 8 は、絶縁膜 3 等を介して二次元材料層 1 の上面または下面上に配置されてもよい。

【0248】

電磁波が照射されることで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は、例えば、量子ドット、強誘電体材料、液晶材料、フラーレン、希土類酸化物、半導体材料、pn 接合材料、金属-半導体接合材料、金属-絶縁物-半導体接合材料等である。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が用いられる場合には、電磁波の照射によって強誘電体材料に分極の変化が生じる。これにより、二次元材料層 1 に電位の変化が与えられる。

【0249】

実施の形態 16.

次に、図 36 を用いて、実施の形態 16 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 16 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。

【0250】

図 36 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、薄膜誘電体層 91 をさらに含んでいる。薄膜誘電体層 91 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。薄膜誘電体層 91 は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1a と半導体層 4 とを電気的に接続している。このため、二次元材料層 1 の第 1 部分 1a は、薄膜誘電体層 91 を介して半導体層 4 に電気的に接続されている。薄膜誘電体層 91 は、開口部 OP の内部に配置されている。薄膜誘電体層 91 は、絶縁膜 3 および強誘電体層 5 よりも薄くてもよい。

【0251】

薄膜誘電体層 91 は、電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている。薄膜誘電体層 91 は、検出波長を有する電磁波が二次元材料層 1 および強誘電体層 5 に照射された場合に二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に光電流を生じさせることが可能な厚さを有している。薄膜誘電体層 91 は、検出波長を有する電磁波が二次元材料層 1 および強誘電体層 5 に照射された場合に光電流を生じさせるように構成されている。薄膜誘電体層 91 の厚さは、例えば、1 nm 以上 10 nm 以下である。望ましくは、薄膜誘電体層 91 は、暗状態において分極が生じるように構成されている。望ましくは、薄膜誘電体層 91 の材料は、暗状態において分極が生じることで暗電流を低下させる分極率を有する材料である。

【0252】

具体的には、薄膜誘電体層 91 の材料は、例えば、チタン酸バリウム (BaTiO_3)、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3)、タンタル酸リチウム (LiTaO_3)、チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3)、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT)、タンタル酸ビスマス酸ストロンチウム (SBT)、ビスマスフェライト (BFO)、酸化亜鉛 (ZnO)、酸化ハフニウム (HfO_2) および有機ポリマーであるポリフッ化ビニリデン系強誘電体 (PVDF、 P(VDF-TrFE) 、 P(VDF-TrFE-CTFE) 等) などの強誘電体材料であってもよい。薄膜誘電体層 91 の材料は、アルミナ (酸化アルミニウム) または酸化ハフニウム (HfO_2) などの金属酸化物、酸化ケイ素 (SiO) または窒化ケイ素 (Si_3N_4) などの半導体を含む酸化物、窒化ホウ素 (BN) 等の窒化物であってもよい。また、フッ化炭素 (CF) 系ポリマー膜などの有機ポリマー膜であってもよい。

【0253】

薄膜誘電体層 91 の作製方法は、適宜に決められてもよいが、例えば、ALD (Atomic

10

20

30

40

50

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。また、薄膜誘電体層 91 は、半導体層 4 の表面を酸化または窒化させることにより形成されてもよい。また、薄膜誘電体層 91 は、半導体層 4 の表面に形成される自然酸化膜であってもよい。また、薄膜誘電体層 91 は、四フッ化炭素 (CF₄) などを用いた反応性イオンエッチングで生成される反応生成物で形成されてもよい。

【0254】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0255】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0256】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 36 に示されるように、薄膜誘電体層 91 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。薄膜誘電体層 91 は、電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている。このため、電磁波の入射によって電磁波検出器 100 に光電流が生じる。よって、半導体層 4 および薄膜誘電体層 91 を通って二次元材料層 1 に注入される光電流の注入効率が向上する。これにより、薄膜誘電体層 91 がいない場合よりも、二次元材料層 1 に大きな光電流が注入される。したがって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

【0257】

薄膜誘電体層 91 は、暗状態において分極が生じるように構成されていてもよい。この場合、二次元材料層 1 と半導体層 4 との接合界面における漏れ電流を抑制することができる。これにより、暗電流を低減することができる。

【0258】

実施の形態 17.

次に、図 37 を用いて、実施の形態 17 に係る電磁波検出器 100 の構成を説明する。実施の形態 17 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。

【0259】

図 37 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 は、熱電材料層 92 をさらに含んでいる。熱電材料層 92 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。二次元材料層 1 は、熱電材料層 92 を介して半導体層 4 に電氣的に接続されている。熱電材料層 92 は、図示されない電極を介して二次元材料層 1 および半導体層 4 と接続されていてもよい。熱電材料層 92 は、開口部 OP の内部に配置されている。熱電材料層 92 は、絶縁膜 3 と同じ厚みを有していてもよい。

【0260】

熱電材料層 92 の上面には、二次元材料層 1 が重ねられている。望ましくは、熱電材料層 92 の上面の高さ位置は、絶縁膜 3 の上面の高さ位置と同じである。熱電材料層 92 の下面は、半導体層 4 の第 1 面 4a に電氣的に接続されている。

【0261】

熱電材料層 92 は、電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている。熱電材料層 92 は、熱電材料層 92 の温度が変化した場合に電圧（熱起電力）を生じさせるように構成されている。熱電材料層 92 は、電磁波が照射されることで熱電材料層 92 の温度が変化した場合に電圧を生じさせるように構成されている。熱電材料層 92 は、ゼーベック効果を生じさせるように構成されている。ゼーベック効果とは、互いに接合された 2 種類の異なる金属または半導体の両端に生じた温度差によって起電力が生じる効果である。熱電材料層 92 は、温度差によって生じた熱起電力を二次元材料層 1 および半導体層 4 から取り出すように構成されている。

【0262】

10

20

30

40

50

図示されないが、例えば、熱電材料層 92 は、p 型熱電層および n 型熱電層を含んでいる。p 型熱電層は、例えば、p 型ビスマステルライドである。n 型熱電層は、例えば、n 型ビスマステルライドである。p 型熱電層および n 型熱電層は、積層されている。p 型熱電層および n 型熱電層は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とが積層される方向に沿って積層されている。熱電材料層 92 の上面および下面のいずれか一方に向かって電磁波が照射されることで、熱電材料層 92 の上面および下面のいずれか一方が相対的に高温になり、上面および下面のいずれか他方が相対的に低温になる。これにより、熱電材料層 92 から熱電圧が生じる。このため、電磁波が電磁波検出器 100 に照射された際の光電流が増加する。よって、電磁波検出器 100 の感度が向上する。また、暗状態においては、pn 接合障壁によって暗電流を低減することができる。

10

【0263】

熱電材料層 92 の材料は、温度差が付与されることにより生じる熱エネルギーを電気エネルギーに変換する材料であれば適宜に決められてもよい。熱電材料層 92 の材料は、例えば、p 型ビスマステルライド、n 型ビスマステルライド、ビスマス—テルル系熱電半導体材料、テルライド系熱電半導体材料、アンチモン—テルル系熱電半導体材料、亜鉛—アンチモン系熱電半導体材料、シリコン—ゲルマニウム系熱電半導体材料、ビスマスセレン化物系熱電半導体材料、シリサイド系熱電半導体材料、酸化物系熱電半導体材料、ホイスラー材料である。ビスマス—テルル系熱電半導体材料は、例えば、テルル化ビスマス (Bi_2Te_3) 等である。テルライド系熱電半導体材料は、例えば、テルル化ゲルマニウム (GeTe) およびテルル化鉛 (PbTe) 等である。亜鉛—アンチモン系熱電半導体材料は、例えば、アンチモン化亜鉛 (ZnSb 、 Zn_3Sb_2 および Zn_4Sb_3) 等である。シリコン—ゲルマニウム系熱電半導体材料は、例えば、シリコンゲルマニウム (SiGe) 等である。ビスマスセレン化物系熱電半導体材料は、セレン化ビスマス (Bi_2Se_3) 等である。シリサイド系熱電半導体材料は、鉄シリサイド ($\beta\text{-FeSi}_2$)、ケイ化クロム (CrSi_2)、ケイ化マンガン ($\text{MnSi}_{1.73}$)、ケイ化マグネシウム (Mg_2Si) 等である。ホイスラー材料は、例えば、 FeVAl 、 FeVAlSi および FeVTiAl 等である。望ましくは、熱電材料層 92 の材料は、p 型ビスマステルライド、n 型ビスマステルライド、ビスマス—テルル系熱電半導体材料ならびにシリサイド系熱電半導体材料のいずれかである。望ましくは、p 型ビスマステルライドのキャリアは正孔であり、p 型ビスマステルライドのゼーベック係数は正值であり、p 型ビスマステルライドの構成は $\text{Bi}_x\text{Te}_3\text{Sb}_{2-x}$ ($0 < x \leq 0.6$) で示される。望ましくは、n 型ビスマステルライドのキャリアは電子であり、n 型ビスマステルライドのゼーベック係数は負値であり、n 型ビスマステルライドの構成は $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{YSe}_y$ ($0 < y \leq 3$) で示される。上記の p 型ビスマステルライドおよび n 型ビスマステルライドは、一対で使用されることが望ましい。上記の p 型ビスマステルライドおよび n 型ビスマステルライドは、互いに直列接続によって接続された複数対で使用されてもよい。この場合、熱電変換によって発生する電圧を増加させることができるため、電磁波検出器 100 の感度が向上する。

20

30

【0264】

熱電材料層 92 を成膜する方法は、適宜に決められてもよい。熱電材料層 92 は、例えば、アークプラズマ蒸着法またはフラッシュ蒸着法等の公知の方法によって成膜されてもよい。

40

【0265】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器 100 の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0266】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0267】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 によれば、図 37 に示されるように、熱電材料

50

層 9 2 は、二次元材料層 1 と半導体層 4 とに挟み込まれている。熱電材料層 9 2 は、電磁波が照射された場合に電流が流れるように構成されている。このため、熱起電力によって電磁波検出器 1 0 0 の感度を向上させることができる。

【 0 2 6 8 】

また、2 種類以上（例えば、p 型ビスマステルライドおよび n 型ビスマステルライド）の熱電材料が積層されているため、p n 接合等の障壁によって暗電流を抑制することができる。

【 0 2 6 9 】

熱電材料層 9 2 の上面の高さ位置は、絶縁膜 3 の上面の高さ位置と同じであってもよい。この場合、熱電材料層 9 2 の上面および絶縁膜 3 の上面にまたがって二次元材料層 1 が折れ曲がることなく直線状に形成され得る。このため、二次元材料層 1 は、折れ曲がることなく水平に形成されてもよい。よって、二次元材料層 1 におけるキャリアの移動度が向上する。

【 0 2 7 0 】

また、実施の形態 1 6 に示した薄膜誘電体層 9 1 と熱電材料層 9 2 を組み合わせて積層構造にすることで、より大きな電圧を発生することが出来る。

【 0 2 7 1 】

実施の形態 1 8 .

次に、図 3 8 および図 3 9 を用いて、実施の形態 1 8 に係る電磁波検出器 1 0 0 の構成を説明する。実施の形態 1 8 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 2 7 2 】

図 3 8 および図 3 9 に示されるように、本実施の形態に係る電磁波検出器 1 0 0 は、発熱材料層 9 3 をさらに含んでいる。発熱材料層 9 3 は、強誘電体層 5 と接触するように配置されている。発熱材料層 9 3 が強誘電体層 5 と接触する位置は、適宜に決められてもよい。このため、発熱材料層 9 3 は、強誘電体層 5 に対して上下左右いずれに配置されていてもよい。発熱材料層 9 3 は、強誘電体層 5 の電磁波が照射される面（入射面）に接触するように配置されていることが望ましい。

【 0 2 7 3 】

発熱材料層 9 3 は、発熱材料層 9 3 に電磁波が照射された場合に熱を生じるように構成されている。すなわち、発熱材料層 9 3 は、発熱材料層 9 3 に電磁波が照射された場合に発熱するように構成されている。発熱材料層 9 3 は強誘電体層 5 に接触しているため、発熱材料層 9 3 に電磁波が照射された場合に生じた熱は発熱材料層 9 3 から強誘電体層 5 に伝達される。発熱材料層 9 3 は、発熱材料層 9 3 に電磁波が照射された場合に生じた熱を強誘電体層 5 に伝達するように構成されている。発熱材料層 9 3 は、検出波長を有する電磁波が強誘電体層 5 に照射された場合に熱を生じさせることが可能な厚さを有している。望ましくは、発熱材料層 9 3 は、検出波長を有する電磁波を吸収する材料である。

【 0 2 7 4 】

具体的には、発熱材料層 9 3 の材料は、例えば、黒体塗料が塗布された金属表面を有する黒体材料、グラファイト、多層グラフェン、アルミナ（酸化アルミニウム）または酸化ハフニウム（ HfO_2 ）などの金属酸化物、酸化ケイ素（ SiO ）または窒化ケイ素（ Si_3N_4 ）などの半導体を含む酸化物、または窒化ホウ素（ BN ）等の窒化物である。また、発熱材料層 9 3 の材料は、金属パターンが周期的に形成された表面プラズモン共鳴を利用するプラズモン吸収体であってもよい。また、発熱材料層 9 3 の材料は、誘電体多層膜、ナノポーラス材料が用いられた無反射コート、または金黒などの赤外線吸収材料であってもよい。

【 0 2 7 5 】

発熱材料層 9 3 の材料は、熱電材料層 9 2（図 3 7 参照）に用いられる熱電材料であってもよい。発熱材料層 9 3 は、強誘電体層 5 と接触する接触面を有している。発熱材料層

10

20

30

40

50

93の発熱は、接触面を介して強誘電体層5に伝達される。熱電材料によって構成された発熱材料層93は、強誘電体層5において発生した電流によってペルチェ効果を生じさせるように構成されている。望ましくは、熱電材料によって構成された発熱材料層93は、ペルチェ効果によって接触面の温度を上昇させるように構成されている。

【0276】

発熱材料層93の作製方法は、適宜に決められてもよいが、例えば、ALD (Atomic Layer Deposition) 法、真空蒸着法、スパッタ法、アークプラズマ蒸着法、およびフラッシュ蒸着法等の公知の成膜方法などから選択され得る。また、発熱材料層93は、半導体層4の表面を酸化または窒化させることにより形成されてもよい。

【0277】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器100の構成は、他の実施の形態にも適用することができる。

【0278】

<作用効果>

続いて、本実施の形態の作用効果を説明する。

【0279】

本実施の形態に係る電磁波検出器100によれば、図38および図39に示されるように、発熱材料層93は、強誘電体層5と接触するように配置されている。このため、発熱材料層93は、電磁波の照射によって生じた熱を強誘電体層5に伝達することができる。よって、電磁波の照射によって発生する強誘電体層5の分極電圧が増加する。これにより、電磁波検出器100の光電流が増加する。したがって、電磁波検出器100の感度が向上する。

【0280】

望ましくは、熱電材料によって構成された発熱材料層93は、電磁波が照射された場合にペルチェ効果によって接触面の温度を上昇させるように構成されている。このため、電磁波の照射によって強誘電体層5の分極変化がさらに増加する。よって、電磁波検出器100の光電流が増加する。したがって、電磁波検出器100の感度が向上する。

【0281】

また、実施の形態16に示した薄膜誘電体層91や実施の形態17に示した熱電材料層92を半導体層4と二次元材料層1の間に挿入した構造と組み合わせて使用することで、電磁波検出器100の感度をさらに向上させることができる。

【0282】

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。

【符号の説明】

【0283】

1 二次元材料層、1a 第1部分、1b 第2部分、2a 第1電極部、2b 第2電極部、3 絶縁膜、4 半導体層、5 強誘電体層、6 トンネル絶縁層、7 導電体、8 接触層、41 第1半導体部、42 第2半導体部、51 第1強誘電体部分、52 第2強誘電体部分、70 導電部分、91 薄膜誘電体層、92 熱電材料層、93 発熱材料層、100 電磁波検出器、200 電磁波検出器アレイ、CC 接続導電体、OP 開口部。

10

20

30

40

50

【要約】

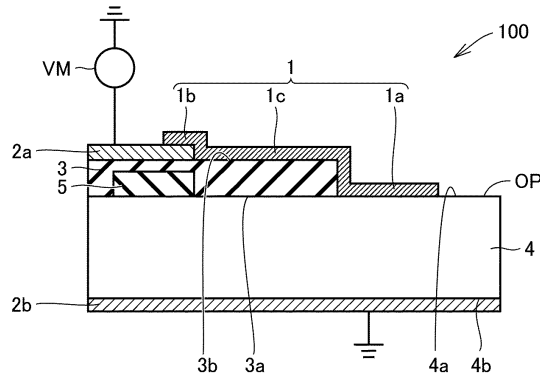
電磁波検出器（１００）は、半導体層（４）と、二次元材料層（１）と、第１電極部（２ａ）と、第２電極部（２ｂ）と、強誘電体層（５）とを備えている。二次元材料層（１）は、半導体層（４）に電氣的に接続されている。第１電極部（２ａ）は、二次元材料層（１）に電氣的に接続されている。第２電極部（２ｂ）は、半導体層（４）を介して二次元材料層（１）に電氣的に接続されている。強誘電体層（５）は、第１電極部（２ａ）、第２電極部（２ｂ）および半導体層（４）の少なくともいずれかと電氣的に接続されている。電磁波検出器（１００）が二次元材料層（１）に対して強誘電体層（５）から生じる電界が遮蔽されるように構成されている。または、強誘電体層（５）は、二次元材料層（１）と平面視で重ならないように配置されている。

10

【図面】

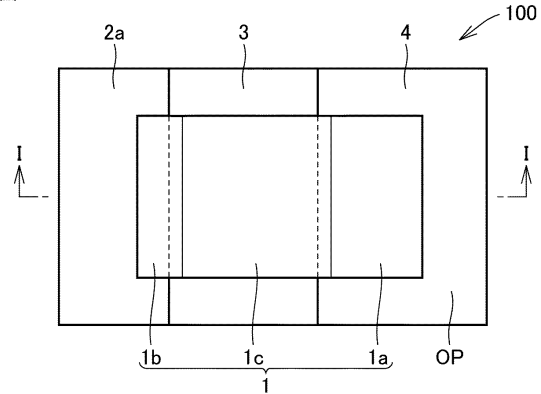
【図１】

図1



【図２】

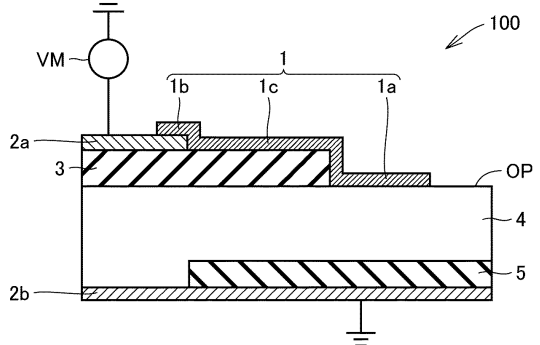
図2



20

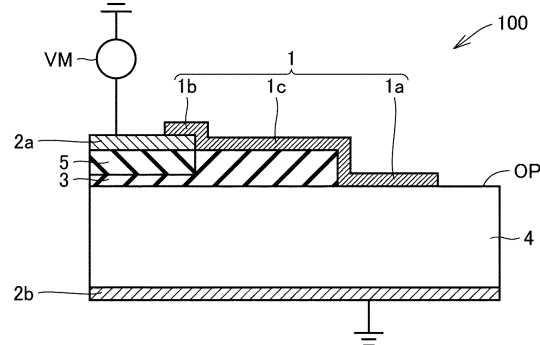
【図３】

図3



【図４】

図4



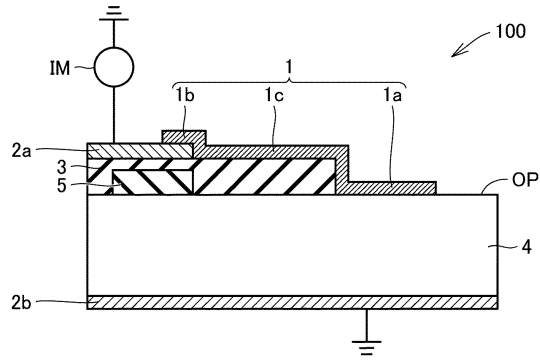
30

40

50

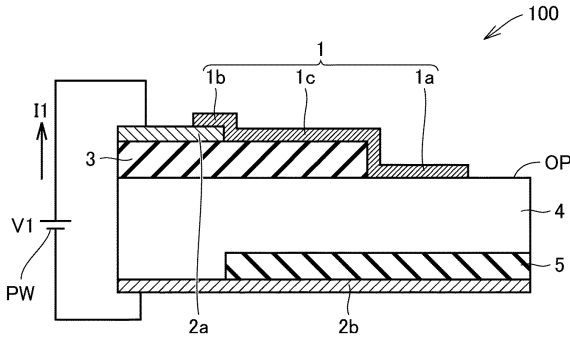
【図 5】

図5



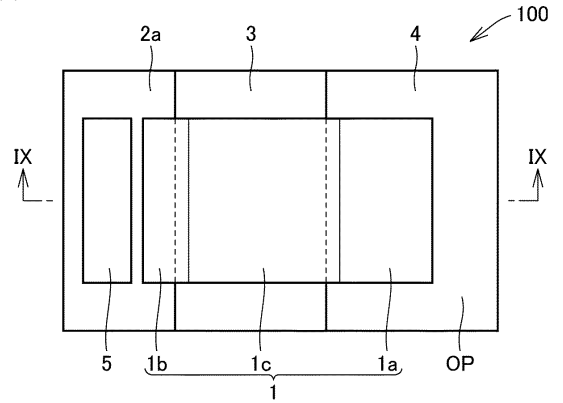
【図 6】

図6



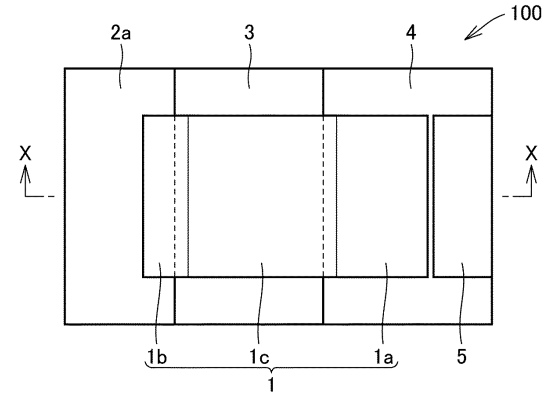
【図 7】

図7



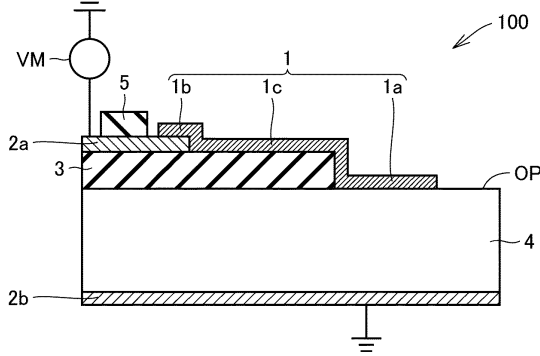
【図 8】

図8



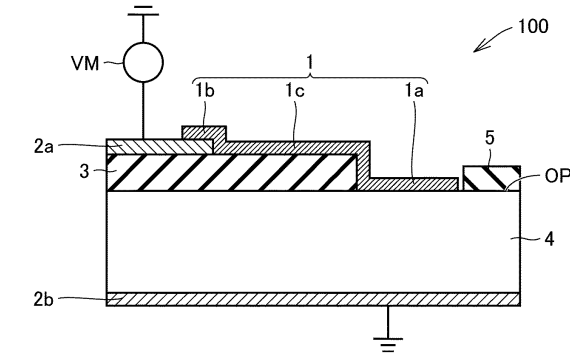
【図 9】

図9



【図 10】

図10



10

20

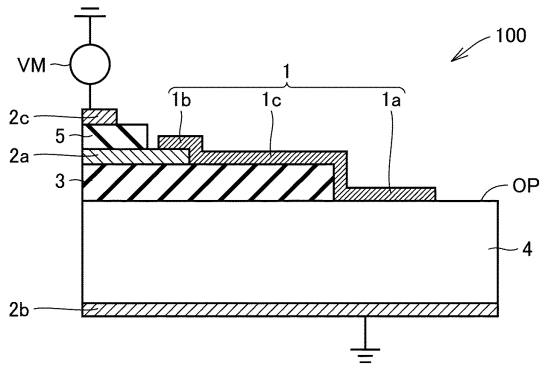
30

40

50

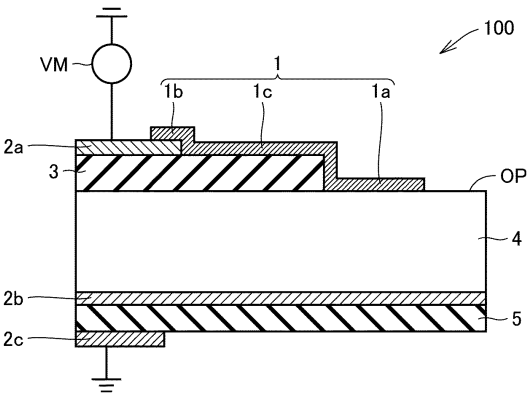
【図 1 1】

図11



【図 1 2】

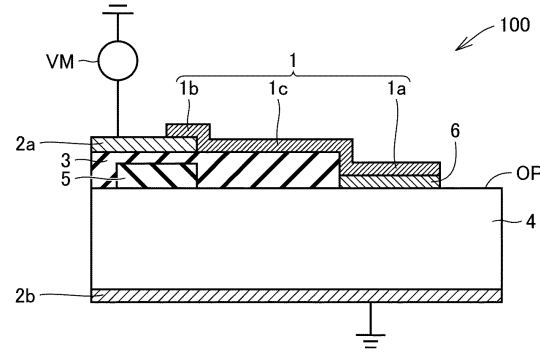
図12



10

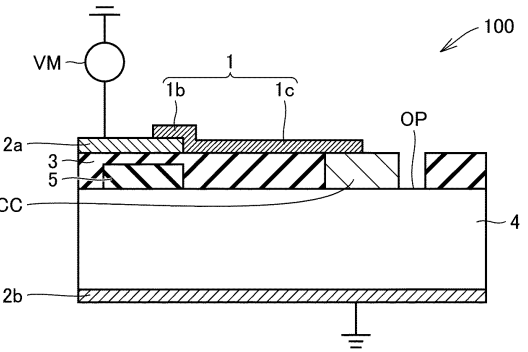
【図 1 3】

図13



【図 1 4】

図14



20

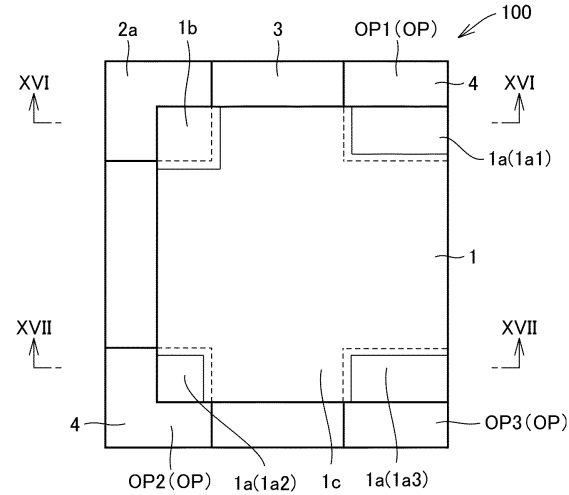
30

40

50

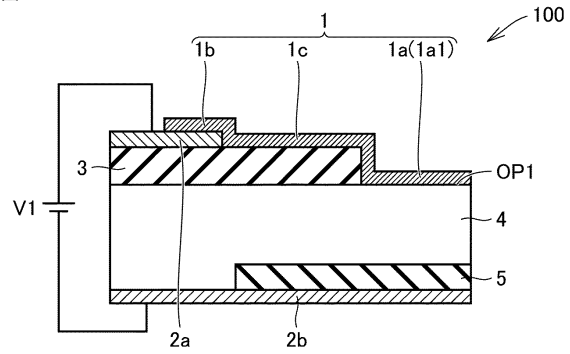
【図 1 5】

図15



【図 1 6】

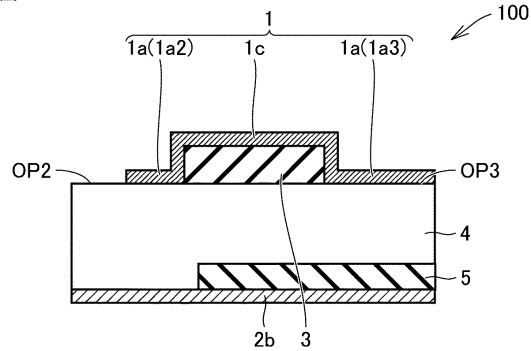
図16



10

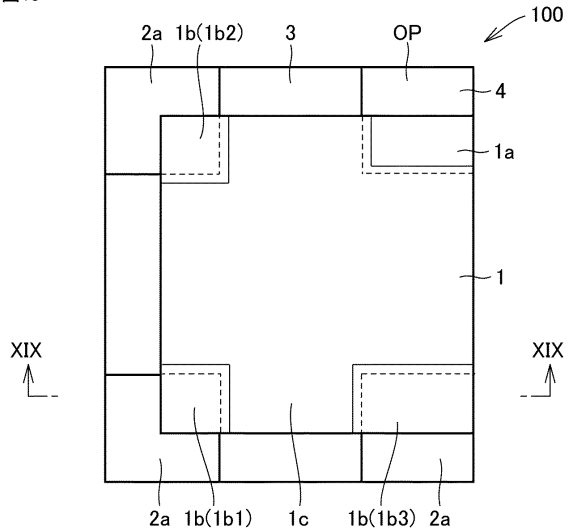
【図 1 7】

図17



【図 1 8】

図18



20

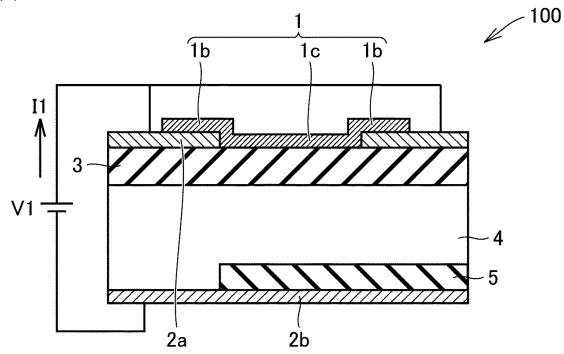
30

40

50

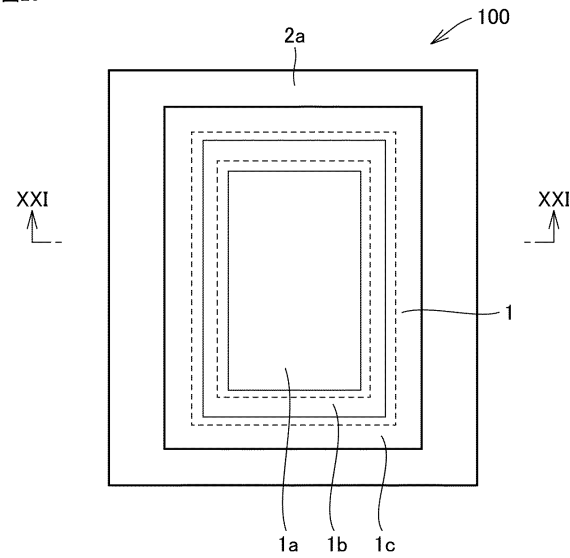
【図 19】

図19



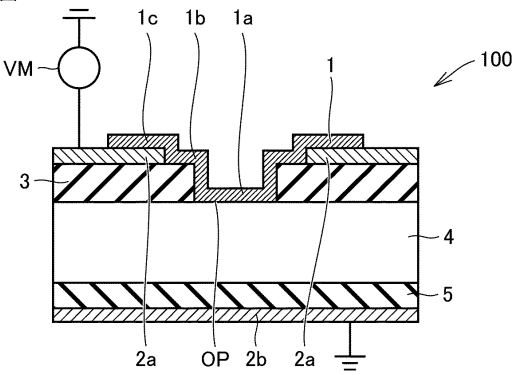
【図 20】

図20



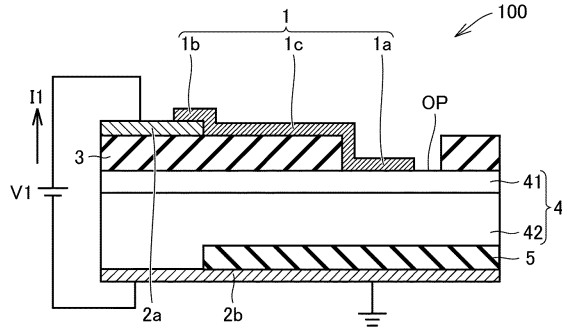
【図 21】

図21



【図 22】

図22



10

20

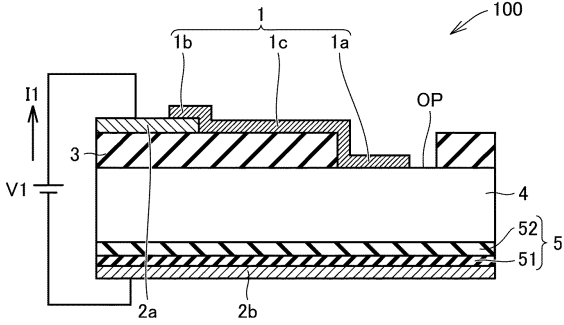
30

40

50

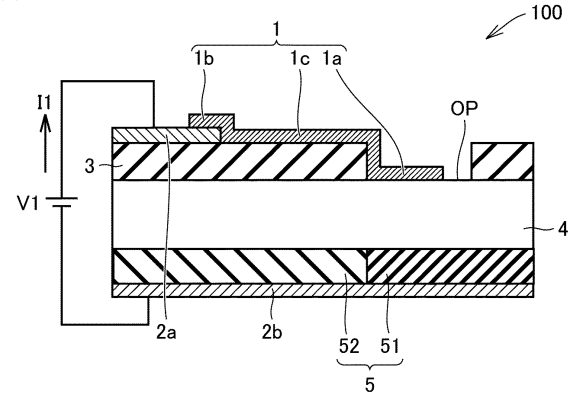
【図 2 3】

図23



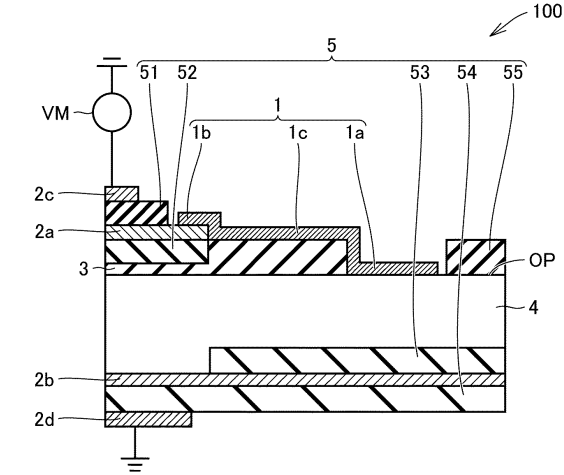
【図 2 4】

図24



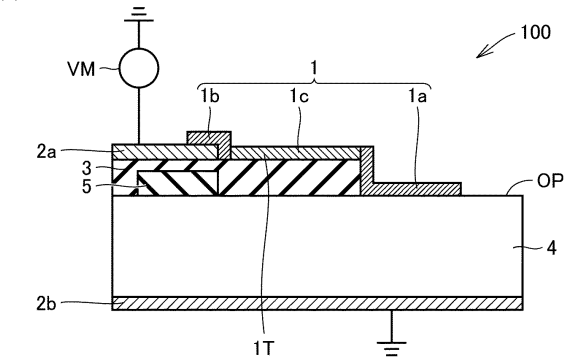
【図 2 5】

図25



【図 2 6】

図26



10

20

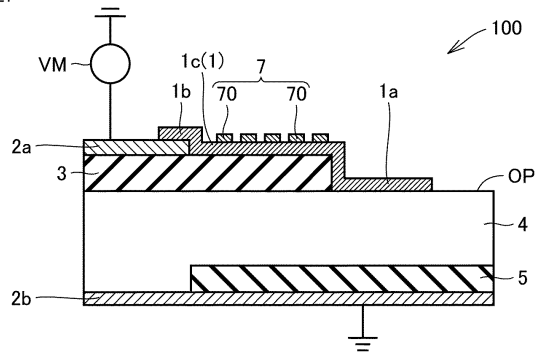
30

40

50

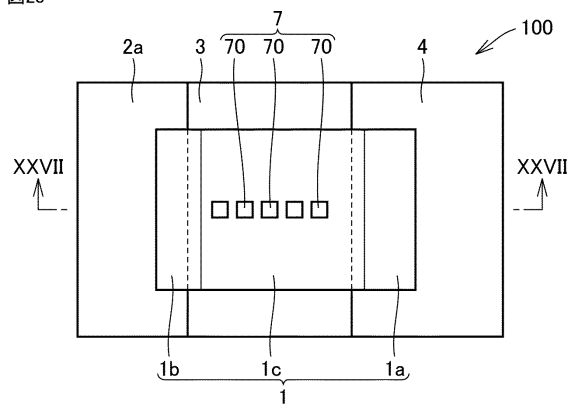
【圖 27】

図27



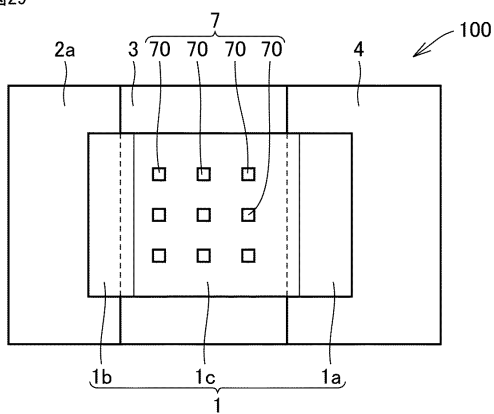
【圖 28】

图28



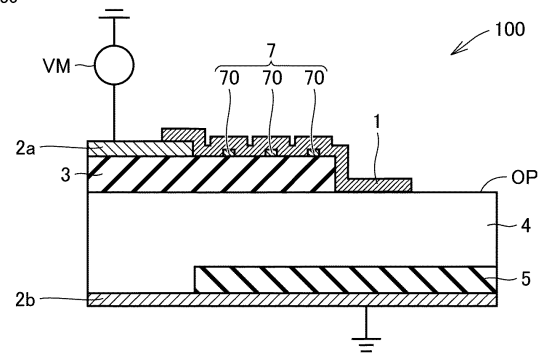
【圖 29】

图29

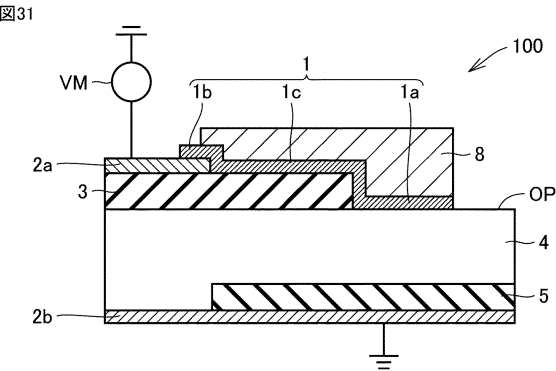


【図 30】

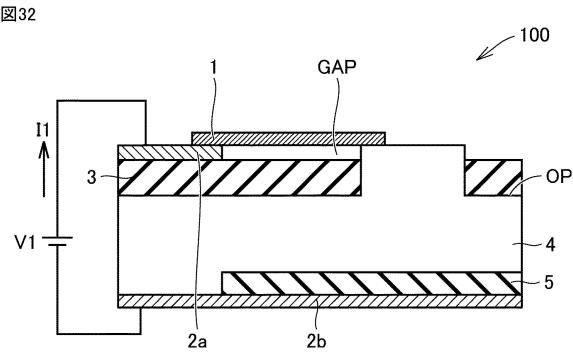
図30



【図 3 1】

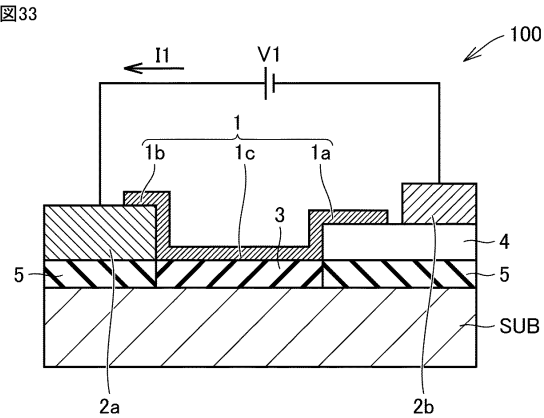


【図 3 2】

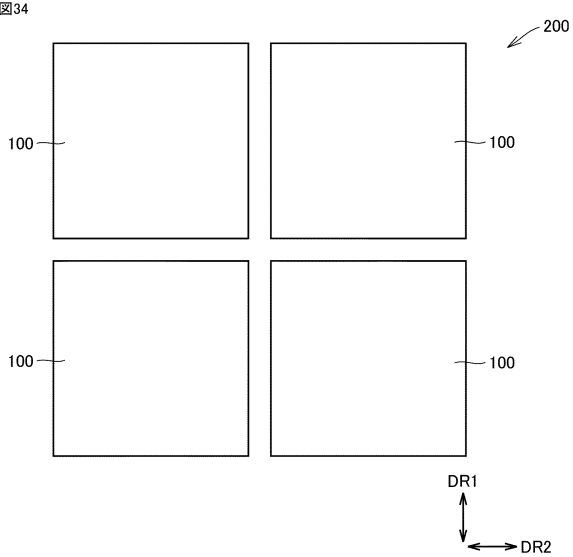


10

【図 3 3】



【図 3 4】



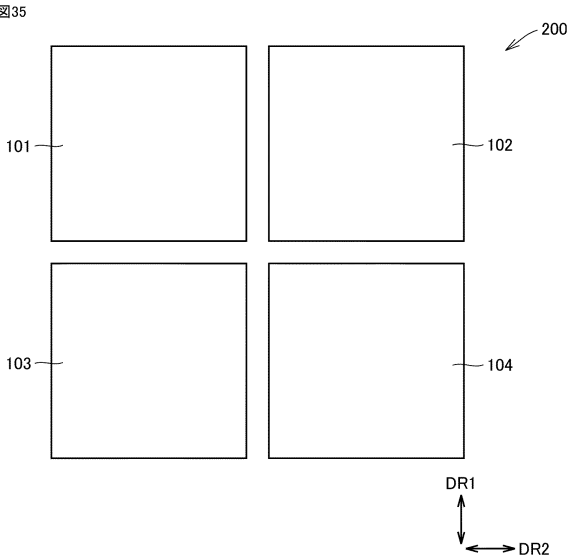
20

30

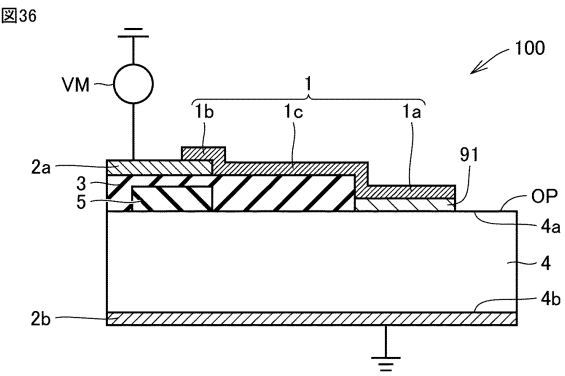
40

50

【図 3 5】

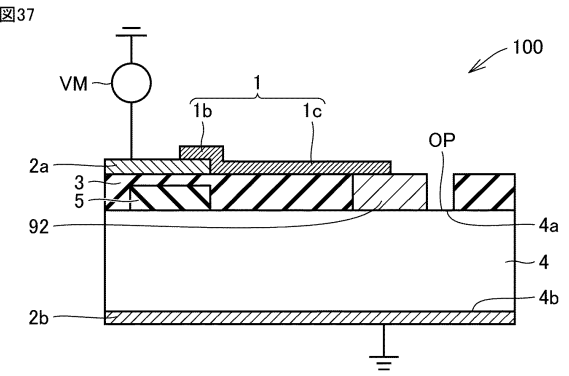


【図 3 6】



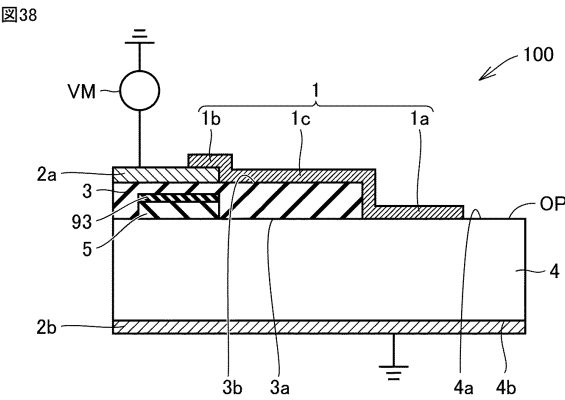
10

【図 3 7】



20

【図 3 8】

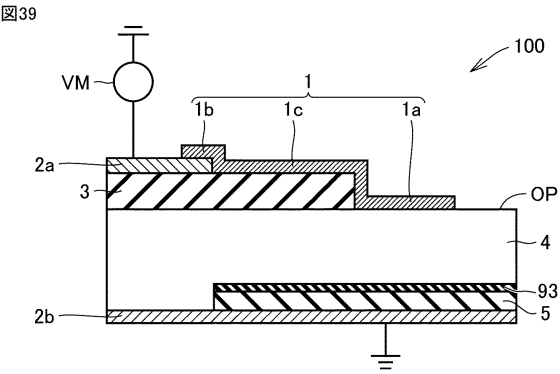


30

40

50

【図 39】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

三菱電機株式会社内

審査官 原 俊文

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2015/0333196 (US, A1)
米国特許出願公開第2019/0252569 (US, A1)
国際公開第2020/003613 (WO, A1)
国際公開第2018/012076 (WO, A1)
中国特許出願公開第106784122 (CN, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 31/00-31/0392
H01L 31/08-31/119
G01J 1/00-1/46
H01L 27/14-27/148