

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7422963号
(P7422963)

(45)発行日 令和6年1月26日(2024.1.26)

(24)登録日 令和6年1月18日(2024.1.18)

(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 27/146 (2006.01)	G 0 1 J 1/02	Q		
H 1 0 N 10/01 (2023.01)	H 0 1 L 27/146	A		
H 1 0 N 10/13 (2023.01)	H 1 0 N 10/01			
請求項の数 20 (全56頁) 最終頁に続く				

(21)出願番号 特願2023-565966(P2023-565966)	(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2月14日(2023.2.14)	(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/JP2023/004894	(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5年10月26日(2023.10.26)	(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
(31)優先権主張番号 特願2022-71669(P2022-71669)	(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
(32)優先日 令和4年4月25日(2022.4.25)	(72)発明者 福島 昌一郎
(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、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	最終頁に続く

(54)【発明の名称】 電磁波検出器

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1面を有する半導体層と、
前記半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、
前記半導体層を介さずに前記二次元材料層と電氣的に接続されている第1電極部と、
前記半導体層を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている第2電極部と、
熱電変換材料層とを備え、
前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と接している、または、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記熱電変換材料層内の電位差が変化するとき前記第1電極部と前記第2電極部との間の電位差を変化させるように設けられており、
前記熱電変換材料層は、前記熱電変換材料層内に生じる電位差が変化するとき前記二次元材料層の電気抵抗値が変化するように設けられており、
前記二次元材料層は、前記半導体層または前記半導体層と電氣的に接続されている導電部材と接している第1部分を含み、
前記熱電変換材料層は、少なくとも前記二次元材料層の前記第1部分と接している、電磁波検出器。

【請求項2】

前記二次元材料層は、前記半導体層または前記半導体層と電氣的に接続されている導電部材と接している第1部分と、前記第1電極部と接している第2部分と、前記第1部分と前記第2部分との間を電氣的に接続する第3部分とを含み、

前記熱電変換材料層は、少なくとも前記二次元材料層の前記第 3 部分と接している、請求項 1 に記載の電磁波検出器。

【請求項 3】

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層の前記第 1 部分、前記第 2 部分、及び前記第 3 部分の各々と接している、請求項 2 に記載の電磁波検出器。

【請求項 4】

第 1 面を有する半導体層と、

前記半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、

前記半導体層を介さずに前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 1 電極部と、

前記半導体層を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 2 電極部と、

熱電変換材料層とを備え、

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と接している、または、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記熱電変換材料層内の電位差が変化するとき前記第 1 電極部と前記第 2 電極部との間の電位差を変化させるように設けられており、

前記熱電変換材料層は、前記熱電変換材料層内に生じる電位差が変化するとき前記二次元材料層の電気抵抗値が変化するように設けられており、

前記二次元材料層は、前記半導体層または前記半導体層と電氣的に接続されている導電部材と接している第 1 部分と、前記第 1 電極部と接している第 2 部分と、前記第 1 部分と前記第 2 部分との間を電氣的に接続する第 3 部分とを含み、

前記二次元材料層の前記第 1 部分、前記第 2 部分、及び前記第 3 部分の少なくともいずれかと前記熱電変換材料層との間を隔てる絶縁膜をさらに備え、

前記二次元材料層の前記第 1 部分、前記第 2 部分、及び前記第 3 部分の各々は、前記熱電変換材料層と間隔を空けて配置されている、電磁波検出器。

【請求項 5】

第 1 面を有する半導体層と、

前記半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、

前記半導体層を介さずに前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 1 電極部と、

前記半導体層を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 2 電極部と、

熱電変換材料層とを備え、

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と接している、または、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記熱電変換材料層内の電位差が変化するとき前記第 1 電極部と前記第 2 電極部との間の電位差を変化させるように設けられており、

前記熱電変換材料層は、前記熱電変換材料層内に生じる電位差が変化するとき前記二次元材料層の電気抵抗値が変化するように設けられており、

前記二次元材料層は、前記半導体層または前記半導体層と電氣的に接続されている導電部材と接している第 1 部分と、前記第 1 電極部と接している第 2 部分と、前記第 1 部分と前記第 2 部分との間を電氣的に接続する第 3 部分とを含み、

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層の前記第 2 部分のみと接しており、

前記熱電変換材料層は、前記第 1 電極部と同一部材として構成されている、電磁波検出器。

【請求項 6】

前記第 1 部分または前記導電部材は、前記半導体層とショットキー接合している、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】

平面視において、前記第 1 電極部は環状に形成されており、かつ前記第 1 部分は、前記第 1 電極部よりも内側に配置されている、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 8】

前記第 1 部分は、平面視における前記二次元材料層の端部を有する、請求項 6 に記載の電磁波検出器。

【請求項 9】

10

20

30

40

50

前記第 1 部分は、平面視における前記二次元材料層の端部を有する、請求項 7 に記載の電磁波検出器。

【請求項 1 0】

前記二次元材料層と前記半導体層との間に配置されているトンネル絶縁層をさらに備え、前記トンネル絶縁層の厚さは、検出対象とする電磁波が前記二次元材料層および前記熱電変換材料層に入射したときに、前記二次元材料層と前記半導体層との間にトンネル電流が生じるように設定されている、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 1 1】

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層に対して前記半導体層とは反対側に配置されている、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

10

【請求項 1 2】

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層に対して前記半導体層側に配置されており、前記半導体層、前記二次元材料層、前記第 1 電極部、および前記第 2 電極部は、前記熱電変換材料層上に配置されている、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 1 3】

第 1 面を有する半導体層と、

前記半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、

前記半導体層を介さずに前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 1 電極部と、

前記半導体層を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 2 電極部と、

熱電変換材料層とを備え、

20

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と接している、または、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記熱電変換材料層内の電位差が変化するとき前記第 1 電極部と前記第 2 電極部との間の電位差を変化させるように設けられており、

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記二次元材料層及び前記第 1 電極部のうち前記第 1 電極部のみと重なるように配置されている、電磁波検出器。

【請求項 1 4】

第 1 面を有する半導体層と、

前記半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、

前記半導体層を介さずに前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 1 電極部と、

前記半導体層を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている第 2 電極部と、

熱電変換材料層とを備え、

30

前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層と接している、または、前記二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ前記熱電変換材料層内の電位差が変化するとき前記第 1 電極部と前記第 2 電極部との間の電位差を変化させるように設けられており、

前記半導体層は、第 1 導電型の第 1 半導体部分と、第 2 導電型の第 2 半導体部分とを含み、前記二次元材料層は、前記第 1 半導体部分と電氣的に接続されており、

前記第 2 電極部は、前記第 2 半導体部分を介して前記二次元材料層と電氣的に接続されている、電磁波検出器。

【請求項 1 5】

40

前記二次元材料層は、前記第 1 半導体部分および前記第 2 半導体部分と電氣的に接続されており、

前記第 1 半導体部分と電氣的に接続されている第 4 電極部をさらに備える、請求項 1 4 に記載の電磁波検出器。

【請求項 1 6】

前記熱電変換層と接している第 3 電極部をさらに備える、請求項 1 ~ 5 , 1 3 ~ 1 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 1 7】

前記熱電変換材料層は、検出対象とする電磁波が前記熱電変換材料層に入射したときに、前記二次元材料層の延在方向に対して垂直な方向の電界が生じるように設けられており、

50

前記二次元材料層は、前記半導体層と接している領域を含み、
前記熱電変換材料層は、前記二次元材料層の前記半導体層と接している領域において前記二次元材料層の延在方向に対して垂直な方向の電界が生じるように設けられている、請求項 1 ~ 5 , 13 ~ 15 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 18】

前記熱電変換材料層は、第 1 熱電変換材料により構成されている第 1 熱電変換材料部分と、前記第 1 熱電変換材料とは異なる第 2 熱電変換材料により構成されている第 2 熱電変換材料部分とを含む、請求項 1 ~ 5 , 13 ~ 15 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 19】

前記第 1 熱電変換材料の電磁波吸収波長が前記第 2 熱電変換材料の電磁波吸収波長と異なる、又は前記第 1 熱電変換材料のゼーベック係数が前記第 2 熱電変換材料のゼーベック係数と異なる、請求項 18 に記載の電磁波検出器。

10

【請求項 20】

前記熱電変換材料層は、互いに極性が異なる複数の熱電変換材料部分が電極を介して直列に接続されている型構造部を含む、請求項 1 ~ 5 , 13 ~ 15 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【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。

20

【背景技術】

【0002】

従来、次世代の電磁波検出器に用いられる電磁波検出層の材料として、二次元材料層の一例である移動度が極めて高いグラフェンが知られている。グラフェンの吸収率は 2.3% と低い。そのため、グラフェンを用いた電磁波検出器における高感度化手法が提案されている。たとえば、米国特許出願公開第 2015/0243826 号明細書（特許文献 1）では、下記のような構造の検出器が提案されている。すなわち、上記特許文献 1 の検出器では、n 型半導体層上に 2 つ以上の誘電体層が設けられている。2 つの誘電体層上および当該 2 つの誘電体層の間に位置する n 型半導体層の表面部分上にグラフェン層が形成されている。グラフェン層と n 型半導体層とはショットキー接合している。グラフェン層の両端に接続されたソース・ドレイン電極が誘電体層上に配置されている。ゲート電極は n 型半導体層と接続されている。ゲート電極とソース電極またはドレイン電極との間に電圧を印加した場合には、上記ショットキー接合により、OFF 動作が可能となる。

30

【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出来ず、検出器の高感度化が困難である。

40

【0005】

本開示の主たる目的は、上記検出器と比べて検出感度が高い電磁波検出器および電磁波検出器アレイを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示に係る電磁波検出器は、第 1 面を有する半導体層と、半導体層と電氣的に接続されている二次元材料層と、半導体層を介さずに二次元材料層と電氣的に接続されている第

50

1 電極部と、半導体層を介して二次元材料層と電氣的に接続されている第 2 電極部と、熱電変換材料層とを備える。熱電変換材料層は、二次元材料層と接している、または、第 1 面と直交する方向において二次元材料層と間隔を空けて配置されておりかつ熱電変換材料層内の電位差が変化するとき第 1 電極部と第 2 電極部との間の電位差を変化させるように設けられている。

【発明の効果】

【0007】

本開示によれば、上記検出器と比べて検出感度が高い電磁波検出器および電磁波検出器アレイを提供できる。

【図面の簡単な説明】

10

【0008】

【図 1】実施の形態 1 に係る電磁波検出器を説明するための平面図である。

【図 2】図 1 の線分 I I - I I における断面図である。

【図 3】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 4】実施の形態 1 に係る電磁波検出器の第 1 変形例を示す断面図である。

【図 5】実施の形態 1 に係る電磁波検出器の第 2 変形例を示す断面図である。

【図 6】実施の形態 2 に係る電磁波検出器を説明するための平面図である。

【図 7】図 6 の線分 V I I - V I I における断面図である。

【図 8】実施の形態 2 に係る電磁波検出器の第 1 変形例を示す平面図である。

20

【図 9】図 8 の線分 I X - I X における断面図である。

【図 10】実施の形態 2 に係る電磁波検出器の第 2 変形例を示す平面図である。

【図 11】図 10 の線分 X I - X I における断面図である。

【図 12】実施の形態 3 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。

【図 13】実施の形態 4 に係る電磁波検出器を説明するための平面図である。

【図 14】図 13 の線分 X I V - X I V における断面図である。

【図 15】実施の形態 5 に係る電磁波検出器を説明するための平面図である。

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

【図 17】実施の形態 6 に係る電磁波検出器を示す平面図である。

【図 18】図 17 の線分 X V I I I - X V I I I における断面図である。

30

【図 19】図 17 の線分 X I X - X I X における断面図である。

【図 20】実施の形態 8 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。

【図 21】実施の形態 9 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。

【図 22】実施の形態 10 に係る電磁波検出器を説明するための平面図である。

【図 23】図 22 の線分 X X I I I - X X I I I における断面図である。

【図 24】実施の形態 10 に係る電磁波検出器の第 1 変形例を示す断面図である。

【図 25】実施の形態 10 に係る電磁波検出器の第 2 変形例を示す断面図である。

【図 26】実施の形態 11 に係る電磁波検出器を示す平面図である。

【図 27】図 26 の線分 X X V I I - X X V I I における断面図である。

【図 28】実施の形態 11 に係る電磁波検出器を示す平面図である。

40

【図 29】図 28 の線分 X X I X - X X I X における断面図である。

【図 30】実施の形態 12 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。

【図 31】実施の形態 13 に係る電磁波検出器を示す断面図である。

【図 32】実施の形態 13 に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。

【図 33】実施の形態 14 に係る電磁波検出器を示す断面図である。

【図 34】実施の形態 14 に係る電磁波検出器の変形例を説明するための断面図である。

【図 35】実施の形態 15 に係る電磁波検出器を示す断面図である。

【図 36】実施の形態 15 に係る電磁波検出器の第 1 変形例を説明するための断面図である。

【図 37】実施の形態 15 に係る電磁波検出器の第 2 変形例を示す断面図である。

50

- 【図 3 8】実施の形態 1 5 に係る電磁波検出器の第 3 変形例を示す断面図である。
- 【図 3 9】実施の形態 1 6 に係る電磁波検出器を示す断面図である。
- 【図 4 0】実施の形態 1 6 に係る電磁波検出器の変形例を説明するための断面図である。
- 【図 4 1】実施の形態 1 7 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。
- 【図 4 2】実施の形態 1 7 に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。
- 【図 4 3】実施の形態 1 9 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。
- 【図 4 4】実施の形態 2 0 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。
- 【図 4 5】実施の形態 2 1 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。
- 【図 4 6】実施の形態 2 1 に係る電磁波検出器の変形例を示す断面図である。
- 【図 4 7】実施の形態 2 2 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。 10
- 【図 4 8】実施の形態 2 2 に係る電磁波検出器の変形例を説明するための断面図である。
- 【図 4 9】実施の形態 2 3 に係る電磁波検出器を説明するための断面図である。
- 【図 5 0】実施の形態 2 4 に係る電磁波検出器アレイを説明するための平面図である。
- 【図 5 1】実施の形態 2 4 に係る電磁波検出器アレイの変形例を示す平面図である。
- 【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、図面を参照して、本開示の実施の形態について説明する。なお、同一の構成には同一の参照番号を付し、その説明は繰り返さない。

【0010】

以下に説明する実施の形態において、図は模式的なものであり、機能又は構造を概念的に説明するものである。また、以下に説明する実施の形態により本開示が限定されるものではない。特記する場合を除いて、電磁波検出器の基本構成は全ての実施の形態において共通である。また、同一の符号を付したものは、上述のように同一又はこれに相当するものである。これは明細書の全文において共通する。 20

【0011】

以下に説明する実施の形態では、電磁波検出器について、可視光又は赤外光を検出する場合の構成を用いて説明するが、本開示はこれらに限定されない。以下に説明する実施の形態は、可視光または赤外光に加えて、例えば、X線、紫外光、近赤外光、テラヘルツ（THz）波、又は、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、これらの光及び電波を総称して電磁波と記載する。 30

【0012】

また、本開示の実施の形態では、グラフェンとして p 型グラフェン又は n 型グラフェンの用語が用いられる場合がある。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を p 型グラフェン、電子が多いものを n 型グラフェンと呼ぶ。

【0013】

また、本開示の実施の形態では、二次元材料層の一例であるグラフェン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。 40

【0014】

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

【0015】

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 50

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。

【0016】

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。

10

【0017】

実施の形態 1 .

図 1 は、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 2 は、図 1 の線分 I I - I I における断面模式図である。図 1 および図 2 に示した電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1 と、第 1 電極部 2 a と、第 2 電極部 2 b と、絶縁膜 3 と、半導体層 4 と、熱電変換材料層 5 とを主に備える。

【0018】

半導体層 4 は、第 1 面 4 1 および第 1 面 4 1 とは反対側に位置する第 2 面 4 2 を有している。図 1 および図 2 に示されるように、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、絶縁膜 3、および熱電変換材料層 5 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 上に配置されている。第 2 電極部 2 b は、半導体層 4 の第 2 面 4 2 上に配置されている。

20

【0019】

半導体層 4 は、例えば、シリコン (Si) 等の半導体材料からなる。具体的には、半導体層 4 としては、不純物がドーピングされたシリコン基板などが用いられる。

【0020】

ここで、半導体層 4 は、多層構造であってもよく、pn 接合フォトダイオードや、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を用いてもよい。また、半導体層 4 としてフォトトランジスタを用いてもよい。

30

【0021】

半導体層 4 を構成する半導体材料として、上述のようにシリコン基板を例として説明したが、当該半導体層 4 を構成する材料として他の材料を用いてもよい。たとえば、半導体層 4 を構成する材料として、ゲルマニウム (Ge)、III - V 族又は II - V 族半導体などの化合物半導体、水銀カドミウムテルル (HgCdTe)、インジウムアンチモン (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)、又は、量子井戸又は量子ドットを含む基板、Type II 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を用いてもよい。

40

【0022】

本実施の形態に係る電磁波検出器 100 においては、半導体層 4 および半導体層 4 の電気抵抗率が $100 \cdot \text{cm}$ 以下になるように、半導体層 4 および半導体層 4 に不純物がドーピングされていることが好ましい。半導体層 4 および半導体層 4 が高濃度にドーピングされることで、キャリアの半導体層 4 および半導体層 4 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 100 の応答速度が向上する。

【0023】

また、半導体層 4 の厚さ T_1 は $10 \mu\text{m}$ 以下とすることが好ましい。半導体層 4 の厚さ T_1 を薄くすることで、キャリアの失活が少なくなる。

【0024】

50

絶縁膜 3 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 上に配置されている。絶縁膜 3 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 に接している下面と、下面とは反対側に位置する上面とを有している。絶縁膜 3 には、半導体層 4 の第 1 面 4 1 の一部を露出する開口部 3 0 が形成されている。開口部 3 0 は、絶縁膜 3 の上面から下面に達している。絶縁膜 3 の上面の少なくとも一部は、二次元材料層 1 の下面に接している。言い換えると、絶縁膜 3 は、二次元材料層 1 の下部に配置されている。

【 0 0 2 5 】

絶縁膜 3 としては、例えば酸化シリコン (SiO_2) からなる絶縁膜を用いることができる。なお、絶縁膜 3 を構成する材料は上述した酸化シリコンに限定されず、他の絶縁材料を用いてもよい。たとえば、絶縁膜 3 を構成する材料として、オルトケイ酸テトラエチル、窒化シリコン、酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、酸化ニッケル、ボロンナイトライド、又は、シロキサン系のポリマー材料等を用いてもよい。例えば、ボロンナイトライドは原子配列がグラフェンと似ているため、グラフェンからなる二次元材料層 1 と接しても電荷の移動度に悪影響を与えない。そのため、絶縁膜 3 が電子移動度などの二次元材料層 1 の性能を阻害することを抑制する観点から、ボロンナイトライドは絶縁膜 3 を構成する材料として好適である。

【 0 0 2 6 】

また、絶縁膜 3 の厚さ T_2 、すなわち絶縁膜 3 の下面と上面との間の距離は、第 1 電極部 2 a が半導体層 4 と絶縁されており、トンネル電流が生じなければ特に限定されない。また、絶縁膜 3 は二次元材料層 1 の下部に配置されていなくてもよい。

【 0 0 2 7 】

第 1 電極部 2 a は、絶縁膜 3 の上面上に配置されている。第 1 電極部 2 a は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 から離れた位置に配置されている。第 1 電極部 2 a は、絶縁膜 3 の上面と接している下面と、該下面とは反対側に位置する上面と、上面と交差する方向に延びる側面とを有している。第 2 電極部 2 b は、半導体層 4 の第 2 面 4 2 上に配置されている。第 1 電極部 2 a および第 2 電極部 2 b 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 電極部 2 a と絶縁膜 3 との間、又は第 2 電極部 2 b と半導体層 4 との間には、図示しない密着層が形成されていてもよい。密着層は、第 1 電極部 2 a と絶縁膜 3 との密着性、又は第 2 電極部 2 b と半導体層 4 との密着性を高めるものである。密着層を構成する材料は、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 2 8 】

図 2 に示されるように、第 1 電極部 2 a は、例えば二次元材料層 1 の下部に形成されている。なお、第 1 電極部 2 a は、二次元材料層 1 の上部に形成されていてもよい。図 2 に示されるように、第 2 電極部 2 b は、例えば半導体層 4 の第 2 面 4 2 の全面上に設けられている。なお、第 2 電極部 2 b は、少なくとも半導体層 4 の一部と接していればよい。例えば、第 2 電極部 2 b は、半導体層 4 の第 1 面 4 1、第 2 面 4 2、および第 1 面 4 1 と交差する方向に延びる側面のうちの一部と接するように設けられていてもよい。このような電磁波検出器 1 0 0 は、第 2 面 4 2 側から入射した電磁波を検知可能となる。なお、図 2 に示されるように、第 2 電極部 2 b が第 2 面 4 2 の全面上に設けられている電磁波検出器 1 0 0 は、検出対象とされる電磁波が第 1 面 4 1 側からのみ入射する場合に、好適である。図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 では、第 1 面 4 1 側から入射して熱電変換材料層 5 および半導体層 4 を透過した電磁波が第 2 電極部 2 b により反射して再び熱電変換材料層 5 に到達するため、熱電変換材料層 5 における電磁波の吸収率が高められる。

【 0 0 2 9 】

図 2 に示されるように、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間には、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。上記電源回路は、二次元材料層 1 に電圧 V を印加するための回路であり、電圧源 PW を含んでいる。電圧源 PW は、第 1 電極部

10

20

30

40

50

2 a と第 2 電極部 2 b とに電氣的に接続されている。電圧源 P W は、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に電圧 V 1 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 2 a および第 2 電極部 2 b の間には、電流 I 1 が流れる。上記電源回路には、二次元材料層 1 での電流 I を検出するための図示しない電流計が接続される。

【 0 0 3 0 】

二次元材料層 1 は、第 1 電極部 2 a、絶縁膜 3、および半導体層 4 上に配置されている。二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の内部から第 1 電極部 2 a にまで延在する。二次元材料層 1 の一部は、第 1 電極部 2 a 上に配置されており、第 1 電極部 2 a と接している。二次元材料層 1 の他の一部は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の内部に配置されており、半導体層 4 と接している。二次元材料層 1 は、熱電変換材料層 5 の下部に配置されており、熱電変換材料層 5 と接している。二次元材料層 1 は、第 1 電極部 2 a、絶縁膜 3、および半導体層 4 と、熱電変換材料層 5 との間に配置されている。

10

【 0 0 3 1 】

二次元材料層 1 は、半導体層 4 と電氣的に接続されている第 1 部分 1 a と、第 1 電極部 2 a と電氣的に接続されている第 2 部分 1 b と、第 1 部分 1 a と第 2 部分 1 b との間を電氣的に接続する第 3 部分 1 c とを含む。

【 0 0 3 2 】

第 1 部分 1 a は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 内において、半導体層 4 の第 1 面 4 1 上に配置されている。第 1 部分 1 a は、熱電変換材料層 5 の下部に配置されている。第 1 部分 1 a は、半導体層 4 と熱電変換材料層 5 との間に配置されており、かつ半導体層 4 および熱電変換材料層 5 の各々と接している。好ましくは、第 1 部分 1 a は、半導体層 4 とショットキー接合している。

20

【 0 0 3 3 】

図 1 に示されるように、平面視において、二次元材料層 1 は、例えば長手方向と短手方向を有している。二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a が二次元材料層 1 の長手方向の一方の端部を有し、二次元材料層 1 の第 2 部分 1 b が二次元材料層 1 の長手方向の他方の端部を有している。なお、本実施の形態に係る電磁波検出器においては、平面視における二次元材料層 1 の端部の位置は特に限定されるものではない。第 1 部分 1 a は、二次元材料層 1 の端部を有していなくてもよい。二次元材料層 1 は、第 1 部分 1 a において第 3 部分 1 c とは反対側に位置し第 1 部分 1 a と接続されている第 4 部分を有しており、当該第 4 部分が二次元材料層 1 の端部を有していてもよい。

30

【 0 0 3 4 】

第 2 部分 1 b は、絶縁膜 3 の上面上に配置されている。第 2 部分 1 b の一部は、第 1 電極部 2 a の上面上に配置されている。第 2 部分 1 b の少なくとも一部は、熱電変換材料層 5 の下部に配置されている。第 2 部分 1 b は、第 1 電極部 2 a と熱電変換材料層 5 との間に配置されており、かつ第 1 電極部 2 a および熱電変換材料層 5 の各々と接している。

【 0 0 3 5 】

第 3 部分 1 c は、絶縁膜 3 の上面上および絶縁膜 3 の開口部 3 0 の内周面上に配置されている。第 3 部分 1 c は、絶縁膜 3 と熱電変換材料層 5 との間に配置されており、かつ絶縁膜 3 および熱電変換材料層 5 の各々と接している。言い換えると、絶縁膜 3 は、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c と半導体層 4 とを隔てている。

40

【 0 0 3 6 】

二次元材料層 1 の上記第 1 部分 1 a、上記第 2 部分 1 b、および上記第 3 部分 1 c の各々の厚さは、例えば互いに等しい。二次元材料層 1 の上面上には、上記第 1 部分 1 a、上記第 2 部分 1 b、および上記第 3 部分 1 c に起因した凹凸が形成されている。上記第 1 部分 1 a の上面と半導体層 4 の第 1 面 4 1 との間の距離は、上記第 2 部分 1 b の上面と半導体層 4 の第 1 面 4 1 との間の距離未満である。

【 0 0 3 7 】

二次元材料層 1 は、熱電変換材料層 5 と接している領域、および半導体層 4 と接している領域とを含む。熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の熱電変換材料層 5 と接している

50

領域および半導体層 4 と接している領域の少なくとも一方において二次元材料層 1 の延在方向に対して垂直な方向の電界が生じるように、設けられている。

【 0 0 3 8 】

なお、図 2 における二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の中央に対して第 1 電極部 2 a 側（図 2 の左側）からその反対側（図 2 の右側）まで延在しているが、これに限られるものではない。図 2 において二次元材料層 1 の第 1 電極部 2 a とは反対側に位置する端部（右端）は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の中央に対して左側に配置されていてもよい。また、図 2 における二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 において半導体層 4 の第 1 面 4 1 の一部を露出するように配置されているが、これに限られるものではない。二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 において半導体層 4 の第 1 面 4 1 の全体を覆うように配置されていてもよい。二次元材料層 1 の第 1 電極部 2 a とは反対側に位置する端部（右端）は、開口部 3 0 に対して第 1 電極部 2 a とは反対側に位置する絶縁膜 3 上に配置されていてもよい。

10

【 0 0 3 9 】

二次元材料層 1 は、例えば、単層のグラフェンを用いることができる。単層のグラフェンは二次元炭素結晶の単原子層である。また、単層のグラフェンは六角形状に配置された各連鎖に炭素原子を有している。また、二次元材料層 1 は、単層グラフェンが 2 層以上積層した多層グラフェンとして構成されていてもよい。また、二次元材料層 1 として、ノンドープのグラフェン、または p 型又は n 型の不純物がドープされたグラフェンが用いられてもよい。二次元材料層 1 の二次元面は、二次元材料層 1 の上面に沿っている。二次元材料層 1 の二次元面が二次元材料層 1 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。二次元材料層 1 の二次元面は、例えば二次元材料層 1 の上面と平行である。

20

【 0 0 4 0 】

二次元材料層 1 に多層グラフェンを用いた場合、二次元材料層 1 の光電変換効率が増加し、電磁波検出器 1 0 0 の感度は高くなる。二次元材料層 1 として用いられる多層グラフェンは、任意の 2 層のグラフェンにおける六方格子の格子ベクトルの向きが一致しなくてもよく、一致してもよい。例えば、2 層以上のグラフェンを積層することで、二次元材料層 1 においてバンドギャップが形成される。この結果、光電変換される電磁波の波長選択効果を持たせることが可能である。なお、二次元材料層 1 を構成する多層グラフェンにおける層数が増加すると、チャンネル領域でのキャリアの移動度は低下する。一方、この場合には二次元材料層 1 が基板などの下地構造からのキャリア散乱の影響を受けにくくなり、結果的にノイズレベルが低下する。そのため、二次元材料層 1 として多層グラフェンを用いた電磁波検出器 1 0 0 は、光吸収が増加し、電磁波の検出感度を高めることができる。

30

【 0 0 4 1 】

また、二次元材料層 1 が第 1 電極部 2 a と接している場合、第 1 電極部 2 a から二次元材料層 1 へキャリアがドープされる。例えば、第 1 電極部 2 a の材料として金（Au）を用いた場合、二次元材料層 1 と Au との仕事関数の差から、第 1 電極部 2 a 近傍の二次元材料層 1 に正孔がドープされる。この状態で電磁波検出器 1 0 0 を電子伝導状態で駆動させると、第 1 電極部 2 a から二次元材料層 1 にドープされた正孔の影響により、二次元材料層 1 のチャ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 1 と第 1 電極部 2 a 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 1 0 0 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 1 0 0 の性能低下が生じ得る。特に、二次元材料層 1 として単層グラフェンを用いた場合、第 1 電極部 2 a から注入されるキャリアのドープ量が多い。そのため、電磁波検出器 1 0 0 における上記電子の移動度の低下は、二次元材料層 1 として単層グラフェンを用いた場合に特に顕著である。したがって、二次元材料層 1 をすべて単層グラフェンにより形成した場合、電磁波検出器 1 0 0 の性能が低下する恐れがあった。

40

【 0 0 4 2 】

そこで、第 1 電極部 2 a からのキャリアがドープされやすい二次元材料層 1 の上記第 2 部分 1 b は、多層グラフェンにより構成されていてもよい。多層グラフェンは単層グラフ

50

エンに比べ、第1電極部2aからのキャリアドーピングが小さい。そのため、二次元材料層1と第1電極部2aとの間のコンタクト抵抗の増加を抑制することができる。この結果、電磁波検出器100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100の高性能化が図られる。

【0043】

また、二次元材料層1としてはナノリボン状のグラフェン（以下、グラフェンナノリボンとも呼ぶ）を用いることもできる。その場合、二次元材料層1としては、たとえばグラフェンナノリボン単体、複数のグラフェンナノリボンを積層した複合体、又は、グラフェンナノリボンが平面上に周期的に配列された構造体のいずれかを用いることができる。例えば、二次元材料層1として、グラフェンナノリボンが周期的に配置された構造体を用いる場合、グラフェンナノリボンにおいて、プラズモン共鳴を発生させることができる。この結果、電磁波検出器100の感度を向上させることができる。ここで、グラフェンナノリボンが周期的に配列された構造は、グラフェンメタマテリアルと呼ばれることもある。したがって、二次元材料層1としてグラフェンメタマテリアルを用いた電磁波検出器100においても、上述した効果を得ることができる。

10

【0044】

熱電変換材料層5は、電磁波検出器100の検出対象とする電磁波が照射されたときに、熱電変換材料層5の内部に温度差及び電位差が発生又は変化するように設けられている。異なる観点から言えば、熱電変換材料層5は、電磁波検出器100の検出対象とする電磁波を吸収して熱電変換材料層5の内部において温度差を発生又は変化させるように設けられている。さらに熱電変換材料層5は、熱電変換材料層5の内部において温度差が発生又は変化したときに、当該温度差によって電位差が発生又は変化する効果（以下、熱電発電効果と記載する）を奏するように設けられている。

20

【0045】

上記温度差は、熱電変換材料層5において電磁波が照射された面と、電磁波が照射された面とは電磁波の進行方向において反対側に位置する面との間に発生する。例えば、電磁波が熱電変換材料層5の上面に照射された場合、上記温度差は熱電変換材料層5の上面と下面との間に発生する。この場合、熱電変換材料層5において温度差が生じる領域間の配列方向（以下、温度差の方向と記載する）及び電位差が生じる領域間の配列方向（以下、電位差の方向と記載する）は、二次元材料層1の二次元面と交差する。

30

【0046】

好ましくは、熱電変換材料層5は、上記電位差の方向が二次元材料層1の二次元面と直交するように設けられている。

【0047】

好ましくは、熱電変換材料層5は、二次元材料層1と熱電変換材料層5との界面及び二次元材料層1と半導体層4との接合界面の少なくともいずれかにおいて、上記電位差の方向が二次元材料層1の二次元面と直交するように設けられている。このようにすれば、光ゲート効果に起因した二次元材料層1の電気抵抗の変化率が最大化され得る。

【0048】

熱電発電効果において電磁波は単に熱源として作用するため、熱電変換材料層5は基本的に電磁波の波長に依存せず熱電発電効果を発揮する。そのため、熱電変換材料層5は、広帯域の電磁波に感度を有し、電磁波検出器100の検出対象とする電磁波の波長に感度を有している。

40

【0049】

さらに、図2に示される熱電変換材料層5は、上記電位差が熱電変換材料層5の内部に発生したときに、二次元材料層1の電気抵抗値を変化させるように設けられている。異なる観点から言えば、熱電変換材料層5は、その内部に生じた電位差により二次元材料層1に対して疑似的にゲート電圧を印加した状態を実現する効果（以下、光ゲート効果と記載する）を奏するように設けられている。

【0050】

50

図 2 に示されるように、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 と接している。熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の上部に配置されている。つまり、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 に対して、半導体層 4 とは反対側に配置されている。熱電変換材料層 5 は、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 の各々の上部に配置されており、二次元材料層 1 の上記第 1 部分 1 a、上記第 2 部分 1 b、および上記第 3 部分 1 c の各々と接している。

【 0 0 5 1 】

具体的には、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の上記第 1 部分 1 a の上部に配置されており第 1 部分 1 a と接している第 4 部分 5 a と、二次元材料層 1 の上記第 2 部分 1 b の上部に配置されており第 2 部分 1 b と接している第 5 部分 5 b と、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c の上部に配置されており第 3 部分 1 c と接している第 6 部分 5 c とを有している。

10

【 0 0 5 2 】

図 2 に示されるように、熱電変換材料層 5 は、例えば第 1 電極部 2 a、絶縁膜 3、及び半導体層 4 の各々と接していない。

【 0 0 5 3 】

図 2 に示されるように、熱電変換材料層 5 の上記第 4 部分 5 a、上記第 5 部分 5 b、および上記第 6 部分 5 c の各々の厚さは、例えば互いに等しい。熱電変換材料層 5 の上面には、二次元材料層 1 の上面の凹凸に起因した凹凸が形成されている。

20

【 0 0 5 4 】

なお、熱電変換材料層 5 の上記第 4 部分 5 a、上記第 5 部分 5 b、および上記第 6 部分 5 c の各々の厚さは、互いに異なっていてもよい。熱電変換材料層 5 の上面は、例えば平坦であってもよい。

【 0 0 5 5 】

好ましくは、熱電変換材料層 5 の厚さは、熱電変換材料層 5 が十分な熱電発電効果及び光ゲート効果を発揮するように、設定されている。熱電変換材料層 5 の厚さは、例えば 0 . 1 μm 以上 1 0 μm 以下である。

【 0 0 5 6 】

好ましくは、熱電変換材料層 5 の温度変化の変化速度が可能な限り短く設計されている。例えば、熱電変換材料層 5 において電磁波が照射される面の平坦度が高いことが望ましい。

30

【 0 0 5 7 】

熱電変換材料層 5 を構成する材料は、ビスマス・テルル系化合物、テルライド系化合物、アンチモン・テルル化合物、亜鉛・アンチモン化合物、シリコン・ゲルマニウム化合物、セレン化合物系化合物、シリサイド系化合物、酸化物材料、硫化物系材料、ホイスラー材料、スクッテルダイト系材料、及びカルコゲナイド系材料からなる群から選択される少なくともともいづれかを含む。ビスマス・テルル系化合物は、例えばビスマステルライド (Bi_2Te_3) などである。テルライド系化合物は、例えばテルル化マグネシウム (MgTe)、テルル化ゲルマニウム (GeTe)、テルル化鉛 (PbTe) などである。アンチモン・テルル化合物は、例えば三テルル化二アンチモン (Sb_2Te_3) などである。亜鉛・アンチモン化合物は、例えば ZnSb 、 Zn_3Sb_2 、 Zn_4Sb_3 などである。シリコン・ゲルマニウム化合物は、例えばシリコンゲルマニウム (SiGe) などである。セレン化合物系化合物は、例えばセレン化ビスマス (Bi_2Se_3)、セレン化銅 (Cu_2Se)、セレン化スズ (SnSe) などである。シリサイド系化合物は、例えばマグネシウムシリサイド (Mg_2Si)、マンガンシリサイド ($\text{MnSi}_{1.73}$)、クロムシリサイド (CrSi_2)、鉄シリサイド (FeSi_2) などである。熱電変換材料層 5 を構成する材料は、上記熱電変換材料に限られるものではなく、熱電発電効果を奏する任意の熱電変換材料であればよい。また、熱電変換材料層 5 は、異なる熱電変換材料を混合したものでもよいし、互いに異なる熱電変換材料からなる複数の層が積層した積層体であってもよい。

40

【 0 0 5 8 】

50

熱電変換材料層 5 は、例えば p 型又は n 型の極性を有していてもよい。この場合、熱電変換材料層 5 の極性は、例えば上記材料に添加された不純物材料及びその濃度によって制御され得る。

【 0 0 5 9 】

熱電変換材料層 5 の電気伝導率は、特に制限されない。熱電変換材料層 5 の電気伝導率は、例えば上記不純物の濃度及び熱電変換材料層 5 を構成する材料の粒径等によって制御され得る。

【 0 0 6 0 】

< 電磁波検出器 1 0 0 の製造方法 >

図 3 は、実施の形態 1 に係る電磁波検出器 1 0 0 の製造方法を説明するためのフローチャートである。図 3 を参照しながら、図 1 および図 2 に示した電磁波検出器 1 0 0 の製造方法を説明する。

【 0 0 6 1 】

まず、半導体層 4 を準備する工程 (S 1) が実施される。この工程 (S 1) では、たとえば半導体層 4 が Si 等からなる平坦な基板として準備される。

【 0 0 6 2 】

次に、第 2 電極部を形成する工程 (S 2) が実施される。この工程 (S 2) では、半導体層 4 の第 2 面 4 2 (図 2 参照) に第 2 電極部 2 b が形成される。具体的には、まず半導体層 4 の第 1 面 4 1 を覆う保護膜が形成される。保護膜は、たとえばレジストである。次に、半導体層 4 の第 2 面 4 2 上に第 2 電極部 2 b が形成される。第 2 電極部 2 b 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)、及びクロム (Cr) からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。

【 0 0 6 3 】

なお、本工程 (S 2) では、第 2 電極部 2 b を形成する前に、半導体層 4 と第 2 電極部 2 b との密着性を向上させるための密着層が半導体層 4 の第 2 面 4 2 上に形成されてもよい。密着層を構成する材料は、たとえば銅 (Cr) 及びチタン (Ti) の少なくともいずれかを含む。なお、本工程 (S 2) は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 が保護されている限りにおいて、後述する工程 (S 3 ~ S 7) よりも後に実施されてもよい。

【 0 0 6 4 】

次に、絶縁膜を形成する工程 (S 3) が実施される。この工程 (S 3) では、絶縁膜 3 が半導体層 4 の第 1 面 4 1 上に形成される。絶縁膜 3 を形成する方法は、特に制限されず、例えば熱酸化法、CVD (Chemical Vapor Deposition) 法、及びスパッタ法から任意に選択され得る。半導体層 4 を構成する材料 Si を含む場合、絶縁膜 3 は、例えば半導体層 4 の第 1 面 4 1 を部分的に熱酸化して形成される SiO₂ であってもよい。

【 0 0 6 5 】

次に、第 1 電極部を形成する工程 (S 4) が実施される。この工程 (S 4) では、第 1 電極部 2 a が絶縁膜 3 上に形成される。

【 0 0 6 6 】

第 1 電極部 2 a の形成方法は特に制限されないが、例えば以下のようなリフトオフ法が採用され得る。第 1 に、写真製版または EB 描画などを用いて、絶縁膜 3 の上面上に、レジストマスクが形成される。レジストマスクには、第 1 電極部 2 a が形成されるべき領域に開口部が形成されている。第 2 に、蒸着法やスパッタリング法などを用いて、レジストマスクの上面上に、第 1 電極部 2 a となるべき導電性膜が形成される。導電性膜は、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面上にまで延在するように形成される。第 3 に、レジストマスクが、当該レジストマスクの上面上に配置されていた導電性膜の一部と共に除去される。これにより、レジストマスクの開口部内に配置されていた導電性膜の他の一部が絶縁膜 3 の表面上に残存し、第 1 電極部 2 a となる。第 1 電極部 2 a は、例えば方法により形成されてもよい。第 1 に、絶縁膜 3 の上面上に、第 1 電極部 2 a となるべき導電性膜が成膜される。第 2 に、フォトリソグラフィ法によって導電性膜上に

10

20

30

40

50

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が形成されるべき領域を覆うように形成され、第1電極部2aが形成されるべき領域以外の領域には形成されない。第3に、ウェットエッチング及びドライエッチングの少なくともいずれかにより、レジストマスクをマスクとして導電性膜が部分的に除去される。この結果、レジストマスク下に残存した導電性膜の一部が第1電極部2aとなる。第4に、レジストマスクが除去される。

【0067】

なお、第1電極部2aを形成する前に、半導体層4と第1電極部2aとの密着性を向上させるための密着層が半導体層4の第1面41上に形成されてもよい。

【0068】

次に、絶縁膜に開口部を形成する工程(S5)が実施される。この工程(S5)では、絶縁膜3に開口部30(図1及び図2参照)が形成される。第1に、絶縁膜3の上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が形成される。レジストマスクには、絶縁膜3の開口部が形成されるべき領域に開口部が形成されている。第2に、ウェットエッチング及びドライエッチングの少なくともいずれかにより、レジストマスクをマスクとして絶縁膜3が部分的に除去され、絶縁膜3に開口部30が形成される。第3に、レジストマスクが除去される。なお、本工程(S5)は、上記工程(S4)より先に実施されてもよい。

【0069】

次に、二次元材料層を形成する工程(S6)が実施される。本工程(S6)では、例えば、二次元材料層が第1電極部2a、絶縁膜3、及び絶縁膜3の開口部30内において露出する半導体層4の第1面41の全体を覆うように成膜された後、当該二次元材料層がパターニングされることにより、図1および図2に示される二次元材料層1が形成される。

【0070】

二次元材料層1を形成する方法は、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法又はスクリーン印刷法により、第1電極部2a、絶縁膜3および半導体層4の一部上に形成されてもよい。また、二次元材料層1は、半導体層4とは異なる基板上にCVD法等により形成されたフィルム状の二次元材料層又は機械剥離等により黒鉛等から剥離されたフィルム状の二次元材料層を、第1電極部2a、絶縁膜3及び半導体層4の一部上に転写して貼り付けることにより、形成されてもよい。二次元材料層1をパターニングする方法は特に制限されないが、写真製版またはEB描画などが採用され得る。マスクを用いてパターニングされる場合、当該マスクは二次元材料層1を形成後に除去される。

【0071】

次に、熱電変換材料層を形成する工程(S7)が実施される。本工程(S7)では、熱電変換材料層5が二次元材料層1の上面上に形成される。熱電変換材料層5を形成する方法は、特に制限されない。例えば、熱電変換材料層5がポリマー系材料からなる場合、熱電変換材料層5は、スピンコート法などにより形成されたポリマー膜をフォトリソグラフィ法を用いてパターニングすることにより、形成され得る。また、熱電変換材料層5は、例えば、スパッタ、蒸着、及びMODコート法(MOD: Metal Organic Composition)の少なくともいずれかにより成膜された熱電変換材料膜をフォトリソグラフィ法を用いてパターニングすることにより、形成され得る。また、熱電変換材料層5は、リフトオフ法によっても形成され得る。

【0072】

図1および図2に示される電磁波検出器100は、以上の工程(S1~S7)により製造され得る。なお、上述した製造方法では二次元材料層1が第1電極部2a上に形成されるが、第1電極部2aが二次元材料層1及び絶縁膜3上に形成されてもよい。つまり、工程(S4)は工程(S6)の後に実施されてもよい。ただし、第1電極部2aが二次元材料層1及び絶縁膜3上に形成される場合は、第1電極部2aを形成するときに、二次元材料層1に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、二次元材料層

10

20

30

40

50

1において第1電極部2aが重ねて形成される領域以外を保護するための保護膜を形成した後、第1電極部2aを形成する、といった対応が考えられる。

【0073】

<電磁波検出器100の動作原理>

次に、本実施の形態に係る電磁波検出器100の動作原理について説明する。

【0074】

電磁波を検出可能な状態である電磁波検出器100に電磁波が照射されていない状態を、以下では暗状態と記載する。電磁波検出器100が図2に示される電源回路に接続されている場合、暗状態では、電圧Vが第1電極部2aおよび第2電極部2bの間に印加される。二次元材料層1を流れる電流Iは、上記電流計によって測定される。暗状態において、二次元材料層1には電流Iが流れてもよいし、流れていなくてもよい。

10

【0075】

電磁波が暗状態にある電磁波検出器100の熱電変換材料層5に照射される。熱電発電効果により熱電変換材料層5の内部に電位差が生じ、この結果光ゲート効果により二次元材料層1の電気抵抗値が変化する。二次元材料層1の電気抵抗値の変化により、二次元材料層1に流れる電流Iが変化する。電磁波が熱電変換材料層5に照射されることに起因して二次元材料層1に流れる電流を、光電流ともよぶ。電磁波が熱電変換材料層5に照射されている状態では、暗状態と比べて、電流Iが光電流の分だけ増える。この電流Iの変化を検出することで、電磁波検出器100に照射された電磁波を検出できる。

【0076】

好ましくは、電圧V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逆バイアスとなるように設定される。たとえば半導体層4を構成する半導体層4がp型材料シリコンからなり、二次元材料層1がn型材料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する。このとき、電圧Vが上記ショットキー接合に対して逆バイアスとなるように調整されることで、暗状態において二次元材料層1を流れる電流（暗電流）がゼロになり得る。このような電磁波検出器100はオフ動作可能である。具体的には、電磁波が熱電変換材料層5に照射されると、熱電発電効果により熱電変換材料層5に電位差が発生し、二次元材料層1のフェルミレベルが変調されて、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。その結果、電磁波が照射された時にのみ、電流が半導体層4を流れ、電流Iが検出される。

20

30

【0077】

<電磁波検出器の動作>

次に、図1および図2に示した電磁波検出器の具体的な動作について説明する。ここでは、半導体層4がp型シリコンにより構成され、二次元材料層1がグラフェンにより構成され、熱電変換材料層5がビスマス・テルル系化合物により構成されている場合について説明する。

【0078】

図2に示すように、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逆バイアスとなるように電圧を印加すると、二次元材料層1と半導体層4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、ビスマス・テルル系化合物の吸収波長に応じて決定される。

40

【0079】

検出波長の電磁波が熱電変換材料層5に入射すると、熱電発電効果により熱電変換材料層5において電位差が発生する。熱電変換材料層5において電位差が発生すると、光ゲート効果により二次元材料層1において電界変化が生じる。上述のように、二次元材料層1を構成する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、熱電変換材料層5の熱電発電効果により二次元材料層1のフェルミレベルは大きく変化し、半導体層4とのエネルギー障壁が低下する。これにより、第1電極部2aから二次元材料層1に電荷が注入される。さらに、半導体層4から取り出した光注入された電流電荷は、二次元材料層1において光ゲート効果により大きく増幅され

50

る。このため、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、量子効率 100% を超える高感度となり得る。

< 変形例 >

上記電磁波検出器 100 は、以下のように変形され得る。

【0080】

上記電磁波検出器 100 は、熱電変換材料層 5 と接しており、かつ光照射により光誘起相転移が生じて物性（例えば温度）が変化するモット絶縁体をさらに備えていてもよい。

【0081】

上記電磁波検出器 100 は、二次元材料層 1、半導体層 4、第 1 電極部 2 a、及び熱電変換材料層 5 の各々の露出面を覆う保護膜をさらに備えていてもよい。保護膜を構成する材料は、特に制限されないが、例えば電氣的絶縁性を有する材料であってもよい。保護膜を構成する材料は、たとえば酸化シリコン、窒化シリコン、酸化ハフニウム、酸化アルミニウム、及びボロンナイトライドからなる群から選択される少なくともいずれかを含んでいてもよい。

10

【0082】

図 4 に示されるように、電磁波検出器 100 の第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間には、バイアス電圧 V を印加するための電源回路に代えて、バイアス電流 I を印加するための電源回路が電氣的に接続されてもよい。上記電源回路は、二次元材料層 1 にバイアス電流 I を印加するための回路であり、図示しない電流源と、電圧計 VM を含む。電流源は、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間にバイアス電流 I を印加するように構成されている。電流源は、例えば定電流源である。図 4 に示される電磁波検出器 100 は、電圧計 VM が、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されたときに光ゲート効果により発現する二次元材料層 1 の電気抵抗値の変化を、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に生じる電圧の変化として検出することにより、電磁波を検出する。

20

【0083】

図 5 に示されるように、電磁波検出器 100 の第 1 電極部 2 a 及び第 2 電極部 2 b の一方は電圧計 VM 又は電流計 IM に接続され、かつ第 1 電極部 2 a 及び第 2 電極部 2 b の他方は接地されてもよい。電圧計 VM は、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されたときに光ゲート効果により発現する二次元材料層 1 の電気抵抗値の変化を、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に生じる電圧として検出することにより、電磁波を検出する。電流計 IM は、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されたときに光ゲート効果により発現する二次元材料層 1 の電気抵抗値の変化を、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間に生じる電流として検出することにより、電磁波を検出する。

30

【0084】

複数の電磁波検出器 100 が併用されてもよい。複数の電磁波検出器 100 は、互いに同一の構成を備えていてもよい。例えば、複数の電磁波検出器 100 のうち 1 つ以上の電磁波検出器 100 が検出対象の電磁波が照射されない遮蔽された空間に配置され、複数の電磁波検出器 100 のうち他の 1 つ以上の電磁波検出器 100 が検出対象の電磁波が照射される空間に配置される。この場合、後者の電磁波検出器 100 に電磁波が照射されると、前者の電磁波検出器 100 と後者の電磁波検出器 100 との間で電流 I 又は電圧 V の差分が検出され得る。このようにしても、電磁波は検出され得る。

40

【0085】

< 電磁波検出器 100 の効果 >

電磁波検出器 100 は、半導体層 4 と、半導体層 4 と電氣的に接続されている二次元材料層 1 と、半導体層 4 を介さず二次元材料層 1 と電氣的に接続されている第 1 電極部 2 a と、半導体層 4 を介して二次元材料層 1 と電氣的に接続されている第 2 電極部 2 b と、熱電変換材料層 5 とを備える。熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 と接している。

【0086】

このような電磁波検出器 100 では、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されると、熱電発電効果により熱電変換材料層 5 内に電位差が生じ、さらに光ゲート効果により二次元材

50

料層 1 の電気抵抗が変調され、結果的に二次元材料層 1 において光電流を増幅できる。

【 0 0 8 7 】

熱電変換材料層 5 における電位差の発生に起因して光ゲート効果により二次元材料層 1 にて生じる電流変化量は、通常の半導体における電流変化量より大きくなる。特に、二次元材料層 1 では、通常の半導体と比較して、わずかな電位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を用いた場合、二次元材料層 1 の厚さは原子層 1 層分であって極めて薄い。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及び厚さなどから算出される二次元材料層 1 での上記電流変化量は、通常の半導体における電流変化量の数百倍～数千倍程度となる。

10

【 0 0 8 8 】

したがって、光ゲート効果を利用することで、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。このような光ゲート効果は、通常の半導体のような光電変換材料の量子効率を直接的に増強するのではなく、電磁波入射による電流変化を大きくする。そのため、等価的に電磁波入射による差分電流から算出した上記電磁波検出器の量子効率は 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、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、高い。

【 0 0 8 9 】

また、電磁波検出器 100 は、半導体層 4 の一部と接しておりかつ半導体層 4 の他の一部を開口する開口部 30 が形成されている絶縁膜 3 をさらに備える。二次元材料層 1 は、上記開口部 30 において半導体層 4 の上記他の一部と電氣的に接続され、具体的には半導体層 4 とショットキー接合している。二次元材料層 1 と半導体層 4 とがショットキー接合していることで、逆バイアス印加時には電流が流れず、電磁波検出器 100 は OFF 動作可能となる。

20

【 0 0 9 0 】

また、電磁波検出器 100 では、上記二次元材料層 1 が絶縁膜 3 上に配置されている領域を有しているため、二次元材料層 1 が絶縁膜 3 上に配置されていない場合と比べて、上記光ゲート効果による二次元材料層 1 の導電率がより大きく変調しやすい。

30

【 0 0 9 1 】

また、電磁波検出器 100 に電磁波が照射されたときの電流値 I の変化量は、熱電変換材料層 5 において発生する電位差による二次元材料層 1 の抵抗変化により発生する電流の変化量と、二次元材料層 1 と半導体層 4 のエネルギー障壁変化により発生する電流の変化量に加えて、二次元材料層 1 での光電変換により生じる光電流量を含む。つまり、電磁波検出器 100 では、電磁波が熱電変換材料層 5 及び二次元材料層 1 に照射されることにより、上述した光ゲート効果で生じた電流と、エネルギー障壁変化に伴う電流とに加え、二次元材料層 1 本来の光電変換効率に起因する光電流も検出できる。

【 0 0 9 2 】

以上のように、電磁波検出器 100 では、量子効率が 100% 以上となる好感度化と、OFF 動作とが両立され得る。

40

【 0 0 9 3 】

また、電磁波検出器 100 では、半導体層 4 にシリコンを用いる場合は、半導体層 4 中に読出回路を形成することが可能となる。これにより、素子の外部に回路を形成する必要なく信号の読出しが可能となる。

【 0 0 9 4 】

また、電磁波検出器 100 の熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a、第 2 部分 1 b、及び第 3 部分 1 c の各々と接している。電磁波検出器 100 では、熱電変換材料層 5 が二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a、第 2 部分 1 b、及び第 3 部分 1 c のいずれかのみと接している場合と比べて、熱電変換材料層 5 と二次元材料層 1 との接領域が広いた

50

め、熱電発電効果に伴う光ゲート効果が高い。

【0095】

また、電磁波検出器100では、二次元材料層1の第1部分1aが半導体層4とショットキー接合しているため、第1電極部2aと第2電極部2bとの間に印加されるバイアス電圧を調整してショットキー接合に対して逆バイアス電圧を印加することにより、暗電流がゼロになり得る。つまり、電磁波検出器100は、オフ動作が可能である。

【0096】

好ましくは、熱電変換材料層5は、検出対象とする電磁波が熱電変換材料層5に入射したときに、二次元材料層1の延在方向に対して垂直な方向の電界が生じるように設けられている。このようにすれば、光ゲート効果に起因した二次元材料層1の電気抵抗の変化率が最大化される。

10

【0097】

好ましくは、熱電変換材料層5は、二次元材料層1と熱電変換材料層5との界面及び二次元材料層1と半導体層4との接合界面の少なくともいずれかにおいて、上記電位差の方向が二次元材料層1の二次元面と直交するように設けられている。これにより、光ゲート効果に起因した二次元材料層1の電気抵抗の変化率が最大化され得る。

【0098】

好ましくは、電磁波検出器100では、熱電変換材料層5において電磁波が照射される面の平坦度が高い。これにより、熱電変換材料層5の温度変化の変化速度が可能な限り短く設計され得るため、電磁波が電磁波検出器に入射してから二次元材料層1において抵抗値の変化が生じるまでの時間が短くなる。このような電磁波検出器100によれば、光ゲート効果による増幅の遅延が解消され、応答の高速化が可能となる。

20

【0099】

実施の形態2。

図6は、実施の形態2に係る電磁波検出器の平面模式図である。図7は、図6の線分V I I - V I Iにおける断面模式図である。

【0100】

図6及び図7に示される電磁波検出器101は、基本的には図1および図2に示される電磁波検出器100と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層5が二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第3部分1cのうちのいずれかと接していない点で、図1および図2に示される電磁波検出器100と異なっている。以下では、実施の形態2に係る電磁波検出器が電磁波検出器100と異なっている点を主に説明する。

30

【0101】

図6及び図7に示される電磁波検出器101は、熱電変換材料層5が二次元材料層1の上記第1部分のみと重なるように配置されており、かつ上記第1部分のみと接している点で、電磁波検出器100とは異なる。電磁波検出器101では、熱電変換材料層5が二次元材料層1と半導体層4との接合界面の上部にのみ配置されている。熱電変換材料層5は、第4部分5aのみから成り、二次元材料層1の第2部分1b及び第3部分1cと接していない。

40

【0102】

図8は、本実施の形態の第1変形例に係る電磁波検出器102を示す平面模式図である。図9は、図8の線分I X - I Xにおける断面模式図である。図10は、本実施の形態の第2変形例に係る電磁波検出器103を示す平面模式図である。図11は、図10の線分X I - X Iにおける断面模式図である。

【0103】

図8及び図9に示される電磁波検出器102では、熱電変換材料層5は、二次元材料層1の第2部分1bおよび第3部分1cのみと接している。熱電変換材料層5が絶縁膜3上に配置された二次元材料層1の上部にのみ配置されている。熱電変換材料層5は、第5部分5b及び第6部分5cのみから成り、二次元材料層1の第1部分1aと接していない。

50

【0104】

図10及び図11に示される電磁波検出器103では、熱電変換材料層5は二次元材料層1の第3部分1cのみと接している。熱電変換材料層5は、第6部分5cのみから成り、二次元材料層1の第1部分1a及び第2部分1bと接していない。

【0105】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器では、熱電変換材料層5が二次元材料層1の第2部分1bのみと接していてもよい。熱電変換材料層5は、第5部分5bのみから成っていてもよい。

【0106】

<作用効果>

電磁波検出器101では、熱電変換材料層5は二次元材料層1と半導体層4との接合界面の上部に配置されている。この場合、熱電変換材料層5に電磁波が入射したとき、熱電変換材料層5の電位差により二次元材料層1と半導体層4のエネルギー障壁を変化させることができるため、電磁波検出器101の検出感度は高い。

【0107】

また、電磁波検出器102では、熱電変換材料層5は絶縁膜3上の二次元材料層1の上部に配置されている。この場合、熱電変換材料層5に電磁波が入射したとき、熱電変換材料層5の電位差により二次元材料層1の導電率が変調されるため、電磁波検出器102の検出感度は高い。

【0108】

また、電磁波検出器103では、熱電変換材料層5は二次元材料層1の一部に配置されている。この場合、熱電変換材料層5に電磁波が入射したとき、熱電変換材料層5が接している領域の近傍において導電率の変調が生じる。これにより、二次元材料層1の任意の領域において導電率の変調が可能となる。

【0109】

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。

【0110】

実施の形態3 .

図12は、実施の形態3に係る電磁波検出器の断面模式図である。図12に示される電磁波検出器104は、基本的には図1および図2に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層5が第1面41と直交する方向において二次元材料層1と間隔を空けて配置されている点で、図1および図2に示される電磁波検出器100とは異なる。以下では、実施の形態3に係る電磁波検出器が電磁波検出器100と異なっている点を主に説明する。

【0111】

図12に示されるように、熱電変換材料層5は、二次元材料層1と直接接しないようになっている。電磁波検出器104は、二次元材料層1と熱電変換材料層5との間を隔てる絶縁膜3bをさらに備える。二次元材料層1の第1部分、第2部分1b、及び第3部分1cの各々は、熱電変換材料層5と間隔を空けて配置されている。

【0112】

絶縁膜3bの厚さは、熱電変換材料層5の内部に生じた電位差により二次元材料層1に対して疑似的にゲート電圧を印加した状態を実現し得るように設定される。絶縁膜3bの厚さは、例えば0.1µm以上10µm以下である。

【0113】

実施の形態3に係る電磁波検出器では、熱電変換材料層5のうちの少なくとも一部が第1面41と直交する方向において二次元材料層1と間隔を空けて配置されていてもよい。

【0114】

<作用効果>

上記電磁波検出器において、熱電変換材料層5と二次元材料層1の間に絶縁膜3bが配置されている。

10

20

30

40

50

【 0 1 1 5 】

熱電変換材料層 5 と二次元材料層 1 の間に絶縁膜 3 b を挿入することで、熱電変換材料層 5 が二次元材料層 1 と直接接しないようになっている。熱電変換材料層 5 は二次元材料層 1 と直接接した場合、熱電変換材料層 5 と二次元材料層 1 との間で電荷のやり取りが行われるため、光応答が小さくなる。また、熱電変換材料層 5 と二次元材料層 1 が接した場合は、ヒステリシスが生じ、電磁波検出器の応答速度が低下する可能性がある。絶縁膜 3 b を挿入することで、これらの効果を抑制することができる。また絶縁膜 3 b を挿入した場合においても、熱電変換材料層 5 の温度差による電位差の発生による電界変化を二次元材料層 1 に与えることができる。

【 0 1 1 6 】

また、絶縁膜 3 b が検出波長の電磁波を吸収して発熱する場合、絶縁膜 3 b の発熱により熱電変換材料層 5 に熱エネルギーを与えることで発生する温度差を増加させることができ、電磁波検出器を高感度化することができる。

【 0 1 1 7 】

ここで、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 1 8 】

実施の形態 4 .

図 1 3 は、実施の形態 4 に係る電磁波検出器の平面図である。図 1 4 は、図 1 3 の線分 X I V - X I V における断面図である。図 1 3 及び図 1 4 に示される電磁波検出器 1 0 5 は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、平面視において、第 1 電極部 2 a が環状に形成されており、かつ第 1 部分 1 a が第 1 電極部 2 a よりも内側に配置されている点で、図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 とは異なる。以下では、実施の形態 4 に係る電磁波検出器が電磁波検出器 1 0 0 と異なっている点を主に説明する。

【 0 1 1 9 】

例えば、図 1 3 に示される電磁波検出器 1 0 5 を 1 つの画素と考える。第 1 電極部 2 a は、例えば上記画素の外周部に配置されている。平面視において、絶縁膜 3 の開口部 3 0 は、第 1 電極部 2 a よりも内側に配置されており、例えば上記画素の中央に配置されている。第 1 電極部 2 a は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の外周を囲むように、絶縁膜 3 の上部表面上に配置されている。

【 0 1 2 0 】

< 作用効果 >

図 1 3 に示される電磁波検出器 1 0 5 では、第 1 電極部 2 a による電磁波の減衰を抑えながらも、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が図 1 に示す電磁波検出器 1 0 0 と比べて広くなり得る。そのため、電磁波検出器 1 0 5 では、電磁波検出器 1 0 0 と比べて、二次元材料層 1 を介して半導体層 4 から取り出される光電流が増加するため、検出感度は高くなる。

【 0 1 2 1 】

好ましくは、平面視において上記画素に占める第 1 電極部 2 a の面積（以下、占有面積とも記載する）は、平面視において上記画素に占める熱電変換材料層 5 の面積よりも小さい。好ましくは、平面視における第 1 電極部 2 a の内周端と外周端との間の最短距離は、平面視における熱電変換材料層 5 の最小幅よりも短い。平面視における第 1 電極部 2 a の占有面積が小さいほど、電磁波が熱電変換材料層 5 に対して第 1 電極部 2 a 側から入射する場合に熱電変換材料層 5 に入射する電磁波の減衰を抑えることができる。

【 0 1 2 2 】

平面視において、二次元材料層 1 は、第 1 電極部 2 a の内側の全体及び第 1 電極部 2 a の少なくとも内周縁部と重なるように配置されている。平面視において、二次元材料層 1 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 上のほぼ全体と重なるように配置されてもよい。

【 0 1 2 3 】

10

20

30

40

50

実施の形態 5 .

図 1 5 は、実施の形態 5 に係る電磁波検出器の平面図である。図 1 6 は、図 1 5 の線分 X V I - X V I における断面図である。図 1 5 及び図 1 6 に示される電磁波検出器 1 0 6 は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 と電氣的に接続されている複数の第 1 電極部 2 a を備え、二次元材料層 1 と第 1 電極部 2 a との接続部分が複数設けられている点で、図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 とは異なる。以下では、実施の形態 5 に係る電磁波検出器が電磁波検出器 1 0 0 と異なっている点を主に説明する。

【 0 1 2 4 】

図 1 5 に示されるように、電磁波検出器 1 0 6 は、複数（例えば 3 つ）の第 1 電極部 2 a を備えている。図 1 5 及び図 1 6 に示されるように、複数の第 1 電極部 2 a の各々は、互いに同等の構成を有している。複数の第 1 電極部 2 a の各々は、二次元材料層 1 に電氣的に接続されている。複数の第 1 電極部 2 a の各々は、互いに並列に接続されている。平面視において、複数の第 1 電極部 2 a の各々は、例えば電磁波検出器 1 0 6 の外周部に配置されている。電磁波検出器 1 0 6 の平面形状が多角形状である場合、複数の第 1 電極部 2 a の各々は、例えば電磁波検出器 1 0 6 の平面形状の角部に配置されている。電磁波検出器 1 0 6 の平面形状が四角形状である場合、複数の第 1 電極部 2 a の各々は、4 つの角部のうちの 2 以上の角部に配置されていてもよく、4 つの角部の各々に配置されていてもよい。なお、平面視において、複数の第 1 電極部 2 a は、任意の場所に配置されていてもよい。

【 0 1 2 5 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 0 6 では、二次元材料層 1 と第 1 電極部 2 a との接続部分が複数設けられているため、当該接続部分が 1 つのみ設けられている場合と比べて、二次元材料層 1 を経て半導体層 4 と第 1 電極部 2 a との間を流れる電流は、二次元材料層 1 において局所的に流れずに広く分散するため、二次元材料層 1 において光ゲート効果を受ける領域が広がる。その結果、電磁波検出器 1 0 6 の検出感度は高くなる。

【 0 1 2 6 】

実施の形態 6 .

図 1 7 は、実施の形態 6 に係る電磁波検出器の平面図である。図 1 8 は、図 1 7 の線分 X V I I I - X V I I I における断面図である。図 1 9 は、図 1 7 の線分 X I X - X I X における断面模式図である。図 1 7、図 1 8 及び図 1 9 に示される電磁波検出器 1 0 7 は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 と半導体層 4 との接続部分が複数設けられている点で、図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 とは異なる。以下では、実施の形態 6 に係る電磁波検出器が電磁波検出器 1 0 0 と異なっている点を主に説明する。

【 0 1 2 7 】

図 1 7 に示される電磁波検出器 1 0 7 では、絶縁膜 3 に、複数（例えば 3 つ）の開口部 3 0 が形成されている。複数の開口部 3 0 の各々は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 の一部を露出するように形成されている。

【 0 1 2 8 】

図 1 7 に示されるように、平面視において、複数の開口部 3 0 の各々は、互いに間隔を空けて配置されている。平面視において、複数の開口部 3 0 の各々は、例えば電磁波検出器 1 0 7 の外周部に配置されている。平面視において、第 1 電極部 2 a は、例えば電磁波検出器 1 0 7 の外周部において、複数の開口部 3 0 の各々と間隔を空けて配置されている。平面視における第 1 電極部 2 a の占有面積は、複数の開口部 3 0 の各々の開口面積の和よりも小さい。

【 0 1 2 9 】

二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の上面上から複数の開口部 3 0 の各々の内部にまで延在し、かつ当該複数の開口部 3 0 の各々の内部において半導体層 4 と電氣的に接続されている。

二次元材料層 1 は複数の開口部 30 の各々の内部において半導体層 4 と接している。平面視において、二次元材料層 1 及び熱電変換材料層 5 の各々は、複数の開口部 30 の各々に跨っている。

【0130】

<作用効果>

電磁波検出器 107 では、二次元材料層 1 と半導体層 4 との接続部分が複数設けられているため、当該接続部分が 1 つのみ設けられている場合と比べて、二次元材料層 1 を経て半導体層 4 と第 1 電極部 2 a との間を流れる電流は、二次元材料層 1 において局所的に流れずに広く分散するため、二次元材料層 1 において光ゲート効果を受ける領域が広がる。その結果、電磁波検出器 107 の検出感度は高くなる。

10

【0131】

また、電磁波検出器 107 では、第 1 電極部 2 a が、図 15 に示される電磁波検出器 106 と同様に、平面視において電磁波検出器 107 の外周部に複数の開口部 30 の各々と間隔を空けて配置されている。平面視における第 1 電極部 2 a の占有面積は、複数の開口部 30 の各々の開口面積の和よりも小さい。

【0132】

このようにすれば、電磁波が熱電変換材料層 5 に対して第 1 電極部 2 a 側から入射する場合に、熱電変換材料層 5 に入射する電磁波の減衰が抑制され得る。

【0133】

実施の形態 7 .

20

実施の形態 1 に係る電磁波検出器においては、平面視における二次元材料層 1 の端部の位置は特に限定されるものではないが、実施の形態 7 である電磁波検出器においては、二次元材料層 1 の上記第 1 部分 1 a が平面視における二次元材料層 1 の端部を有している。実施の形態 7 に係る電磁波検出器は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 の端部が半導体層 4 上に配置されている点で、電磁波検出器 100 とは異なる。言い換えると、二次元材料層 1 と半導体層 4 との接続部分が、平面視における二次元材料層 1 の端部を有している。

【0134】

平面視における二次元材料層 1 の端部は、絶縁膜 3 の開口部内に配置されている。二次元材料層 1 の上記端部は、例えば二次元材料層 1 の長手方向における端部である。

30

【0135】

平面視における二次元材料層 1 の端部の形状は、例えば矩形形状であるが、三角形形状、または 形形状などであってもよい。

【0136】

二次元材料層 1 は、半導体層 4 と電氣的に接続されている複数の端部を有していてもよい。また、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a は、平面視における二次元材料層 1 の端部の一部のみを有していてもよい。例えば、平面視における二次元材料層 1 の端部は、絶縁膜 3 の開口部内に配置されている部分と、絶縁膜 3 上に配置されている部分とを有していてもよい。

【0137】

40

また、二次元材料層 1 の上記端部はグラフェンナノリボンであっても良い。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ため、暗電流を低減し、電磁波検出器の感度を向上させることができる。

【0138】

<作用効果>

本実施の形態に係る電磁波検出器では、平面視における二次元材料層 1 の端部が半導体層 4 上に存在する。この場合、二次元材料層 1 と半導体部分の接合領域がショットキー接合となる。この結果、二次元材料層 1 と半導体部分を逆バイアスで動作させることで、電磁波検出器の暗電流を低減し、感度を向上させることができる。また、二次元材料層 1 と

50

半導体部分を順バイアスで動作させることで、取り出す光電流を増幅して感度を向上することができる。

【0139】

ここで、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。

【0140】

実施の形態 8 .

図 20 は、実施の形態 8 に係る電磁波検出器の断面図である。図 20 に示される電磁波検出器 108 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 100 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に配置されたトンネル絶縁層 6 をさらに備える点で、電磁波検出器 100 とは異なる。以下では、電磁波検出器 108 が電磁波検出器 100 と異なる点を主に説明する。

10

【0141】

トンネル絶縁層 6 は、絶縁膜 3 の開口部 30 の内部に配置されている。トンネル絶縁層 6 の厚みは、検出対象とする電磁波が二次元材料層 1 および熱電変換材料層 5 に入射したときに、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間にトンネル電流が生じるように設定されている。トンネル絶縁層 6 の厚みは、例えば 1 nm 以上 10 nm 以下である。

【0142】

トンネル絶縁層 6 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。トンネル絶縁層 6 の作製方法としては任意の方法を用いることができる。たとえば、トンネル絶縁層 6 は、ALD (Atomic Layer Deposition) 法、真空蒸着法、スパッタ法などを用いて作製しても良い。あるいは、トンネル絶縁層 6 を、半導体層 4 の表面を酸化または窒化することにより形成しても良い。あるいは、トンネル絶縁層 6 として半導体層 4 の表面に形成される自然酸化膜を用いても良い。

20

【0143】

ここで、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。

30

【0144】

<作用効果>

電磁波検出器 108 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トンネル絶縁層 6 を備えるため、半導体層 4 と二次元材料層 1 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。

【0145】

トンネル絶縁層 6 の厚さは、検出対象とする電磁波が二次元材料層 1 および熱電変換材料層 5 に入射したときに、二次元材料層 1 と半導体層 4 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、半導体層 4 から二次元材料層 1 へトンネル注入が生じて半導体層 4 から二次元材料層 1 に比較的大きな光電流が注入され得るため、電磁波検出器 108 の感度が高まる。

40

【0146】

実施の形態 9 .

図 21 は、実施の形態 9 に係る電磁波検出器の断面模式図である。図 21 に示される電磁波検出器 109 は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間を電氣的に接続する接続導電体部 (導電部材) 2d をさらに備える点で、電磁波検出器 100 とは異なる。以下では、電磁波検出器 109 が電磁波検出器 100 とは異なる点を主に説明する。

【0147】

接続導電体部 2d は、絶縁膜 3 の開口部 30 の内部に配置されている。平面視において

50

、接続導電体部 2 d は、二次元材料層 1 および半導体層 4 の各々と重なるように配置されており、かつ二次元材料層 1 および半導体層 4 の各々と接している。接続導電体部 2 d の下面は半導体層 4 の第 1 面 4 1 と接している。接続導電体部 2 d の上面は、二次元材料層 1 の下面と接している。好ましくは、接続導電体部 2 d は、半導体層 4 とショットキー接合している。

【 0 1 4 8 】

好ましくは、接続導電体部 2 d の上面の位置は絶縁膜 3 の上面の位置と実質的に同じである。言い換えると、好ましくは、接続導電体部 2 d の厚みは、絶縁膜 3 の厚みと等しい。この場合、二次元材料層 1 は、絶縁膜 3 の上面から接続導電体部 2 d の上面上にまで、屈曲することなく平面状に延びている。

10

【 0 1 4 9 】

熱電変換材料層 5 は、例えば接続導電体部 2 d と接している。なお、熱電変換材料層 5 は、接続導電体部 2 d と接していなくてもよい。

【 0 1 5 0 】

電磁波が熱電変換材料層 5 に対して接続導電体部 2 d 側から入射する場合には、接続導電体部 2 d は、電磁波検出器が検出する電磁波の波長において高い透過率を示すことが好ましい。

【 0 1 5 1 】

ここで、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。

20

【 0 1 5 2 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 0 9 では、半導体層 4 と二次元材料層 1 とが接続導電体部 2 d を介して電氣的に接続されているため、接続導電体部 2 d を備えていない場合と比べて、二次元材料層 1 と半導体層 4 との間のコンタクト抵抗が低減され得る。

【 0 1 5 3 】

また、接続導電体部 2 d が半導体層 4 とショットキー接合していれば、暗電流が低減され得る。

【 0 1 5 4 】

また、接続導電体部 2 d の厚みが絶縁膜 3 の厚みと同等であれば、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a 及び第 3 部分 1 c の各々の二次元面が同じ方向に延びるため、二次元材料層 1 でのキャリアの移動度が向上する。光ゲート効果は二次元材料層 1 でのキャリアの移動度に比例する。そのため、電磁波検出器 1 0 9 の検出感度は、電磁波検出器 1 0 0 と比べて向上し得る。

30

【 0 1 5 5 】

実施の形態 1 0 .

< 電磁波検出器の構成 >

図 2 2 は、実施の形態 1 0 に係る電磁波検出器の平面模式図である。図 2 3 は、図 2 2 の線分 X X I I I - X X I I I における断面模式図である。図 2 2 及び図 2 3 に示される電磁波検出器 1 1 0 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 に対して半導体層 4 側に配置されている点で、電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 1 1 0 が電磁波検出器 1 0 0 と異なっている点を主に説明する。

40

【 0 1 5 6 】

図 2 2 及び図 2 3 に示されるように、熱電変換材料層 5 は半導体層 4 の第 1 面 4 1 と二次元材料層 1 の下面との間に配置されている。熱電変換材料層 5 は、例えば第 1 面 4 1 と接している。熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c と接している。二次元材料層 1 において第 1 部分 1 a と第 2 部分 1 b との間を接続している第 3 部分 1 c は、熱電変換材料層 5 上に配置されている。熱電変換材料層 5 は、例えば絶縁膜 3 の開口部 3 0 の内部に配置されている。平面視において、熱電変換材料層 5 は、絶縁膜 3 と重なるよう

50

に配置されていない。平面視において、絶縁膜 3 は、二次元材料層 1 の第 2 部分 1 b 及び第 1 電極部 2 a のみと重なるように配置されている。

【 0 1 5 7 】

好ましくは、熱電変換材料層 5 の厚さは、絶縁膜 3 の厚さと第 1 電極部 2 a の厚さとの和と同等である。

【 0 1 5 8 】

図 2 4 は、実施の形態 1 0 の第 1 変形例に係る電磁波検出器 1 1 1 を示す断面模式図である。図 2 5 は、実施の形態 1 0 の第 2 変形例に係る電磁波検出器 1 1 2 を示す断面模式図である。

【 0 1 5 9 】

図 2 4 に示される電磁波検出器 1 1 1 及び図 2 5 に示される電磁波検出器 1 1 2 の各々は、基本的には図 2 2 及び図 2 3 に示される電磁波検出器 1 1 0 と同様の構成を備えるが、熱電変換材料層 5 が絶縁膜 3 の一部と重なるように配置されている点で、電磁波検出器 1 1 0 とは異なる。

【 0 1 6 0 】

図 2 4 に示されるように、電磁波検出器 1 1 1 では、熱電変換材料層 5 は、絶縁膜 3 と二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c との間に配置されている。熱電変換材料層 5 は、例えば半導体層 4 の第 1 面 4 1 と接している。なお、熱電変換材料層 5 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 と接していなくてもよい。

【 0 1 6 1 】

図 2 5 に示されるように、電磁波検出器 1 1 2 では、熱電変換材料層 5 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 と絶縁膜 3 の下面との間に配置されている。熱電変換材料層 5 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 と接している。

【 0 1 6 2 】

電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 において、熱電変換材料層 5 は、上記電位差の方向が二次元材料層 1 と半導体層 4 の接合界面に対して水平方向に沿うように設けられていてもよい。その場合、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されたときに、熱電発電効果により二次元材料層 1 と半導体層 4 との間のエネルギー障壁が変化して、電流 I の変化量がエネルギー障壁の変化に伴う電流の変化量を含み得る。

【 0 1 6 3 】

電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 において、熱電変換材料層 5 は、上記電位差の方向が絶縁膜 3 と二次元材料層 1 の接合界面に垂直に方向に沿うように設けられていてもよい。この場合、電磁波が熱電変換材料層 5 に照射されたときに、熱電発電効果に伴う光ゲート効果により二次元材料層 1 の導電率が変化して、光電流が増幅され得る。

【 0 1 6 4 】

電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 において、熱電変換材料層 5 は、上記電位差の方向が二次元材料層 1 と半導体層 4 の接合界面に対して水平方向に沿うように設けられている部分と、上記電位差の方向が絶縁膜 3 と二次元材料層 1 の接合界面に垂直に方向に沿うように設けられている部分とを有していてもよい。

【 0 1 6 5 】

ここで、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。例えば、電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 において、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 と接していなくてもよい。この場合には、実施の形態 3 と同様の効果がさらに奏される。

【 0 1 6 6 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 では、熱電変換材料層 5 が二次元材料層 1 に対して半導体層 4 側に配置されている。このような電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 の製造方法では、二次元材料層 1 を形成する工程が熱電変換材料層 5 を形成する工程後に実施され得る。そのため、電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 では、二次元材料層 1 が熱電

10

20

30

40

50

変換材料層 5 を形成する工程によるプロセスダメージを受けないため、二次元材料層 1 の性能低下が生じない。その結果、電磁波検出器 1 1 0 , 1 1 1 , 1 1 2 の検出感度は、電磁波検出器 1 0 0 の検出感度と比べて高くなり得る。

【 0 1 6 7 】

電磁波検出器 1 1 0 では、好ましくは、熱電変換材料層 5 の厚さは、絶縁膜 3 の厚さと第 1 電極部 2 a の厚さとの和と同等である。二次元材料層 1 の第 2 部分 1 b 及び第 3 部分 1 c の各々の二次元面が同じ方向に延びるため、二次元材料層 1 でのキャリアの移動度が向上する。

【 0 1 6 8 】

実施の形態 1 1 .

図 2 6 は、実施の形態 1 1 に係る電磁波検出器の平面模式図である。図 2 7 は、図 2 6 の線分 X X V I I - X X V I I における断面模式図である。図 2 6 及び図 2 7 に示される電磁波検出器 1 1 3 は、基本的には図 2 2 および図 2 3 に示される電磁波検出器 1 1 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、半導体層 4、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、および第 2 電極部 2 b は、熱電変換材料層 5 上に配置されている点で、電磁波検出器 1 1 0 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 1 1 3 が電磁波検出器 1 1 0 と異なっている点を主に説明する。

【 0 1 6 9 】

熱電変換材料層 5 は、第 3 面 5 1 を有している。半導体層 4、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、および第 2 電極部 2 b は、熱電変換材料層 5 の第 3 面 5 1 上に配置されている。半導体層 4 は、第 3 面 5 1 上において第 1 電極部 2 a と間隔を空けて配置されている。二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c は、熱電変換材料層 5 の第 3 面 5 1 と接している。第 2 電極部 2 b は、半導体層 4 上において二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a と間隔を空けて配置されている。

【 0 1 7 0 】

熱電変換材料層 5 は、半導体層 4、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、および第 2 電極部 2 b が実装される基板を成している。熱電変換材料層 5 は、熱電変換材料結晶基板により構成され得る。

【 0 1 7 1 】

図 2 8 は、実施の形態 1 1 の変形例に係る電磁波検出器 1 1 4 を示す平面図である。図 2 9 は、図 2 8 の線分 X X I X - X X I X における断面模式図である。

【 0 1 7 2 】

図 2 8 及び図 2 9 に示される電磁波検出器 1 1 4 は、基本的には図 2 6 及び図 2 7 に示される電磁波検出器 1 1 3 と同様の構成を備えるが、二次元材料層 1 と熱電変換材料層 5 との間を隔てる絶縁膜 3 b をさらに備えている点で、電磁波検出器 1 1 3 とは異なる。異なる観点から言えば、電磁波検出器 1 1 4 は、半導体層 4、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、および第 2 電極部 2 b は、熱電変換材料層 5 上に配置されている点で、図 1 2 に示される電磁波検出器 1 0 4 とは異なっている。

【 0 1 7 3 】

図 2 9 に示されるように、絶縁膜 3 b は、熱電変換材料層 5 の第 3 面 5 1 上に配置されている。第 1 電極部 2 a 及び半導体層 4 は、絶縁膜 3 b 上に互いに間隔を空けて配置されている。

【 0 1 7 4 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 1 3 及び電磁波検出器 1 1 4 では、熱電変換材料層 5 が熱電変換材料結晶基板により構成され得るため、熱電変換材料層 5 が熱電変換材料結晶基板により構成されていない場合と比べて、熱電変換材料層 5 の結晶性を高めることができ、また熱電変換材料層 5 を厚くできる。このような熱電変換材料層 5 に電磁波が照射されることにより熱電変換材料層 5 内に発生する温度差は、熱電変換材料結晶基板として構成されていない熱電変換材料層 5 のそれと比べて大きくなるため、検出感度が向上する。

10

20

30

40

50

【 0 1 7 5 】

なお、電磁波検出器 1 1 3 及び電磁波検出器 1 1 4 は電磁波検出器 1 1 0 と同様の効果を得ることができるため、電磁波検出器 1 1 3 においても二次元材料層 1 は二次元材料層 1 が熱電変換材料層 5 を形成する工程によるプロセスダメージを受けない。

【 0 1 7 6 】

ここで、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 7 7 】

実施の形態 1 2 .

図 3 0 は、実施の形態 1 2 に係る電磁波検出器の断面模式図である。図 3 0 に示される電磁波検出器 1 1 5 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層 5 と電氣的に接続されている第 3 電極部 2 c をさらに備える点で、電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 1 1 5 が電磁波検出器 1 0 0 とは異なる点を主に説明する。

10

【 0 1 7 8 】

第 3 電極部 2 c は、熱電変換材料層 5 の上部に配置されている。第 3 電極部 2 c は、熱電変換材料層 5 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 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b とは、半導体層 4、二次元材料層 1、絶縁膜 3 及び熱電変換材料層 5 の各々の少なくとも一部を挟むように配置されている。

【 0 1 7 9 】

第 3 電極部 2 c は、熱電変換材料層 5 と接している。第 3 電極部 2 c は、例えば熱電変換材料層 5 の第 4 部分 5 a、第 5 部分 5 b、及び第 6 部分 5 c の各々と接している。第 3 電極部 2 c は、熱電変換材料層 5 の第 4 部分 5 a、第 5 部分 5 b、及び第 6 部分 5 c のいずれかのみと接していてもよい。

20

【 0 1 8 0 】

第 3 電極部 2 c 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 (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)、及びパラジウム (P d) 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 3 電極部 2 c と熱電変換材料層 5 との間には、図示しない密着層が形成されていてもよい。密着層は、第 3 電極部 2 c と熱電変換材料層 5 との密着性を高めるものである。密着層を構成する材料は、特に制限されないが、例えばクロム (C r) 及びチタン (T i) の少なくともいずれかを含んでいてもよい。

30

【 0 1 8 1 】

第 3 電極部 2 c は熱電変換材料層 5 と電氣的に接続されている。電磁波検出器 1 1 7 では、第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b との間、及び第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b の間に電圧が印加され得る。図 3 0 に示されるように、第 3 電極部 2 c 及び第 1 電極部 2 a は、例えば電源 P W に対して並列に接続される。この場合、第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b との間に印加される電圧は、例えば第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b の間に印加される電圧と等しい。

【 0 1 8 2 】

なお、第 3 電極部 2 c 及び第 1 電極部 2 a は、互いに異なる電源に接続されてもよい。この場合、第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b との間に印加される電圧は、第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b の間に印加される電圧とは独立して調整され得る。第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b との間に印加される電圧は、第 3 電極部 2 c と第 2 電極部 2 b の間に印加される電圧と異なってもよい。

40

【 0 1 8 3 】

電磁波が熱電変換材料層 5 に対して第 3 電極部 2 c 側から入射する場合には、第 3 電極部 2 c は、電磁波検出器が検出する電磁波の波長において高い透過率を示すことが好ましい。

【 0 1 8 4 】

50

なお、第3電極部2cは、熱電変換材料層5と電氣的に接続されている限りにおいて、任意の場所に配置され得る。好ましくは、第3電極部2cは、第3電極部2cから熱電変換材料層5に電圧を印加する方向が二次元材料層1の延在方向に対して垂直方向となるように、配置されている。

【0185】

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。

【0186】

<作用効果>

電磁波検出器115は、熱電変換材料層5と電氣的に接続されている第3電極部2cを備える。そのため、電磁波検出器116では、第3電極部2cと第2電極部2bとの間に電圧を印加することが可能となり、熱電変換材料層5内で発生する電位差を調整可能となる。

10

【0187】

また、第3電極部2cと第2電極部2bとの間に印加される電圧が第3電極部2cと第2電極部2bの間に印加される電圧とは独立して調整される場合には、第3電極部2cと第2電極部2bとの間に印加される電圧に基づいて、電磁波が熱電変換材料層5に照射されたときに熱電発電効果により熱電変換材料層5内に生じる電位差を調整可能となる。この場合、電磁波が熱電変換材料層5に照射されたときに二次元材料層1と半導体層4のエネルギー障壁を効率的に低下させることができ、電磁波検出器の感度が向上する。

【0188】

実施の形態13.

20

図31は、実施の形態13に係る電磁波検出器の断面模式図である。図31に示される電磁波検出器116は、基本的には図1および図2に示される電磁波検出器100と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層5が第1熱電変換材料部分5dおよび第2熱電変換材料部分5eを含む点で、電磁波検出器100とは異なっている。以下では、電磁波検出器116が電磁波検出器100とは異なる点を主に説明する。

【0189】

第1熱電変換材料部分5dは、第1熱電変換材料により構成されている。第2熱電変換材料部分5eは、第1熱電変換材料とは異なる第2熱電変換材料により構成されている。

【0190】

30

電磁波検出器117では、熱電変換材料層5のうち第1熱電変換材料部分5dのみが二次元材料層1と接している。第2熱電変換材料部分5eは二次元材料層1と接していない。第2熱電変換材料部分5eは、第1熱電変換材料部分5dと接している。第2熱電変換材料部分5eは、第1熱電変換材料部分5d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熱電変換材料部分5eは、第1熱電変換材料部分5dを介して、二次元材料層1と電氣的に接続されている。

【0191】

第1熱電変換材料部分5dおよび第2熱電変換材料部分5eの各々を構成する材料は、温度差によって電位差が生じる任意の熱電変換材料であればよいが、好ましくは電磁波の吸収波長が互いに異なる。

40

【0192】

第1熱電変換材料部分5d及び第2熱電変換材料部分5eの各々は、例えば二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第3部分1cの各々の上に配置されているが、これに限られるものではない。

【0193】

図32は、実施の形態13の変形例に係る電磁波検出器117を示す断面模式図である。図32に示される電磁波検出器117では、熱電変換材料層5のうち第1熱電変換材料部分5d及び第2熱電変換材料部分5eの各々が二次元材料層1と接している。

【0194】

第1熱電変換材料部分5dは、二次元材料層1の第1部分1aと接している。平面視に

50

において、第1熱電変換材料部分5dは、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熱電変換材料部分5eは、二次元材料層1の上記第2部分1bおよび第3部分1cの各々と接している。平面視において、第2熱電変換材料部分5eは、二次元材料層1の上記第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。

【0195】

好ましくは、第1熱電変換材料のゼーベック係数が第2熱電変換材料のゼーベック係数と異なる。より好ましくは、第1熱電変換材料および第2熱電変換材料の各々のゼーベック係数は、二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第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。例えば、第1部分1aに接している第1熱電変換材料部分5dを構成する第1熱電変換材料のゼーベック係数は、第2部分1b及び第3部分1cの各々に接している第2熱電変換材料部分5eを構成する第2熱電変換材料のゼーベック係数と比べて、高く設定される。

10

【0196】

<作用効果>

電磁波検出器116及び電磁波検出器117は、熱電変換材料層5が互いに異なる熱電変換材料により構成されている第1熱電変換材料部分5dおよび第2熱電変換材料部分5eを含むため、第1熱電変換材料と第2熱電変換材料との組み合わせが適宜調整されることにより、熱電発電効果及び光ゲート効果が調整され得る。

【0197】

電磁波検出器116において、第1熱電変換材料の電磁波吸収波長が第2熱電変換材料の電磁波吸収波長と異なる場合、第1熱電変換材料の電磁波吸収波長が第2熱電変換材料の電磁波吸収波長と等しい場合と比べて、広帯域の波長の検出が可能となる。

20

【0198】

電磁波検出器117において、第1熱電変換材料の電磁波吸収波長が第2熱電変換材料の電磁波吸収波長と異なる場合、二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第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得る。この場合、電磁波検出器117の高性能化が図られる。

【0199】

実施の形態14.

図33は、実施の形態14に係る電磁波検出器の断面図である。図33に示される電磁波検出器118は、基本的には図1および図2に示した電磁波検出器100と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層5が二次元材料層1と間隔を空けて配置されておりかつ二次元材料層1及び第1電極部2aのうち第1電極部2aのみと重なるように配置されている点で、電磁波検出器100とは異なっている。

30

【0200】

電磁波検出器118では、熱電変換材料層5が第1電極部2aの上部に配置されている。熱電変換材料層5は、第1電極部2aと接している。第1電極部2a及び第2電極部2bは、電源回路に接続される。

【0201】

図34は、実施の形態14に係る電磁波検出器118の変形例を示す断面模式図である。図34に示されるように、電磁波検出器118の熱電変換材料層5が電圧計VM又は電流計IMに接続され、かつ第2電極部2bが接地されてもよい。

40

<作用効果>

電磁波検出器100では、熱電変換材料層5が二次元材料層1と接しているため、熱電変換材料層5内に著しく大きい電位差が生じた場合に、二次元材料層1のフェルミレベルが著しく変化して電磁波検出器100の特性が大きく変化することで、電磁波検出器100の検出感度が低下する可能性がある。これに対し、電磁波検出器118では、熱電変換材料層5が二次元材料層1と間隔を空けて配置されておりかつ二次元材料層1及び第1電極部2aのうち第1電極部2aのみと重なるように配置されているため、電磁波検出器100と比べて、熱電変換材料層5に生じた電位差に起因する電界が二次元材料層1に及び

50

にくい。言い換えると、電磁波検出器 118 では、電磁波検出器 100 と比べて、熱電発電効果による光ゲート効果が得られにくい。そのため、電磁波検出器 118 では、熱電変換材料層 5 内に著しく大きい電位差が生じたとしても、検出感度の低下が抑制され得る。

【0202】

ここで、本実施の形態であ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。

【0203】

実施の形態 15 .

図 35 は、実施の形態 15 に係る電磁波検出器の断面図である。図 35 に示される電磁波検出器 119 は、基本的には図 33 および図 34 に示される電磁波検出器 118 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層 5 が互いに極性が異なる複数の熱電変換材料部分が導電部分を介して直列に接続されている型構造部を含む点で、電磁波検出器 118 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 119 が電磁波検出器 118 とは異なる点を主に説明する。

10

【0204】

図 35 に示されるように、熱電変換材料層 5 は、第 3 熱電変換材料部分 5 f と、第 4 熱電変換材料部分 5 g と、第 1 導電部分 5 h と、第 2 導電部分 5 i とを含む。第 3 熱電変換材料部分 5 f 及び第 4 熱電変換材料部分 5 g の各一端（上端）は、第 1 導電部分 5 h を介して直列に接続されている。第 3 熱電変換材料部分 5 f の他端（下端）は、第 1 電極部 2 a に接続されている。第 4 熱電変換材料部分 5 g の他端（下端）は、第 2 導電部分 5 i に接続されている。

20

【0205】

第 3 熱電変換材料部分 5 f 及び第 4 熱電変換材料部分 5 g は、互いに極性が異なっている。第 1 導電部分 5 h 及び第 2 導電部分 5 i 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。

【0206】

図 35 に示されるように、電磁波検出器 119 では、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、第 3 熱電変換材料部分 5 f、第 1 導電部分 5 h、第 4 熱電変換材料部分 5 g、及び第 2 導電部分 5 i が順に直列に接続されている。電磁波検出器 119 では、熱電変換材料層 5 の第 2 導電部分 5 i と第 2 電極部 2 b との間にバイアス電圧 V（あるいはバイアス電流）が印加される。

30

【0207】

図 36 は、実施の形態 15 に係る電磁波検出器 119 の第 1 変形例を示す断面模式図である。図 36 に示されるように、電磁波検出器 119 の熱電変換材料層 5 の第 2 導電部分 5 i が電圧計 VM 又は電流計 IM に接続され、かつ第 2 電極部 2 b が接地されてもよい。

【0208】

図 37 は、実施の形態 15 の第 2 変形例に係る電磁波検出器 120 を示す断面模式図である。図 37 に示される電磁波検出器 120 は、基本的には図 35 および図 36 に示される電磁波検出器 119 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層 5 が第 5 熱電変換材料部分 5 j と第 3 導電部分 5 k をさらに含む点で、電磁波検出器 119 とは異なる。第 5 熱電変換材料部分 5 j の極性は、第 4 熱電変換材料部分 5 g の極性と異なっている。第 5 熱電変換材料部分 5 j の一端（下端）は、第 2 導電部分 5 i に接続されている。第 5 熱電変換材料部分 5 j の他端（上端）は、第 3 導電部分 5 k に接続されている。

40

【0209】

図 37 に示されるように、電磁波検出器 120 では、二次元材料層 1、第 1 電極部 2 a、第 3 熱電変換材料部分 5 f、第 1 導電部分 5 h、第 4 熱電変換材料部分 5 g、第 2 導電部分 5 i、第 5 熱電変換材料部分 5 j、及び第 3 導電部分 5 k が順に直列に接続されてい

50

る。電磁波検出器 1 1 9 では、熱電変換材料層 5 の第 3 導電部分 5 k と第 2 電極部 2 b との間にバイアス電圧 V (あるいはバイアス電流) が印加される。

【 0 2 1 0 】

図 3 8 は、電磁波検出器 1 2 0 の第 3 変形例を示す断面模式図である。図 3 8 に示されるように、電磁波検出器 1 2 0 の熱電変換材料層 5 の第 3 導電部分 5 k が電圧計 V M 又は電流計 I M に接続され、かつ第 2 電極部 2 b が接地されてもよい。

【 0 2 1 1 】

なお、本実施の形態に係る電磁波検出器において、熱電変換材料層 5 の上記 型構造部は、互いに極性が異なる 4 以上の熱電変換材料部分が複数の導電部分を介して直列に接続されていてよい。また、本実施の形態に係る電磁波検出器においても、熱電変換材料層 5 は、二次元材料層 1 の少なくとも一部と接していてもよい。

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 1 9 及び電磁波検出器 1 2 0 では、熱電変換材料層 5 が 型構造部を有しているため、第 3 熱電変換材料部分 5 f 内にて発生した電位差と第 4 熱電変換材料部分 5 g 内にて発生した電位差が合算して増強され、検出感度が向上する。

【 0 2 1 2 】

ここで、本実施の形態であ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 2 1 3 】

実施の形態 1 6 .

図 3 9 は、実施の形態 1 6 に係る電磁波検出器の断面模式図である。図 3 9 に示される電磁波検出器 1 2 1 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、熱電変換材料層 5 が第 1 電極部 2 a と一体的に構成されている点で、電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 1 2 1 が電磁波検出器 1 0 0 とは異なる点を主に説明する。

【 0 2 1 4 】

図 3 9 に示される電磁波検出器 1 1 9 では、熱電変換材料層 5 は、第 1 電極部 2 a と同一の部材として構成されている。熱電変換材料層 5 は、絶縁膜 3 上に配置されており、二次元材料層 1 の第 2 部分 1 b のみと接している。

【 0 2 1 5 】

図 4 0 は、実施の形態 1 6 に係る電磁波検出器 1 2 1 の変形例を示す断面模式図である。図 4 0 に示されるように、電磁波検出器 1 2 1 の熱電変換材料層 5 が電圧計 V M 又は電流計 I M に接続され、かつ第 2 電極部 2 b が接地されてもよい。

【 0 2 1 6 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 2 1 では、熱電変換材料層 5 が第 1 電極部 2 a と同一の部材として構成されているため、熱電変換材料層 5 が第 1 電極部 2 a と別部材として構成されている場合と比べて、部品点数及び製造工数が削減され得る。

【 0 2 1 7 】

実施の形態 1 7 .

図 4 1 は、実施の形態 1 7 に係る電磁波検出器の断面模式図である。

【 0 2 1 8 】

図 4 1 に示される電磁波検出器 1 2 2 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、半導体層 4 の構成が図 1 および図 2 に示した電磁波検出器と異なっている。すなわち、図 4 1 に示した電磁波検出器は、半導体層 4 が第 1 導電型の半導体層 4 a (第 1 半導体部分) と第 2 導電型の半導体層 4 b (第 2 半導体部分) とを含む点で、電磁波検出器 1 0 0 と異なっている。以下では、電磁波検出器 1 2 2 が電磁波検出器 1 0 0 とは異なる点を主に説明する。

【 0 2 1 9 】

図 4 1 に示すように、半導体層 4 は、例えば半導体層 4 a 及び半導体層 4 b により構成

10

20

30

40

50

されている。半導体層 4 a が第 1 面 4 1 を有し、半導体層 4 b が第 2 面 4 2 を有している。半導体層 4 a は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 において露出しており、二次元材料層 1 を介して第 1 電極部 2 a と電氣的に接続されている。半導体層 4 a は、例えば二次元材料層 1 および絶縁膜 3 と接している。半導体層 4 b は、例えば半導体層 4 a に対して二次元材料層 1 とは反対側に配置されており、第 2 電極部 2 b と電氣的に接続されている。

【 0 2 2 0 】

半導体層 4 a の導電型は、半導体層 4 b の導電型とは異なる。例えば半導体層 4 a の導電型が n 型、半導体層 4 b の導電型が p 型である。これにより、半導体層 4 a と半導体層 4 b とはダイオードを構成する。

【 0 2 2 1 】

半導体層 4 a と半導体層 4 b とは、熱電変換材料層 5 とは異なる波長に感度を有するフォトダイオードを構成してもよい。

【 0 2 2 2 】

なお、半導体層 4 a および半導体層 4 b は、図 4 1 においては積層しているが、これに限られるものではない。また、半導体層 4 は、3 以上の半導体層を含んでいてもよい。

【 0 2 2 3 】

図 4 2 は、実施の形態 1 7 に係る電磁波検出器の変形例を示す断面模式図である。図 4 2 に示される電磁波検出器 1 2 3 は、基本的には図 4 1 に示した電磁波検出器 1 2 2 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、半導体層 4 b (第 2 半導体部分) と電氣的に接続されている第 2 電極部 2 b に加え、半導体層 4 a (第 1 半導体部分) と電氣的に接続されている第 4 電極部 2 e をさらに備える点で、電磁波検出器 1 2 2 と異なっている。

【 0 2 2 4 】

二次元材料層 1 は、半導体層 4 a および半導体層 4 b の各々と電氣的に接続されている。半導体層 4 a と半導体層 4 b との界面は、絶縁膜 3 の開口部 3 0 内に配置されている。半導体層 4 a は、例えば二次元材料層 1 および第 4 電極部 2 e の各々と接している。半導体層 4 b は、例えば、第 2 電極部 2 b に加え、二次元材料層 1 および絶縁膜 3 と接している。

【 0 2 2 5 】

図 4 2 に示されるように、第 2 電極部 2 b と第 4 電極部 2 e の間には電圧 V 2 が印加される。好ましくは、電圧 V 2 は、半導体層 4 a と半導体層 4 b との p n 接合に対して逆バイアスとなるように設定される。

【 0 2 2 6 】

ここで、本実施の形態であ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 2 2 7 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 2 2 及び電磁波検出器 1 2 3 において、半導体層 4 a および半導体層 4 b が p n 接合を形成することにより、暗電流が低減され得る。また、半導体層 4 a と半導体層 4 b とが熱電変換材料層 5 とは異なる波長に感度を有するフォトダイオードを構成する場合には、熱電変換材料層 5 と上記フォトダイオードとにより広帯域の波長の検出が可能となる。

【 0 2 2 8 】

実施の形態 1 8 .

本実施の形態に係る電磁波検出器は、二次元材料層 1 が乱層構造部分を含む点で、図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と異なっている。

【 0 2 2 9 】

本実施の形態に係る電磁波検出器では、二次元材料層 1 のうちの少なくとも一部が乱層構造を有している。ここで、乱層構造とは、グラフェンが複数積層された領域であって、積層されたグラフェン同士の格子が不整合な状態で積層された構造を意味する。なお、二

10

20

30

40

50

次元材料層 1 の全体が乱層構造であってもよいし、チャンネルとして作用する部分のみが乱層構造を有していてもよい。二次元材料層 1 において絶縁膜 3 との接している部分が、乱層構造を有していてもよい。

【 0 2 3 0 】

乱層構造部分の形成方法は、任意の方法を用いることができる。たとえば、CVD法により成膜された単層のグラフェンを複数回転写し、多層グラフェンを積層することにより、乱層構造部分は形成され得る。また、グラフェン上に、エタノールまたはメタンなどを炭素源としてCVD法によりグラフェンを成長することによっても、乱層構造部分は形成され得る。ここで、通常の積層グラフェンは、A - B積層と呼ばれ、積層したグラフェン同士の格子が整合した状態で積層される。しかし、CVD法により作製したグラフェンは多結晶であり、グラフェン上に更にグラフェンを複数回転写した場合、またはCVD法を用いて下地のグラフェン上にグラフェンを積層した場合は、積層されたグラフェン同士の格子が不整合な状態である乱層構造となる。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。

10

【 0 2 3 1 】

ここで、本実施の形態であ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 2 3 2 】

< 作用効果 >

本実施の形態に係る電磁波検出器では、二次元材料層 1 は、乱層構造を含む。この場合、二次元材料層 1 におけるキャリアの移動度を向上させることができる。この結果、電磁波検出器の感度を向上させることができる。

20

【 0 2 3 3 】

具体的には、二次元材料層 1 のキャリアの移動度は、下地として二次元材料層 1 と接する絶縁膜 3 でのキャリア散乱の影響を受けると、低下する。これに対し、二次元材料層 1 が乱層構造部分を含む場合には、乱層構造部分において、下地に接するグラフェンはキャリア散乱の影響を受けるが、当該グラフェン上に乱層構造で積層された上層のグラフェンは、下地から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、互いに隣り合うグラフェン層間の相互作用が少ないため、向上された導電率を有する。以上より、乱層構造のグラフェンではキャリアの移動度が向上し、乱層構造のグラフェンを含む電磁波検出器 1 0 0 は、電磁波に対して向上された感度を有する。

30

【 0 2 3 4 】

実施の形態 1 9 .

図 4 3 は、実施の形態 1 9 に係る電磁波検出器の断面模式図である。図 4 3 に示される電磁波検出器 1 2 4 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 に接するように配置された 1 つ以上の導電体 7 をさらに備える点で、電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 1 2 4 が電磁波検出器 1 0 0 とは異なる点を主に説明する。

【 0 2 3 5 】

図 4 3 に示されるように、電磁波検出器 1 2 4 は、例えば複数の導電体 7 を備えている。複数の導電体 7 の各々は、二次元材料層 1 に接している。複数の導電体 7 の各々は、例えば二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c に接している。複数の導電体 7 の各々は、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c の上面上に互い間隔を空けて配置されている。

40

【 0 2 3 6 】

複数の導電体 7 の各々は、電源回路等に接続されておらず、フローティング電極として作用する。

【 0 2 3 7 】

導電体 7 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、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。

50

好ましくは、導電体 7 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。

【 0 2 3 8 】

複数の導電体 7 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。一次元の周期構造を有する複数の導電体 7 の各々は、例えば図 4 3 の紙面上の水平方向又は紙面の奥行き方向に沿って互いに間隔を空け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導電体 7 の各々は、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。平面視における複数の導電体 7 の配列は、上述した周期的な対称性を有する配列だけに限られず、平面視において非対称性を有する配列であってもよい。

【 0 2 3 9 】

平面視において、各導電体 7 の平面形状は、円形状、三角形形状、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 2 4 0 】

導電体 7 を形成する方法は、特に制限されないが、例えば、第 1 電極部 2 a と同様に形成されてもよい。

【 0 2 4 1 】

また、上記電磁波検出器は、二次元材料層 1 の下に導電体 7 が配置されていてもよい。このような構成によっても、図 4 3 に示される電磁波検出器と同様の効果を得ることができる。さらに、この場合、導電体 7 の形成時に二次元材料層 1 にダメージを与えないため、二次元材料層 1 でのキャリアの移動度の低下を抑制できる。

【 0 2 4 2 】

また、二次元材料層 1 に凹凸部を形成してもよい。この場合、二次元材料層 1 の凹凸部は、上述した複数の導電体 7 と同様、周期的な構造又は非対称な構造としてもよい。この場合、複数の導電体 7 を形成した場合と同様の効果を得ることができる。

【 0 2 4 3 】

ここで、本実施の形態であ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 2 4 4 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 2 4 は二次元材料層 1 に接している 1 つ以上の導電体 7 を備える。そのため、電磁波検出器 1 2 4 では、熱電変換材料層 5 において電磁波の照射により発生した表面キャリアが二次元材料層 1 と導電体 7 との間及び複数の導電体 7 間を行き来できるようになり、二次元材料層 1 における光キャリアの寿命が長くなって、検出感度が高くなる。

【 0 2 4 5 】

また、導電体 7 を構成する材料が表面プラズモン共鳴が生じる材料であり、かつ複数の導電体 7 が一次元の周期構造を有していれば、照射される電磁波によって導電体 7 に偏光依存性が生じる。このような電磁波検出器 1 2 4 では、特定の偏光の電磁波だけが半導体層 4 に照射されるため、特定の偏光のみが検出され得る。

【 0 2 4 6 】

また、導電体 7 を構成する材料が表面プラズモン共鳴が生じる材料であり、かつ複数の導電体 7 が二次元の周期構造を有していれば、複数の導電体 7 によって特定の波長の電磁波を共鳴させることができるため、特定の波長を有する電磁波だけが検出され得る。

【 0 2 4 7 】

また、複数の導電体 7 が平面視において非対称に配置されている場合にも、複数の導電体 7 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対して導電体 7 に偏光依存性が生じ、特定の偏光のみが検出され得る。

【 0 2 4 8 】

実施の形態 2 0 .

図 4 4 は、実施の形態 2 0 に係る電磁波検出器の断面模式図である。図 4 4 に示される電磁波検出器 1 2 5 は、基本的には図 1 および図 2 に示される電磁波検出器 1 0 0 と同様

10

20

30

40

50

の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 に接する 1 つ以上の接触層 8 をさらに備える点で、電磁波検出器 100 とは異なっている。以下では、電磁波検出器 125 が電磁波検出器 100 と異なる点を主に説明する。

【0249】

図 44 に示されるように、接触層 8 は、例えば二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a、第 2 部分 1 b、及び第 3 部分 1 c の各々と接している。なお、接触層 8 は、二次元材料層 1 の第 1 部分 1 a、第 2 部分 1 b、及び第 3 部分 1 c の少なくともいずれかと接していればよい。接触層 8 は、二次元材料層 1 の上部表面における第 1 電極部 2 a 側または半導体層 4 側のどちらか一方にのみ形成されていてもよい。言い換えると、接触層 8 は、第 1 部分 1 a 及び第 2 部分 1 b のみと接していてもよい。

10

【0250】

接触層 8 を構成する材料は、二次元材料層 1 に正孔又は電子を供給することが可能な材料である。接触層 8 を構成する材料は、例えば、ポジ型フォトリソグレイとと呼ばれる、キノンジアジト基を有する感光剤とノボラック樹脂とを含有する組成物である。また、接触層 8 を構成する材料は、例えば、極性基を有する任意の材料であってもよい。このような材料の一例として、電子求引基を有する材料又は電子供与基を有する材料が挙げられる。電子求引基を有する材料は、二次元材料層 1 の電子密度を減少させる効果を持つ。電子供与基を有する材料は、二次元材料層 1 の電子密度を増加させる効果を持つ。電子求引基を有する材料としては、例えば、ハロゲン、ニトリル、カルボキシル基、及びカルボニル基からなる群から選択される少なくともいずれかを有する材料が挙げられる。また、電子供与基を有する材料としては、例えば、アルキル基、アルコール、アミノ基、及びヒドロキシル基からなる群から選択される少なくともいずれかを有する材料が挙げられる。

20

【0251】

接触層 8 を構成する材料は、上記材料以外であってもよく、例えば極性基によって分子全体において電荷の偏りが生じる材料であってもよい。接触層 8 を構成する材料は、有機物、金属、半導体、絶縁体、二次元材料、又は、これら材料のいずれかの混合物であっても、分子内で電荷の偏りが生じて極性を生じる任意の材料であってもよい。ここで、接触層 8 を構成する材料が無機物である場合、二次元材料層 1 がドーピングされる導電型は、二次元材料層 1 の仕事関数よりも接触層 8 の仕事関数が高い場合には p 型、小さい場合には n 型であるのが好ましい。

30

【0252】

接触層 8 が有機物により構成されている場合、当該接触層 8 を構成する材料である有機物が明確な仕事関数を有していないため、二次元材料層 1 に対して n 型ドープになるのか、p 型ドープになるのかは、接触層 8 に用い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が好ましい。

【0253】

例えば、接触層 8 として、ポジ型フォトリソグレイとと呼ばれる、キノンジアジト基を有する感光剤とノボラック樹脂とを含有する組成物を用いる場合、二次元材料層 1 においてフォトリソグラフィ工程によりレジストを形成した領域が p 型二次元材料層領域となる。これにより、二次元材料層 1 の表面上に接するマスク形成処理が不要となる。この結果、二次元材料層 1 に対するプロセスダメージの低減及びプロセスの簡素化が可能となる。

40

【0254】

電磁波検出器 125 は、複数の接触層 8 を備えていてもよい。接触層 8 の数は、3 以上であってもよく、任意の数とすることができる。複数の接触層 8 の各々を構成する材料は、互いに同じ材料であってもよいし、互いに異なる材料であってもよい。複数の接触層 8 のうちの少なくとも 1 つの接触層 8 は、第 1 電極部 2 a と半導体層 4 との間に位置する二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c 上に配置されていてもよい。

【0255】

ここで、本実施の形態であ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。

50

【0256】

<作用効果>

電磁波検出器125では、二次元材料層1に接する接触層8が二次元材料層1に正孔または電子を供給するため、第1電極部2aおよび半導体層4から二次元材料層1へのキャリアドーピングの影響を考慮せず、二次元材料層1のキャリアドーピングを制御することができる。この結果、電磁波検出器125の性能向上が図られる。

【0257】

また、電磁波検出器125では、接触層8の材料として、例えば、電子求引基を有する材料、又は、電子供与基を有する材料を用いることで、二次元材料層1の状態(導電型)を意図的にn型又はp型とすることができる。この場合、第1電極部2aおよび半導体層4および熱電変換材料層5の電界からのキャリアドーピングの影響を考慮せず、二次元材料層1のキャリアドーピングを制御することができる。この結果、電磁波検出器125の性能向上が図られる。

10

【0258】

また、接触層8が二次元材料層1の上部表面における第1電極部2a側または半導体層4側のどちらか一方にのみ形成されている場合、二次元材料層1中に電荷密度の勾配が形成される。この結果、二次元材料層1中のキャリアの移動度が向上し、電磁波検出器125の検出感度が高まる。

【0259】

電磁波検出器125において、接触層8の厚さは、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。他方、接触層8の厚さは、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であるのが好ましい。

20

【0260】

接触層8は、分子又は電子などのキャリアが二次元材料層1にドーピングされ得る限りにおいて、任意の構成を有していればよい。

【0261】

また、電磁波検出器125は固体の接触層8を備えるが、接触層8を備えていない他の実施形態に係る電磁波検出器においても、二次元材料層1を溶液に浸漬させて、分子レベルで二次元材料層1にキャリアを供給することで、二次元材料層1のキャリアドーピングを制御し得る。

30

【0262】

また、接触層8を構成する材料は、上述した材料以外にも、極性変換を生じる材料であってもよい。この場合、接触層8が極性変換すると、変換の際に生じた電子又は正孔が二次元材料層1に供給される。そのため、二次元材料層1において接触層8が接している部分に電子又は正孔のドーピングが生じる。そのため、当該ドーピング後に接触層8が取り除かれても、接触層8と接していた二次元材料層1の当該部分は、電子又は正孔がドーピングされたままの状態となる。したがって、接触層8を構成する材料が極性変換を生じる材料である場合、電磁波検出器125が製造されてから一定の時間が経過した後に接触層8が二次元材料層1上から取り除かれてもよい。この場合、接触層8が存在している場合より二次元材料層1の開口部面積が増加するため、電磁波検出器の検出感度の向上が図られる。ここで、極性変換とは、極性基が化学的に変換する現象であり、例えば、電子求引基が電子供与基に変化する、または電子供与基が電子求引基に変化する、または極性基が非極性基に変化する、または非極性基が極性基に変化する、といった現象を意味する。

40

【0263】

また、接触層8が電磁波照射によって極性変換を生じる材料により形成されてもよい。この場合、特定の電磁波の波長において極性変換を生じる材料を接触層8の材料として選択することで、特定の電磁波の波長の電磁波照射時のみ接触層8で極性変換を生じさせ、二次元材料層1へのドーピングを行うことができる。この結果、二次元材料層1に流入する光電流を増大させることができる。

50

【0264】

また、電磁波照射によって酸化還元反応を生じる材料を接触層8の材料として用いてもよい。この場合、酸化還元反応時に生じる電子又は正孔を二次元材料層1にドーピングすることができる。

【0265】

実施の形態21.

図45は、実施の形態21に係る電磁波検出器の断面模式図である。図45に示される電磁波検出器126は、基本的には図1および図2に示した電磁波検出器100と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層1の周囲に空隙9が形成されている点で、電磁波検出器100とは異なっている。以下では、電磁波検出器126が電磁波検出器100と異なる点を主に説明する。

10

【0266】

図45に示されるように、空隙9は、例えば二次元材料層1と絶縁膜3との間に形成されている。二次元材料層1は、空隙9に面した表面を有している。二次元材料層1は、絶縁膜3と接していない。例えば、二次元材料層1の第3部分1cの下面が、空隙9に面している。

【0267】

二次元材料層1の第1部分1aは、接続導電体部2dを介して半導体層4と電氣的に接続されている。接続導電体部2dは、実施の形態9における接続導電体部2dと同様の構成を有していればよい。

20

【0268】

好ましくは、接続導電体部2dの上面は第1電極部2aの上面と同一の高さである。二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第3部分1cの各々の二次元面は、互いに同じ方向に延びている。

【0269】

空隙9は、第1電極部2aと接続導電体部2dとの間に形成されている。

なお、電磁波検出器126では、空隙9が二次元材料層1と絶縁膜3との間に形成されている限りにおいて、空隙9と第1電極部2a及び接続導電体部2dとの相対的な位置関係は特に制限されない。

【0270】

図46は、実施の形態21に係る電磁波検出器の変形例を示す断面模式図である。図46に示される電磁波検出器127は、基本的には図45に示される電磁波検出器126と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、空隙9が二次元材料層1と熱電変換材料層5の間に形成されている点で、電磁波検出器126とは異なっている。

30

【0271】

図46に示すように、二次元材料層1は、熱電変換材料層5と接していない。電磁波検出器127では、電磁波が熱電変換材料層5に照射されることにより熱電変換材料層5内に生じる電位差は、第1電極部2a又は半導体層4を介して二次元材料層1に電界変化を生じさせる。つまり、光ゲート効果は電磁波検出器127においても発現し得る。このとき、熱電変換材料層5の上記電位差の方向は二次元材料層1の二次元面と平行であってもよい。

40

【0272】

また、電磁波検出器127では、電磁波が熱電変換材料層5に照射されることにより熱電変換材料層5内に生じる電位差は、空隙9を介して二次元材料層1に電界変化を生じさせ得る。熱電変換材料層5の上記電位差の方向は、二次元材料層1の二次元面に直交していてもよい。

【0273】

好ましくは、半導体層4の上面は第1電極部2aの上面と同一の高さである。二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第3部分1cの各々の二次元面は、互いに同じ方向に延びている。

50

【 0 2 7 4 】

空隙 9 は、第 1 電極部 2 a と半導体層 4 との間に形成されている。

なお、電磁波検出器 1 2 7 では、空隙 9 が二次元材料層 1 と熱電変換材料層 5 との間に形成されている限りにおいて、空隙 9 と第 1 電極部 2 a 及び半導体層 4 との相対的な位置関係は特に制限されない。

【 0 2 7 5 】

ここで、本実施の形態であ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 2 7 6 】

< 作用効果 >

電磁波検出器 1 2 6 及び電磁波検出器 1 2 7 において、空隙 9 が二次元材料層 1 と絶縁膜 3 との間又は二次元材料層 1 と半導体層 4 との間に形成されている。この場合、二次元材料層 1 と絶縁膜 3 との接面、又は二次元材料層 1 と熱電変換材料層 5 との接面でのキャリアの散乱の影響が抑制され得る。その結果、電磁波検出器 1 2 6 , 1 2 7 の検出感度の向上が図られる。

【 0 2 7 7 】

なお、空隙 9 の厚さは、上記キャリアの散乱の影響を抑制できる限りにおいて、特に限定されない。ただし、光ゲート効果を高める観点で、空隙 9 の幅は可能な限り薄い方が好ましい。

【 0 2 7 8 】

実施の形態 2 2 .

図 4 7 は実施の形態 2 2 に関わる電磁波検出器の断面模式図である。図 4 7 に示された電磁波検出器 1 2 8 は、基本的には図 1 および図 2 に示した電磁波検出器 1 0 0 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、二次元材料層 1 の周囲に掘り込み構造 1 0 が形成されている点で、電磁波検出器 1 0 0 とは異なっている。

【 0 2 7 9 】

掘り込み構造 1 0 の内部は、例えば空隙である。したがって、電磁波検出器 1 2 8 は、二次元材料層 1 の周囲に空隙 9 が形成されている点で、電磁波検出器 1 2 7 と同様の構成を備えているが、二次元材料層 1 の周囲に配置されている部材に形成されている掘り込み構造 1 0 によって空隙 9 が形成されている点で、電磁波検出器 1 2 7 とは異なる。

【 0 2 8 0 】

以下では、電磁波検出器 1 2 8 が電磁波検出器 1 0 0 及び電磁波検出器 1 2 7 とは異なる点を主に説明する。

【 0 2 8 1 】

図 4 7 に示されるように、掘り込み構造 1 0 は、例えば絶縁膜 3 の開口部 3 0 内に位置する半導体層 4 に形成されている。掘り込み構造 1 0 は、半導体層 4 の第 1 面 4 1 に対して凹んでいる凹部により構成されている。二次元材料層 1 は、掘り込み構造 1 0 に面した表面を有している。例えば、二次元材料層 1 の第 3 部分 1 c の下面が、掘り込み構造 1 0 に面している。

【 0 2 8 2 】

掘り込み構造 1 0 は、第 1 電極部 2 a と半導体層 4 との間に形成されている。掘り込み構造 1 0 の側面は、例えば、絶縁膜 3 の開口部 3 0 の内周面、及び第 1 電極部 2 a の端面と同一平面を成すように形成されている。

【 0 2 8 3 】

図 4 8 は、実施の形態 2 2 に係る電磁波検出器の変形例を示す断面模式図である。図 4 8 に示される電磁波検出器 1 2 9 は、基本的には図 4 7 に示される電磁波検出器 1 2 8 と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、掘り込み構造 1 0 が絶縁膜 3 及び熱電変換材料層 5 に形成されている点で、電磁波検出器 1 2 8 とは異なっている。異なる観点から言えば、電磁波検出器 1 2 9 では、掘り込み構造 1 0 が、絶縁膜 3 に形成されている開口部 3 0 と、平面視において当該開口部 3 0 と重なるように熱電変換材料層 5 に形

10

20

30

40

50

成されている凹部との組み合わせにより構成されている。

【0284】

図48に示すように、二次元材料層1は、熱電変換材料層5と接していない。電磁波検出器129では、電磁波が熱電変換材料層5に照射されることにより熱電変換材料層5内に生じる電位差は、第1電極部2a又は半導体層4を介して二次元材料層1に電界変化を生じさせる。つまり、光ゲート効果は電磁波検出器129においても発現し得る。このとき、熱電変換材料層5の上記電位差の方向は二次元材料層1の二次元面と平行であってもよい。

【0285】

また、電磁波検出器129では、電磁波が熱電変換材料層5に照射されることにより熱電変換材料層5内に生じる電位差は、掘り込み構造10を介して二次元材料層1に電界変化を生じさせ得る。熱電変換材料層5の上記電位差の方向は、二次元材料層1の二次元面に直交していてもよい。二次元材料層1の第1部分1a、第2部分1b、及び第3部分1cの各々の二次元面は、互いに同じ方向に延びている。

10

【0286】

ここで、本実施の形態であ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。

<作用効果>

電磁波検出器128では、掘り込み構造10が絶縁膜3と半導体層4に形成されている。この場合、二次元材料層1と半導体層4との接面でのキャリアの散乱の影響が抑制され得る。また、電磁波検出器129では、掘り込み構造10が絶縁膜3及び熱電変換材料層5に形成されている。この場合、二次元材料層1と熱電変換材料層5との接面でのキャリアの散乱の影響が抑制され得る。その結果、電磁波検出器128、129では、検出感度の向上が図られる。

20

【0287】

電磁波検出器128、129において、掘り込み構造10は、例えば半導体層4上に形成された絶縁膜3に開口部30が形成された後に、開口部30内に表出している半導体層4を部分的にエッチングすることにより、形成され得る。

【0288】

なお、電磁波検出器128、129において、掘り込み構造10の厚さは、上記キャリアの散乱の影響を抑制できる限りにおいて、特に限定されない。ただし、光ゲート効果を高める観点で、掘り込み構造10の幅は可能な限り薄い方が好ましい。

30

【0289】

また、電磁波検出器128、129では、掘り込み構造10と第1電極部2a及び半導体層4との相対的な位置関係は特に制限されない。

【0290】

実施の形態23.

図49は、実施の形態23に係る電磁波検出器の断面模式図である。図49に示される電磁波検出器130は、基本的には図1および図2に示した電磁波検出器100と同様の構成を備え、同様の効果を得ることができるが、電磁波検出器100と同等の構成を備えている電磁波検出器本体131からの信号を読み出すように構成された読み出し回路11を含んでいる点で、電磁波検出器100とは異なっている。なお、電磁波検出器本体131は、電磁波検出器100～129のいずれかと同等の構成を備えていればよい。以下では、電磁波検出器130が電磁波検出器100と異なる点を主に説明する。

40

【0291】

図49に示されるように、電磁波検出器本体131は、読み出し回路11の上に配置されている。読み出し回路11の読み出し形式は、例えば、CTIA (Capacitive Transimpedance Amplifier) 型である。読み出し回路11は、他の読み出し形式であってもよい。読み出し回路11は、シリコン基板上に形成されている。

【0292】

50

電磁波検出器本体 131 は、例えば第 1 電極部 2a と電氣的に接続されている制御電極 2f をさらに備える。制御電極 2f は、例えば絶縁膜 3 上に形成されている部分を含む。

【0293】

電磁波検出器 130 は、電磁波検出器本体 131 の制御電極 2f と読み出し回路 11 とを電氣的に接続するための、バンプ 12 及びパッド 13 をさらに備える。パッド 13 は、制御電極 2f と電氣的に接続されている。パッド 13 は、例えば制御電極 2f 上に形成されている。バンプ 12 は、パッド 13 と読み出し回路 11 との間を電氣的に接続する。バンプ 12 は、パッド 13 上に形成されている。

【0294】

電磁波検出器本体 131 と読み出し回路 11 がバンプ 12 によって接続される構造は、ハイブリッド接合と呼ばれる。ハイブリッド接合は、量子型赤外線センサにおいては一般的な構造である。

10

【0295】

バンプ 12 を構成する材料は、任意の導電性材料であればよいが、例えばインジウム (In) を含む。パッド 13 を構成する材料は、任意の導電性材料であればよいが、例えばアルミニウムシリコン (Al-Si) 系合金、ニッケル (Ni)、及び金 (Au) からなる群から選択される少なくともいずれかを含む。

【0296】

電磁波検出器 130 では、電磁波検出器本体 131 の半導体層 4 を構成する材料として、シリコン以外の任意の半導体材料を採用し得る。半導体層 4 を構成する材料として、例えば、ゲルマニウム (Ge)、III-V 族又は II-V 族半導体などの化合物半導体、水銀カドミウムテルル (HgCdTe)、インジウムアンチモン (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)、又は、量子井戸又は量子ドットを含む基板、Type II 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などが挙げられる。

20

<作用効果>

電磁波検出器 130 は、電磁波検出器本体 131 からの信号を読み出すように構成された読み出し回路 11 を含んでいる。一般的に、電磁波検出器における読み出し回路の作製にはシリコン基板が用いられる。そのため、半導体層 4 にシリコンを使用した場合には同基板上に読み出し回路が形成可能である。しかし、半導体層 4 にシリコン以外の半導体、例えば、ゲルマニウム (Ge)、III-V 族又は II-V 族半導体などの化合物半導体、水銀カドミウムテルル (HgCdTe)、インジウムアンチモン (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)、又は、量子井戸又は量子ドットを含む基板、Type II 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などを使用した場合、これらの材料からなる半導体層上に読み出し回路を形成することは困難である。

30

【0297】

電磁波検出器 130 では、半導体層 4 に上記に記載のシリコン以外の半導体を使用した場合においても、シリコン基板上に形成された読み出し回路 11 を当該半導体層 4 上に接合することは容易である。そのため、電磁波検出器 130 は、半導体層 4 を構成する半導体材料に依らず、比較的容易に製造され得る。

40

【0298】

実施の形態 24 .

図 50 は、実施の形態 24 に係る電磁波検出器アレイの平面模式図である。図 51 は、実施の形態 24 に係る電磁波検出器の変形例を示す平面図である。

【0299】

図 50 に示される電磁波検出器アレイ 200 は、電磁波検出器集合体であって、検出素

50

子として複数の電磁波検出器 300 を備える。複数の電磁波検出器 300 の各々は、実施の形態 1 ~ 23 の電磁波検出器 100 ~ 130 のいずれかである。例えば、各電磁波検出器 300 は、電磁波検出器 100 であってもよい。図 50 に示される電磁波検出器アレイ 200 では、複数の電磁波検出器 300 の各々が二次元方向にアレイ状に配置されている。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。複数の電磁波検出器 300 の各々が電磁波検出器 130 である場合、複数の電磁波検出器 300 の各々が読み出し回路 11 が形成されている基板を含んでいてもよいし、複数の電磁波検出器 300 の各々の読み出し回路 11 が 1 つの基板上に一体化されていてもよい。

【0300】

図 50 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。

【0301】

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。

【0302】

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。例えば、各電磁波検出器 300 の第 2 電極部 2b は共通電極であってもよい。第 2 電極部 2b が共通電極であれば、各電磁波検出器 300 の第 2 電極部 2b が互いに独立している構成と比べて、各検出素子間の配線数が削減され得る。この結果、電磁波検出器アレイ 200 の高解像度化が図られる。

【0303】

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。

【0304】

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。

【0305】

図 51 に示される電磁波検出器アレイ 201 は、基本的には図 50 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 ~ 21 の電磁波検出器 100 ~ 130 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。

【0306】

図 51 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 ~ 21 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。

10

20

30

40

50

【0307】

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。

【0308】

複数種類の電磁波検出器300, 301, 302, 303の各々の半導体層4を構成する材料は、検出波長の異なる材料とされてもよい。たとえば、電磁波検出器300の半導体層4を構成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の半導体層4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。

10

【0309】

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。

20

【0310】

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。

30

【0311】

図51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。

【0312】

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。

【0313】

なお、上述した各実施の形態において、絶縁膜3を構成する材料、半導体層4を構成する材料、及び接触層8を構成する材料の少なくともいずれかは、電磁波の照射により特性が変化し、二次元材料層1に電位の変化を与える材料を含んでいてもよい。電磁波の照射により特性が変化し、二次元材料層1に電位の変化を与える材料としては、例えば、熱電変換材料、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、又は、金属-絶縁物-半導体接合材料等が挙げられる。

40

【0314】

例えば、絶縁膜3を構成する材料、半導体層4を構成する材料、及び接触層8を構成する材料の少なくともいずれかは、熱電変換材料を含んでいてもよい。この場合、電磁波が絶縁膜3、半導体層4、または接触層8に照射されたときに、絶縁膜3、半導体層4、ま

50

たは接触層 8 においても熱電変換材料層 5 と同様の熱電発電効果が生じ、その結果、これらの部材で発現した熱電発電効果により二次元材料層 1 に電位の変化を与えることができる。

【0315】

なお、例えば接触層 8 を構成する材料が熱電変換材料を含んでいる場合、このような接触層 8 は二次元材料層 1 に接していなくてもよい。このような接触層 8 は、熱電発電効果により二次元材料層 1 に電位の変化を与える限りにおいて、絶縁膜等を介して二次元材料層 1 の上面又は下面上に配置されていてもよい。

【0316】

また、上述した各実施の形態に係る電磁波検出器は、第 2 電極部 2 b と接している熱電変換材料層をさらに備えていてもよい。また、本開示に係る電磁波検出器では、熱電変換材料層として、第 2 電極部 2 b と接している熱電変換材料層のみを備えていてもよい。この場合、熱電変換材料層は、熱電発電効果によりその内部の電位差が変化するとき、第 1 電極部 2 a と第 2 電極部 2 b との間の電位差を変化させるように設けられていなければならない。

10

【0317】

上述した各実施の形態を適宜、変形、省略したりすることが可能である。さらに、上記実施の形態は実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で種々に変形することが可能である。また、上記実施の形態には種々の段階の発明が含まれており、開示される複数の構成要件における適宜な組み合わせにより種々の発明が抽出される。

【符号の説明】

20

【0318】

1 二次元材料層、1 a 第 1 部分、1 b 第 2 部分、1 c 第 3 部分、2 a 第 1 電極部、2 b 第 2 電極部、2 c 第 3 電極部、2 d 接続導電体部、2 e 第 4 電極部、3、3 b 絶縁膜、4、4 a、4 b 半導体層、5 熱電変換材料層、5 a 第 4 部分、5 b 第 5 部分、5 c 第 6 部分、5 d 第 1 熱電変換材料部分、5 e 第 2 熱電変換材料部分、5 f 第 3 熱電変換材料部分、5 g 第 4 熱電変換材料部分、5 h 第 1 導電部分、5 i 第 2 導電部分、5 j 第 5 熱電変換材料部分、5 k 第 3 導電部分、6 トンネル絶縁層、7 導電体、8 接触層、9 空隙、10 掘り込み構造、30 開口部、41 第 1 面、42 第 2 面、51 第 3 面、100、101、102、103、104、105、106、107、108、109、110、111、112、113、114、115、116、117、118、119、120、121、122、123、124、125、126、127、128、129、130、300、301、302、303 電磁波検出器、200、201 電磁波検出器アレイ。

30

40

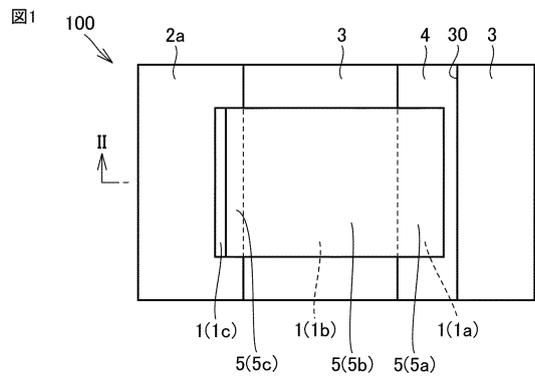
50

【要約】

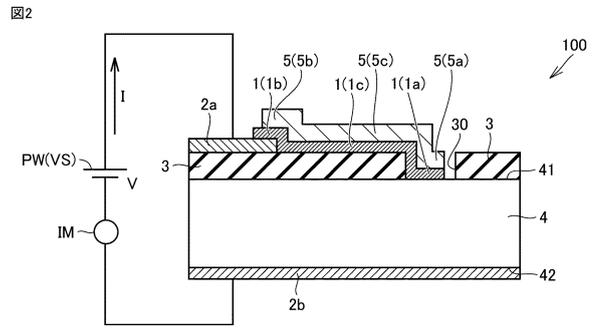
検出感度が高い電磁波検出器および電磁波検出器アレイを提供する。電磁波検出器（100）は、第1面（41）を有する半導体層（4）と、半導体層（4）と電氣的に接続されている二次元材料層（1）と、半導体層（4）を介さずに二次元材料層（1）と電氣的に接続されている第1電極部（2a）と、半導体層（4）を介して二次元材料層（1）と電氣的に接続されている第2電極部（2b）と、熱電変換材料層（5）とを備える。熱電変換材料層（5）は、二次元材料層（1）と接している。

【図面】

【図1】



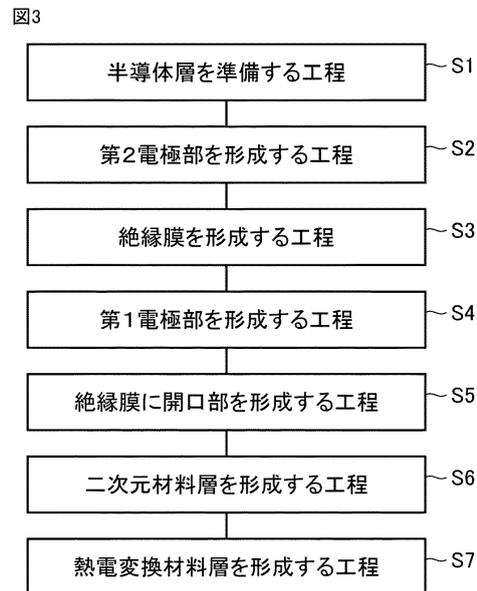
【図2】



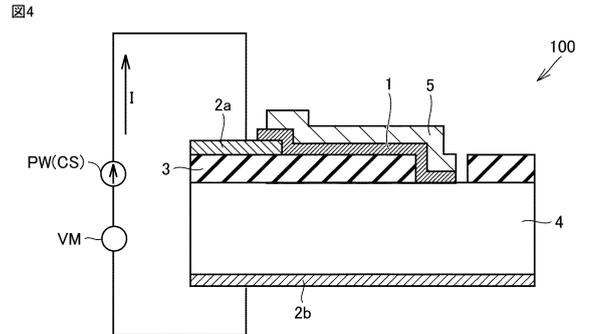
10

20

【図3】



【図4】



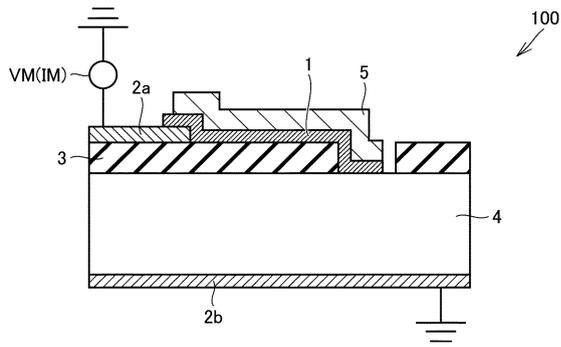
30

40

50

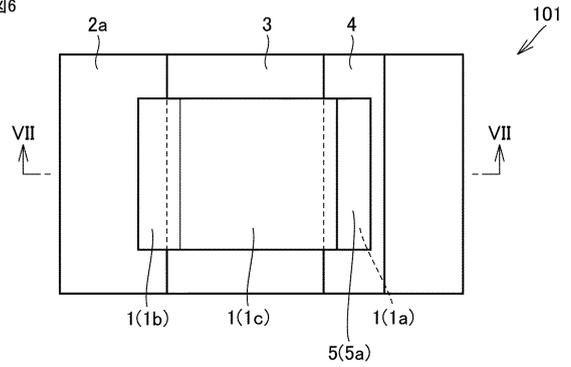
【 図 5 】

図5



【 図 6 】

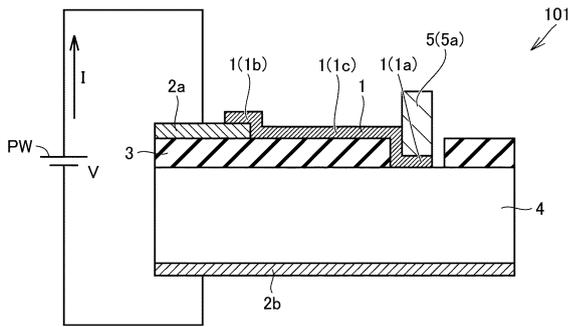
図6



10

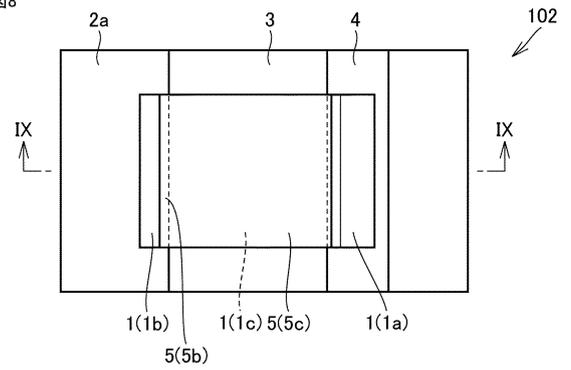
【 図 7 】

図7



【 図 8 】

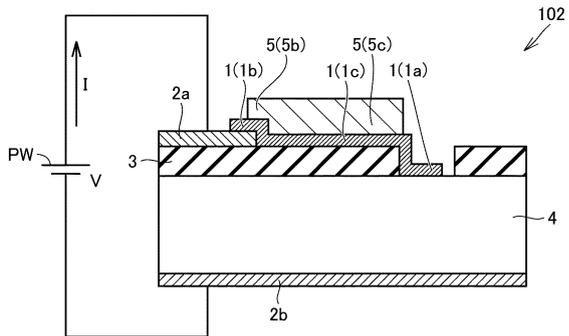
図8



20

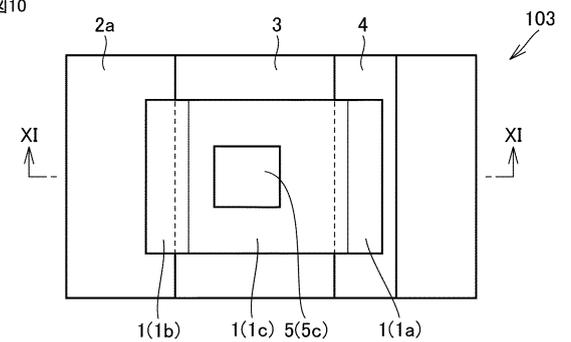
【 図 9 】

図9



【 図 10 】

図10



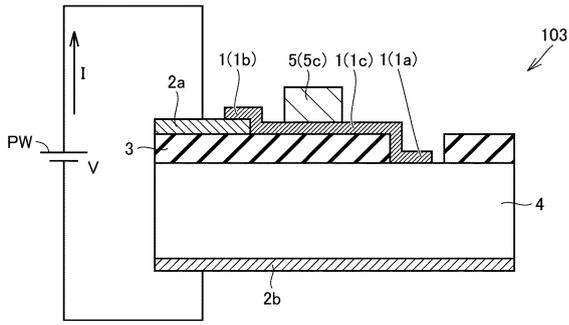
30

40

50

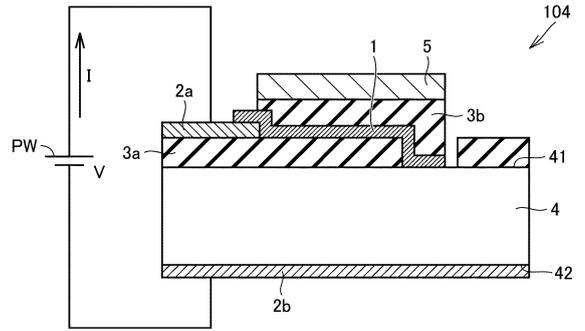
【図 1 1】

図11



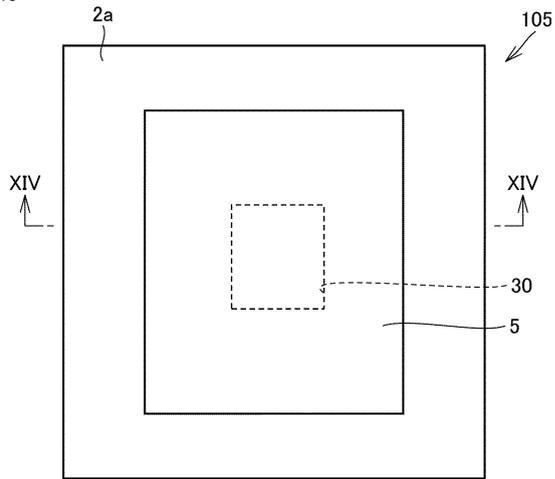
【図 1 2】

図12



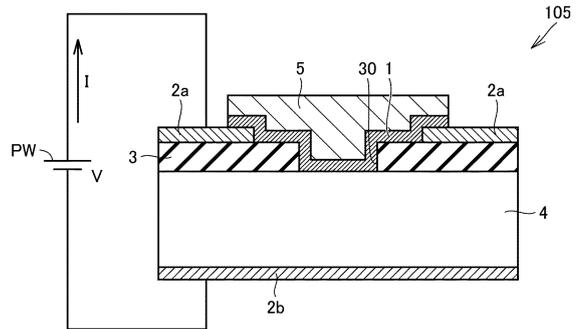
【図 1 3】

図13



【図 1 4】

図14



10

20

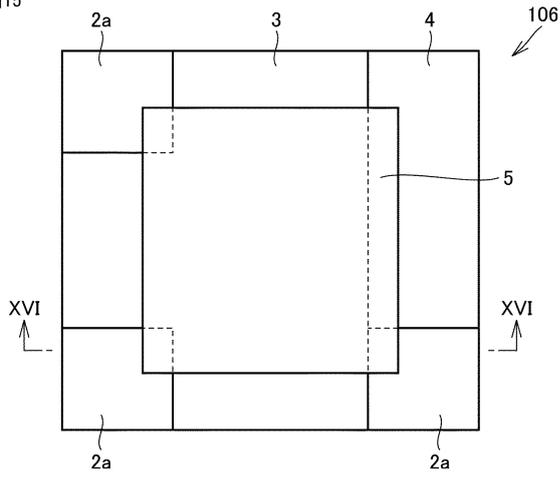
30

40

50

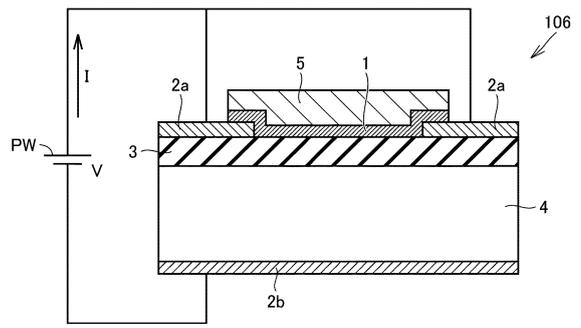
【図 15】

図15



【図 16】

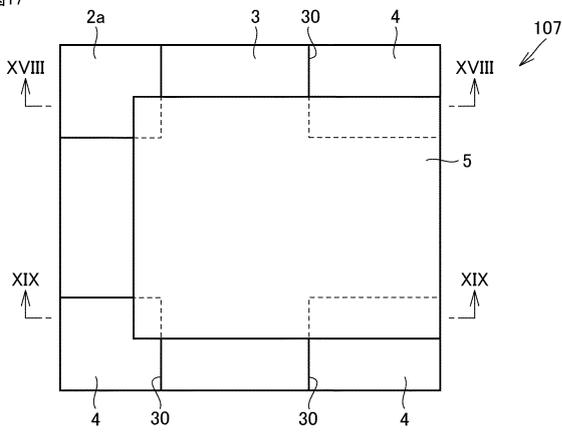
図16



10

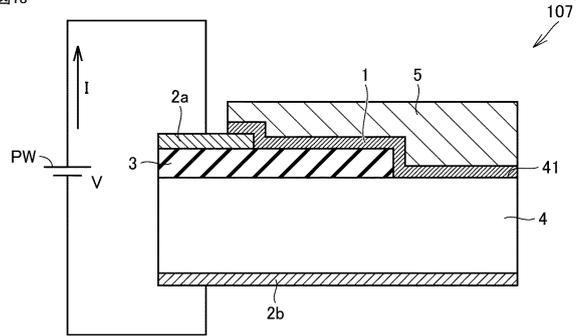
【図 17】

図17



【図 18】

図18



20

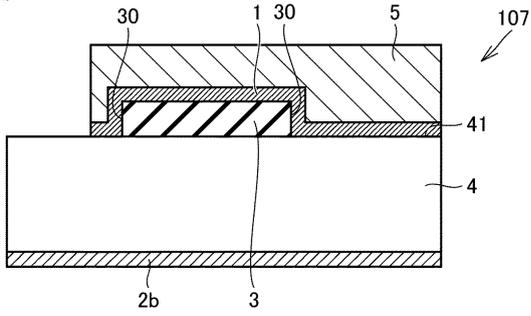
30

40

50

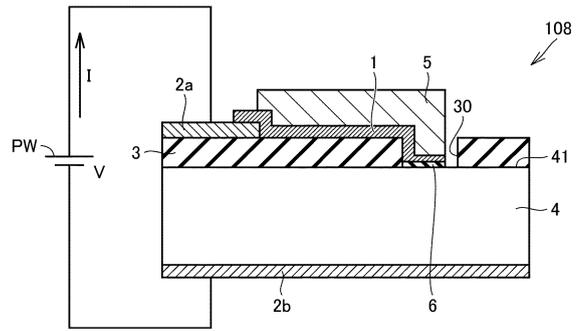
【図 19】

図19



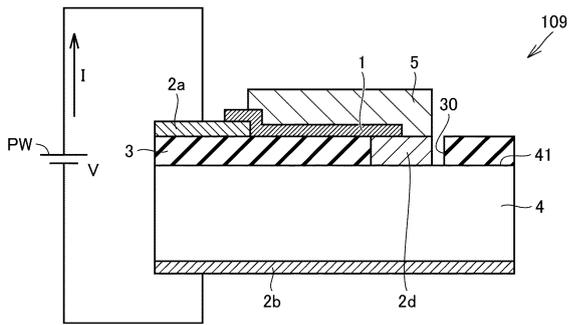
【図 20】

図20



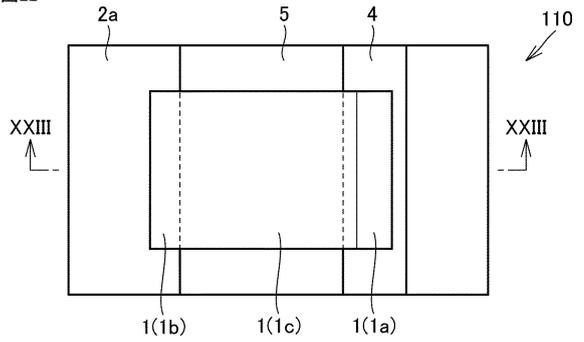
【図 21】

図21



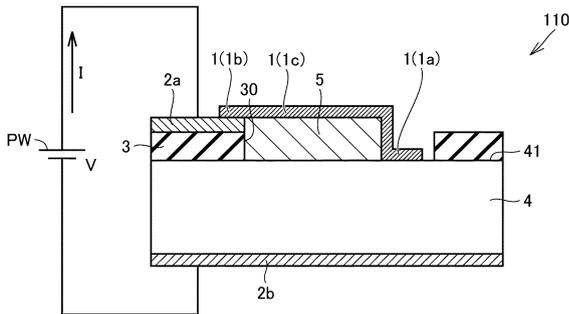
【図 22】

図22



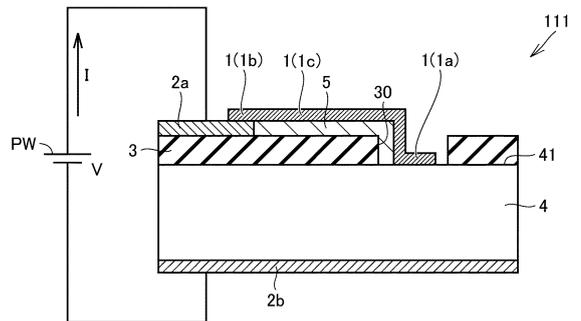
【図 23】

図23



【図 24】

図24



10

20

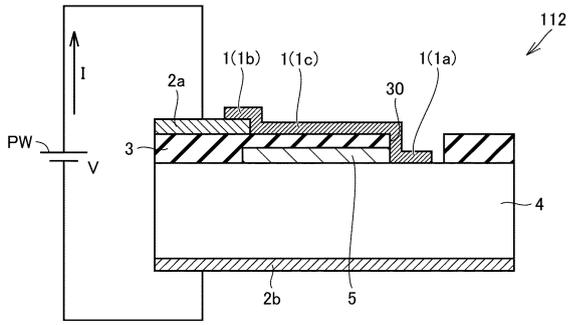
30

40

50

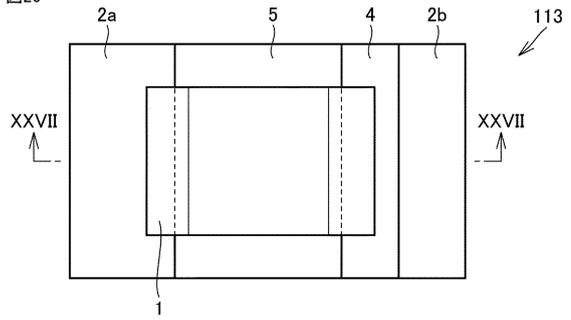
【図 25】

図25



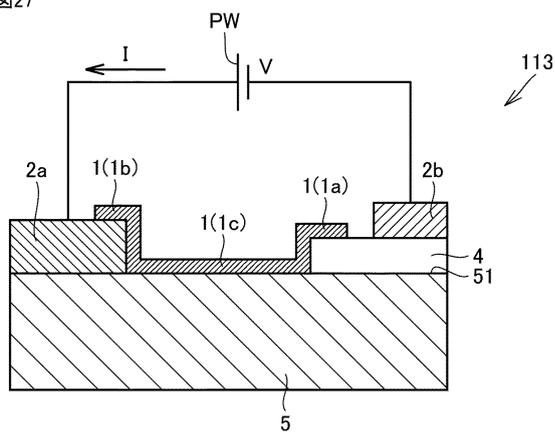
【図 26】

図26



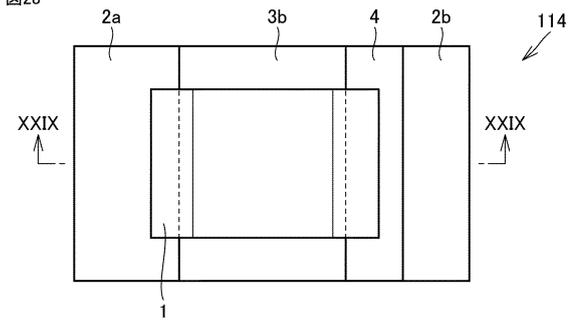
【図 27】

図27



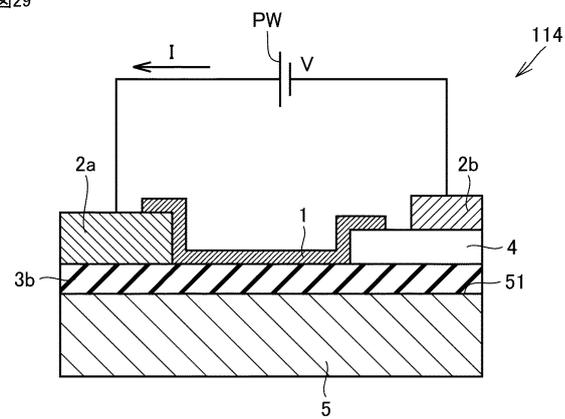
【図 28】

図28



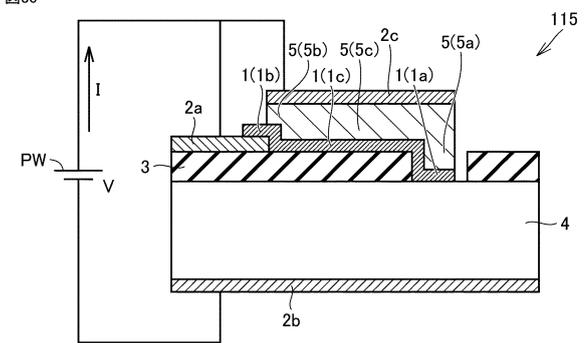
【図 29】

図29



【図 30】

図30



10

20

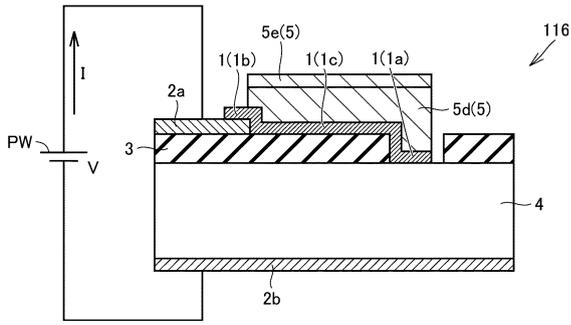
30

40

50

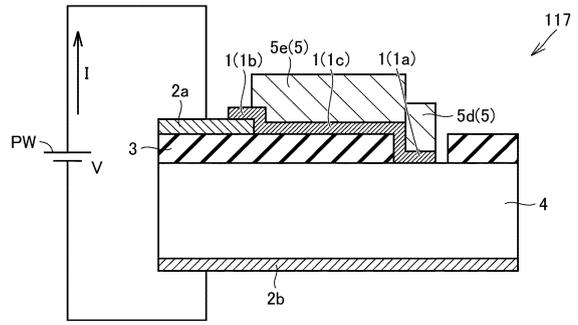
【図31】

図31



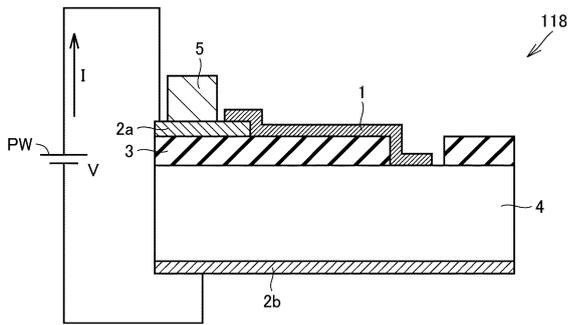
【図32】

図32



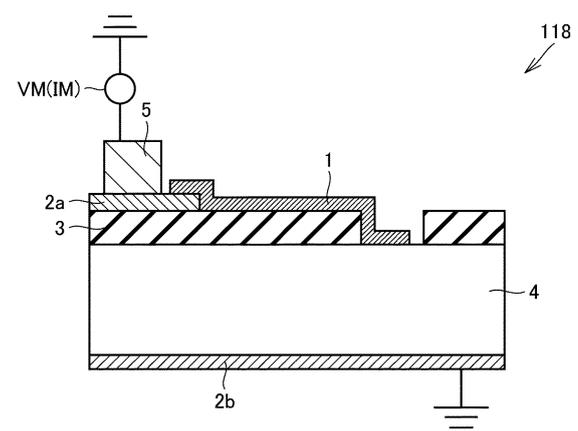
【図33】

図33



【図34】

図34



10

20

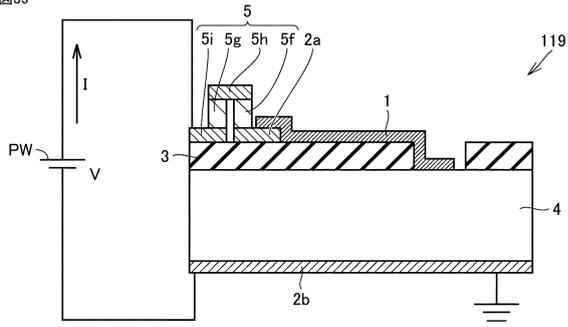
30

40

50

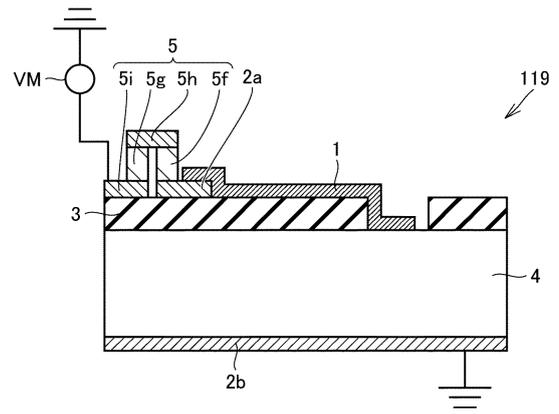
【 図 3 5 】

図35



【 図 3 6 】

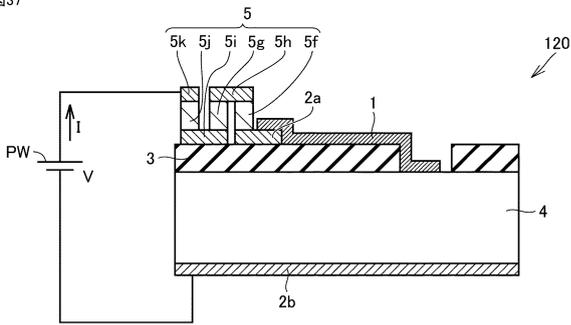
図36



10

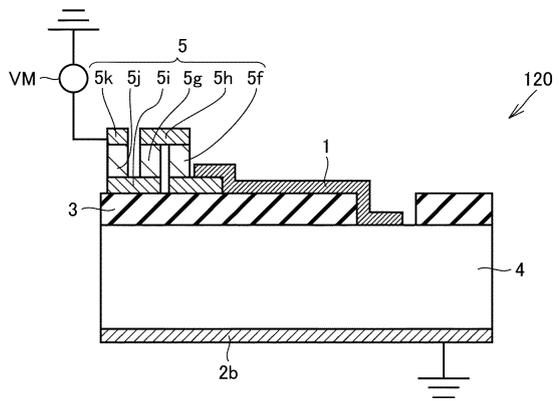
【 図 3 7 】

図37



【 図 3 8 】

図38



20

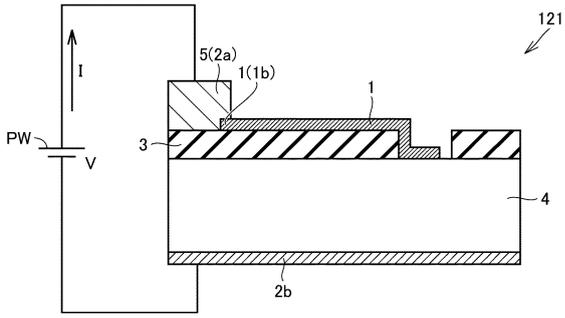
30

40

50

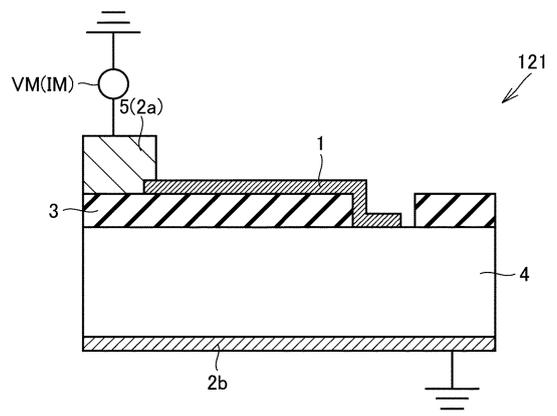
【 図 3 9 】

図39



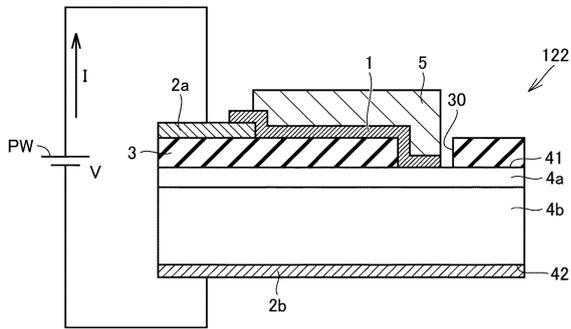
【 図 4 0 】

図40



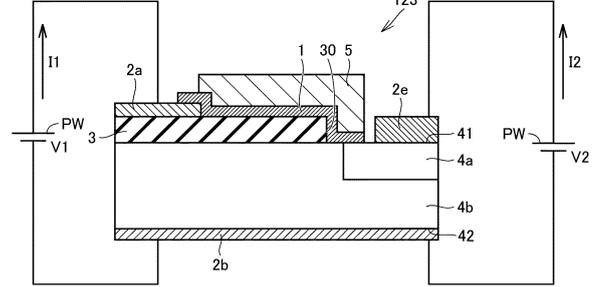
【 図 4 1 】

図41



【 図 4 2 】

図42



10

20

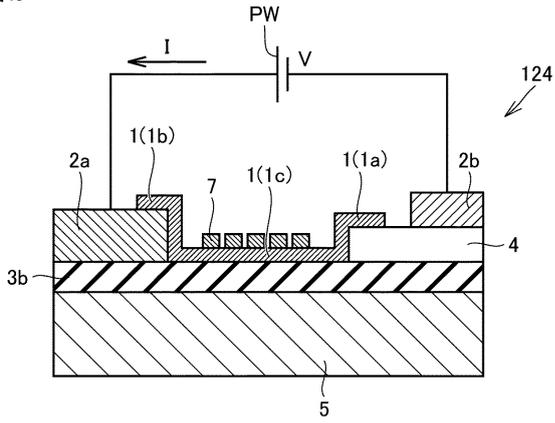
30

40

50

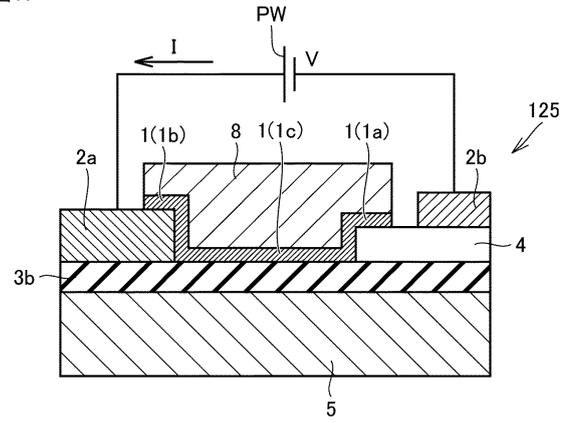
【 4 3 】

43



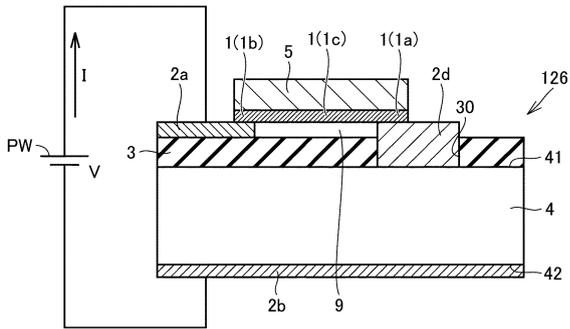
【 4 4 】

44



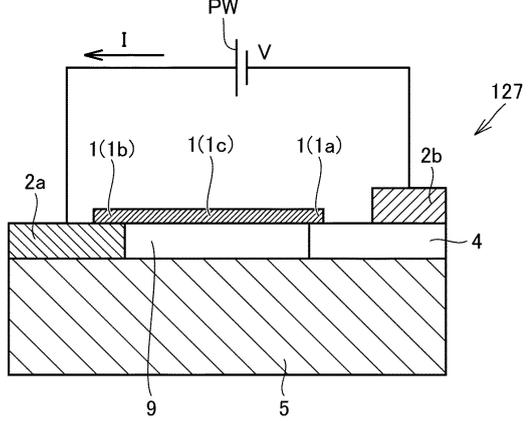
【 4 5 】

45



【 4 6 】

46



10

20

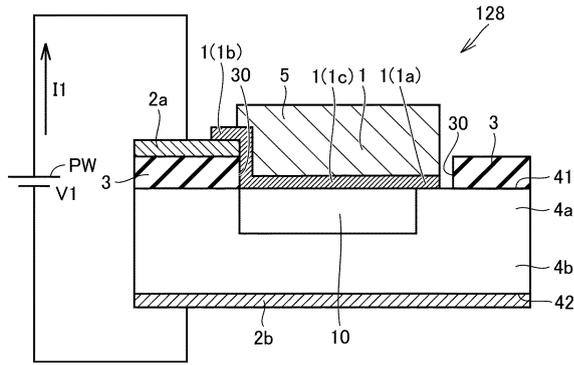
30

40

50

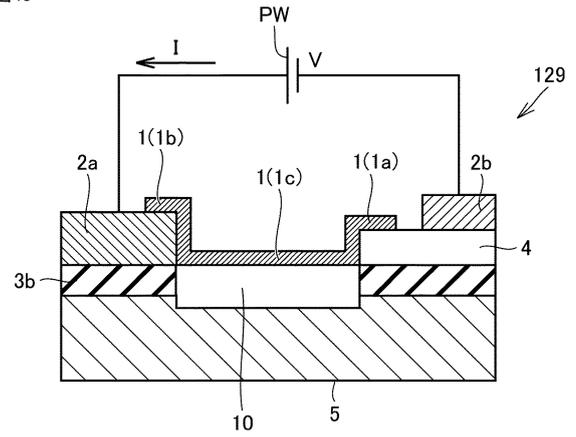
【 図 4 7 】

図47



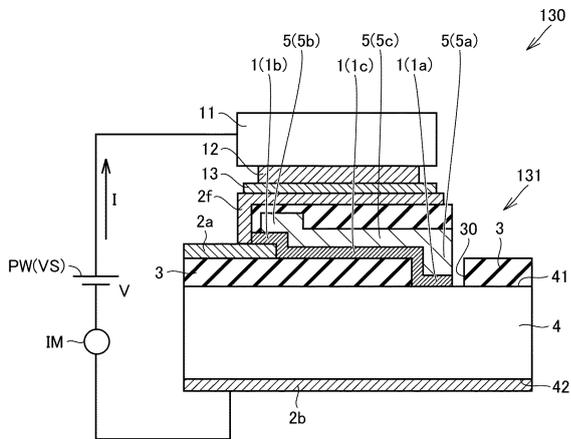
【 図 4 8 】

図48



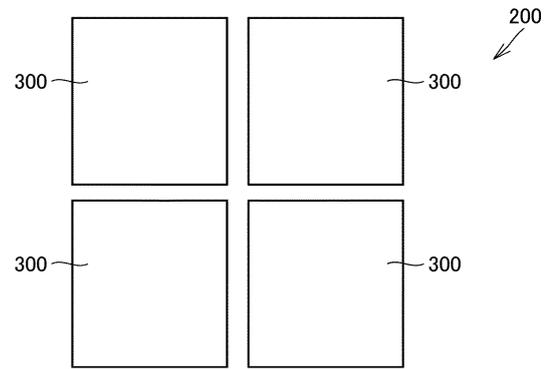
【 図 4 9 】

図49



【 図 5 0 】

図50



10

20

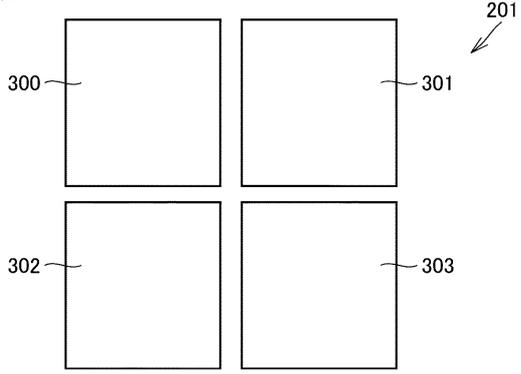
30

40

50

【 5 1】

51



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類		F I		
<i>H 1 0 N</i>	<i>10/17 (2023.01)</i>	<i>H 1 0 N</i>	<i>10/13</i>	
<i>H 1 0 N</i>	<i>10/851 (2023.01)</i>	<i>H 1 0 N</i>	<i>10/17</i>	A
		<i>H 1 0 N</i>	<i>10/851</i>	

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2021/256016 (WO, A1)
 国際公開第2022/044447 (WO, A1)
 特開2016-25356 (JP, A)
 YU, Hong et al. , "Enhanced Photoelectric Properties of Multilayer Graphene Mg2Si/Si Heterojunction Photodetector" , IEEE PHOTONICS JOURNAL , 2022年02月 , VOL. 14, NO. 1, Article Number 6805009 , pp.1-9
 YOON, Hoon Hahn et al. , "Tunable Quantum Tunneling through a Graphene/Bi2Se3 Heterointerface for the Hybrid Photodetection Mechanism" , ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES , 2021年 , Vol.13 , pp.58927-58935

- (58)調査した分野 (Int.Cl. , DB名)
 H 0 1 L 3 1 / 0 0 - 3 1 / 2 0
 H 1 0 K 3 0 / 0 0 - 3 0 / 8 9
 H 1 0 N 1 0 / 0 0 - 1 9 / 0 0