

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6918591号
(P6918591)

(45) 発行日 令和3年8月11日(2021.8.11)

(24) 登録日 令和3年7月27日(2021.7.27)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 J 1/02 (2006.01)	GO 1 J 1/02 B
HO 1 L 29/786 (2006.01)	HO 1 L 29/78 6 1 3 Z
HO 1 L 31/10 (2006.01)	HO 1 L 29/78 6 1 8 C
	HO 1 L 29/78 6 1 8 B
	HO 1 L 29/78 6 1 7 L
請求項の数 12 (全 19 頁) 最終頁に続く	

(21) 出願番号	特願2017-119174 (P2017-119174)	(73) 特許権者	000003609 株式会社豊田中央研究所 愛知県長久手市横道41番地の1
(22) 出願日	平成29年6月16日(2017.6.16)	(73) 特許権者	000004260 株式会社デンソー 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
(65) 公開番号	特開2019-2852 (P2019-2852A)	(74) 代理人	100087723 弁理士 藤谷 修
(43) 公開日	平成31年1月10日(2019.1.10)	(74) 代理人	100165962 弁理士 一色 昭則
審査請求日	令和2年5月11日(2020.5.11)	(74) 代理人	100206357 弁理士 角谷 智広
		(72) 発明者	藤川 久喜 愛知県長久手市横道41番地の1 株式会 社豊田中央研究所内 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電磁波検出器およびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電磁波を検出する電磁波検出器において、
半導体層、ゲート電極、ソース電極およびドレイン電極を備えたトランジスタ構造と、
前記半導体層から離間して設けられ、電磁波を吸収して電界を生じさせる吸収層と、
前記半導体層と前記吸収層との間に設けられ、前記吸収層から前記半導体層へとトンネル電流が生じない厚さに設定された絶縁膜と、

を有し、

前記半導体層は、強い結合によって二次元的に結合したシート状の構造を単位として、
そのシート状構造が弱い接合によって積層した層状構造を有した物質であり、

前記半導体層の平面パターンは、前記吸収層の平面パターンと重ならず、かつ前記吸収層の周の少なくとも一部の近傍に位置するパターンに設定されていて、

前記トランジスタ構造のゲート電圧 - ドレイン電流特性は、前記吸収層の電磁波の吸収によって生じた電界に前記半導体層が晒されることにより変化する、

ことを特徴とする電磁波検出器。

【請求項2】

前記吸収層の平面パターンは、2回対称以上の対称性を有したパターンである、
ことを特徴とする請求項1に記載の電磁波検出器。

【請求項3】

前記吸収層の平面パターンは、2つの二等辺三角形を頂角で重ねたボウタイ型の単位構

造が正方格子状に配列された周期的パターンであり、

前記半導体層の平面パターンは、ボウタイ型の二等辺三角形の底辺に沿ったストライプ状である、

であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁波検出器。

【請求項 4】

前記吸収層の平面パターンは、正方形の単位構造が正方格子状に配列された周期的パターンであり、

前記半導体層の平面パターンは、前記吸収層の正方形の一边に沿ったストライプ状のパターンである、

であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁波検出器。

10

【請求項 5】

前記吸収層の平面パターンは、正方形の単位構造が正方格子状に配列された周期的パターンであり、

前記半導体層の平面パターンは、前記吸収層の各辺に沿った格子状のパターンである、

であることを特徴とする請求項 2 に記載の電磁波検出器。

【請求項 6】

前記吸収層と前記半導体層は、同一面上に形成されている、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 7】

前記吸収層と前記ゲート電極は、同一面上に形成されている、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 5 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

20

【請求項 8】

前記トランジスタ構造は、2 以上のゲート電極を備える、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 7 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 9】

前記半導体層は、グラフェンからなる、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 8 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 10】

前記半導体層は、遷移金属ダイカルコゲナイドからなる、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 8 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

30

【請求項 11】

前記吸収層は、表面プラズモン共鳴により電磁波を吸収する材料からなる、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 10 のいずれか 1 項に記載の電磁波検出器。

【請求項 12】

前記吸収層は、電磁波の吸収により電子 - 正孔対が生成される材料からなる、ことを特徴とする請求項 1 ないし請求項 10 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】

本発明は、電磁波を検出する電磁波検出器、およびその製造方法に関するものであり、特に電磁波を吸収し電流の変化として検出するものである。

40

【背景技術】

【0002】

炭素の同素体の 1 つとして、グラフェンがある。グラフェンは、炭素原子が蜂の巣格子状に並んで結合したシート状の単層の構造であり、バンドギャップのない半導体である。グラフェンは、物理的な強度、電子移動度、および熱伝導性が高いなど、特異な性質を有しており、各種応用研究が進められている。また、グラフェンは広い吸収スペクトルを有し、電磁波検出器として用いることが検討されている。

【0003】

特許文献 1 には、Si からなる基板上に、ゲート絶縁膜、グラフェンを順に積層し、ゲ

50

ラフェン上にソース電極とドレイン電極を形成したFET型の光検出器が記載されている。特許文献1では、グラフェンの電磁波吸収による電気抵抗の変化により光を検出し、ゲート電圧を印加して光電流の変化率の大きな動作点を利用する。

【0004】

特許文献2には、基板上に金属層、絶縁層、グラフェン層、孤立金属を順に形成し、グラフェン層上に孤立金属を挟んで対向して2つの電極を設けた電磁波検出器が記載されている。孤立金属は、表面プラズモン共鳴を生じやすい金属からなり、複数の正方形が間隔を空けて正方格子状に配列されたパターンである。この電磁波検出器では、金属層と孤立金属とにより挟まれた絶縁層内で表面プラズモン共鳴が生じ、所定波長の電磁波が局在する。そして、共振器内にグラフェン層が配置されていることにより、所定波長の電磁波がグラフェン層に入射を繰り返す。このように、特許文献2では、表面プラズモン共鳴と共振器構造を利用して電磁波の吸収率を高め、電磁波の検出感度の向上を図っている。

10

【0005】

特許文献3には、下層金属層、絶縁層、グラフェンからなる上層金属パターンを順に形成した構造体を有し、その構造体の温度変化を電気信号に変換して電磁波を検出する電磁波検出器が記載されている。特許文献3では、上層金属パターンによる表面プラズモン共鳴を利用してグラフェンの光吸収率を高めている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特表2013-502735号公報

【特許文献2】特開2015-45629号公報

【特許文献3】特開2015-121417号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかし、特許文献1の光検出器では、グラフェンの光吸収率が低いと高感度の検出は難しかった。

【0008】

また、特許文献1～3の構造では、ノイズや暗電流を低減させることはできないため、 D^* 値などのデバイス性能が低いという問題があった。

30

【0009】

また、特許文献1～3では、全面にグラフェンが形成されているため、プラズモンで誘起された電荷に偏りが生じたとしても、偏りが打ち消され、検出感度を向上させることができなかった。

【0010】

そこで本発明の目的は、高感度に電磁波を検出することができる電磁波検出器を実現することである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

電磁波を検出する電磁波検出器において、半導体層、ゲート電極、ソース電極およびドレイン電極を備えたトランジスタ構造と、半導体層から離間して設けられ、電磁波を吸収して電界を生じさせる吸収層と、半導体層と吸収層との間に設けられ、吸収層から半導体層へとトンネル電流が生じない厚さに設定された絶縁膜と、を有し、半導体層は、強い結合によって二次元的に結合したシート状の構造を単位として、そのシート状構造が弱い結合によって積層した層状構造を有した物質であり、半導体層の平面パターンは、吸収層の平面パターンと重ならず、かつ吸収層の周の少なくとも一部の近傍に位置するパターンに設定されていて、トランジスタ構造のゲート電圧-ドレイン電流特性は、吸収層の電磁波の吸収によって生じた電界に半導体層が晒されることにより変化する、ことを特徴とする電磁波検出器である。

40

50

【0012】

本発明において、半導体層の平面パターンと吸収層の平面パターンが重ならないとは、完全に重ならないことを意味するのではなく、多少の重なりは許容される。

【0013】

本発明において、層状物質とは、層状構造を有する物質であって、単層から数層の積層構造であるものを示すとする。

【0014】

半導体層は、層状物質であれば任意でよいが、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドが好ましい。

【0015】

吸収層は、電磁波を吸収して電界を生じさせるものであれば任意でよく、表面プラズモン共鳴により電磁波を吸収する材料や、電磁波の吸収により電子 - 正孔対が生成される材料を用いることができる。

【0016】

吸収層の平面パターンは、2回対称以上の対称性を有したパターンとするのが望ましい。効率的に電磁波を吸収させることができ、より高感度に電磁波を検出することができる。

【0017】

半導体層の平面パターンは、吸収層の平面パターンと重ならず、かつ吸収層の周の少なくとも一部の近傍に位置するパターンであれば任意のパターンでよい。ただし、吸収層の平面パターンを、2つの二等辺三角形を頂角で重ねたボウタイ型の単位構造が正方格子状に配列された周期的パターンとする場合には、半導体層の平面パターンは、ボウタイ型の二等辺三角形の底辺に沿ったストライプ状とするのがよい。より高感度に電磁波を検出することができる。また、吸収層の平面パターンを、正方形の単位構造が正方格子状に配列された周期的パターンとする場合には、吸収層の正方形の一辺に沿ったストライプ状のパターンとするのがよい。より高感度に電磁波を検出することができる。あるいは、吸収層の各辺に沿った格子状のパターンとするのがより望ましい。さらに高感度に電磁波を検出することができる。

【0018】

吸収層と半導体層が同一面上に形成された構造や、吸収層とゲート電極が同一面上に形成された構造としてもよい。製造工程を削減することができ、低コスト化を図ることができる。

【0019】

また、ゲート電極を2以上設けてもよい。トランジスタの電気的特性をより細かに制御することができ、より高感度に電磁波を検出することができる。

【発明の効果】

【0020】

本発明の電磁波検出器は、吸収層による電磁波の吸収によって吸収層の周囲に電界を生じさせ、その生じた電界の強度の強い領域に半導体層を晒すことで半導体層の電気的特性に変化を生じさせ、その変化によって電磁波の検出をするものである。

【0021】

このように、本発明の電磁波検出器では、電磁波の吸収を担う構造と、電磁波の吸収に伴う電流変化を検出するための構造とを分離しているため、ノイズや暗電流の影響を回避することができ、電磁波を高感度に検出することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】実施例1の電磁波検出器の構成を示した図。

【図2】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図3】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図4】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

10

20

30

40

50

【図5】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図6】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図7】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図8】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図9】変形例の電磁波検出器の構成を示した図。

【図10】実施例1の電磁波検出器の製造工程を示した図。

【図11】グラフェンをチャンネルとするトランジスタのゲート電圧 - ドレイン電流特性を示したグラフ。

【図12】グラフェンをチャンネルとするトランジスタのゲート電圧 - ドレイン電流特性の変化を示した図。

10

【図13】半導体層12および吸収層14の平面パターンを示した図。

【図14】吸収層14の透過スペクトルを示したグラフ。

【図15】半導体層12および吸収層14の平面パターンを示した図。

【図16】吸収層14の透過スペクトルを示したグラフ。

【図17】吸収層14がポウタイ型形状の場合の電界強度分布について示した図。

【図18】吸収層14が正方形の場合の電界強度分布について示した図。

【図19】吸収層14の透過スペクトルを示したグラフ。

【図20】吸収層14がポウタイ型形状の場合の電界強度分布について示した図。

【図21】吸収層14が正方形の場合の電界強度分布について示した図。

【図22】半導体層12および吸収層14の平面パターンを示した図。

20

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、本発明の具体的な実施例について説明するが、本発明は実施例に限定されるものではない。

【実施例1】

【0024】

図1は、実施例1の電磁波検出器の構成を示した図である。図1のように、実施例1の電磁波検出器は、基板10と、基板10上に設けられた第1絶縁膜11と、第1絶縁膜11上に設けられた半導体層12と、半導体層12上に設けられた第2絶縁膜13と、第2絶縁膜13上に設けられた吸収層14と、吸収層14を覆う第3絶縁膜18と、ゲート電極15、ソース電極16、ドレイン電極17と、を有している。基板10、第1絶縁膜11、半導体層12、ゲート電極15、ソース電極16、ドレイン電極17は、本発明のトランジスタ構造(MOSFET)に相当する。実施例1の電磁波検出器は、半導体層12をチャンネルとして、ドレイン電流の変化により遠赤外線を検出するFET型の電磁波検出器である。

30

【0025】

(基板10について)

基板10は、表面に第1絶縁膜11が形成されたn-Siからなる。第1絶縁膜11はSiの熱酸化膜(SiO_2)であり、厚さは500nmである。第1絶縁膜11は、FETのゲート絶縁膜として機能する。

40

【0026】

なお、基板10はSiに限らず、任意の材料を用いることができる。ただし、基板10裏面側からの遠赤外線を検出する場合には、基板10は遠赤外線を透過する材料とする必要がある。基板10を遠赤外線透過材料とする場合、基板10の表面側と裏面側の両方からの両方の遠赤外線を検出するようにしてもよい。

【0027】

また、第1絶縁膜11はSiの熱酸化膜としているが、他の方法により形成した SiO_2 でもよいし、 SiO_2 以外の絶縁体を用いてもよい。たとえば、 Al_2O_3 、 SiN 、 SiON 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Ta_2O_5 などを用いることができる。また、異なる材料の積層であってもよい。

50

【0028】

また、実施例1の電磁波検出器では、ボトムゲート型であるため基板10を導電性材料としているが、トップゲート型とする場合には絶縁性材料を用いてもよい。

【0029】

(半導体層12について)

半導体層12は、グラフェンからなり、第1絶縁膜11上に接して位置している。ここでグラフェンは、単層のものだけでなく数層のものも含み、たとえば1~9層のものである。半導体層12は、トランジスタのチャンネルとして動作する層である。半導体層12は、吸収層14の平面パターンと重ならず、かつ吸収層14の周の少なくとも一部の近傍に位置するパターンに形成されている。そのパターンの詳細については後述する。

10

【0030】

半導体層12には、グラフェン層以外の層状物質の半導体を用いることもできる。ここで層状物質は、強い結合によって二次元的に結合したシート状の構造を単位として、そのシート状構造が弱い接合によって積層した層状構造を有し、積層数が単層から数層程度(たとえば1~9層)の積層のものを示すとする。

【0031】

たとえば、遷移金属ダイカルコゲナイドを用いることができる。遷移金属ダイカルコゲナイドは、化学式 MX_2 で表される層状物質である。ここでMは、遷移金属であり、たとえば、Mo、W、Ta、Hf、Sn、Ti、Re、Sn、などである。また、Xは、S、Se、またはTeである。具体的には、 MoS_2 、 WS_2 、 WSe_2 、 $MoSe_2$ 、 HfS_2 、 SnS_2 などを用いることができる。

20

【0032】

また、たとえば、13族カルコゲナイドや14族カルコゲナイドを用いることができる。13族カルコゲナイドは、13族元素と16族元素の化合物であり、14族カルコゲナイドは、14族元素と16族元素の化合物である。具体的には、GaS、GaSe、InSe、GeSe、 $SnSe_2$ などを用いることができる。

【0033】

また、たとえば、フォスフォレン、シリセン、ゲルマネンなどの単一元素からなる層状物質を用いることができる。

【0034】

(第2絶縁膜13について)

第2絶縁膜13は、半導体層12上に接して設けられている。第2絶縁膜13は、 SiO_2 からなる。第2絶縁膜13は、半導体層12と吸収層14とを離間させ、吸収層14から半導体層12へ電流がリークしないようにするために設けるものである。

30

【0035】

第2絶縁膜13の厚さは、吸収層14から半導体層12へトンネル効果により電流がリークしない厚さに設定されていればよい。電流リークがあると、検出精度に影響を及ぼしてしまうからである。なお、完全に電流リークが生じない厚さである必要はなく、遠赤外線検出精度に影響のない範囲で多少の電流リークが生じることは許容される。

【0036】

たとえば、第2絶縁膜13の厚さは、2nm以上とすることが望ましい。2nm未満の厚さでは電流リークを十分に抑制できない。また、第2絶縁膜13の厚さは、100nm以下とすることが望ましい。吸収層14と半導体層12の距離が離れると、吸収層14で発生した電界の半導体層12での電界強度が弱くなり、遠赤外線検出精度が十分に向上しないためである。また、第2絶縁膜13が厚くなると製造に時間やコストがかかり、電磁波検出器も大型になってしまうためである。より望ましい第2絶縁膜13の厚さは、2~50nm、さらに望ましくは5~20nmである。

40

【0037】

また、第2絶縁膜13の材料は SiO_2 に限らず、第1絶縁膜11とは異なる材料であってもよい。たとえば、 Al_2O_3 、 SiN 、 $SiON$ 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、

50

Ta₂O₅などを用いることができる。第2絶縁膜13は複数の材料の積層であってもよい。装置の小型化を図りつつ電流リークを効果的に防止するために、第2絶縁膜13は高誘電率材料が望ましい。たとえば、比誘電率が4以上の材料が望ましい。

【0038】

(吸収層14について)

吸収層14は、第2絶縁膜13上の一部領域に設けられている。吸収層14は、厚さ5nmのCr、厚さ30nmのAuを順に積層した構造である。Au層は、表面プラズモン共鳴により所望の波長の遠赤外線を吸収し、吸収層14の周囲に電界を発生させるための層である。Cr層は、第2絶縁膜13とAu層との密着性を高めるための層である。吸収層14の平面パターンは、所望の波長を効率的に吸収可能なパターンに形成されている。そのパターンの詳細については後述する。

10

【0039】

吸収層14の厚さは、30nmに限らず、所望の波長の遠赤外線を十分に吸収できる厚さであれば任意である。たとえば10~1000nmの範囲とすれば十分である。

【0040】

吸収層14の材料はAuに限らず、遠赤外線を吸収して電界を生じさせるような材料であれば任意の材料を用いることができ、絶縁体、金属、半導体のいずれでもよいし、無機材料であっても有機材料であってもよい。複数材料の積層であってもよい。また、遠赤外線の吸収は、材料の格子欠陥や不純物による吸収でもよい。また、電界の発生要因は、表面プラズモン共鳴によるもの、電子と正孔対の生成による電荷の局在に起因するもの、分極によるもの、など任意の要因であってもよい。

20

【0041】

たとえば、表面プラズモン共鳴を生ずる材料である。そのような材料であれば、金属、半導体、絶縁体のいずれであってもよい。そのような材料の一例は、実施例1のAuの他、Ag、Cuなどの金属、PbTiO₃、BaTiO₃などの強誘電体、遷移金属ダイカルコゲナイド、である。遷移金属ダイカルコゲナイドについては、半導体層12の説明で挙げた材料を用いることができる。

【0042】

また、たとえば、電磁波の吸収によって電子-正孔対を生成し、その電子と正孔の局在によって電界が発生する材料である。たとえば、Ge、Si、GaAs、GaN、AlGaAsなどの半導体、有機色素、フタロシアニン系材料などの有機半導体、BaTiO₃などの強誘電体、PbTiO₃などの焦電体である。また、pn接合構造やpin接合構造としてもよい。電子と正孔の局在がより顕著となり、より強い電界が発生することで電磁波検出器の遠赤外線検出精度の向上を図ることができる。

30

【0043】

なお、実施例1では、半導体層12と吸収層14の位置関係は、遠赤外線の入射側(基板10表面側)から順に、吸収層14、半導体層12の順であるが、逆に半導体層12、吸収層14の順の構造であってもよい。一例として、図2に、実施例1において第2絶縁膜13上の吸収層14を第1絶縁膜11中に埋め込む構成(吸収層14Aとする)に替え、第2絶縁膜13は省略した構成を示す。図2のような構成であっても、半導体層12を透過した遠赤外線を吸収層14Aによって吸収させることができるため、実施例1の電磁波検出器と同様に動作させることができる。

40

【0044】

また、実施例1では、吸収層14は1層のみであるが、2層以上設けてもよい。これにより、複数の波長を検出可能としたりすることができる。一例として、図3に、実施例1において第1絶縁膜11中に吸収層14Aをさらに加えた構成を示す。図3の電磁波検出器において、吸収層14の材料、平面パターンと、吸収層14Aの材料、平面パターンとを变えることで、吸収層14の吸収波長と、吸収層14Aの吸収波長を変えてもよい。たとえば、波長5μmの遠赤外線と波長10μmの遠赤外線の両方を検出可能な電磁波検出器を実現することができる。

50

【 0 0 4 5 】

(第 3 絶縁膜 1 8 について)

第 3 絶縁膜 1 8 は、吸収層 1 4 を覆うようにして形成されている。第 3 絶縁膜 1 8 の厚さは、たとえば 5 ~ 2 0 n m である。吸収層 1 4 は第 2 絶縁膜 1 3 と第 3 絶縁膜 1 8 によって内部に封止された状態となっている。このように絶縁膜で吸収層 1 4 を封止することで、吸収層 1 4 を物理的、化学的に保護している。第 3 絶縁膜 1 8 は $S i O_2$ からなる。 $S i O_2$ 以外にも、吸収層 1 4 を物理的、化学的に保護可能な任意の材料を用いることができる。

【 0 0 4 6 】

(電極構造について)

第 2 絶縁膜 1 3 および第 3 絶縁膜 1 8 の一部領域にコンタクトホールが設けられ、その底面に半導体層 1 2 が露出している。その露出する半導体層 1 2 上に接してソース電極 1 6 およびドレイン電極 1 7 が設けられている。ソース電極 1 6 とドレイン電極 1 7 は所定距離離間して設けられている。ゲート電極 1 5 は、基板 1 0 の裏面に接して設けられている。ソース電極 1 6、ドレイン電極 1 7、およびゲート電極 1 5 は、 $T i / A u$ からなる。

10

【 0 0 4 7 】

なお、実施例 1 では、ゲート電極 1 5 が第 1 絶縁膜 1 1 を介して半導体層 1 2 に接続する絶縁ゲート構造の F E T (M O S F E T) を構成しているが、ゲート電極 1 5 の材料としてグラフェンにショットキー接続する材料を用い、ゲート電極 1 5 と半導体層 1 2 とを直接接続してショットキーゲート構造の F E T (M E S F E T) としてもよい。たとえば、基板 1 0 をグラフェンにショットキー接続する材料とし、ゲート電極 1 5 を兼ねる構造としてもよい。

20

【 0 0 4 8 】

また、実施例 1 では、ゲート電極 1 5 を 1 つ設けているが、複数設けてもよい。複数のゲート電極 1 5 を設けることで、半導体層 1 2 に対する電圧の印加位置を制御することができ、F E T の動作を両極性から半極性としたり、半導体層 1 2 のディラックポイントのシフト量制御をより容易とすることができ、電磁波の検出精度の向上を図ることができる。また、実施例 1 では、基板 1 0 裏面側にゲート電極 1 5 を設けたバックゲート型の構造としているが、基板 1 0 表面側にゲート電極 1 5 を設けたトップゲート型の構造としてもよいし、表面側と裏面側の両方に設けたデュアルゲート型の構造としてもよい。

30

【 0 0 4 9 】

ゲート電極 1 5 を複数設ける場合の具体例を以下にいくつか例示する。図 4 の電磁波検出器は、実施例 1 において、第 3 絶縁膜 1 8 上にグラフェンからなるゲート電極 1 5 A をさらに加えた構成である。この場合、第 3 絶縁膜 1 8 はゲート絶縁膜としての機能を兼ねる。

【 0 0 5 0 】

また、図 5 の電磁波検出器は、ゲート電極 1 5 に替えて、ゲート電極 2 5、2 6 を加えた構成であり、実施例 1 において基板 1 0 に替えて、遠赤外線を透過する高抵抗の $n - S i$ からなる基板 2 0 を用いている。基板 2 0 上には、グラフェンからなるゲート電極 2 5、第 1 絶縁膜 1 1、半導体層 1 2 が順に積層され、半導体層 1 2 上には、実施例 1 と同様に第 2 絶縁膜 1 3、吸収層 1 4、ソース電極 1 6、ドレイン電極 1 7、第 3 絶縁膜 1 8 が設けられている。また、第 3 絶縁膜 1 8 上に $T i / A u$ からなるゲート電極 2 6 が設けられている。基板 2 0 裏面には、ゲート電極 2 5 を底面に露出させるコンタクトホールが設けられ、コンタクトホールを埋めてゲート電極 2 5 と接続するコンタクト電極 2 7 が設けられている。この図 5 の電磁波検出器では、基板 2 0 裏面側から基板 2 0 を透過して入射する遠赤外線を検出する。

40

【 0 0 5 1 】

また、ゲート電極 1 5 を吸収層 1 4 と同一面上に設けてもよい。一例を図 6 に示す。図 6 の電磁波検出器は、高抵抗の基板 2 0 上に半導体層 1 2、第 2 絶縁膜 1 3 を順に形成し

50

、第2絶縁膜13上に吸収層14とゲート電極15を離間して形成し、さらに第2絶縁膜13にコンタクトホールを設けて半導体層12と接続するソース電極16、ドレイン電極17を形成した構成である。このように吸収層14とゲート電極15を同一面上に設けると、素子構造を簡略化して絶縁膜の形成回数を削減でき、製造コストの低減を図ることができる。また、吸収層14と半導体層12とを隔てて電流リークを抑制するための第2絶縁膜13が、ゲート絶縁膜としての機能を兼ねるようにすることができる。

【0052】

また、実施例1では吸収層14と半導体層12は異なる面上に位置しているが、吸収層14から半導体層12に電流リークが生じないように絶縁膜によって離間して設けられていれば、吸収層14と半導体層12との位置関係は任意でよい。吸収層14と半導体層12を同一面上に設けてもよい。絶縁膜を形成する領域を削減でき、製造工程の簡略化、コスト低減を図ることができる。なお、吸収層14と半導体層12を同一面上に形成する場合、必然的に吸収層14の平面パターンと半導体層12の平面パターンは重ならない。

10

【0053】

吸収層14と半導体層12を同一面上に形成する場合の具体例を以下にいくつか例示する。図7は、変形例の電磁波検出器の構成を示し、図7(a)は断面図、図7(b)は平面図である。図7のように、基板10上に第1絶縁膜11が設けられ、第1絶縁膜11上に正方形のパターンの吸収層14を設けられ、同じく第1絶縁膜11上に半導体層12が設けられている。半導体層12は正方形の窓が空けられ、その窓内に半導体層12から一定距離離間して吸収層14が位置している。そして吸収層14と半導体層12を覆うようにして第3絶縁膜18が設けられ、吸収層14と半導体層12との隙間にも第3絶縁膜18が位置する。ゲート電極15、ソース電極16、ドレイン電極17については実施例1と同様にして設けられている。

20

【0054】

図8は、図7の電磁波検出器において、図4と同様にして第3絶縁膜18上にもゲート電極15Aを設けてゲート電極を2つ有した構成としたものである。

【0055】

図9は、図7の電磁波検出器において、図5と同様にして2つのゲート電極25、26を設けた構成としたものである。

【0056】

これら図7～9の電磁波検出器では、実施例1の電磁波検出器に比べて第2絶縁膜13を設ける必要がないため、製造工程をより削減でき、低コスト化を図ることができる。

30

【0057】

(実施例1の電磁波検出器の製造方法)

次に、実施例1の電磁波検出器の製造方法について、図10を参照に説明する。

【0058】

まず、銅箔上に、CVD法を用いて半導体層12を形成する。炭素源にはメタン、エタンなどの炭素含有ガスを用いる。温度はたとえば1000以上とし、圧力はたとえば500Pa以下とする。

【0059】

次に、表面、裏面に500nmの熱酸化膜(第1絶縁膜11)が形成されたn-Siからなる低抵抗な基板10を用意する。この基板10表面に、銅箔上の半導体層12を張り合わせる。そして、銅箔をウェットエッチングによって除去する。このようにして、半導体層12を基板10表面の第1絶縁膜11上に転写する(図10(a)参照)。

40

【0060】

なお、半導体層12の形成方法はCVD法に限らず、テープ剥離法などの任意の方法を用いてもよい。

【0061】

次に、フォトリソグラフィ、ドライエッチングにより、第1絶縁膜11上に所定のパターンの半導体層12を形成する(図10(b)参照)。

50

【 0 0 6 2 】

次に、半導体層 1 2 上に、CVD法によって厚さ 20 nm の第 2 絶縁膜 1 3 を形成し、第 2 絶縁膜 1 3 上に所定のパターンの吸収層 1 4 を形成する（図 10 (c) 参照）。吸収層 1 4 は、Cr/Au であり、Cr 層は 5 nm、Au 層は 30 nm とする。吸収層 1 4 は、スパッタ法や蒸着法などによって形成する。吸収層 1 4 のパターニングは、フォトリソグラフィとドライエッチングを用いる。あるいはリフトオフ法によってパターニングしてもよい。

【 0 0 6 3 】

次に、吸収層 1 4 を覆うようにして CVD 法により第 3 絶縁膜 1 8 を形成する。そして、第 2 絶縁膜 1 3、第 3 絶縁膜 1 8 の一部領域をドライエッチングしてコンタクトホールを形成し、コンタクトホール底面に半導体層 1 2 を露出させる。そして、露出させた半導体層 1 2 上に、フォトリソグラフィ、蒸着、リフトオフにより、ソース電極 1 6、ドレイン電極 1 7 を形成する（図 10 (d) 参照）。次に、基板 1 0 裏面の熱酸化膜を除去し、ゲート電極 1 5 を形成する。以上によって図 1 に示す実施例 1 の電磁波検出器を作製する。

【 0 0 6 4 】

（電磁波検出器の動作について）

次に、実施例 1 の電磁波検出器の動作について説明する。

【 0 0 6 5 】

まず、ゲート電極 1 5 に所定の電圧を印加し、ドレイン電圧の変化に対してドレイン電流が大きく変化する領域となるように設定しておく。グラフェンからなる半導体層 1 2 をチャンネルとするトランジスタは、両極性を示し、図 11 のように、ゲート電圧 - ドレイン電流特性の曲線は線対称に現れる。そこで、曲線の傾きの大きな領域 A や領域 B となるようにゲート電圧を印加する。

【 0 0 6 6 】

このようにゲート電圧を印加した状態で、実施例 1 の電磁波検出器の基板 1 0 表面側から遠赤外線が入射すると、遠赤外線は吸収層 1 4 に吸収される。すると、吸収層 1 4 中の電子の分布に偏りが生じ、吸収層 1 4 の周囲に電界が生じる。

【 0 0 6 7 】

吸収層 1 4 の遠赤外線吸収によって生じた電界に半導体層 1 2 が晒されると、半導体層 1 2 を構成するグラフェンのディラックポイントがシフトする。半導体層 1 2 は、後述のような平面パターンであるため、吸収層 1 4 の遠赤外線吸収により発生する電界のうち、電界強度の強い領域に半導体層 1 2 を効率的に晒すことができる。その結果、半導体層 1 2 のディラックポイントを効率的にシフトさせることができる。ディラックポイントのシフトにより、半導体層 1 2 をチャンネルとするトランジスタの電気的特性（ゲート電圧 - ドレイン電流の特性）も変化し、図 12 のようにその曲線がシフトする。

【 0 0 6 8 】

ここで、あらかじめゲート電圧の印加によって、ゲート電圧の変動によって大きくドレイン電流が変化する領域（図 11 中の領域 A や領域 B）に設定されている。そのため、グラフェンをチャンネルとするトランジスタの電気的特性の変化によって、ドレイン電流も大きく変化する（図 12 参照）。このドレイン電流の変化により、遠赤外線を検出することができる。また、ドレイン電流の変化量から遠赤外線の強度を測定することができる。

【 0 0 6 9 】

実施例 1 の電磁波検出器では、遠赤外線を吸収させる機能と、その吸収を電流の変化として検出するトランジスタの機能とを分離させている。また、半導体層 1 2 は、遠赤外線の吸収によって発生する電界の強い領域に配置され、弱い領域には配置されていない。そのため、実施例 1 の電磁波検出器はノイズや暗電流に強く、高感度に遠赤外線を検出することができ、たとえば比検出能 (D^*) を向上させることができる。

【 0 0 7 0 】

（吸収層 1 4 および半導体層 1 2 のパターン）

上述のように、吸収層 14、半導体層 12 の平面パターンは、効率的に遠赤外線を検出できるように設定されている。その平面パターンについて、図を参照に詳しく説明する。

【0071】

まず、吸収層 14 の平面パターンについて説明する。吸収層 14 は、図 13 に示すように、ボウタイ型の形状を単位構造として、その単位構造が正方格子状に配列されたパターンである。ボウタイ型の形状は、2つの二等辺三角形の頂角が一部重なるように対向させた形状である。また、ボウタイ型の2つの底辺 14a は、検出したい偏光方向に対して垂直となるように配置する。これにより、その偏光方向の遠赤外線を高効率に検出することができる。

【0072】

図 14 は、吸収層 14 の透過スペクトルをシミュレーションにより算出した結果を示したグラフである。吸収層 14 のボウタイ型の形状は、2つの二等辺三角形の底辺 14a の長さを 2340 nm、頂角の重なり幅を 80 nm、2つの底辺 14a の間隔を 2340 nm とし、そのボウタイ型の形状を周期 2590 nm で正方格子状に無限に配列した平面パターンとした。また、遠赤外線は吸収層 14 の厚さ方向に入射し、偏光方向は、ボウタイ型の底辺 14a に直交する方向とした。このような平面パターンの吸収層 14 は、図 14 のように、波長 10 μm の遠赤外線の透過率はおよそ 0.02 であり、波長 10 μm の遠赤外線を効率的に吸収できることがわかる。

【0073】

なお、吸収層 14 の単位構造は、実施例 1 ではボウタイ型の構造としているが、任意のパターンでよい。ただし、効率的に遠赤外線を吸収するために、2回対称以上の対称性を有するパターンとするのがよい。たとえば、正三角形、正方形、長方形、正六角形、円、楕円、十字型などのパターンとしてもよい。特に、4回対称以上とすれば、無偏光であっても効率的に検出することができる。

【0074】

吸収層 14 の単位構造の他の例として、図 15 に、吸収層 14 の単位構造を正方形とした場合の平面パターンを示す。また、図 16 は、この平面パターンにおける吸収層 14 の透過スペクトルをシミュレーションにより算出した結果を示したグラフである。正方形の辺の長さは 2 μm とし、その正方形を周期 5 μm で正方格子状に無限に配列した平面パターンとした。また、吸収層 14 の厚さは 100 nm とした。図 16 のように、波長 5 μm の遠赤外線の透過率はおよそ 0.07 であり、波長 5 μm の遠赤外線を効率的に吸収できることがわかる。

【0075】

また、実施例 1 では、吸収層 14 を単位構造が正方格子状に配列されたパターンとしているが、所望の吸収波長、吸収帯域幅などに応じて配列パターンや配列数を設定してよく、正方格子以外にも、三角格子、蜂の巣格子などの周期的パターンであってもよい。ただし、吸収層 14 全体として 2回対称以上の対称性となるように配置することが望ましい。吸収層 14 によって効率的に遠赤外線を吸収させることができる。また、複数の単位構造を配列したパターンではなく、単位構造を 1つ有するのみであってもよい。

【0076】

次に、吸収層 14 の単位構造がボウタイ型形状の場合における半導体層 12 の平面パターンについて説明する。半導体層 12 は、図 13 に示すように、ストライプ状に形成されている。吸収層 14 のボウタイ型形状における底辺 14a に垂直な方向を x 軸方向、底辺 14a に沿う方向を y 軸方向とすると、そのストライプの方向は、y 軸方向である。また、隣接するボウタイ型形状の一方の底辺 14a と他方の底辺 14a との間隔の位置に設けられており、吸収層 14 と半導体層 12 とは平面視で重ならないように設定されている。また、ストライプの幅は、隣接するボウタイ型形状の一方の底辺 14a と他方の底辺 14a との間隔に等しい。

【0077】

図 17 は、x 軸方向に偏光した波長 10 μm の遠赤外線の吸収層 14 による吸収で発生

10

20

30

40

50

する電界の強度分布をシミュレーションにより求めた結果を示した図である。吸収層 1 4 直下の x y 平面での電界強度分布である。吸収層 1 4 がボウタイ型形状である場合、図 1 7 のように、電界強度分布は、吸収層 1 4 と平面視が重なる領域では非常に弱くなる。一方、ボウタイ型形状の底辺 1 4 a 近傍の領域では負の強い電界強度を示す。

【 0 0 7 8 】

そこで、半導体層 1 2 を図 1 3 に示すストライプ状とすることで、遠赤外線吸収により発生する電界の強い領域（ボウタイ型形状の底辺 1 4 a 近傍の領域）に半導体層 1 2 を配置し、電界の弱い領域（吸収層 1 4 と重なる領域）には半導体層 1 2 を配置しないようにしている。このように半導体層 1 2 を配置することで、半導体層 1 2 を構成するグラフェンのディラックポイントを効率的にシフトさせることができ、高感度に遠赤外線を検出することができる。

10

【 0 0 7 9 】

次に、吸収層 1 4 の単位構造が正方形の場合における半導体層 1 2 の平面パターンについて説明する。半導体層 1 2 は、図 1 5 のように、ストライプ状に形成されている。吸収層 1 4 の正方形の辺のうち、ある一辺に沿う方向を x 軸方向、これに垂直な方向を y 軸方向として、ストライプの方向は y 軸方向である。また、正方形と正方形の間の領域に設けられており、吸収層 1 4 と半導体層 1 2 とは平面視が重ならないように設定されている。また、ストライプの幅は、正方形と正方形の間隔に等しい。

【 0 0 8 0 】

図 1 8 は、x 軸方向に偏光した波長 5 μm の遠赤外線吸収層 1 4 による吸収で発生する電界の強度分布をシミュレーションにより求めた結果を示した図である。吸収層 1 4 直下の x y 平面における電界強度分布である。図 1 8 のように、電界強度分布は吸収層 1 4 と重なる領域で非常に弱くなる。一方、正方形の辺のうち x 軸方向に直交する辺の近傍の領域では負の強い電界強度を示し、他の辺の近傍の領域では弱い電界強度を示す。

20

【 0 0 8 1 】

そこで、半導体層 1 2 を図 1 5 に示すストライプ状とすることで、遠赤外線吸収により発生する電界の強い領域（正方形の辺のうち x 軸方向に直交する辺の近傍の領域）に半導体層 1 2 を配置し、電界の弱い領域（吸収層 1 4 と重なる領域）には半導体層 1 2 を配置しないようにしている。このように半導体層 1 2 を配置することで、半導体層 1 2 を構成するグラフェンのディラックポイントを効率的にシフトさせることができ、高感度に遠赤外線を検出することができる。

30

【 0 0 8 2 】

以上は x 軸方向の偏光の遠赤外線を検出する場合の半導体層 1 2 の平面パターンについて述べたが、無偏光の遠赤外線を検出する場合の半導体層 1 2 の平面パターンについて説明する。

【 0 0 8 3 】

まず、吸収層 1 4 の単位構造がボウタイ型形状の場合を考える。ボウタイ型形状を単位構造とする吸収層 1 4 に、無偏光の遠赤外線が入射した場合、y 軸方向の偏光に対しては、図 1 9 のように、波長 10 μm の遠赤外線をあまり吸収することはできないが、x 軸方向の偏光に対しては、図 1 4 のように波長 10 μm の遠赤外線を効率的に吸収できる。

40

【 0 0 8 4 】

図 2 0 は、無偏光の遠赤外線を吸収した場合に発生する電界の強度分布を示したグラフである。この図 2 0 のように、無偏光の遠赤外線の場合でも、ボウタイ型形状の底辺 1 4 a 近傍の領域では負の強い電界強度を示し、吸収層 1 4 と重なる領域では電界強度が非常に弱くなる。

【 0 0 8 5 】

したがって、図 1 3 と同様に半導体層 1 2 の平面パターンをストライプ状のパターンとすれば、無偏光の場合においても高感度に遠赤外線を検出することができる。

【 0 0 8 6 】

次に、吸収層 1 4 の単位構造が正方形の場合を考える。正方形を単位構造とする吸収層

50

14では、その形状の対称性から、x軸方向の偏光もy軸方向の偏光も同じ透過スペクトル(図16参照)となり、無偏光であっても効率的に波長5 μ mの遠赤外線を吸収できる。

【0087】

また、図21は、吸収層14の単位構造を正方形とした場合において、無偏光の遠赤外線が入射したときの電界強度分布を示した図である。図21のように、吸収層14と重なる領域は電界強度が弱く、一方で正方形の各辺の近傍の領域では負の強い電界強度を示す。x軸方向に偏光した遠赤外線が入射した場合には、x軸方向に直交する辺の近傍のみが負の強い電界強度を示したが、無偏光の場合には、全ての辺の近傍で負の強い電界強度を示している。

10

【0088】

したがって、吸収層14の単位構造が正方形の場合には、図15と同様のストライプ状でも高感度に無偏光の遠赤外線を検出することはできるが、格子状とすることでさらに高感度に無偏光の遠赤外線を検出することができる。図22は、半導体層12を格子状とした場合の平面パターンを示す。図22のように、半導体層12の平面パターンは、吸収層14の正方形と正方形の間の領域にx軸方向に伸びるストライプと、同じく正方形と正方形の間の領域にy軸方向に伸びるストライプとが直交して交差する格子状のパターンである。このような格子状のパターンとすることで、遠赤外線の吸収により発生する電界の強い領域(正方形の各辺の近傍の領域)に半導体層12を配置し、電界の弱い領域(吸収層14と重なる領域)には半導体層12を配置しないようにしている。

20

【0089】

以上の検討から、半導体層12の平面パターンは、吸収層14の平面パターンと重なる領域には設けないようにし、吸収層14の周の少なくとも一部の近傍に位置するようなパターンとすれば、遠赤外線の吸収により発生する電界のうち、電界強度の強い領域に半導体層12を晒すことができ、効率的に遠赤外線を検出できることがわかる。特に、吸収層14の単位構造の周の形状を、ある1組の平行な対辺とそれに直交する1組の対辺とを有した形状(たとえば正方形、長方形、八角形など)とし、半導体層12の平面パターンを、それらの辺に沿った格子状のパターンとすれば、無偏光の遠赤外線について高感度に検出することができる。

【0090】

なお、吸収層14と半導体層12のパターンが完全に重ならないようにする必要はなく、多少の重なりはあってもよい。ただし、平面視において吸収層14と半導体層12との重なり幅は200nm以下とすることが望ましい。より望ましくは100nm以下、さらに望ましくは20nm以下である。最も望ましいのは重ならないようにすることである。また、吸収層14と半導体層12とのパターンに間隔が開きすぎると、遠赤外線の吸収により吸収層14で電界が発生したときに半導体層12に係る電圧が弱くなり、遠赤外線の検出感度が悪くなる。そのため、平面視において吸収層14と半導体層12との間隔は100nm以下とすることが望ましい。より望ましくは50nm以下、さらに望ましくは20nm以下である。

30

【0091】

また、実施例1の電磁波検出器は、遠赤外線の検出に用いるものであったが、本発明の電磁波検出器は、任意の波長の電磁波の検出に用いることができる。たとえば、紫外線、可視光、赤外線、テラヘルツ波の検出に用いることができる。特に、赤外線(とりわけ中赤外線や遠赤外線)の検出に有効である。中赤外から遠赤外領域を高感度に検出できる検出器が従来存在していなかったためである。

40

【産業上の利用可能性】

【0092】

本発明の電磁波検出器は、各種波長の電磁波の検出に用いることができる。

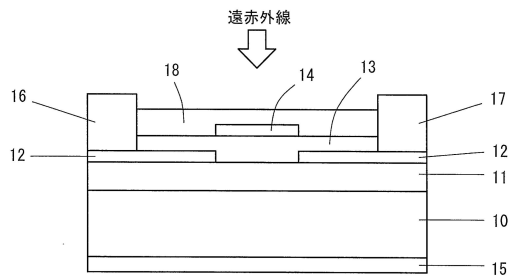
【符号の説明】

【0093】

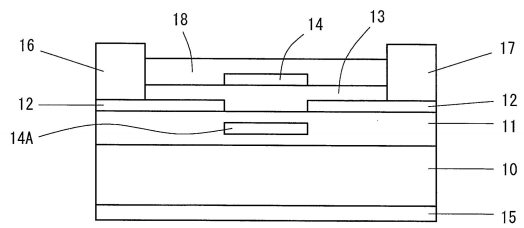
50

- 10 : 基板
- 11 : 第1絶縁膜
- 12 : 半導体層
- 13 : 第2絶縁膜
- 14 : 吸収層
- 15 : ゲート電極
- 16 : ソース電極
- 17 : ドレイン電極
- 18 : 第3絶縁膜

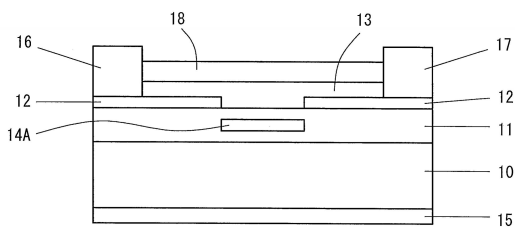
【図1】



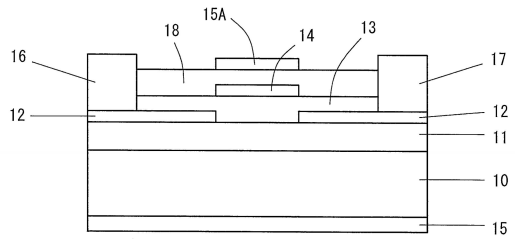
【図3】



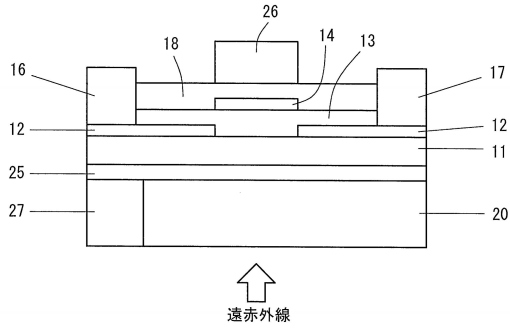
【図2】



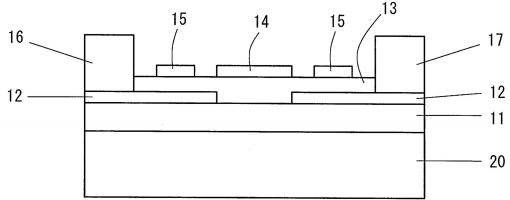
【図4】



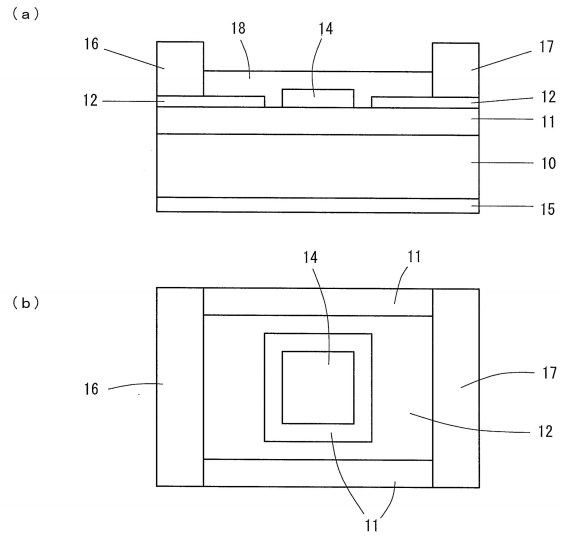
【図5】



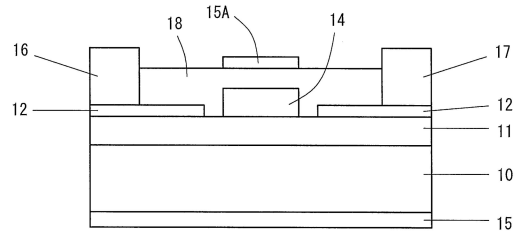
【図6】



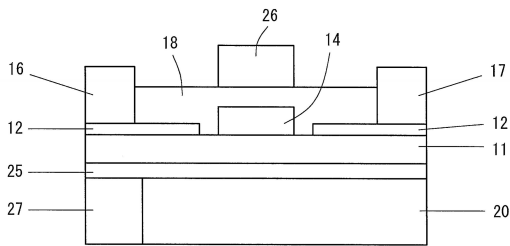
【図7】



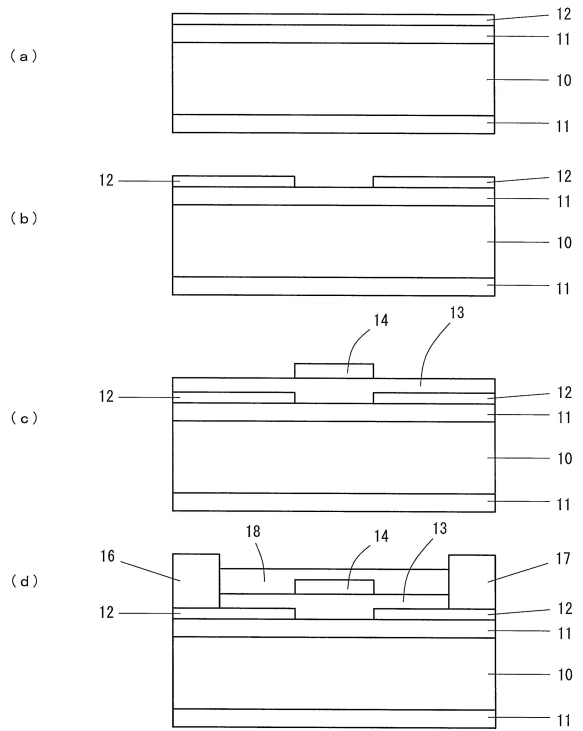
【図8】



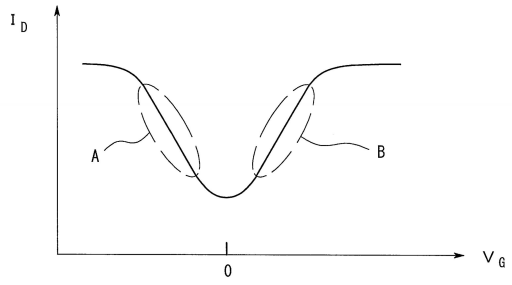
【図9】



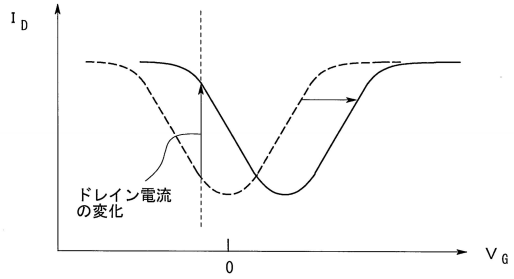
【図10】



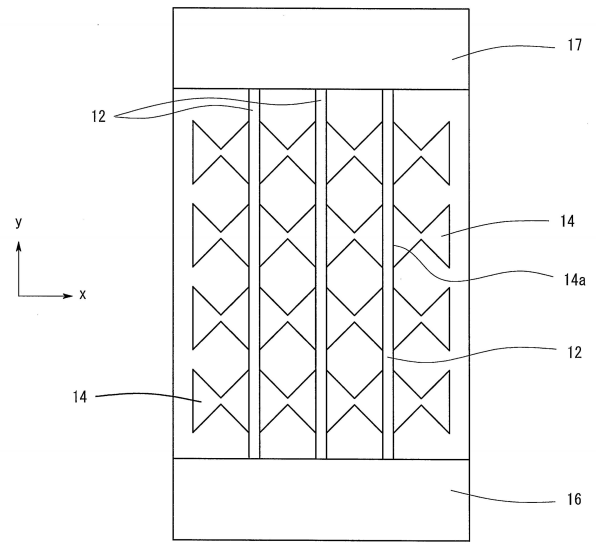
【図 1 1】



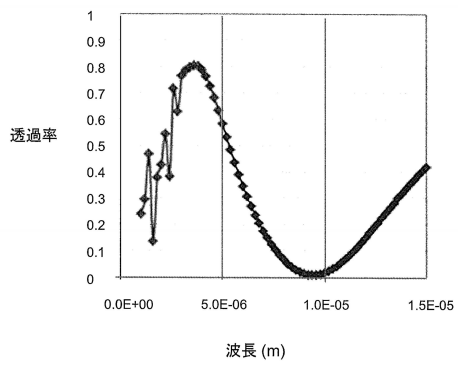
【図 1 2】



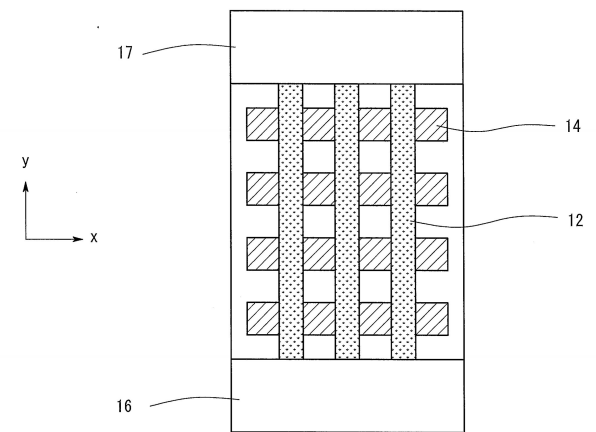
【図 1 3】



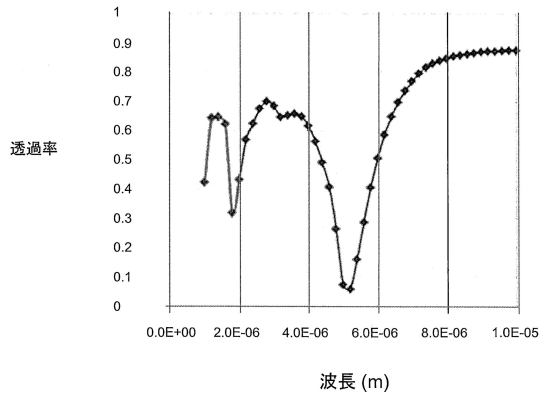
【図 1 4】



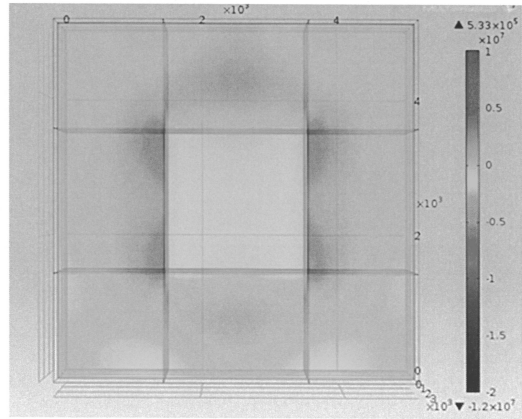
【図 1 5】



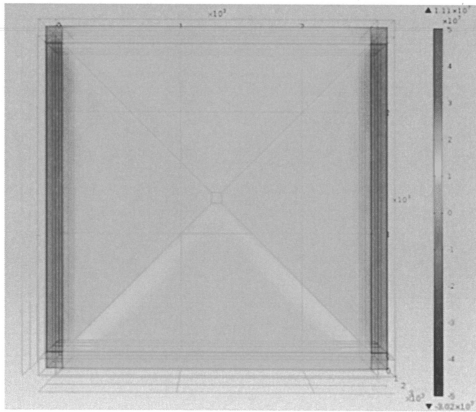
【 図 1 6 】



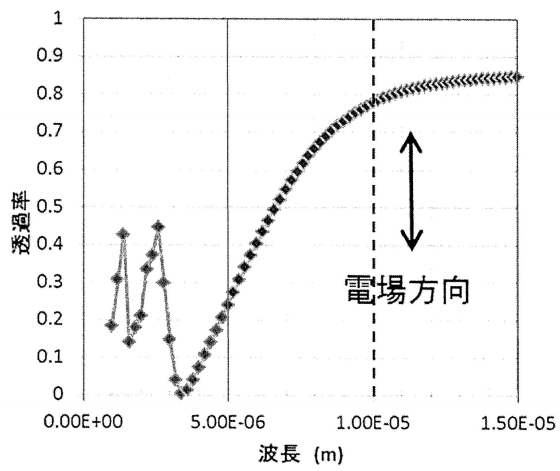
【 図 1 8 】



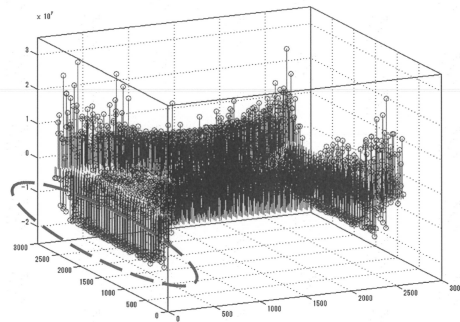
【 図 1 7 】



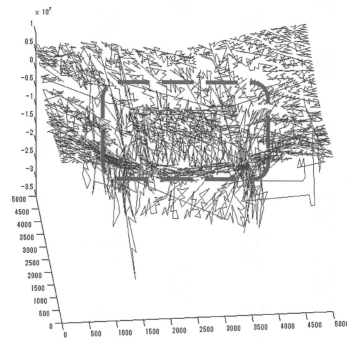
【 図 1 9 】



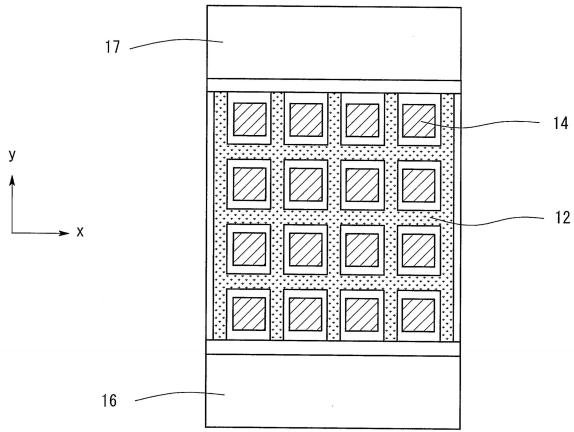
【 図 2 0 】



【 図 2 1 】



【 2 2 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
 G 0 1 J 1/02 C
 H 0 1 L 31/10 A

(72)発明者 安藤 道則
 愛知県長久手市横道41番地の1 株式会社豊田中央研究所内
 (72)発明者 山下 達弥
 愛知県長久手市横道41番地の1 株式会社豊田中央研究所内
 (72)発明者 小島 永児
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内
 (72)発明者 青木 敬
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内
 (72)発明者 加納 一彦
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地 株式会社デンソー内

審査官 小澤 瞬

(56)参考文献 国際公開第2016/121408(WO,A1)
 国際公開第2015/188634(WO,A1)
 特表2012-529768(JP,A)
 特開2015-045629(JP,A)
 特表2013-502735(JP,A)
 米国特許出願公開第2013/0285018(US,A1)
 独国特許出願公開第102011076840(DE,A1)
 MIAO Jinshui et al., Surface Plasmon-Enhanced Photodetection in Few Layer MoS2 Phototransistors with Au Nanostructure Arrays, Small, 2015年 5月, Vol.11, No.20, 2392-2398, URL, doi:10.1002/smll.201403422

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 J 1 / 0 0 - G 0 1 J 1 / 6 0
 G 0 1 J 1 1 / 0 0
 G 0 1 N 2 1 / 0 0 - G 0 1 N 2 1 / 0 1
 G 0 1 N 2 1 / 1 7 - G 0 1 N 2 1 / 6 1
 H 0 1 L 3 1 / 0 0 - H 0 1 L 3 1 / 0 2
 H 0 1 L 3 1 / 0 2 3 2
 H 0 1 L 3 1 / 0 2 4 8
 H 0 1 L 3 1 / 0 2 6 4
 H 0 1 L 3 1 / 0 8
 H 0 1 L 3 1 / 1 0
 H 0 1 L 3 1 / 1 0 7 - H 0 1 L 3 1 / 1 0 8
 H 0 1 L 3 1 / 1 1 1
 H 0 1 L 3 1 / 1 8
 H 0 1 L 5 1 / 4 2
 J S T P l u s / J M E D P l u s / J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I I)