

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6830574号  
(P6830574)

(45) 発行日 令和3年2月17日(2021.2.17)

(24) 登録日 令和3年1月29日(2021.1.29)

(51) Int.Cl.		F I			
HO 1 L	31/10	(2006.01)	HO 1 L	31/10	A
GO 1 J	1/02	(2006.01)	GO 1 J	1/02	B

請求項の数 9 (全 15 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2016-27911 (P2016-27911)</p> <p>(22) 出願日 平成28年2月17日 (2016.2.17)</p> <p>(65) 公開番号 特開2017-147323 (P2017-147323A)</p> <p>(43) 公開日 平成29年8月24日 (2017.8.24)</p> <p>審査請求日 平成31年1月10日 (2019.1.10)</p>	<p>(73) 特許権者 000004237 日本電気株式会社 東京都港区芝五丁目7番1号</p> <p>(73) 特許権者 504137912 国立大学法人 東京大学 東京都文京区本郷七丁目3番1号</p> <p>(74) 代理人 100077838 弁理士 池田 憲保</p> <p>(74) 代理人 100129023 弁理士 佐々木 敬</p> <p>(74) 代理人 100147809 弁理士 松田 順一</p> <p>(72) 発明者 各務 惣太 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
--	---

(54) 【発明の名称】 赤外線検出素子、赤外線検出器および赤外線検出素子の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体から成る中間層と、前記中間層中に形成され、複数の量子ドットを含む少なくとも一層の量子ドット層とを含む光吸収層を有し、前記量子ドット層の量子閉じ込みによって形成される基底準位と励起準位とのエネルギー差に相当する検出波長の赤外線を検出する赤外線検出素子であって、

前記量子ドット層は、

下部量子井戸層と、

該下部量子井戸層上に成長された前記量子ドットと、

該量子ドットの周囲に形成された埋込層と、

該埋込層に添加されたドナー不純物であるドーパント原子と、

前記埋込層上に形成された上部量子井戸層とから成り、

前記量子ドットは、その高さが前記埋込層の厚さ以下であり、

前記ドーパント原子は、前記埋込層および前記量子ドットの上部に存在することを特徴とする赤外線検出素子。

【請求項2】

下部障壁層と、上部障壁層とをさらに有し、

前記下部量子井戸層は、前記下部障壁層の上部に形成され、

前記上部障壁層は、前記上部量子井戸層の上に形成されている請求項1に記載の赤外線検出素子。

## 【請求項 3】

前記中間層は、A l G a A s から成り、  
 前記下部量子井戸層および前記上部量子井戸層は、G a A s から成り、  
 前記埋込層は、G a A s から成り、  
 前記量子ドットは、I n G a A s から成り、  
 前記ドナー不純物は、S i から成る請求項 1 または 2 に記載の赤外線検出素子。

## 【請求項 4】

前記下部障壁層および前記上部障壁層は、A l G a A s から成る請求項 2 に記載の赤外線検出素子。

## 【請求項 5】

請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の赤外線検出素子を複数素子有し、該複数の赤外線検出素子が 1 次元または 2 次元アレイ状に配置されて成る赤外線検出器。

## 【請求項 6】

半導体から成る中間層と、前記中間層中に形成され、複数の量子ドットを含む少なくとも一層の量子ドット層とを含む光吸収層を有し、前記量子ドット層の量子閉じ込めによって形成される基底準位と励起準位のエネルギー差に相当する検出波長の赤外線を検出する赤外線検出素子の製造方法であって、

半導体基板上に、前記中間層の下部層を形成する工程と、

前記中間層の下部層が形成された半導体基板の上に、下部量子井戸層を形成する工程と、

前記下部量子井戸層上に、複数の量子ドットを成長させる工程と、

前記量子ドットが成長された下部量子井戸層上に、埋込層を前記量子ドットの上端部が突出する厚さで形成する工程と、

前記埋込層の表面から突出した前記量子ドットの上端部を、前記埋込層形成工程時よりも高温下に維持して蒸発または水平方向に拡散させることにより、平坦化する工程と、

平坦化された前記埋込層の表面にドナー不純物であるドーパント原子を添加する工程と

、前記ドーパント原子が添加された前記埋込層上に、上部量子井戸層を形成する工程と、

前記上部量子井戸層上に、前記中間層の上部層を形成する工程とを有することを特徴とする赤外線検出素子の製造方法。

## 【請求項 7】

前記下部量子井戸層形成工程前に、前記中間層の下部層上に、下部障壁層を形成する工程をさらに有すると共に、

前記中間層の上部層形成工程前に、前記上部量子井戸層上に、上部障壁層を形成する工程をさらに有し、

前記下部量子井戸層形成工程では、前記下部障壁層を介して、前記中間層の下部層上に前記下部量子井戸層を形成し、

前記中間層の上部層形成工程では、前記上部障壁層を介して、前記上部量子井戸層上に前記中間層の上部層を形成する請求項 6 に記載の赤外線検出素子の製造方法。

## 【請求項 8】

前記中間層は、A l G a A s から成り、

前記下部量子井戸層および前記上部量子井戸層は、G a A s から成り、

前記埋込層は、G a A s から成り、

前記量子ドットは、I n G a A s から成り、

前記ドナー不純物は、S i から成る請求項 6 または 7 に記載の赤外線検出素子の製造方法。

## 【請求項 9】

前記下部障壁層および前記上部障壁層は、A l G a A s から成る請求項 7 に記載の赤外線検出素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

10

20

30

40

50

## 【0001】

本発明は、光吸収層内に半導体量子ドットを含む赤外線検出素子に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

熱源の検知や温度測定、特定のガス検知、あるいは、暗視用カメラのセンサなどを目的として、赤外線検出素子や、それを利用した赤外領域における光検出技術が近年注目を集めている。また、複数の素子を線状及び2次元アレイ状に配置してイメージセンサとした赤外線検出器が盛んに開発されている。

## 【0003】

赤外線検出素子の材料や構造には複数あり、その1つが、光吸収層に半導体量子ドットを含む量子ドット赤外線検出素子(Quantum Dot Infrared Photodetector、以下、「QDIP」とも称する)である。

## 【0004】

QDIPは、量子ドットの周囲が、量子ドットを構成する材料よりも大きなバンドギャップを持つ半導体で3次的に囲まれた構造を有している。また、量子ドットの領域に電子および正孔が強く閉じ込められている。その結果、量子ドット中に離散的なエネルギー準位が形成される。QDIPは、それらの準位のうち、伝導帯の複数の電子サブバンド準位を利用し、サブバンド間エネルギー差に相当する検出波長を持つ赤外線を検知する。

## 【0005】

QDIPはその特性上、一般的に波長に対して離散的な分光感度を持つ。熱検知においては温度に依存したスペクトルの特定を目的とし、また、ガス検知においてはガスの物質に依存した特定のスペクトルを抽出するため、QDIPには目的に即した波長において狭帯域な波長特性、即ち狭線幅な分光感度ピークを持つことが望まれる。また、QDIPは、光照射に伴う電気伝導度の変化を検出する光伝導型の赤外線検出素子であり、その性能指標である比検出能 $D^*$ は、以下の式1で表される。

## 【数1】

$$D^* = \frac{R_p \sqrt{A \Delta f}}{i_n} \quad \dots \text{(式1)}$$

## 【0006】

ここで、 $R_p$ は検出波長における受光感度、 $A$ は素子の受光面積、 $f$ は素子の帯域幅、 $i_n$ はノイズ電流である。QDIPにおいて、ノイズ電流は主に暗電流によって決まり、ノイズ電流 $i_n$ は以下の式2で表される。

## 【数2】

$$i_n = \sqrt{4egI} \quad \dots \text{(式2)}$$

## 【0007】

ここで、 $e$ は素電荷、 $g$ は光伝導利得、 $I$ は暗電流である。QDIPにおいて、所望の波長に対して高い比検出能を有する素子を実現するためには、特定波長における受光感度を向上させると共に、素子の低暗電流化が求められる。

## 【0008】

一方、分光感度ピークの線幅は、主に量子ドットの大きさ、特に高さのばらつきに起因した不均一広がりに映される。量子ドットの高さばらつきが大きいほど分光感度ピークの線幅が大きくなるため、狭帯域な波長特性の実現には、量子ドットの高さばらつきを抑制することが必要となる。

## 【0009】

このような量子ドットの高さばらつきを抑制するための方法が、例えば特許文献1に開示されている。非特許文献1に開示された技術においては、組成として $I_n$ を含む量子ド

10

20

30

40

50

ットの成長中、ある制御された高さまでGaAsを埋め込み、基板温度を一時的に上昇させることにより、ある高さ以上の量子ドットの頂部を蒸発させることで、量子ドットの高さ均一化を図っている。

【0010】

一方、受光感度向上のための手法の1つとして、例えば、n型ドーパントであるSi原子の注入即ちドナー不純物のドーピングが挙げられる。受光感度は、素子への光照射強度と、それに伴い流れる電流との比であり、QDIPにおいては量子ドットの光の吸収効率に依存する。光の吸収効率に寄与する要因の一つとして、量子ドットの基底状態の電子数がある。量子ドットの成長後、量子ドットの直上にドナーとなるSi原子を添加する。これにより、量子ドットの基底状態に電子が1つ以上存在する確率を高めることで光の吸収に寄与する量子ドットの数が増加し、結果として、素子の受光感度が向上する。しかし、ドーピングにより量子ドットの基底状態以外に導入された電子は暗電流の原因となり、ノイズ電流を増加させる要因となる。したがって、比検出能向上のためには、適切な位置に適切な量のドーピングを施す必要がある。

10

【0011】

尚、QDIPにおいてドーピングによる受光感度向上を図った赤外線検出素子が、例えば非特許文献1に公開されている。非特許文献1に開示された技術においては、QDIPの1つである量子ドットが量子井戸内に存在するDWELL(Dot-in-WELL)構造を採用し、量子ドットの直上にn型ドーパントを添加することで光吸収に関与する量子ドットの割合を増やし、素子の高感度化を図っている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0012】

【特許文献1】特許第4066002号公報

【非特許文献】

【0013】

【非特許文献1】S. Krishnaほか、APPLIED PHYSICS LETTERS 83巻、14号、2745~2747頁(2003年発行)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

30

【0014】

QDIPの性能向上のための狭線幅化および比検出能向上のためには、非特許文献1のドーピング手法と特許文献1の狭線幅化とを併せて行う必要があるが、成長された量子ドットの直上にドーピングを行い、薄い埋込層形成後に基板温度を上昇させて埋め込まれていない量子ドット頂部のInAsまたはInGaAsの蒸発を行う従来の手法においては、温度上昇によりドーパント原子が周囲の層に拡散して量子ドット内に電子が束縛されないため、受光感度が増加せず、また、拡散した電子により暗電流が増加するため、結果として比検出能が向上しないという課題があった。

【0015】

それ故、本発明の目的は、狭線幅かつ優れた比検出能を持つ赤外線検出素子およびその製造方法を提供することである。

40

【課題を解決するための手段】

【0016】

本発明によれば、半導体から成る中間層と、前記中間層中に形成され、複数の量子ドットを含む少なくとも一層の量子ドット層とを含む光吸収層を有し、前記量子ドット層の量子閉じ込めによって形成される基底準位と励起準位とのエネルギー差に相当する検出波長の赤外線を検出する赤外線検出素子であって、前記量子ドット層は、下部量子井戸層と、該下部量子井戸層の上に成長された前記量子ドットと、該量子ドットの周囲に形成された埋込層と、該埋込層に添加されたドナー不純物であるドーパント原子と、前記埋込層の上に形成された上部量子井戸層とから成り、前記量子ドットは、その高さが前記埋込層の厚

50

さ以下であり、前記ドーパント原子は、前記埋込層および前記量子ドットの上部に存在することを特徴とする赤外線検出素子が得られる。

【0017】

本発明によればまた、半導体から成る中間層と、前記中間層中に形成され、複数の量子ドットを含む少なくとも一層の量子ドット層とを含む光吸収層を有し、前記量子ドット層の量子閉じ込めによって形成される基底準位と励起準位のエネルギー差に相当する検出波長の赤外線を検出する赤外線検出素子の製造方法であって、半導体基板上に、前記中間層の下部層を形成する工程と、前記中間層の下部層が形成された半導体基板上に、下部量子井戸層を形成する工程と、前記下部量子井戸層上に、複数の量子ドットを成長させる工程と、前記量子ドットが成長された下部量子井戸層上に、埋込層を前記量子ドットの上端部が突出する厚さで形成する工程と、前記埋込層の表面から突出した前記量子ドットの上端部を、前記埋込層形成工程時よりも高温下に維持して蒸発または水平方向に拡散させることにより、平坦化する工程と、平坦化された前記埋込層の表面に前記ドーパント原子を添加する工程と、前記ドーパント原子が添加された前記埋込層上に、前記上部量子井戸層を形成する工程と、前記上部量子井戸層上に、前記中間層の上部層を形成する工程とを有することを特徴とする赤外線検出素子の製造方法が得られる。

10

【発明の効果】

【0018】

本発明による赤外線検出素子は、優れた比検出能を有することに加え、狭線幅な分光感度ピークを有している。

20

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明の実施形態1による赤外線検出器の構造を示す断面図である。

【図2】本発明の実施形態1による赤外線検出器における量子ドット層の拡大図である。

【図3】本発明の実施形態1による赤外線検出器における量子ドット層の伝導帯のエネルギーバンドおよび量子準位を示す図である。

【図4】本発明による赤外線検出器の製造方法を説明するための図である。

【図5】(a)～(f)は、本発明の実施形態1による赤外線検出器における量子ドット層の製造方法を説明するための図である。

【図6】本発明の実施形態1による赤外線検出素子の動作原理を説明するための図である。

30

【図7】本発明の実施形態1による赤外線検出器と従来の赤外線検出器との比検出能の測定結果である。

【図8】本発明の実施形態2による赤外線検出器における量子ドット層を示す断面図である。

【図9】本発明の実施形態2による赤外線検出器における量子ドット層の伝導帯のエネルギーバンドおよび量子準位を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

本発明による赤外線検出素子は、中間層と、前記中間層中に形成され、複数の量子ドットを含む少なくとも一層の量子ドット層とを含む光吸収層を有し、前記量子ドット層の量子閉じ込めによって形成される基底準位と励起準位のエネルギー差に相当する検出波長の赤外線を検出する。

40

【0021】

特に、本発明において、量子ドット層42は、量子ドット42Aとドーパント42Eと下部量子井戸層42Bと上部量子井戸層42Fとから成り、前記量子ドット42Aは、下部量子井戸層42Bの上に成長され、その周囲を埋込層42Dで覆い、前記量子ドット42Aの高さは前記埋込層42Dの厚さ以下であって、前記埋込層42Dの上部および前記量子ドット42Aの頂部にドーパント原子が存在し、その上部に上部量子井戸層42Fが積層されていることを特徴とする。

50

## 【 0 0 2 2 】

また量子ドット42Aは、下部量子井戸層42Bの上に成長された量子ドット42Aを埋込層42Dで覆い、埋込層42Dの厚さ以上に突出した量子ドット42Aの頂部を平坦化し、その上部にドーパント原子を添加した後、上部量子井戸層42Fを積層してある。

## 【 0 0 2 3 】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態をさらに詳細に説明する。

## 【 0 0 2 4 】

[ 実施形態 1 ]

[ 構成 ]

図1は、本発明の実施形態1による赤外線検出器200の構造を説明する断面図である。赤外線検出器200は、共通の半導体基板1、緩衝層2および下部コンタクト層3上にて、取得したい赤外線画像の1画素に相当する赤外線検出素子100が複数個、x方向およびy方向に並んだ構造である。ただし、図1においては、1つの赤外線検出素子100のみを示している。

10

## 【 0 0 2 5 】

赤外線検出器200は、半導体基板1、緩衝層2、下部コンタクト層3、光吸収層4、上部コンタクト層5、下部電極7、上部電極8などを備えている。

## 【 0 0 2 6 】

具体的には、半導体基板1の上に緩衝層2が形成されている。緩衝層2は、半導体基板1と同じ半導体材料から構成されている。また、緩衝層2の上に下部コンタクト層3が形成されている。下部コンタクト層3は、n型半導体を主材料として構成されている。尚、下部コンタクト層3は、半導体基板1上に、緩衝層2を介さず直接形成されていてもよい。また、下部コンタクト層3上に光吸収層4および下部電極7が形成されている。半導体基板1がn型である場合には、この上に直接、下部電極7が形成されても構わない。さらに、光吸収層4の上に上部コンタクト層5、および上部電極8が形成されている。上部コンタクト層5は、n型半導体を主材料として構成されている。

20

## 【 0 0 2 7 】

光吸収層4と上部コンタクト層5は、エッチングプロセス等によりその一部を取り除くことにより素子分離が行われている。この工程により、複数の赤外線検出素子100が形成される。赤外線検出素子100は、以下の原理で赤外線を検出する。電圧源601によって上部電極8と下部電極7との間に適切な電圧を印加した条件下で、上部コンタクト層5の上側から赤外線Xが入射されると、光吸収層4がその構造に応じた波長の赤外線を吸収し、その結果、上部電極8と下部電極7との間に光電流が流れ、電流計602を用いて検出される。その際、入射赤外線Xの検出効率を高めるために、上部コンタクト層5の上側や半導体基板1の下側に反射防止膜を形成するといった工夫をしてもよい。また、入射赤外線Xは半導体基板1の下側から入射してもよい。

30

## 【 0 0 2 8 】

光吸収層4は、n型ドーパされた下部コンタクト層3上にて、i型の間層41と、複数の量子ドット42A(図2)を含む量子ドット層42とが交互に形成されて成る。具体的には、下部コンタクト層3上に、中間層41、量子ドット層42の順に、各層が複数回繰り返して形成されている。このような積層をできるだけ多く繰り返すことにより、光吸収層4における赤外線の吸収効率を大きくすることができる。尚、図1では略して4回の繰り返して積層が示されている。また、図1では、説明の便宜上、中間層41と、量子ドット層42における量子ドット42A間とを明確に区別して描いているが、実際には、両層間に明確な界面が存在するわけではない。

40

## 【 0 0 2 9 】

次に、さらに図2を参照して、本発明の実施形態1における量子ドット層42を、詳細に説明する。

## 【 0 0 3 0 】

図2は本発明の実施形態1による赤外線検出器200における量子ドット層42近傍の

50

積層構造一組のみを抜き出して示した断面図の一例である。

【0031】

量子ドット層42は、複数の量子ドット42Aと、濡れ層42Cと、埋込層42Dと、ドーパント42Eと、下部量子井戸層42Bと、上部量子井戸層42Fとから構成されている。

【0032】

量子ドット42Aは、濡れ層42Cを介して下部量子井戸層42Bの上部に形成されている。この濡れ層42Cは、量子ドット42Aを形成する過程で付随して自然に形成される。尚、図示はしないが、量子ドット42Aの周囲にも濡れ層が形成されている。即ち、量子ドット42Aは、その下部および周囲が、濡れ層によって覆われている。製造法の違いにより濡れ層42Cが形成されない場合、本発明において濡れ層42Cを省いても構わない。

10

【0033】

さらに、これらの量子ドット42A、濡れ層42Cを埋め込む様に、それらの上部に埋込層42Dが積層されている。最初に形成した段階では量子ドット42Aの高さにはばらつきがあるが、埋込層42Dを積層後、熱処理を施し、量子ドット42Aの埋込層42Dの厚さより高い部分を除去することにより量子ドット42Aの高さは埋込層42Dの厚さ以下となる。

【0034】

熱処理後の埋込層42Dおよび量子ドット42Aの上部には、ドーパント42Eが添加され、さらにその上部に上部量子井戸層42Fが積層された後、図1に示した様に中間層41が積層されている。

20

【0035】

本実施形態における各層の具体的な組成例として、量子ドット42Aと濡れ層42CとはInGaAsから成り、中間層41はAlGaAsから成り、埋込層42Dと下部量子井戸層42Bと上部量子井戸層42FとはGaAsから成っている。

【0036】

[製造方法]

次に、図4ならびに図5(a)~(f)をさらに参照して、本発明の実施形態1による赤外線検出器200の製造方法を説明する。

30

【0037】

図4は、赤外線検出器200を製造する際に用いられる分子線エピタキシャル(MBE)装置の概略を示している。尚、図4においては、本発明に特徴的な製造方法を説明するために必要な部分のみを記している。

【0038】

図4に示されるように、半導体基板1として、面方位が(001)面の半絶縁性ノンドープGaAs基板を用意し、この基板をMBE装置の真空チャンバ300内の基板ホルダ301に装着する。基板ホルダ301は、ヒータを介して半導体基板1を高温にすることができると共に、供給される原料が原料供給源の位置に拠らず基板上で均一な厚さになるように、半導体基板1を回転方向r301に回転させる回転機構が付与されている。第1の原料供給源302からはIII族原料であるInが、第2の原料供給源303からはIII族原料であるGaが、第3の原料供給源304からはV族原料であるAsが、それぞれ供給される。以下、特に記載の無い場合には基板回転を行う。

40

【0039】

続いて、GaAsから成る半導体基板1に第3の原料供給源304からV族原料であるAsを照射しながら、この半導体基板1の温度を上昇させることにより、半導体基板上に形成された自然酸化膜を除去する。酸化膜除去処理を行った後、基板温度を580程度に温度設定し、厚さ500nmの緩衝層2を積層する。緩衝層2は、半導体基板1と同じノンドープGaAsから構成される。

【0040】

50

次に、Si原子を濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度ドーピングしたGaAsで構成されるn型の下部コンタクト層3を、厚さが500nmだけ積層する。

【0041】

さらに、ノンドープのAlGaAsで構成されるi型の間層41の下部層を、厚さ50nmだけ積層した後、ノンドープのGaAsから成る下部量子井戸層42Bを積層する。下部量子井戸層42Bの厚さは代表値としては3nmである。

【0042】

続いて、基板温度を490程度まで低下させ、第3の原料供給源304からAsを照射しながら、第1の原料供給源302からInを、第2の原料供給源303からはGaを厚さが2原子層相当となる量だけ供給し、InGaAsから成る量子ドット42Aを形成する(図5(a))。このとき、InGaAs(量子ドット42A)とGaAs(下部量子井戸層42B)との格子定数の違いから発生する歪みによって、InGaAs層は2次元薄膜ではなく島状に3次的に成長する。この成長モードはSK(Stranski-Krastanov)モードと呼ばれ、この様式にしたがって量子ドット42Aおよび濡れ層42Cが形成される。その結果、量子ドットが高密度に平面上に並んだ量子ドット42Aの層が形成される。量子ドットの典型的な直径は20~30nm、高さ3~7nm程度であり、1平方センチメートルあたりの数密度は $1 \times 10^{11}$ 個程度である。

10

【0043】

量子ドット42Aを成長させた後、InおよびGaの供給を停止し基板温度を50程度下げ、埋込層42Dを積層する(図5(b))。本実施形態において、埋込層42Dは厚さが5nmであり、材料はGaAsである。

20

【0044】

その後、再び基板温度を少なくとも30以上上げ、Asのみを照射した状態で、基板温度を維持した状態で数分間放置する。尚、この際に適用する温度は、量子ドット42Aおよび埋込層42Dがダメージを受けないように選定する。量子ドット42Aは高さにはばらつきがあるため、幾つかの量子ドットにおいてその頂部は埋込層42Dから突出し、またその突出部分の高さにもばらつきがあるが、本工程により、埋込層42Dから突出している量子ドット42Aにおける頭頂部が蒸発、あるいは、水平方向に拡散して平坦化され、その結果、図5(c)に示されるように、量子ドット42Aの高さは均一化され、埋込層42Dの厚さに略一致することになる。

30

【0045】

続いて、図5(d)に示されるように、埋込層42Dおよび平坦化された量子ドット42の上部にドーパント42Eのドーピングを行う。ドーパント42Eは例えばSi原子を照射することにより表面に散布し、その散布面密度は量子ドットの面密度 $N \text{ cm}^{-2}$ に対して本実施形態ではN程度である。

【0046】

次に、図5(e)に示されるように、ドーパント42Eを導入した埋込層42Dの上部に、5nmのGaAsから成る上部量子井戸層42Fを積層した後、基板温度を580程度に設定し、50nmのAlGaAsから成る上部の間層41の上部層を成長する(図5(f))。

40

【0047】

以後、光の吸収効率を上げるため、図5(a)~(f)に示された上記の手順と同様にして、中間層41、下部量子井戸層42B、量子ドット42A、濡れ層42C、埋込層42Dおよび成長中断工程、ドーパント42E、上部量子井戸層42F、中間層41の積層行程を10回以上繰り返し、図1に示される光吸収層4を形成する。

【0048】

次に、光吸収層4の上に、厚さが200nmでSi原子を濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度ドーピングしたGaAsで構成されるn型の上コンタクト層5(図1)を積層し、赤外線検出器用ウエハの成長工程を終了する。

【0049】

50

続いて、作製した赤外線検出器用ウエハを加工し、図1に示された赤外線検出器200の基本構成を作製する工程について述べる。作製には、フォトリソグラフィ法、ドライエッチングまたはウエットエッチング法を利用する。まず、ウエハにレジストをスピコート法により塗布し、フォトリソグラフィ法により素子分離のための例えば正方形パターンを形成する。このパターンをマスクとし、ドライエッチング法もしくはウエットエッチング法により、図1に示されるように上部コンタクト層5、光吸収層4および下部コンタクト層3の途中までエッチングし、下部コンタクト層3の表面の一部を露出させる。

#### 【0050】

本工程により、各素子が分離され、分離された構造が赤外線検出素子100の1つになる。各赤外線検出素子100の受光面の直径は、用途によって異なるが、典型的には200 $\mu$ mから300 $\mu$ m程度である。

10

#### 【0051】

次いで、上部コンタクト層5と下部コンタクト層3に電極を形成すべくAuGe/Ni/Auから成るアロイオーミック電極を形成し、図1に示されるような上部電極8および下部電極7とする。上部電極8および下部電極7は、それぞれ、リソグラフィ、金属蒸着、レジスト剥離などの工程を含むリフトオフ法によって形成し、赤外線を透過する窓構造および電極構造を所望の形状で所望の位置に形成する。

#### 【0052】

以上の工程により、図1に示された、実施形態1による赤外線検出器200の基本構成が完成する。

20

#### 【0053】

尚、上記製造方法においては、量子ドット42Aを含む光吸収層やそれらの周辺構造をMBE法によって形成しているが、成長方法はこの方法に限定されるものではない。たとえば、これらの構造を、有機金属気相成長法(MOCVD法)等の他の結晶成長法を用いてもよい。また、中間層41、量子ドット42A、埋込層42D、濡れ層42C、下部量子井戸層42B、上部量子井戸層42Fなどを含む本発明の材料組成、厚さ、材料構成等は、本発明の効果を満たすものであれば上記に限定されることはない。

#### 【0054】

##### [動作原理]

次に、さらに図6を参照して、本発明の実施形態1による赤外線検出器200の動作原理を説明する。

30

#### 【0055】

図6に、複数の量子ドット層42、中間層41によって構成される光吸収層4の電子のエネルギーバンド構造を示す。図6における左右方向が図1での上下方向に相当し、図6の左側が下部コンタクト層3側、右側が上部コンタクト層5側を表している。尚、図6は、電圧源601からの負バイアス電圧印加時のエネルギーバンド図である。

#### 【0056】

図6を参照すると、量子力学に基づけば量子ドット層42に束縛された電子は離散的なエネルギー準位しかとることができない。「基底準位」と「励起準位」のエネルギー差に等しいエネルギーを持った入射赤外光Xを基底状態の電子 $e^-$ が吸収すると、電子 $e^-$ は「励起準位」へと遷移する。この「励起準位」への遷移した電子 $e^-$ が「伝導帯連続状態」に抜け出し、上部コンタクト層5に到達することでそれに伴う電流値の変化を検出し、赤外線検出素子として動作する。よって光吸収層4の中の複数の量子ドットのうち、「基底準位」に電子が存在する量子ドットのみが光の吸収に関与する。ドーパントによる電子が量子ドットの周囲にない場合、「励起準位」からの緩和や「伝導帯連続状態」からの捕獲を介して量子ドット層の「基底準位」に電子が導入される。

40

#### 【0057】

赤外線検出器200においては、赤外光Xの吸収によって「基底準位」から「励起準位」へ遷移してから「伝導帯連続状態」に抜け出した電子と、予め「励起準位」に存在している「伝導帯連続状態」に抜け出した電子と、下部コンタクト層3から中間層41の「伝

50

導帯連続状態」へと流れ込む電子とを区別することができない。暗電流を抑え、高感度な素子を実現するためには下記の動作が望ましい。

【0058】

- ・バイアス電圧印加下時に量子ドット層の基底状態のみに電子が導入されていること。
- ・入射赤外線Xのない状態において、素子内部を伝導する電子の数が少ないこと。
- ・入射赤外線Xの吸収に伴い「励起準位」へと遷移してから「伝導帯連続状態」に抜出した電子が、上部コンタクト層にたどり着くまでに周囲の量子井戸や量子ドット等に再捕獲されることがないこと。

【0059】

図3は、量子ドット層42およびその周辺における伝導帯のバンド図の計算結果と電子の量子準位を示した図である。量子井戸層42Bと量子ドット42A、中間層と量子井戸層の間には歪みが生じるため、異なる材料の境界においてポテンシャルが平坦にならず、図3のように、異なる材料の接合面に近づくほどポテンシャルが高くなっている。したがって、中間層を伝導する電子や上部量子井戸層や下部量子井戸層から量子ドット層の基底準位には電子が導入され難く、バイアス電圧の印加無しに予め基底状態に電子が導入されている。

10

【0060】

本発明の構成においては、ドーパントが量子ドットの近傍に添加されるため、ドーパント42Eが量子ドット42Aの直上に存在する確率が高い。電子は量子ドット層の基底状態に高確率で導入されるため、入射赤外線Xに対し、光を吸収可能な量子ドットの個数が増加し、結果として、素子の受光感度および比検出能が向上する。

20

【0061】

図7は、本発明の実施形態1における構造での比検出能の測定結果であり、縦軸が比検出能、横軸が波長である。図中の破線は従来の(Si原子ドーピング後に量子ドットの高さの均一化を行った)構造、実線が本発明における構造での測定結果であり、分光感度ピークの波長6.75μmにおいて本発明の構造が高い比検出能を有していることが確認される。

【0062】

[実施形態2]

本発明による赤外線検出素子の実施形態2は、量子ドット層が障壁層を有している点が実施形態1と異なっている。このため、実施形態1と同一または同様の部分については、実施形態1における説明および図面を援用することとし、詳細な説明は省略する。

30

【0063】

実施形態1を示す図1を援用的に参照すると、本発明の実施形態2の赤外線検出装置は、図1の本発明の実施形態1による赤外線検出器200における量子ドット層42に代えて、図8に示された量子ドット層42'を有しており、量子ドット層42'以外は、実施形態1による赤外線検出器200と同様の構成である。

【0064】

図8を参照すると、量子ドット層42'は、複数の量子ドット42Aと、濡れ層42Cと、埋込層42Dと、ドーパント42Eと、下部量子井戸層42Bと、上部量子井戸層42Fと、下部障壁層42Gと、上部障壁層42Hとから構成されている。

40

【0065】

下部量子井戸層42Bは、下部障壁層42G上に積層されており、量子ドット42Aは下部量子井戸層42Bの上部に形成されている。量子ドットの下部およびその周囲には濡れ層42Cが形成されている。この濡れ層42Cは、量子ドット42Aを形成する過程で付随して自然に形成される。

【0066】

そして、これらの量子ドット42A、濡れ層42Cを埋め込む様に、それらの上部に埋込層42Dが積層されている。実施形態1と同様に、最初に形成した段階では量子ドット42Aの高さにはばらつきがあるが、埋込層42Dを積層後、熱処理を施し、量子ドット

50

4 2 Aの埋込層4 2 Dの厚さより高い部分を除去することにより、量子ドット4 2 Aの高さは埋込層4 2 Dの厚さ以下となっている。

【0067】

熱処理後の埋込層4 2 Dおよび量子ドット4 2 Aの上部にはドーパント4 2 Eが添加され、さらにその上部に上部量子井戸層4 2 F、その上部に上部障壁層4 2 Hを積層した後、中間層4 1が積層されている。

【0068】

即ち、本発明の実施形態2における量子ドット層4 2'は、本発明の実施形態1における各量子ドット層4 2'の下部、上部に下部障壁層4 2 Gと上部量子障壁層4 2 Hとが形成された構造である。

10

【0069】

本実施形態における各層の具体的な組成例として、量子ドット4 2 Aと濡れ層4 2 CとはInGaAsから成り、中間層4 1はAlGaAsから成り、埋込層4 2 Dと下部量子井戸層4 2 Bと上部量子井戸層4 2 FとはGaAsから成っている。

【0070】

本発明における各層の具体的な構成例として、各層は、量子ドット4 2 Aと濡れ層4 2 CとはInGaAsから成り、中間層4 1はAlGaAsから成り、埋込層4 2 Dと下部量子井戸層4 2 Bと上部量子井戸層4 2 FとはGaAsから成り、また、下部障壁層4 2 Gと上部障壁層4 2 HとはAlGaAsから成っている。中間層4 1のAl組成は0.07、下部障壁層4 2 Gおよび上部障壁層4 2 HのAl組成は0.2である。また、下部障壁層4 2 Gおよび上部障壁層4 2 Hの厚さは、2 nm程度である。

20

【0071】

図9に、本発明の実施形態2における量子ドット層4 2'およびその周辺における伝導帯のバンドと電子の量子準位の一例を示す。本形態において、下部障壁層4 2 Gおよび上部障壁層4 2 Hの伝導帯のポテンシャルは、中間層4 1および下部量子井戸層4 2 Bおよび上部量子井戸層4 2 Fのそれよりも高い。

【0072】

本実施形態においては、下部障壁層4 2 Gおよび上部障壁層4 2 Hの導入により励起状態の波動関数の閉じ込めが強化されるため、量子ドット1個当たりの光の入射に伴う基底準位から励起準位への電子の励起確率が、実施形態1に比べてさらに向上している。

30

【0073】

ただし、中間層から量子井戸層4 2 B、4 2 Fおよび量子ドット4 2 Aへの電子の注入を障壁層が抑制するため、バイアス電圧印加時における量子ドット層の基底準位への電子の導入がされ難く、素子の受光感度が向上し難いという課題がある。

【0074】

以上の実施形態の説明から明らかなように、本発明は、平坦化された量子ドットの上部にドーパントが存在し、量子ドット層の基底準位にバイアス電圧の印加無しに電子を導入できる。その結果として、吸収に参与する量子ドットの割合を効率よく増加させ、素子の受光感度を向上させることができる。

【産業上の利用可能性】

40

【0075】

本発明は、記実施の形態に限られたものではなく、趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更することが可能であることは言うまでもない。

【0076】

例えば、本発明は、中赤外および中遠赤外領域において高感度な赤外線検出装置に適用できる。また、特定の波長を選択的に受信することが必要となる通信用の受光器といった用途にも適用可能である。

【符号の説明】

【0077】

1 半導体基板

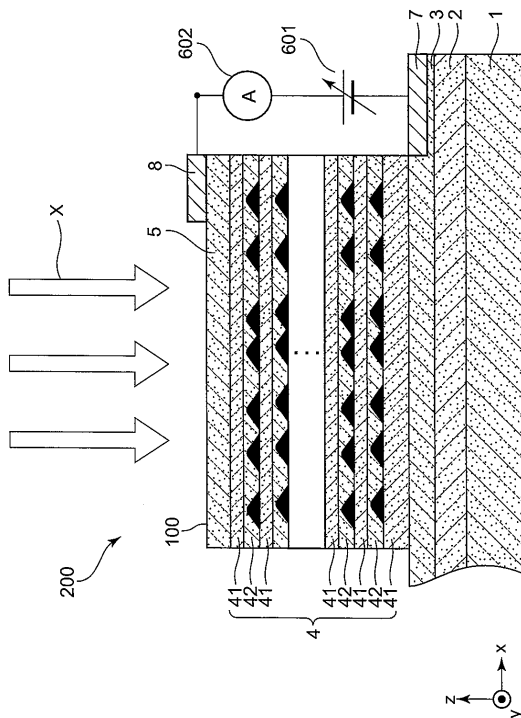
50

- 2 緩衝層
- 3 下部コンタクト層
- 4 光吸収層
- 4 1 中間層
- 4 2、4 2' 量子ドット層
- 4 2 A 量子ドット
- 4 2 B 下部量子井戸層
- 4 2 C 濡れ層
- 4 2 D 埋込層
- 4 2 E ドーパント
- 4 2 F 上部量子井戸層
- 4 2 G 下部障壁層
- 4 2 H 上部障壁層
- 5 上部コンタクト層
- 7 上部電極
- 8 下部電極
- X 入射赤外線
- 3 0 0 真空チャンバ
- 3 0 1 基板ホルダ
- 3 0 2 第1の原料供給源
- 3 0 3 第2の原料供給源
- 3 0 4 第3の原料供給源
- 6 0 1 電圧源
- 6 0 2 電流計

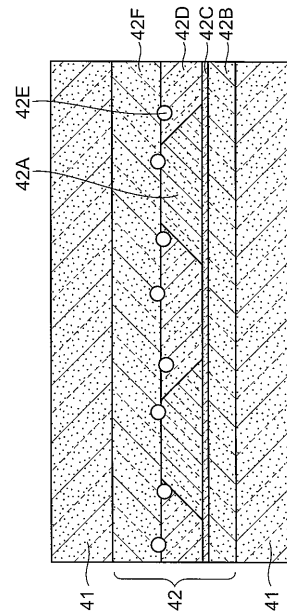
10

20

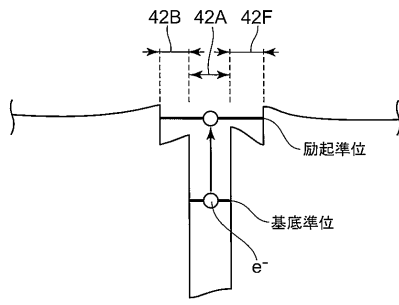
【図1】



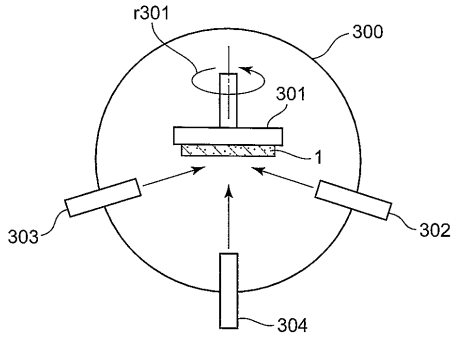
【図2】



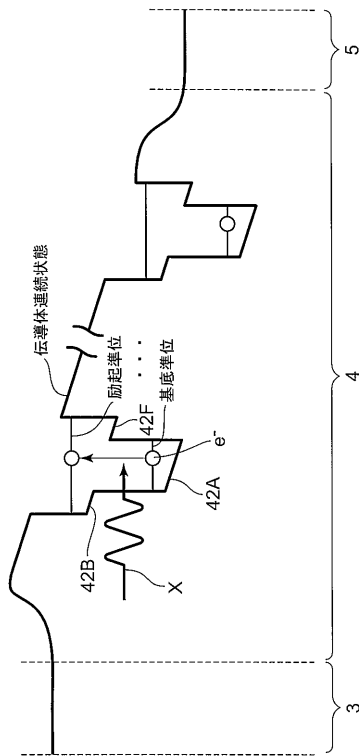
【 図 3 】



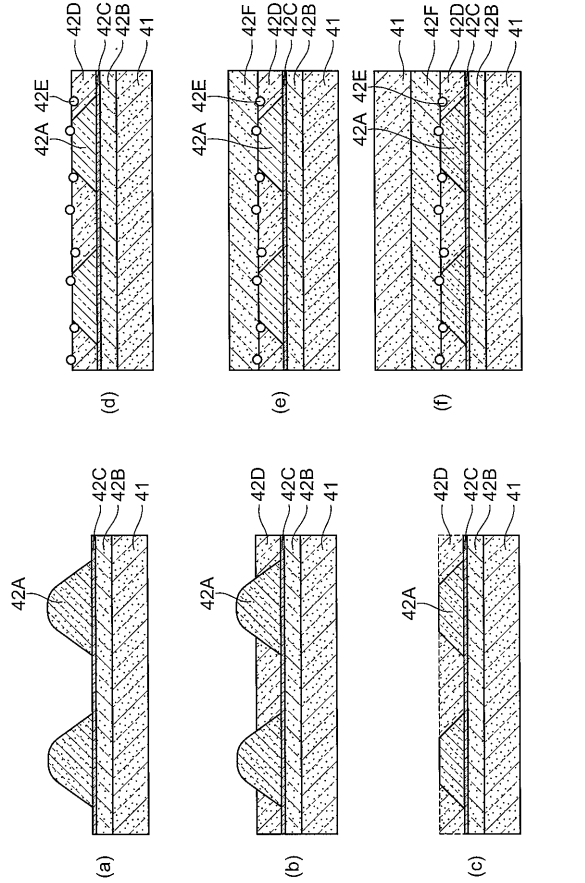
【 図 4 】



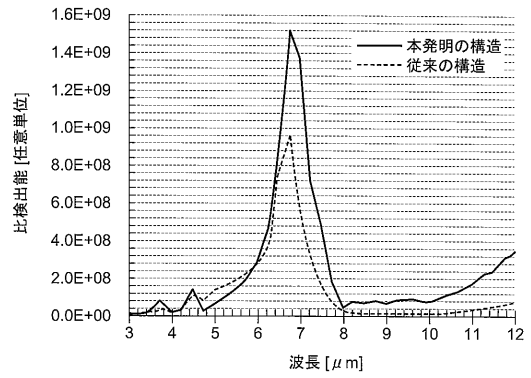
【 図 6 】



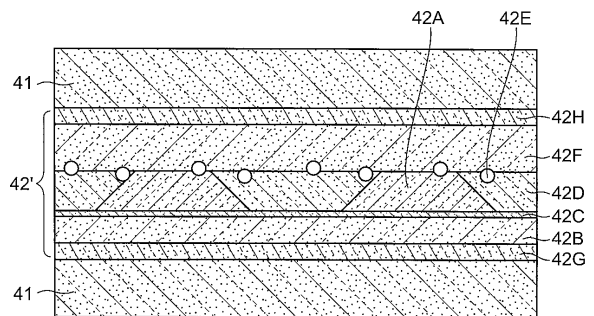
【 図 5 】



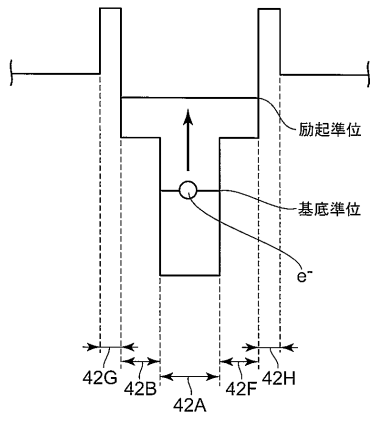
【 図 7 】



【 図 8 】



【図 9】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 五十嵐 悠一  
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
- (72)発明者 白根 昌之  
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内
- (72)発明者 渡邊 克之  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- (72)発明者 大河内 俊介  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- (72)発明者 荒川 泰彦  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内

審査官 原 俊文

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2004/0021138 (US, A1)  
特開2008-198677 (JP, A)  
特開2008-091427 (JP, A)  
特開2016-023940 (JP, A)  
特開2012-109434 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01L 31/10 - 31/119