

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4982729号
(P4982729)

(45) 発行日 平成24年7月25日(2012.7.25)

(24) 登録日 平成24年5月11日(2012.5.11)

(51) Int.Cl. F I
 HO 1 L 31/10 (2006.01) HO 1 L 31/10 Z NMA
 HO 1 L 27/146 (2006.01) HO 1 L 27/14 A

請求項の数 9 (全 10 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2005-20265 (P2005-20265) (22) 出願日 平成17年1月27日 (2005.1.27) (65) 公開番号 特開2006-210620 (P2006-210620A) (43) 公開日 平成18年8月10日 (2006.8.10) 審査請求日 平成19年12月10日 (2007.12.10)</p>	<p>(73) 特許権者 504173471 国立大学法人北海道大学 北海道札幌市北区北8条西5丁目 (74) 代理人 110000338 特許業務法人原謙三国際特許事務所 (72) 発明者 陽 完治 北海道札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター内 審査官 岡田 吉美</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超高感度画像検出装置およびその製造方法、検出方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

量子ドットを集積したトランジスタ構造を有し、
単一光子が、上記量子ドットに捕獲された電子に吸収され、その電子が励起されて上記量子ドットから飛び出し、上記量子ドット周辺に電子が存在しなくなることで、ドレイン電流が、ゲート電圧 - ドレイン電流の履歴曲線の低電流パスから高電流パスにジャンプするときの電流の増加を検知することによって、単一光子の吸収の有無を、上記量子ドット中の1個の電子の減少に基づく上記トランジスタのチャンネル中の電流の増加というマクロ的な観測量によって検知する、ミクロ/マクロ変換を行うことを特徴とする超高感度画像検出装置。

【請求項 2】

上記単一光子の吸収の前後におけるチャンネル電流の差分を微分回路によって検出することで画像を検出することを特徴とする請求項 1 に記載の超高感度画像検出装置。

【請求項 3】

上記量子ドット中に電子を捕獲するときの量子ドット中の量子準位として、量子ドットに1つ目の電子が入った場合の準位を用いることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の超高感度画像検出装置。

【請求項 4】

上記量子ドット中に電子を捕獲するときの量子ドット中の量子準位として、量子ドットに2つ目の電子が入った場合の準位を用いることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の

超高感度画像検出装置。

【請求項 5】

請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の超高感度画像検出装置の製造方法であって、
上記トランジスタを MOS 構造により作製し、上記量子ドットを、ゲート酸化膜中に埋め込んだシリコン微粒子により作製することを特徴とする超高感度画像検出装置の製造方法。

【請求項 6】

請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の超高感度画像検出装置の製造方法であって、
上記トランジスタを半導体ヘテロ構造により作製し、上記量子ドットを、ヘテロ構造中に埋め込む歪成長を用いた自然形成法により作製することを特徴とする超高感度画像検出装置の製造方法。

10

【請求項 7】

請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の超高感度画像検出装置を用いて、
単一光子が、上記量子ドットに捕獲された電子に吸収され、その電子が励起されて上記量子ドットから飛び出し、上記量子ドット周辺に電子が存在しなくなることで、ドレイン電流が、ゲート電圧・ドレイン電流の履歴曲線の低電流パスから高電流パスにジャンプするときの電流の増加を検知することによって、単一光子の吸収の有無を、上記量子ドット中の 1 個の電子の減少に基づく上記トランジスタのチャンネル中の電流の増加というマクロ的な観測量によって検知する、マイクロ/マクロ変換を行うことを特徴とする超高感度画像検出方法。

20

【請求項 8】

上記単一光子の吸収の前後におけるチャンネル電流の差分を検出することで画像を検出することを特徴とする請求項 7 に記載の超高感度画像検出方法。

【請求項 9】

上記トランジスタのゲート電極に加えるパルス列として、しきい値電圧以下で固定し、待機する時間をできるだけ長くし、スキャンスピードのタイムチャートを制御することで、単一光子の検出率を増加させるような計測手順を有することを特徴とする請求項 7 または 8 に記載の超高感度画像検出方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

30

【0001】

本発明は、超高感度画像検出装置およびその製造方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来から、光子 1 個が入ると電子 1 個分の電流が流れるフォトダイオードが一般に知られている。電子 1 個分の電流は微量であるが、これに対し、ガラス繊維を束ねた構造のチャンネルプレート（二次電子倍增管）で、励起電子の数を増加させることができることが知られている。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0003】

赤外線画像検出装置などにおいて、非常に暗い状況で、例えば光子 1 個が入ったことを高感度で検出できるような画像検出装置は非常に有用であるが、従来はこのようなものは知られていない。

【0004】

本発明は、上記の問題点を鑑みてなされたものであり、その目的は、光子 1 個が入ったことを高感度で検出できるような超高感度画像検出装置およびその製造方法を実現することにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

50

上記の課題を解決するため、本発明に係る超高感度画像検出装置は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を有し、単一光子の吸収の有無を、上記量子ドット中の1個の電子の減少に基づく上記トランジスタのチャンネル中の電流の増加というマクロ的な観測量によって検知する、マイクロ/マクロ変換を行うことを特徴としている。

【0006】

上記の構成により、単一光子の吸収の有無を、上記量子ドット中の1個の電子の減少に基づく上記トランジスタのチャンネル中の電流の増加というマクロ的な観測量によって検知するマイクロ/マクロ変換を行う。したがって、光子1個で電子1個分の電流が流れるような構成とは異なり、光子1個で顕著に大きな電流が流れ、それを検出すればよいので、光子1個の入力を容易に検出することができる。それゆえ、光子1個が入ったことを高感度で検出できるような超高感度画像検出装置を実現することができるという効果を奏する。

10

【0007】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、上記の構成に加えて、上記トランジスタのソース電極およびドレイン電極を強磁性体とすることにより、上記量子ドットに捕獲される電子のスピンを制御し、励起光の偏光度を選択して受光し、偏光単一光子を検出することを特徴としている。

【0008】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、上記単一光子の吸収の前後におけるチャンネル電流の差分を検出することで画像を検出することを特徴としている。

20

【0009】

また、本発明に係る画像検出装置は、上記の構成に加えて、上記チャンネル電流の差分を微分回路によって検出することを特徴としている。

【0010】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、上記の構成に加えて、上記量子ドット中に電子を捕獲するときの量子ドット中の量子準位として、量子ドットに1つ目の電子が入った場合の準位、および、量子ドットに2つ目の電子が入った場合の準位のうちから選択することを特徴としている。

【0011】

したがって、上記の構成による効果に加えて、複数の準位から選ぶことにより、最適なゲート特性を利用できる動作範囲を選ぶことができるという効果を奏する。

30

【0012】

また、本発明に係る画像検出装置は、上記の構成に加えて、上記トランジスタのゲート電極が全て半導体電極であることにより、ゲート電極表面からの赤外線を受光が可能であることを特徴としている。

【0013】

また、本発明に係る画像検出装置は、上記の構成に加えて、上記トランジスタのゲート電極に加えるパルス列として、しきい値電圧以下で固定し、待機する時間をできるだけ長くし、スキャンスピードのタイムチャートを制御することで、単一光子の検出率を増加させるような計測手順を有することを特徴としている。

40

【0014】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、上記の超高感度画像検出装置の製造方法であって、上記トランジスタをMOS構造により作製し、上記量子ドットを、ゲート酸化膜中に埋め込んだシリコン微粒子により作製することを特徴としている。

【0015】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、上記の超高感度画像検出装置の製造方法であって、上記トランジスタを半導体ヘテロ構造により作製し、上記量子ドットを、ヘテロ構造中に埋め込む歪成長を用いた自然形成法により作製することを特徴としている。

【発明の効果】

50

【 0 0 1 6 】

以上のように、本発明に係る超高感度画像検出装置は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を有し、単一光子の吸収の有無を、上記量子ドット中の1個の電子の減少に基づく上記トランジスタのチャンネル中の電流の増加というマクロ的な観測量によって検知する、マイクロ/マクロ変換を行う構成である。

【 0 0 1 7 】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、上記トランジスタをMOS構造により作製し、上記量子ドットを、ゲート酸化膜中に埋め込んだシリコン微粒子により作製する構成である。

【 0 0 1 8 】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、上記トランジスタを半導体ヘテロ構造により作製し、上記量子ドットを、ヘテロ構造中に埋め込む歪成長を用いた自然形成法により作製する構成である。

【 0 0 1 9 】

これにより、光子1個で電子1個分の電流が流れるような構成とは異なり、光子1個で顕著に大きな電流が流れ、それを検出すればよいので、光子1個の入力を容易に検出することができる。それゆえ、光子1個が入ったことを高感度で検出できるような超高感度画像検出装置およびその製造方法を実現することができるという効果を奏する。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 0 】

本実施形態は、クーロンブロック効果を用いた超高感度画像検出装置（イメージセンサ）の原理とその製造方法とを示している。

【 0 0 2 1 】

図1は、本発明に係る超高感度画像検出装置のデバイス構造（MOS（Metal Oxide Semiconductor）構造）の一構成例を示す。

【 0 0 2 2 】

半導体基板17上に、基板不純物拡散層16が形成され、基板不純物拡散層16上にソース電極11およびドレイン電極15が形成され、その上に、ゲート絶縁膜（ゲート酸化膜）14、さらにその上にゲート電極13が形成されている。ゲート絶縁膜14中には量子ドット12が形成されている。これにより、トランジスタが構成されている。

【 0 0 2 3 】

画像検出装置（超高感度画像検出装置）1は、図1中、上方向から、画像に応じた光子が入力され、その光子を二次元的に捉えるために、半導体基板17上に、図1中、上向きに、光子検出素子としての上記トランジスタが、二次元的なアレイとして配置された構成となっている。

【 0 0 2 4 】

ソース電極11・ドレイン電極15は強磁性体とすることができ、これにより、量子ドット12に捕獲される電子のスピンを制御し、励起光の偏光度を選択して受光することが可能となる。このような構成においては、画像検出装置1は、偏光単一光子を検出する。

【 0 0 2 5 】

ゲート電極13は、全て半導体電極とすることができ、その場合は、ゲート電極13表面からの赤外線を受光が可能である。

【 0 0 2 6 】

図1の構成では、上記トランジスタをMOS構造により作製し、上記量子ドット12を、ゲート酸化膜（ゲート絶縁膜14）中に埋め込んだシリコン微粒子により作製している。

【 0 0 2 7 】

図2は、本発明に係る超高感度画像検出装置のデバイス構造（HEMT（High Electro Mobility Transistor）構造）の一構成例を示す。

【 0 0 2 8 】

10

20

30

40

50

半導体基板 27 上に基板側障壁層 26、量子井戸層 25、障壁層半導体、ゲート電極がこの順に形成されている。障壁層半導体 24、量子井戸層 25 を貫き、基板側障壁層に達するようにオーミック接触合金が形成され、その上にオーミック電極が形成されている。これにより、トランジスタが構成されている。

【0029】

画像検出装置（超高感度画像検出装置）2 は、図 2 中、上方向から、画像に応じた光子が入力され、その光子を二次元的に捉えるために、半導体基板 27 上に、図 2 中、上向きに、光子検出素子としての上記トランジスタが、二次元的なアレイとして配置された構成となっている。

【0030】

図 2 の構成では、上記トランジスタを半導体ヘテロ構造により作製し、上記量子ドット 12 を、ヘテロ構造中に埋め込む歪成長を用いた自然形成法により作製している。

【0031】

図 1 または図 2 の構成では、単一光子吸収の前後における上記トランジスタのチャンネル電流の差分を微分回路によって検出することで画像を検出するようになっている。

【0032】

図 3 は、超高感度イメージセンサのエネルギーバンド（ダブル・ヘテロ構造）を示す図である。図 4 は、超高感度イメージセンサのエネルギーバンド（シングル・ヘテロ構造）を示す図である。

【0033】

ショットキーゲート電極 31 に正電圧を印加することによって表面ポテンシャルを下方に押し下げると、量子井戸（以下、チャンネルと称する）36 のフェルミ準位 38 と量子ドット 35 中の量子準位 34 とが揃った時に、チャンネル 36 中の電子 37 が量子力学的に障壁層 33 をすり抜け、量子ドット 35 中に閉じ込められる。

【0034】

この障壁層 33 に閉じ込められて量子ドット 35 に捕らえられた電子のクーロンポテンシャルにより、チャンネル 36 を流れる電流は減少する。これは、量子ドット 35 において帯電した電子によりチャンネル 36 中の電子が遠ざけられて電流が減少するといってもよい。

【0035】

ゲート電圧をこの条件の前後でスキャンすると、ゲート電圧 - ドレイン電流曲線は、図 5 や図 6 に示すような履歴曲線を描く。一旦減少した電流電圧特性からもとの電流電圧特性に戻すには、しきい値電圧 V_{th1} または V_{th2} よりも低いゲート電圧に電圧を固定したまま、量子ドット 35 から電子が漏れるまで長時間待つか、外部からエネルギーを与えて、量子ドット 35 に捕獲された電子を励起してやればよい。このプロセスを繰り返すと、履歴のループが描かれることになる。

【0036】

さて、捕獲された電子が漏れ出す時間より短い周期のパルスでゲート電圧を制御したとき、外部から捕獲電子を励起するのに必要なエネルギー以上の光がこの捕獲電子により吸収されなければ、履歴曲線の低電流パス（d、e）を往復することになる。

【0037】

ゲート電圧がいま低電圧側（しきい値電圧より低い電圧）にあるとする。このとき外側（図 3、図 4 の左方）から光子が飛来し、量子ドット 35 に捕獲された電子に吸収され、その電子が励起されて量子ドット 35 から飛び出し、障壁層 33 やチャンネル 36 などを伝導して、量子ドット 35 周辺にはもはや電子は存在しなくなる。すると、それまで減少していた電流が再び増加するので、履歴曲線の高電流パス（a、b）にジャンプする。この電流の増加を検知すれば、単一光子が検出されたことになる。

【0038】

ゲート電圧を再び増加させ、しきい値電圧を超えると、電流は再び減少し（図中、c）、低電流パス（d、e）に戻る。したがって、光子の検出率を増加させるには、ゲート電

10

20

30

40

50

圧をしきい値電圧以下で固定し、待機する時間をできるだけ長くし、スキャンスピードのタイムチャートを制御することで対処できる。

【0039】

図5は、量子ドットに1つ目の電子が入った場合の超高感度画像検出装置の電圧電流特性を示す図である。図6は、量子ドットに2つ目の電子が入った場合の超高感度画像検出装置の電圧電流特性を示す図である。 V_{th1} 、 V_{th2} はいずれも、捕獲された電子によるクーロンブロックのしきい値電圧である。トランジスタ特性に応じて、図5や図6のものを選ぶことができる。これ以外にも、励起準位(p-殻)に電子を捕獲することも可能である。

【0040】

a、bは、高電流パスである。ゲート電圧がしきい値以下でスキャンされる時は電流はこの線上を往復する。ゲート電圧が単電子のしきい低電圧を超えると、クーロンブロックにより、cに示すように、チャンネル電流が減少する。熱エネルギーによるエネルギーのボケが存在するときは、電流の減少も有限の幅にわたって起こる。d、eは低電流パスである。一旦量子ドットに電子が捕獲されると、電流はこの線上を往復する。

【0041】

光子が入射すると、量子ドット35に捕獲された電子が光励起することにより量子ドット35が空になり、チャンネル36の電流特性が高電流パス(a、b)へ飛び移る。

【0042】

本発明は上述した実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能である。すなわち、請求項に示した範囲で適宜変更した技術的手段を組み合わせ得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

【0043】

なお、本発明に係る超高感度画像検出装置は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を用いて単一光子の吸収の有無を量子ドット中の1個の電子の減少をトランジスタのチャンネル中電流の増加というマクロ的な観測量より検知することをもってするミクロ/マクロ変換を伴うように構成してもよい。

【0044】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を用いて単一光子の吸収の有無を量子ドット中の1個の電子の減少をトランジスタのチャンネル中電流の増加というマクロ的な観測量により検知することをもってする超高感度画像検出装置において、単一光子吸収の前後におけるチャンネル電流の差分を微分回路によって検出する回路方式であるように構成してもよい。

【0045】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、量子ドット中に電子を捕獲するとき、量子ドット中の量子準位として基底準位を用いることもできるし、励起準位を用いることもできるように動作点をもってすることにより最適のゲート特性を利用できる動作範囲を選ぶことができる受光動作方式であるように構成してもよい。

【0046】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、以上のデバイスのゲート電極を全て半導体電極にすることにより基板表面からの赤外線を受光を可能にする構造を有するように構成してもよい。

【0047】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、ソース電極・ドレイン電極を強磁性体とすることにより、量子ドットの捕獲される電子のスピンを制御し、励起光の偏光度を選択的に受光し、偏光単一光子を検出するように構成してもよい。

【0048】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置は、ゲート電極に加えるパルス列の設計方法として、しきい値電圧以下で固定し、待機する時間をできるだけ長くし、スキャンスピードのタイムチャートを制御することで単一光子の検出率を増加させるような計測手順を有

10

20

30

40

50

するように構成してもよい。

【0049】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を用いて単一光子の吸収の有無を量子ドット中の1個の電子の減少をトランジスタのチャンネル中電流の増加というマクロ的な観測量により検知することをもってするマイクロ/マクロ変換を伴う超高感度画像検出装置のトランジスタを半導体ヘテロ構造により作製し、量子ドットをヘテロ構造中に埋め込む歪成長による自然形成法により作製するように構成してもよい。

【0050】

また、本発明に係る超高感度画像検出装置の製造方法は、量子ドットを集積したトランジスタ構造を用いて単一光子の吸収の有無を量子ドット中の1個の電子の減少をトランジスタのチャンネル中電流の増加というマクロ的な観測量により検知することをもってするマイクロ/マクロ変換を伴う超高感度画像検出装置のトランジスタをMOS構造により作製し、量子ドットをゲート酸化膜中に埋め込んだシリコン微粒子により構成するように構成してもよい。

【産業上の利用可能性】

【0051】

赤外線画像検出装置のような用途にも適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0052】

【図1】本発明に係る超高感度画像検出装置のデバイス構造(MOS構造)の一構成例を示す断面図である。

【図2】本発明に係る超高感度画像検出装置のデバイス構造(HEMT構造)の一構成例を示す断面図である。

【図3】超高感度画像検出装置のエネルギーバンド(ダブル・ヘテロ構造)を示す図である。

【図4】超高感度画像検出装置のエネルギーバンド(シングル・ヘテロ構造)を示す図である。

【図5】量子ドットに1つ目の電子が入った場合の超高感度画像検出装置の電圧電流特性を示す図である。

【図6】量子ドットに2つ目の電子が入った場合の超高感度画像検出装置の電圧電流特性を示す図である。

【符号の説明】

【0053】

1、2 画像検出装置(超高感度画像検出装置)

1 1 ソース電極

1 2 量子ドット

1 3 ゲート電極

1 4 ゲート絶縁膜(ゲート酸化膜)

1 5 ドレイン電極

1 6 基板不純物拡散層

1 7 半導体基板

2 0 オーミック接触合金

2 1 オーミック電極

2 2 量子ドット

2 3 ゲート電極

2 4 障壁層半導体

2 5 量子井戸層

2 6 基板側障壁層

2 7 半導体基板

10

20

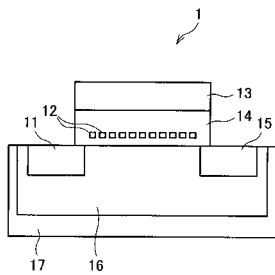
30

40

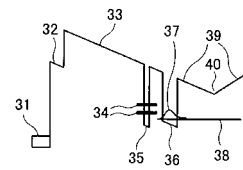
50

- 3 1 ショットキーゲート電極
- 3 2 表面保護層
- 3 3 障壁層
- 3 4 量子ドットに閉じ込められた量子エネルギー準位
- 3 5 量子ドット
- 3 6 量子井戸
- 3 7 電子の波動関数
- 3 8 チャンネルのフェルミ準位
- 3 9 障壁層
- 4 0 不純物ドーピング層

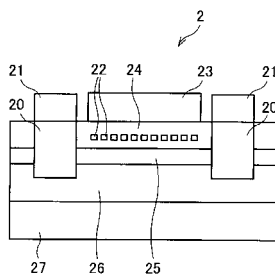
【図 1】



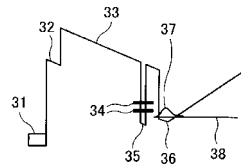
【図 3】



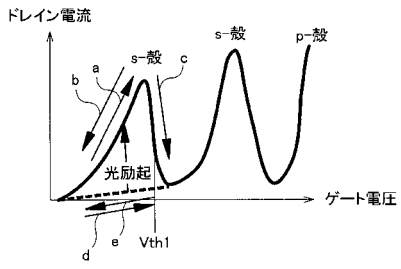
【図 2】



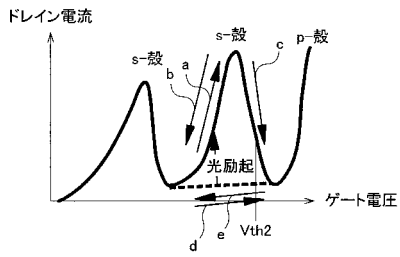
【図 4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平11-004017(JP,A)

特開2003-243692(JP,A)

特開2001-168353(JP,A)

特開2003-092412(JP,A)

特開2005-277263(JP,A)

A. J. Shields, et al, Detection of Single Photons using a field-effect transistor gated by a layer of quantum dots, APPLIED PHYSICS LETTERS, 米国, 2000年 4月26日, Vol.76 Num25, 3673-3675

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 31/00 - 31/0264、

31/08 - 31/109、

27/14 - 27/148