

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2011-226800

(P2011-226800A)

(43) 公開日 平成23年11月10日(2011.11.10)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>GO1N 27/414 (2006.01)</b>	GO1N 27/30 301U	2G060
<b>GO1N 27/00 (2006.01)</b>	GO1N 27/30 301V	
	GO1N 27/30 301W	
	GO1N 27/30 301X	
	GO1N 27/30 301Y	
審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 25 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2010-94012 (P2010-94012)  
 (22) 出願日 平成22年4月15日 (2010.4.15)

(71) 出願人 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 100088155  
 弁理士 長谷川 芳樹  
 (74) 代理人 100113435  
 弁理士 黒木 義樹  
 (74) 代理人 100154656  
 弁理士 鈴木 英彦  
 (72) 発明者 佐藤 威友  
 北海道札幌市北区北13条西8丁目 国立  
 大学法人北海道大学 量子集積エレクトロ  
 ニクス研究センター内  
 Fターム(参考) 2G060 AA01 AA07 AE17 AE19 AF07  
 AG06 AG08 BA07 DA01 DA12  
 DA31 JA01 JA06

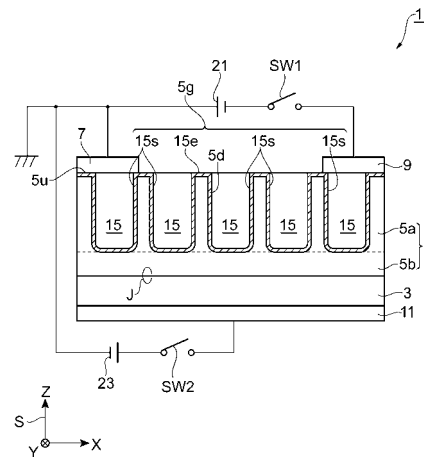
(54) 【発明の名称】 センサ及びセンサの製造方法

(57) 【要約】

【課題】 製造コストが低いと共に、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが可能なセンサ等を提供する。

【解決手段】 本発明に係るセンサ1は、半導体基板3と、半導体基板3上に設けられた半導体領域5と、半導体領域5の上面に設けられたソース電極7及びドレイン電極9と、半導体基板3の裏面3b上に設けられたバックゲート電極11とを備え、半導体基板3と半導体領域5とはpn接合Jを構成し、半導体領域5の上面5uの少なくとも一部5eには、複数の孔部15が形成されており、複数の孔部15は、それぞれ、半導体領域5の上面5uから半導体基板3に向かって延びると共に、半導体基板3には至っておらず、半導体領域5の上面5uの少なくとも一部5e及び複数の孔部15の側面15sは、オープンゲート5gを構成していることを特徴とする。

【選択図】 図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

電界効果トランジスタ型のセンサであって、

第 1 導電型半導体基板と、

前記第 1 導電型半導体基板の主面上に設けられた第 2 導電型半導体領域と、

前記第 2 導電型半導体領域の上面又は側面に設けられたソース電極と、

前記ソース電極と離間するように前記第 2 導電型半導体領域の上面又は側面に設けられたドレイン電極と、

前記第 1 導電型半導体基板の裏面上に設けられたバックゲート電極と、

を備え、

前記第 1 導電型半導体基板と前記第 2 導電型半導体領域とは p n 接合を構成し、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の少なくとも一部は、前記ソース電極及び前記ドレイン電極によって覆われておらず、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の前記少なくとも一部には、複数の孔部が形成されており、

前記複数の孔部は、それぞれ、前記第 2 導電型半導体領域の上面から前記第 1 導電型半導体基板に向かって延びると共に、前記第 1 導電型半導体基板には至っておらず、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の前記少なくとも一部及び前記複数の孔部の側面は、オープンゲートを構成していることを特徴とするセンサ。

**【請求項 2】**

前記複数の孔部は、前記バックゲート電極を陽極電極として用いた陽極酸化法によって形成されていることを特徴とする請求項 1 に記載のセンサ。

**【請求項 3】**

電界効果トランジスタ型のセンサの製造方法であって、

第 1 導電型半導体基板の主面上に、当該第 1 導電型半導体基板と p n 接合を構成する第 2 導電型半導体領域を形成する半導体領域形成工程と、

前記第 1 導電型半導体基板の裏面上にバックゲート電極を形成するバックゲート電極形成工程と、

前記第 2 導電型半導体領域に、複数の孔部を形成する孔部形成工程と、

前記第 2 導電型半導体領域の上面又は側面に互いに離間するソース電極及びドレイン電極を形成し、その際、前記第 2 導電型半導体領域の上面の少なくとも一部は前記ソース電極及び前記ドレイン電極によって覆われていないようにするソース・ドレイン電極形成工程と、

を備え、

前記孔部形成工程は、前記第 1 導電型半導体基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、前記第 2 導電型半導体領域に、当該第 2 導電型半導体領域の上面から前記第 1 導電型半導体基板に向かって延びる前記複数の孔部であって、前記第 1 導電型半導体基板には至っていない前記複数の孔部を形成する陽極酸化工程を含むことを特徴とするセンサの製造方法。

**【請求項 4】**

前記孔部形成工程は、前記陽極酸化工程の前に、前記第 2 導電型半導体領域の上面に、複数の開口を有するマスクを形成するマスク形成工程をさらに含むことを特徴とする請求項 3 に記載のセンサの製造方法。

**【請求項 5】**

第 1 導電型半導体基板と、

前記第 1 導電型半導体基板の主面上に設けられた第 2 導電型半導体領域と、

前記第 2 導電型半導体領域の上面又は側面に設けられた第 1 電極と、

前記第 1 電極と離間するように前記第 2 導電型半導体領域の上面又は側面に設けられた第 2 電極と、

前記第 1 導電型半導体基板の裏面上に設けられた第 3 電極と、

10

20

30

40

50

を備え、

前記第 1 導電型半導体基板と前記第 2 導電型半導体領域とは p n 接合を構成し、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の少なくとも一部は、前記第 1 電極及び前記第 2 電極によって覆われておらず、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の前記少なくとも一部には、複数の孔部が形成されており、

前記複数の孔部は、それぞれ、前記第 2 導電型半導体領域の上面から前記第 1 導電型半導体基板に向かって延びると共に、前記第 1 導電型半導体基板には至っておらず、

前記第 2 導電型半導体領域の上面の前記少なくとも一部及び前記複数の孔部の側面は、測定対象を作用させる感応面を構成しており、

前記測定対象が前記感応面に作用することにより、前記第 2 導電型半導体領域の電気伝導度が変化することを特徴とするセンサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、センサ及びセンサの製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

測定対象物を半導体へ作用させ、その際に生じる半導体の電気伝導度の変化を測定することにより、測定対象物を検出するセンサが知られている。例えば、下記非特許文献 1 には、イオン感応性電界効果トランジスタと呼ばれるセンサが記載されている。このセンサは、電界効果トランジスタ構造を有している。測定の際には、ソース電極とドレイン電極間に検知電流を流した状態で、測定対象物である溶液中のイオンをセンサのゲート部に吸着させる。すると、ゲート部の表面電位が変化する。この表面電位の変化に起因して、ゲート部に接する半導体領域の空乏層の厚さが変化するため、当該半導体領域の電気伝導度が増加する。その結果、ソース電極とドレイン電極間を流れる検知電流の大きさも変化するため、その変化を測定することにより、測定対象物を検出することができる。

【0003】

また、下記特許文献 1 には、絶縁基板上に設けられた多孔質構造の半導体層からなるガス感応部と、ガス感応部上に設けられた一対の電極と、を備えるガス検知素子が記載されている。このガス検知素子においては、ガス感応部が多孔質構造であるため、測定対象のガスを吸着するガス感応部の表面積が大きくなり、測定感度が向上することが記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開平 6 - 2 1 3 8 5 1 号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】P. Bergveld et al., "Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Neurophysiological Measurements", IEEE TRANSACTIONS ON BIO-MEDICAL ENGINEERING, 17 (1970), p.70-71

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

イオン感応性電界効果トランジスタ等の、測定対象の作用による半導体の電気伝導度の変化を利用したセンサは、ガスセンサやバイオセンサ等の幅広い用途に応用されており、その感度の向上が求められている。

【0007】

上記非特許文献 1 に記載のイオン感応性電界効果トランジスタにおいては、半導体領域

10

20

30

40

50

の表面の一部が、感応面としてのゲート部（オープンゲート）を構成している。この感応面は平坦な面であるため、その表面積は小さく、感度が低いという問題がある。

【0008】

このような問題を解決するために、上記特許文献1に記載のガス検知素子のように、多孔質構造の半導体を用いることにより、ガス感応部の表面積を増大させる方法が考えられる。しかしながら、上記特許文献1に記載のガス検知素子のような構成を有するセンサにおいては、下記のような理由により、センサの製造工程が複雑であり製造コストが高いという問題がある。

【0009】

即ち、半導体層に多孔質構造を形成する際には、一般的に、基板上に均一な半導体層を形成した後に、この基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、半導体層に多孔質構造を形成する。陽極酸化法を用いることにより、複数の孔部を直線的に形成することができ、また、各孔部の直径のばらつきを低減させることができる。

10

【0010】

しかしながら、上記特許文献1に記載のガス検知素子においては、絶縁基板上に多孔質構造の半導体層を設けている。そのため、絶縁基板に半導体層が固定された状態では、基板が導電性を有していないため、基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって半導体層に多孔質構造を形成することはできない。そのため、導電性の基板上に均一な半導体層を形成してから陽極酸化法によって半導体層に多孔質構造を形成した後に、基板と半導体層とを分離し、当該半導体層を絶縁性の基板に固定するという複数の工程が必要となる。そのため、センサの製造工程が複雑となり、製造コストが高くなってしまいう問題がある。

20

【0011】

このような問題を改善するためには、導電性の基板上に半導体層を形成し、この基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって半導体層に多孔質構造を形成する方法が考えられる。しかしながら、このような方法を採用した場合、以下のような理由により、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが困難であるという問題がある。

【0012】

即ち、導電性の基板上に半導体層を形成し、この基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって半導体層に多孔質構造を形成する際、各孔部が半導体層の下面、即ち、半導体層と基板との界面まで延びるようにすると、半導体層と基板とでは、同一条件下での陽極酸化法によるエッチングレートが異なるため、各孔部の深さについての加工精度が低下してしまう。その結果、各孔部の深さのばらつきが大きくなってしまいうため、センサの特性のばらつきも大きくなってしまいう。

30

【0013】

このようなばらつきを抑制するためには、各孔部が半導体層と基板との界面まで達しないように、即ち、各孔部が半導体層の上面と下面との中間点まで延びるように、陽極酸化法によって半導体層に多孔質構造を形成する方法が考えられる。しかしながら、このようは方法を採用した場合、半導体層に設けた2つの電極（例えば、ソース電極とドレイン電極）の間に流れる検知電流は、孔部が延びていない半導体層の下部にも流れてしまいうため、その分センサの感度が低下してしまう。このような理由により、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが困難であるという問題がある。

40

【0014】

本発明はこのような課題に鑑みてなされたものであり、製造コストが低いと共に、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが可能なセンサ、及び、このようなセンサの製造方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0015】

上述の課題を解決するため、本発明に係るセンサは、電界効果トランジスタ型のセンサ

50

であって、第1導電型半導体基板と、第1導電型半導体基板の主面上に設けられた第2導電型半導体領域と、第2導電型半導体領域の上面又は側面に設けられたソース電極と、ソース電極と離間するように第2導電型半導体領域の上面又は側面に設けられたドレイン電極と、第1導電型半導体基板の裏面上に設けられたバックゲート電極とを備え、第1導電型半導体基板と第2導電型半導体領域とはpn接合を構成し、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部は、ソース電極及びドレイン電極によって覆われておらず、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部には、複数の孔部が形成されており、複数の孔部は、それぞれ、第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びると共に、第1導電型半導体基板には至っておらず、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部及び複数の孔部の側面は、オープンゲートを構成していることを特徴とする。

10

## 【0016】

本発明に係るセンサにおいては、感応面となるオープンゲートは、複数の孔部の側面を含んでいるために、表面積が大きくなる。そのため、センサの感度を高くすることができる。

## 【0017】

また、本発明に係るセンサにおいては、導電性を有する第1導電型半導体基板上に、第2導電型半導体領域が設けられ、第2導電型半導体領域に複数の孔部が形成されている。そのため、第1導電型半導体基板上に均一な第2導電型半導体領域を形成した後に、第1導電型半導体基板を電極として用いた方法によって、第2導電型半導体領域に複数の孔部を形成することができる。これにより、複数の孔部を有する第2導電型半導体領域を基板上に形成した後に、当該基板と第2導電型半導体領域とを分離し、別の基板に第2導電型半導体領域を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

20

## 【0018】

また、本発明に係るセンサにおいては、複数の孔部は、第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びると共に、第1導電型半導体基板には至っていないため、複数の孔部を形成する際に、各孔部の深さのばらつきを抑制することができる。

## 【0019】

また、本発明に係るセンサは、第1導電型半導体基板と第2導電型半導体領域とはpn接合を構成し、第1導電型半導体基板の裏面上にバックゲート電極を備えている。そのため、バックゲート電極によって当該pn接合に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部に空乏層を形成することができる。これにより、測定中に、ソース電極からドレイン電極に流れる検知電流が、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部を経由することを抑制することができるため、複数の孔部が第1導電型半導体基板に至っていないことに起因するセンサの感度の低下を防止することができる。

30

## 【0020】

以上のような理由により、本発明に係るセンサによれば、製造コストを低くすることが可能であると共に、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが可能となる。

## 【0021】

さらに、本発明に係るセンサにおいて、複数の孔部は、バックゲート電極を陽極電極として用いた陽極酸化法によって形成されていることが好ましい。これにより、複数の孔部を直線的に形成することができ、また、各孔部の直径のばらつきを低減させることができる。

40

## 【0022】

また、上述の課題を解決するため、本発明に係るセンサの製造方法は、電界効果トランジスタ型のセンサの製造方法であって、第1導電型半導体基板の主面上に、当該第1導電型半導体基板とpn接合を構成する第2導電型半導体領域を形成する半導体領域形成工程と、第1導電型半導体基板の裏面上にバックゲート電極を形成するバックゲート電極形成工程と、第2導電型半導体領域に、複数の孔部を形成する孔部形成工程と、第2導電型半

50

導体領域の上面又は側面に互いに離間するソース電極及びドレイン電極を形成し、その際、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部はソース電極及びドレイン電極によって覆われていないようにするソース・ドレイン電極形成工程とを備え、孔部形成工程は、第1導電型半導体基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、第2導電型半導体領域に、当該第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びる複数の孔部であって、第1導電型半導体基板には至っていない複数の孔部を形成する陽極酸化工程を含むことを特徴とする。

【0023】

本発明に係るセンサの製造方法においては、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部を覆わないように、ソース電極及び前記ドレイン電極が形成される。そのため、第2導電型半導体領域の上面の上記少なくとも一部は、オープンゲートの一部を構成すると共に、複数の孔部の側面は、オープンゲートの他の一部となる。そのため、感度の高いセンサが得られる。

10

【0024】

また、本発明に係るセンサの製造方法は、導電性を有する第1導電型半導体基板上に第2導電型半導体領域を形成する半導体領域形成工程と、第2導電型半導体領域に、複数の孔部を形成する孔部形成工程とを備え、孔部形成工程は、第1導電型半導体基板を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、第2導電型半導体領域に複数の孔部を形成する陽極酸化工程を含んでいる。そのため、複数の孔部を有する第2導電型半導体領域を基板上に形成した後に、当該基板と第2導電型半導体領域とを分離し、別の基板に第2導電型半導体領域を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

20

【0025】

また、本発明に係るセンサの製造方法では、陽極酸化工程において形成される複数の孔部は、第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びると共に、第1導電型半導体基板には至っていない。そのため、各孔部の深さのばらつきを抑制することができる。

【0026】

また、本発明に係るセンサの製造方法では、半導体領域形成工程において、第1導電型半導体基板とpn接合を構成する第2導電型半導体領域を形成し、また、バックゲート電極形成工程において、第1導電型半導体基板の裏面上にバックゲート電極を形成している。そのため、バックゲート電極によって当該pn接合に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部に空乏層を形成することができる。これにより、測定中に、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部に検知電流が流れることを抑制することができるため、複数の孔部が第1導電型半導体基板に至っていないことに起因する感度の低下を防止することが可能なセンサを得ることができる。

30

【0027】

以上のような理由により、本発明に係るセンサの製造方法によれば、製造コストが低いと共に、特性のばらつきを抑制しながら、感度を向上させることが可能なセンサを得ることができる。

【0028】

さらに、本発明に係るセンサの製造方法において、孔部形成工程は、陽極酸化工程の前に、第2導電型半導体領域の上面に、複数の開口を有するマスクを形成するマスク形成工程をさらに含むことが好ましい。これにより、第2導電型半導体領域に複数の開口を容易に形成することができる。

40

【0029】

また、上述の課題を解決するため、本発明に係る他の態様のセンサは、第1導電型半導体基板と、第1導電型半導体基板の主面上に設けられた第2導電型半導体領域と、第2導電型半導体領域の上面又は側面に設けられた第1電極と、第1電極と離間するように第2導電型半導体領域の上面又は側面に設けられた第2電極と、第1導電型半導体基板の裏面上に設けられた第3電極とを備え、第1導電型半導体基板と第2導電型半導体領域とはp

50

n接合を構成し、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部は、第1電極及び第2電極によって覆われておらず、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部には、複数の孔部が形成されており、複数の孔部は、それぞれ、第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びると共に、第1導電型半導体基板には至っておらず、第2導電型半導体領域の上面の少なくとも一部及び複数の孔部の側面は、測定対象を作用させる感応面を構成しており、測定対象が感応面に作用することにより、第2導電型半導体領域の電気伝導度が変化することを特徴とする。

【0030】

本発明に係る他の態様のセンサにおいては、感応面は、複数の孔部の側面を含んでいるために、表面積が大きくなる。そのため、センサの感度を高くすることができる。

10

【0031】

また、本発明に係る他の態様のセンサにおいては、導電性を有する第1導電型半導体基板上に、第2導電型半導体領域が設けられ、第2導電型半導体領域に複数の孔部が形成されている。そのため、第1導電型半導体基板上に均一な第2導電型半導体領域を形成した後、第1導電型半導体基板を電極として用いた方法によって、第2導電型半導体領域に複数の孔部を形成することができる。これにより、複数の孔部を有する第2導電型半導体領域を基板上に形成した後、当該基板と第2導電型半導体領域とを分離し、別の基板に第2導電型半導体領域を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

【0032】

また、本発明に係る他の態様のセンサにおいては、複数の孔部は、第2導電型半導体領域の上面から第1導電型半導体基板に向かって延びると共に、第1導電型半導体基板には至っていないため、複数の孔部を形成する際に、各孔部の深さのばらつきを抑制することができる。

20

【0033】

また、本発明に係る他の態様のセンサは、第1導電型半導体基板と第2導電型半導体領域とはpn接合を構成し、第1導電型半導体基板の裏面上に第3電極を備えている。そのため、第3電極によって当該pn接合に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部に空乏層を形成することができる。これにより、測定中に、第1電極から第2電極に流れる検知電流が、複数の孔部が延びていない第2導電型半導体領域の下部を経由することを抑制することができるため、複数の孔部が第1導電型半導体基板に至っていないことに起因するセンサの感度の低下を防止することができる。

30

【0034】

以上のような理由により、本発明に係るセンサによれば、製造コストを低くすることが可能であると共に、特性のばらつきを抑制しながら、感度を向上させることが可能となる。

【発明の効果】

【0035】

本発明によれば、製造コストが低いと共に、センサの特性のばらつきを抑制しながら、センサの感度を向上させることが可能なセンサ、及び、このようなセンサの製造方法が提供される。

40

【図面の簡単な説明】

【0036】

【図1】第1実施形態のセンサを示す斜視図である。

【図2】第1実施形態の半導体領域の断面図である。

【図3】第1実施形態のセンサの断面図である。

【図4】第1実施形態のセンサの断面図である。

【図5】第1実施形態の半導体領域の断面図である。

【図6】第1実施形態のセンサの断面図である。

【図7】第1実施形態の半導体領域の断面図である。

50

【図 8】第 1 実施形態のセンサの断面図である。

【図 9】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 10】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 11】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 12】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 13】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 14】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 15】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 16】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 17】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

10

【図 18】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 19】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 20】第 1 実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図及び断面図である。

【図 21】第 2 実施形態のセンサの断面図である。

【図 22】実施例 1 のソース・ドレイン電流 ( $I_{DS}$ ) の時間変化を示す図である。

【図 23】実施例 1 のソース・ドレイン電流の変化量 ( $I_{DS}$ ) と pH 値との関係を示す図である。

【図 24】比較例 1 と実施例 1 の電解液に対する感度 ( $\mu A / pH$ ) を示す図である。

【図 25】第 1 実施形態の変形例のセンサの断面図である。

【発明を実施するための形態】

20

【0037】

以下、実施の形態に係るセンサ及びセンサの製造方法について、添付図面を参照しながら詳細に説明する。なお、各図面において、可能な場合には同一要素には同一符号を用いる。また、図面中の構成要素内及び構成要素間の寸法比は、図面の見易さのため、それぞれ任意となっている。

【0038】

(第 1 実施形態)

第 1 実施形態のセンサとして、電界効果トランジスタ型のセンサについて説明する。図 1 は、本実施形態のセンサを示す斜視図である。

【0039】

30

図 1 に示すように、本実施形態のセンサ 1 は、半導体基板 3 と、半導体領域 5 と、ソース電極 7 と、ドレイン電極 9 と、バックゲート電極 11 と、を備えている。なお、図 1 においては、直交座標系 S が示されており、図 2 以降の各図においても、必要に応じて直交座標系 S が示されている。

【0040】

半導体基板 3 は、第 1 導電型 (例えば、p 型) の半導体材料からなる基板である。本実施形態においては、半導体基板 3 は矩形状の基板である。半導体基板 3 を構成する半導体材料としては、例えば、InP、GaAs、GaP、GaN、InSb 等の III-V 族半導体、CdSe、CdTe、ZnTe 等の II-VI 族半導体、SiC 等の IV-IV 族半導体、Si、Ge 等の単元素半導体、又は、TiO<sub>2</sub>、ZnO、WO<sub>3</sub> 等の酸化物半導体や、これらの混晶材料からなる。そして、半導体基板 3 には、第 1 導電型の不純物がドーピングされている。なお、図 1 の直交座標系 S においては、半導体基板 3 の主面 3m の長辺方向に X 軸を設定し、半導体基板 3 の主面 3m の短辺方向に Y 軸を設定し、半導体基板 3 の主面 3m と垂直な方向に Z 軸を設定している。

40

【0041】

半導体領域 5 は、半導体基板 3 の主面 3m 上に設けられている。半導体領域 5 は、第 2 導電型 (例えば第 1 導電型が p 型の場合、n 型) の半導体材料からなる半導体領域である。半導体領域 5 は、本実施形態においては、半導体基板 3 の主面 3m 上に積層された層状の領域である。即ち、センサ 1 の積層方向は、Z 軸方向である。そして、半導体基板 3 と半導体領域 5 とは、pn 接合 J を構成している。

50



## 【0042】

半導体領域5を構成する材料としては、例えば、InP、GaAs、GaP、GaN、InSb等のIII-V族半導体、CdSe、CdTe、ZnTe等のII-VI族半導体、SiC等のIV-IV族半導体、Si、Ge等の単元素半導体、又は、TiO<sub>2</sub>、ZnO、WO<sub>3</sub>等の酸化物半導体や、これらの混晶材料からなる。そして、半導体領域5には、第2導電型の不純物がドーピングされている。

## 【0043】

ソース電極7は、半導体領域5の上面5uの一部上に設けられている。本実施形態においては、ソース電極7は、半導体領域5の上面5uの-X軸方向の外縁に接するように設けられている。ソース電極7は、金属等の導電性材料からなる。例えば、半導体領域5がn型のIII-V族半導体からなる場合、ソース電極7は、Ge、Au、Ni等の金属からなることが好ましい。ソース電極7は半導体領域5とオーミック接触していることが好ましい。

10

## 【0044】

ドレイン電極9は、半導体領域5の上面5uの他の一部上に設けられている。これにより、本実施形態の半導体領域5は多孔質構造となっている。本実施形態においては、ドレイン電極9は、半導体領域5の上面5uのX軸方向の外縁に接するように設けられている。ドレイン電極9は、金属等の導電性材料からなる。例えば、半導体領域5がn型のIII-V族半導体からなる場合、ドレイン電極9は、Ge、Au、Ni等の金属からなることが好ましい。ドレイン電極9は半導体領域5とオーミック接触していることが好ましい。

20

## 【0045】

半導体領域5の上面5uの一部5eは、Z方向から見て、ソース電極7及びドレイン電極9によって覆われていない。即ち、本実施形態においては、半導体領域5の上面5u上において、ソース電極7とドレイン電極9は、X軸方向に互いに離間するように設けられている。そのため、本実施形態においては、半導体領域5の上面5uの一部5eは、露出している。

## 【0046】

また、半導体領域5の上面5uには、複数の孔部15が形成されている。詳細は後述するように、複数の孔部15は、それぞれ、半導体領域5の上面5uから半導体基板3に向かって延びているが、半導体基板3には達していない。

30

## 【0047】

バックゲート電極11は、半導体基板3の裏面3b上に設けられている。そのため、バックゲート電極11は、半導体基板3を介して半導体領域5と対向している。バックゲート電極11は、金属等の導電性材料からなる。例えば、半導体基板3がp型のIII-V族半導体からなる場合、バックゲート電極11は、Au、Zn、Ni等の金属からなることが好ましい。バックゲート電極11は、半導体基板3とオーミック接触していることが好ましい。

## 【0048】

次に、半導体領域5の構成について、詳細に説明する。図2は、Z軸と垂直な面で切断したときの半導体領域の断面図であり、図3は、Y軸と垂直な面で切断したときのセンサの断面図である。また、図3においては、センサの電気回路構成も示している。

40

## 【0049】

図2に示すように、複数の孔部15は、Z軸方向から見て、六方格子状に配列している。複数の孔部15の配列の態様は、Z軸方向から見て、正方格子状、直方格子状、菱形格子状、又は、平行四辺形格子状であってもよく、また、ランダムであってもよい。各孔部15のZ軸と垂直な面での切断形状は、本実施形態では円形であるが、楕円形や、矩形等の多角形であってもよい。

## 【0050】

半導体領域5のうち、複数の孔部15の側面15sの周辺には、空乏層5dが形成されている。空乏層5dの厚さ(XY面における厚さ)は、孔部15の側面15sの表面電位

50

に対応して変化する。

【0051】

また、図3に示すように、複数の孔部15は、それぞれ、半導体領域5の上面5uから半導体基板3に向かって延びているが、半導体基板3には達していない。即ち、半導体領域5は、複数の孔部15が形成された孔部形成領域5aと、複数の孔部15が形成されていない孔部非形成領域5bと、を有している。孔部非形成領域5bは、半導体基板3と孔部形成領域5aとの間に位置する。

【0052】

半導体領域5のZ軸方向の厚さは、例えば、0.1 $\mu\text{m}$ 以上、100 $\mu\text{m}$ 以下とすることができる。各孔部15のZ軸方向の深さは、例えば、0.1 $\mu\text{m}$ 以上、100 $\mu\text{m}$ 以下とすることができる。各孔部15の直径（各孔部15のZ軸と垂直な面での断面の直径）は、例えば、0.1 $\text{nm}$ 以上、1000 $\text{nm}$ 以下とすることができる。なお、各孔部15の直径は、測定対象物が孔部15内に侵入可能な大きさに設定される。また、測定対象物以外の不要物が各孔部15内に侵入しないように、各孔部15の直径を設定することもできる。

10

【0053】

また、半導体領域5の上面5uのうちの一部5e（上面5uのうち、Z方向から見て、ソース電極7及びドレイン電極9によって覆われていない部分）と、複数の孔部15の側面15sとで、オープンゲート5gを構成している。オープンゲート5gは、測定対象に対する感応面として機能する。

20

【0054】

オープンゲート5gの大きさは、特に制限されないが、オープンゲート5gのX軸に沿った方向の長さ（ゲート長）は、例えば、1 $\mu\text{m}$ 以上、5000 $\mu\text{m}$ 以下とすることができる。オープンゲート5gのY軸に沿った方向の長さ（ゲート幅）は、例えば、1 $\mu\text{m}$ 以上、5000 $\mu\text{m}$ 以下とすることができる。

【0055】

また、図3に示すように、ソース電極7とドレイン電極9との間には、スイッチSW1を介して電源21が電氣的に接続されている。電源21は、ソース電極7からドレイン電極9へ検知電流を流すための電源である。また、バックゲート電極11とソース電極7との間には、スイッチSW2を介して電源23が電氣的に接続されている。電源23は、バックゲート電極11及びソース電極7を介して、半導体基板3と半導体領域5との間に電圧を印加するための電源である。また、ソース電極7は、グラウンドに電氣的に接続されている。図3は、非測定状態におけるセンサ1の電気回路構成を示しており、スイッチSW1及びスイッチSW2はオフとなっている。

30

【0056】

次に、センサ1による測定原理について説明する。図4及び図6は、Y軸と垂直な面で切断したときのセンサの断面図であり、図5及び図7は、Z軸と垂直な面で切断したときの半導体領域の断面図である。図4及び図6は、測定状態におけるセンサ1の電気回路構成も示している。また、図4及び図5は、測定対象物がセンサに作用する前の状態を示した図であり、図6及び図7は、測定対象物がセンサに作用した後の状態を示した図である。

40

【0057】

まず、測定対象物がセンサに作用する前の状態とセンサに作用した後の状態とで共通する事項について説明する。

【0058】

図4及び図6に示すように、センサ1によって測定を行う際には、まず、スイッチSW2をオンにし、電源23によってバックゲート電極11とソース電極7との間に電圧を印加する。この際、半導体基板3と半導体領域5との間のpn接合Jに、逆電圧が印加されるようにする。例えば、第1導電型がp型で第2導電型がn型である場合、即ち、半導体基板3がp型半導体からなり、半導体領域5がn型半導体からなる場合、ソース電極7が

50

正電圧、バックゲート電極 11 が負電圧となるように（半導体領域 5 が正電圧、半導体基板 3 が負電圧となるように）、電源 23 によって印加する電圧の極性を選択する。

【0059】

これにより、半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b には、空乏層 5bd が形成される。図 4 及び図 6 に示すように、半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b の略全てが空乏層 5bd となるように、即ち、空乏層 5bd が複数の孔部 15 の底部に達するように、電源 23 によって pn 接合 J に印加する逆電圧の大きさを調節することが好ましい。後述のように、検知電流 30 が半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b を流れなくなるため、センサ 1 の測定感度が向上するためである。

【0060】

続いて、図 4 及び図 6 に示すように、スイッチ SW1 をオンにし、電源 21 によって半導体領域 5 内に検知電流 30 を流す。検知電流 30 は、ソース電極 7 から半導体領域 5 を経由してドレイン電極 9 に至る。図 4 及び図 6 に示すように半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b の略全てが空乏層 5bd となっている場合、検知電流 30 は半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b 内は殆ど流れず、検知電流 30 の大部分は半導体領域 5 の孔部形成領域 5a 内を流れる。

【0061】

図 5 及び図 7 に示すように、検知電流 30 は半導体領域 5 の空乏層 5d 内を流れることができない。そのため、検知電流 30 は、複数の孔部 15 の周りの空乏層 5d によって規定される半導体領域 5 内の経路に沿って、ソース電極 7 からドレイン電極 9 まで流れる。

【0062】

続いて、測定対象物がセンサに作用する前の状態とセンサに作用した後の状態とで異なる事項について説明する。

【0063】

図 4 及び図 5 に示すように、測定対象物がセンサ 1 に作用する前の状態においては、半導体領域 5 の空乏層 5d は、基準となる厚さを有している。そのため、図 5 に示すように、複数の孔部 15 の周りの空乏層 5d によって規定される半導体領域 5 内の経路は基準となる広さを有しており、ソース電極 7 とドレイン電極 9 間における半導体領域 5 の電気伝導度も、基準となる値となっている。そのため、ソース電極 7 からドレイン電極 9 まで流れる検知電流 30 は、基準となる電流値となっている。

【0064】

続いて、図 6 及び図 7 に示すように、測定対象物 27 がセンサ 1 に作用した後の状態においては、測定対象物 27 は、オープンゲート 5g（半導体領域 5 の上面 5u のうちの一部 5e、及び、複数の孔部 15 の側面 15s）に、吸着等によって接触する。これにより、オープンゲート 5g の表面電位が変化する。そして、この表面電位の変化に起因して、半導体領域 5 の空乏層 5d の厚さは、測定対象物 27 が存在しない場合の空乏層 5d の厚さ（図 4 及び図 5 参照）から変化する。例えば、図 6 及び図 7 に示すように、測定対象物 27 がオープンゲート 5g に吸着等によって接触することによって、半導体領域 5 の空乏層 5d の厚さが厚く変化する。

【0065】

これにより、図 7 に示すように、複数の孔部 15 の周りの空乏層 5d によって規定される半導体領域 5 内の経路は狭くなるため、ソース電極 7 とドレイン電極 9 間における半導体領域 5 の電気伝導度は、基準となる値よりも小さくなる。この測定対象物 27 がセンサ 1 に作用する前後の半導体領域 5 の電気伝導度の変化量は、センサ 1 に作用した測定対象物 27 の濃度に対応する。そのため、半導体領域 5 の電気伝導度の変化量を測定すれば、測定対象物 27 の濃度を測定することができる。

【0066】

半導体領域 5 の電気伝導度の変化量は、例えば、電源 21 によってソース電極 7 とドレイン電極 9 間に印加する電圧値を一定に保った状態で、測定対象物 27 をセンサ 1 に作用させることにより測定することができる。即ち、このような状態で測定対象物 27 をセン

10

20

30

40

50

サ 1 に作用させると、図 7 に示すように、ソース電極 7 とドレイン電極 9 間における半導体領域 5 の電気伝導度が基準となる値よりも小さくなるため、検知電流 30 は、基準となる電流値よりも小さくなっている。この検知電流 30 の電流値の変化量は、半導体領域 5 の電気伝導度に対応して決まるため、測定対象物 27 をセンサ 1 に作用させる前後の検知電流 30 の電流値の変化量を測定すれば、測定対象物 27 の濃度を測定することができる。

#### 【0067】

測定対象物 27 は、オープンゲート 5g に接触することにより、オープンゲート 5g の表面電位を変化させるものである。具体的には、測定対象物 27 は、水素イオン、アンモニウムイオンやリン酸イオン等のイオン、水素、NO<sub>x</sub> や CO<sub>x</sub> 等のガス、血中成分や DNA 等の生体物質等である。そのため、本実施形態のセンサ 1 は、pH センサ等のイオンセンサ、ガスセンサ、及び、バイオセンサ等として使用することができる。

10

#### 【0068】

上述のような本実施形態に係るセンサ 1 によれば、感応面となるオープンゲート 5g は、複数の孔部 15 の側面 15s を含んでいるために、表面積が大きくなる（図 3、図 4、及び、図 6 参照）。そのため、センサ 1 の感度を高くすることができる。特に本実施形態のセンサ 1 では、測定対象物 27 がセンサ 1 に作用すると、複数の孔部 15 の周りの空乏層 5d は、Z 軸と垂直な断面において 2 次元的に広がるため、ソース電極 7 とドレイン電極 9 間における半導体領域 5 の電気伝導度が大きく変化する（図 5 及び図 7 参照）。そのため、センサ 1 の測定感度は非常に高くなる。

20

#### 【0069】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1 においては、導電性を有する第 1 導電型の半導体基板 3 上に、第 2 導電型の半導体領域 5 が設けられ、この半導体領域 5 に複数の孔部 15 が形成されている（図 1、図 3、図 4 及び図 6 参照）。そのため、半導体基板 3 上に均一な半導体領域 5 を形成した後に、半導体基板 3 を電極として用いた方法によって、半導体領域 5 に複数の孔部 15 を形成することができる。これにより、複数の孔部 15 を有する半導体領域 5 を基板上に形成した後に、当該基板と半導体領域 5 とを分離し、別の基板に半導体領域 5 を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

#### 【0070】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1 においては、複数の孔部 15 は、半導体領域 5 の上面 5u から半導体基板 3 に向かって延びると共に、半導体基板 3 には至っていない（図 3、図 4 及び図 6 参照）。そのため、複数の孔部 15 を形成する際に、各孔部 15 の深さのばらつきを抑制することができる。

30

#### 【0071】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1 においては、半導体基板 3 と半導体領域 5 とは pn 接合 J を構成し、センサ 1 は半導体基板 3 の裏面 3b 上にバックゲート電極 11 を備えている（図 1、図 3、図 4 及び図 6 参照）。そのため、バックゲート電極 11 によって当該 pn 接合 J に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部 15 が延びていない半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b に空乏層 5bd を形成することができる（図 4 及び図 6 参照）。これにより、測定中に、ソース電極 7 からドレイン電極 9 に流れる検知電流 30 が、複数の孔部 15 が延びていない半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b を経由することを抑制することができるため、複数の孔部 15 が半導体基板 3 に至っていないことに起因するセンサ 1 の感度の低下を防止することができる。

40

#### 【0072】

以上のような理由により、本実施形態に係るセンサ 1 によれば、製造コストを低くすることが可能であると共に、センサ 1 の特性のばらつきを抑制しながら、センサ 1 の感度を向上させることが可能となる。

#### 【0073】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1 において、複数の孔部 15 は、バックゲート電極 11 を陽極電極として用いた陽極酸化法によって形成されていることが好ましい

50

。これにより、複数の孔部 15 を直線的に形成することができ、また、各孔部 15 の直径のばらつきを低減させることができる。その結果、センサ 1 の特性のばらつきを抑制することができる。

#### 【0074】

また、上述のような本実施形態のセンサ 1 においては、測定の際、半導体領域 5 の孔部非形成領域 5 b の略全てが空乏層 5 b d となるように、電源 23 によって p n 接合 J に逆電圧を印加しているが（図 4 及び図 6 参照）、図 8 に示すように、孔部非形成領域 5 b のうちの下層部のみ空乏層 5 b d を形成し、孔部非形成領域 5 b のうちの上層部 5 b n には空乏層を形成しないように、電源 23 によって p n 接合 J に印加する電圧の大きさを調節することができる。この場合、検知電流 30 の一部は、孔部非形成領域 5 b の上層部 5 b n にも流れるため、センサ 1 の感度が低下する。即ち、本実施形態のセンサ 1 においては、電源 23 によって p n 接合 J に印加する電圧の大きさを調節することにより、センサ 1 の感度を調節することが可能である。これにより、例えば、複数のセンサ 1 によってセンサアレイを構成した場合、各センサ 1 の感度の大きさを調節することによって、各センサ 1 間の感度のばらつきを抑制することが可能となる。

10

#### 【0075】

次に、本実施形態のセンサの製造方法について、図 9 ~ 図 20 を参照しながら説明する。図 9 ~ 図 20 の (A) は、本実施形態のセンサの製造方法を説明するための平面図であり、図 9 ~ 図 20 の (B) は、本実施形態のセンサの製造方法を説明するための断面図である。

20

#### 【0076】

本実施形態のセンサの製造方法は、半導体領域形成工程と、バックゲート電極形成工程と、孔部形成工程と、ソース・ドレイン電極形成工程と、を備えている。

#### 【0077】

(半導体領域形成工程及びバックゲート電極形成工程)

これらの工程においては、まず、図 9 に示すように、第 1 導電型の半導体基板 3 を準備する。そして、半導体基板 3 の主面 3 m 上に、分子線エピタキシ法、有機金属気相成長法、液相成長法等によって、第 2 導電型の半導体領域 5 を結晶成長させる。又は、第 1 導電型の半導体基板を準備し、当該半導体基板の主面の少なくとも一部を含む領域に、第 2 導電型の不純物をドーピングしてもよい。この場合、当該半導体基板の当該不純物がドーピングされた領域が半導体領域 5 となり、当該半導体基板の当該不純物がドーピングされていない領域が半導体基板 3 となる。半導体基板 3 と半導体領域 5 は、p n 接合 J を構成するようにする。半導体領域 5 の厚さは、例えば、5  $\mu$ m とすることができる。

30

#### 【0078】

その後、半導体基板 3 の裏面 3 b 上に、真空蒸着法、スパッタリング法、及び、電着法等によって、バックゲート電極 11 を形成する。バックゲート電極 11 を形成した後に、バックゲート電極 11 に 300 ~ 500 程度の熱処理を施してもよい。

#### 【0079】

(孔部形成工程)

孔部形成工程は、マスク形成工程と、陽極酸化工程と、を含んでいる。

40

#### 【0080】

(マスク形成工程)

マスク形成工程においては、図 10 に示すように、半導体領域 5 の上面 5 u に、複数の開口 33 h を有するマスク 33 を形成する。マスク 33 は、例えば、絶縁材料からなる。開口 33 h は、マスク 33 の厚さ方向に延びている。

#### 【0081】

(陽極酸化工程)

陽極酸化工程においては、マスク 33 で覆われた半導体領域 5 を電解液の中にひたす。半導体領域 5 が n 型の InP からなる場合、電解液としては、例えば、1 mol/L の塩酸に少量の硝酸を加えた溶液を用いることができる。そして、マスク 33 の上方に白金等

50

の金属からなる電極板を、半導体領域 5 と対応するように設ける。そして、半導体基板 3 を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、半導体領域 5 をエッチングする。具体的には、バックゲート電極 1 1 と電極板間に、半導体基板 3 が陽極となるように電圧を印加し、陽極電流を流す。これにより、半導体領域 5 のマスク 3 3 によってマスクされていない領域をエッチングする。半導体領域 5 が n 型の InP からなる場合、バックゲート電極 1 1 と電極板間に印加する電圧は、例えば、6 V ~ 7 V とすることができ、この電圧の印加時間は、例えば、5 秒間とすることができる。

【0082】

このようにして、図 1 1 に示すように、半導体領域 5 に、半導体領域 5 の上面 5 u から半導体基板 3 に向かって延びると共に、半導体基板 3 には至っていない複数の孔部 1 5 を形成する。複数の開口 3 3 h を有するマスク 3 3 を用いることにより、半導体領域 5 に複数の孔部 1 5 を容易に形成することができる。

10

【0083】

なお、孔部形成工程においては、マスク形成工程を省略し、陽極酸化工程において、半導体領域 5 に複数の孔部 1 5 を自己組織化形成してもよい。即ち、マスク 3 3 を用いずに、半導体領域 5 を適切な条件下で陽極酸化法によってエッチングすることにより、所定の態様（例えば、六方格子状）で配列した複数の孔部 1 5 を自己組織化的に形成することもできる。

【0084】

（ソース・ドレイン電極形成工程）

20

その後、図 1 2 に示すように、半導体領域 5 上に、酸化シリコンや窒化シリコン等からなる絶縁物層 3 5 を形成する。

【0085】

続いて、図 1 3 に示すように、絶縁物層 3 5 の上面のうち、ソース電極及びドレイン電極を形成予定面以外の部分を、フォトレジスト層 3 7 で覆う。

【0086】

そして、図 1 4 に示すように、フォトレジスト層 3 7 をマスクとして用いて絶縁物層 3 5 をエッチングすることにより、半導体領域 5 の上面 5 u の一部を露出させる。

【0087】

続いて、図 1 5 に示すように、半導体領域 5 及びフォトレジスト層 3 7 上に、真空蒸着法等によって、金属層 3 9 を形成する。金属層 3 9 を形成後、金属層 3 9 に 300 ~ 500 程度の熱処理を施してもよい。

30

【0088】

そして、図 1 6 に示すように、フォトレジスト層 3 7 を除去（リフトオフ）する。

【0089】

次に、図 1 7 に示すように、オープンゲート形成予定領域に開口 4 1 h を有し、絶縁物層 3 5、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 の一部を覆うフォトレジスト層 4 1 を形成する。

【0090】

続いて、図 1 8 に示すように、開口 4 1 h の下部の絶縁物層 3 5 をエッチングすることにより、半導体領域 5 の上面 5 u の一部を露出させる。このようにして、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 が形成される。半導体領域 5 の上面 5 u のうちの一部 5 e は、Z 軸方向から見て、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 に覆われていない。そして、半導体領域 5 の上面 5 u のうちの一部 5 e と、複数の孔部 1 5 の側面 1 5 s とで、感応面であるオープンゲート 5 g が形成される。

40

【0091】

その後、図 1 9 に示すように、半導体基板 3 を主面 3 m と垂直な面で切断することにより、図 2 0 に示すように、複数のセンサ 1 が完成する。なお、半導体基板 3 を主面 3 m と垂直な面で切断する代わりに、各センサ 1 となる各領域間に半導体基板 3 の厚さ方向の中間部に至るストライプ溝を形成する等の方法によって、各センサ 1 となる各領域間を電気

50

的に分離する（素子間分離する）ことにより、複数のセンサ 1 を完成させることもできる。

【0092】

上述のような本実施形態に係るセンサの製造方法においては、半導体領域 5 の上面 5 u の一部 5 e は、オープンゲート 5 g の一部を構成すると共に、複数の孔部 1 5 の側面 1 5 s は、オープンゲート 5 g の他の一部となる（図 1 8 参照）。そのため、感度の高いセンサ 1 が得られる。

【0093】

また、上述のような本実施形態に係るセンサの製造方法は、導電性を有する第 1 導電型の半導体基板 3 上に第 2 導電型の半導体領域 5 を形成する半導体領域形成工程と、半導体領域 5 に、複数の孔部 1 5 を形成する孔部形成工程とを備え、孔部形成工程は、半導体基板 3 を陽極電極として用いた陽極酸化法によって、半導体領域 5 に複数の孔部 1 5 を形成する陽極酸化工程を含んでいる（図 9 ~ 図 1 1 参照）。そのため、複数の孔部 1 5 を有する半導体領域 5 を基板上に形成した後に、当該基板と半導体領域 5 とを分離し、別の基板に半導体領域 5 を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

10

【0094】

また、上述のような本実施形態に係るセンサの製造方法では、陽極酸化工程において形成される複数の孔部 1 5 は、半導体領域 5 の上面 5 u から半導体基板 3 に向かって延びると共に、半導体基板 3 には至っていない（図 1 1 参照）。そのため、各孔部 1 5 の深さのばらつきを抑制することができる。

20

【0095】

また、上述のような本実施形態に係るセンサの製造方法では、半導体領域形成工程において、半導体基板 3 と p n 接合 J を構成する半導体領域 5 を形成し、また、バックゲート電極形成工程において、半導体基板 3 の裏面 3 b 上にバックゲート電極 1 1 を形成している（図 9 参照）。そのため、バックゲート電極 1 1 によって当該 p n 接合 J に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部 1 5 が延びていない半導体領域 5 の孔部非形成領域 5 b に上層部 5 b n を形成することができる（図 4 及び図 6 参照）。これにより、測定中に、複数の孔部 1 5 が延びていない半導体領域 5 の下部に検知電流 3 0 が流れることを抑制することができるため、複数の孔部 1 5 が半導体基板 3 に至っていないことに起因する感度の低下を防止することが可能なセンサ 1 を得ることができる（図 5 及び図 7 参照）。

30

【0096】

以上のような理由により、本実施形態に係るセンサの製造方法によれば、製造コストが低いと共に、特性のばらつきを抑制しながら、感度を向上させることが可能なセンサ 1 を得ることができる。

【0097】

（第 2 実施形態）

次に、第 2 実施形態のセンサについて説明する。本実施形態の説明においては、図面において第 1 実施形態と同一の要素には同一の符号を付すことにより、その要素の説明を省略する場合がある。

【0098】

図 2 1 は Y 軸と垂直な面で切断したときの本実施形態のセンサの断面図である。図 2 1 に示すように、本実施形態のセンサ 1 x は、第 1 実施形態のセンサ 1 のソース電極 7、ドレイン電極 9、バックゲート電極 1 1、及び、オープンゲート 5 g の代わりに、第 1 電極 7 x、第 2 電極 9 x、第 3 電極 1 1 x、及び、感応面 5 g x を備えている。本実施形態の第 1 電極 7 x、第 2 電極 9 x、第 3 電極 1 1 x、及び、感応面 5 g x は、それぞれ、第 1 実施形態のソース電極 7、ドレイン電極 9、バックゲート電極 1 1、及び、オープンゲート 5 g と同様の構成を有している。

40

【0099】

また、本実施形態のセンサ 1 x の半導体領域 5 は、測定対象 2 7 x が感応面 5 g x に作用することにより、電気伝導度に変化する。測定対象 2 7 x としては、例えば、磁気や光

50

を挙げることができる。測定対象 27x が磁気である場合、測定対象 27x に対しサイクロン運動する半導体領域 5 内の電子（又は正孔）の運動や位相変調を受けた電子（又は正孔）の干渉現象によって、半導体領域 5 の孔部形成領域 5a の電気伝導度が変化する。

【0100】

また、測定対象 27x が光である場合、測定対象 27x によって半導体領域 5 内に電子・正孔対に起因する光電流が発生するため、半導体領域 5 の孔部形成領域 5a の電気伝導度が変化する。

【0101】

そのため、本実施形態のセンサ 1x は、磁気センサや光センサ等として使用することができる。

10

【0102】

上述のような本実施形態に係るセンサ 1x においては、感応面 5gx は、複数の孔部 15 の側面 15s を含んでいるために、表面積が大きくなる。そのため、感応面 5gx は測定対象 27x の作用を受けやすくなるため、センサ 1x の感度を高くすることができる。

【0103】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1x においては、導電性を有する第 1 導電型の半導体基板 3 上に、半導体領域 5 が設けられ、第 2 導電型の半導体領域 5 に複数の孔部 15 が形成されている。そのため、半導体基板 3 上に均一な半導体領域 5 を形成した後に、半導体基板 3 を電極として用いた方法によって、半導体領域 5 に複数の孔部 15 を形成することができる。これにより、複数の孔部 15 を有する半導体領域 5 を基板上に形成した後に、当該基板と半導体領域 5 とを分離し、別の基板に半導体領域 5 を固定する必要はないため、製造コストを低くすることができる。

20

【0104】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1x においては、複数の孔部 15 は、半導体領域 5 の上面 5u から半導体基板 3 に向かって延びると共に、半導体基板 3 には至っていないため、複数の孔部 15 を形成する際に、各孔部 15 の深さのばらつきを抑制することができる。

【0105】

また、上述のような本実施形態に係るセンサ 1x は、半導体基板 3 と半導体領域 5 とは p n 接合 J を構成し、半導体基板 3 の裏面 3b 上に第 3 電極 11x を備えている。そのため、第 3 電極 11x によって当該 p n 接合 J に逆バイアス電圧を印加すれば、複数の孔部 15 が延びていない半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b に空乏層 5bd を形成することができる。これにより、測定中に、第 1 電極 7x から第 2 電極 9x に流れる検知電流が、複数の孔部 15 が延びていない半導体領域 5 の孔部非形成領域 5b を経路することを抑制することができるため、複数の孔部 15 が半導体基板 3 に至っていないことに起因するセンサの感度の低下を防止することができる。

30

【0106】

以上のような理由により、上述のような本実施形態に係るセンサ 1x によれば、製造コストを低くすることが可能であると共に、特性のばらつきを抑制しながら、感度を向上させることが可能となる。

40

【0107】

（実施例）

以下、本発明の効果をより一層明らかなものとするため、実施例および比較例を用いて説明する。

【0108】

第 1 実施形態のセンサ 1 に対応するセンサを実施例 1 とした。この実施例 1 のセンサを pH センサとして用いた場合の特性を評価した。具体的には、実施例 1 のセンサを、0.1 mol/L の塩化カリウム溶液からなる電解液中に浸した。ソース電極 7 とドレイン電極 9 との間に 0.5 V の電圧を印加し、p n 接合 J に逆電圧を印加するように、ソース電極 7 とバックゲート電極 11 との間にバックゲート電圧 ( $V_{BG}$ ) を印加した。バックゲ

50



ート電圧 ( $V_{BG}$ ) の大きさは、 $0V$ 、 $-1.0V$ 、及び、 $-1.5V$  の 3 種類とした。そのような状態で、電解液中に一定時間ごとに所定量の希釈塩酸溶液を滴下し、電解液の pH 値を減少させ、その際の実施例 1 のソース電極 7 とドレイン電極 9 との間に流れるソース・ドレイン電流 ( $I_{DS}$ ) の変化を測定した。

【0109】

図 2 2 は、上記特性評価によって得られた実施例 1 のソース・ドレイン電流 ( $I_{DS}$ ) の時間変化を示す図である。図 2 2 において、測定値の上又は下に、その時点での電解液の pH 値を示している。

【0110】

図 2 2 に示されるように、時間の経過と共に電解液の pH 値が減少すると、それに応答してソース・ドレイン電流 ( $I_{DS}$ ) が増加した。これは、pH 値の変化によって、半導体領域 5 の空乏層 5 d の厚さが減少したことを示している。

【0111】

また、図 2 3 は、上記特性評価によって得られた実施例 1 のソース・ドレイン電流の変化量 ( $I_{DS}$ ) と pH 値との関係を示す図である。図 2 3 に示されるように、実施例 1 においてバックゲート電圧 ( $V_{BG}$ ) が増加すると、センサの感度 (pH 値の変化に対するソース・ドレイン電流の変化の大きさ) が増加することがわかった。

【0112】

次に、比較例 1 及び実施例 1 の電解液に対する感度の比較を行った。比較例 1 は、半導体領域 5 が複数の孔部 1 5 を有していない点、及び、バックゲート電極 1 1 を備えていない点以外は、実施例 1 と同一の構造のセンサとした。

【0113】

図 2 4 は、比較例 1 と実施例 1 の電解液に対する感度 ( $\mu A / pH$ ) を示す図である。図 2 3 に示されるように、比較例 1 の電解液に対する感度は、 $1.7 \mu A / pH$  であった。それに対して、実施例 1 の電解液に対する感度は、バックゲート電圧 ( $V_{BG}$ ) が  $0V$  のときに、 $45.9 \mu A / pH$  であり、バックゲート電圧 ( $V_{BG}$ ) が  $-1.0V$  のときに、 $53.5 \mu A / pH$  であり、バックゲート電圧 ( $V_{BG}$ ) が  $-1.5V$  のときに、 $73.0 \mu A / pH$  であった。実施例 1 の感度は、最大で比較例 1 の約 4 3 倍となった。

【0114】

本発明は上述の実施形態に限定されず、様々な変形態様が可能である。

【0115】

例えば、上述の実施形態では、半導体領域 5 の複数の孔部 1 5 を陽極酸化法によって形成していたが、他の方法、例えば、均一な半導体領域 5 上に複数の開口を有するレジスト層を形成する工程と、このレジスト層をマスクとして半導体領域 5 をドライエッチングする工程とを含むフォトリソグラフィ法によって、複数の孔部 1 5 を形成することもできる。

【0116】

また、上述の実施形態では、オープンゲート 5 g は露出していたが (図 3、図 4 及び図 6 参照)、特定の測定対象物 2 7 に対する測定感度を向上させるために、オープンゲート 5 g は機能修飾されていてもよい。例えば、測定対象物 2 7 が溶液中のグルコースである場合、オープンゲート 5 g はグルコース酸化酵素によってコーティングされることによって、機能修飾されていてもよい。また、測定対象物 2 7 は水素イオンである場合、オープンゲート 5 g は  $SiO_2$  膜や  $Si_3N_4$  膜によってコーティングされることによって、機能修飾されていてもよい。

【0117】

また、上述の実施形態では、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 は、半導体領域 5 の上面 5 u に設けられていたが (図 3、図 4 及び図 6 参照)、Z 方向から見て半導体領域 5 の上面 5 u の少なくとも一部がソース電極 7 及びドレイン電極 9 によって覆われていなければ、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 は半導体領域 5 の側面や、半導体領域 5 の側面から上面 5 u に亘って設けられていてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 1 1 8 】

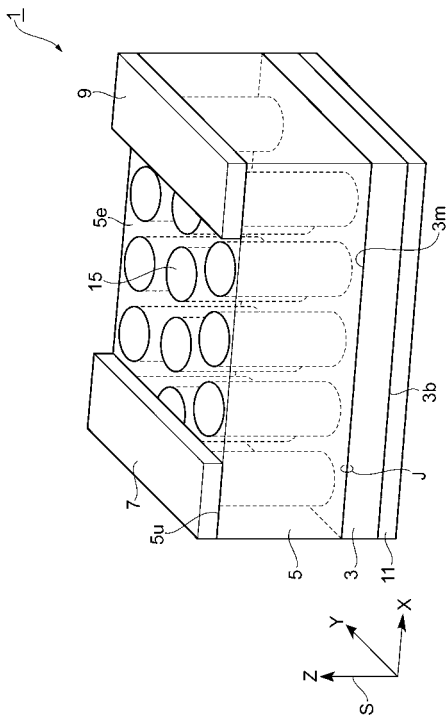
また、半導体基板 3、半導体領域 5、ソース電極 7、及び、ドレイン電極 9 の形状は、上述の実施形態の態様に限られない。例えば、図 25 ( A ) に示すように、ソース電極 7 及びドレイン電極 9 は、半導体領域 5 の上面 5 u の X 軸方向の外縁及び - X 軸方向の外縁に接していなくてもよい。また、図 25 ( B ) に示すように、半導体領域 5 の孔部形成領域 5 a が孔部非形成領域 5 b 内に埋め込まれていてもよい。また、図 25 ( C ) に示すように、半導体領域 5 の孔部形成領域 5 a が孔部非形成領域 5 b 内に埋め込まれており、さらに、孔部非形成領域 5 b が半導体基板 3 内に埋め込まれていてもよい。

【 符号の説明 】

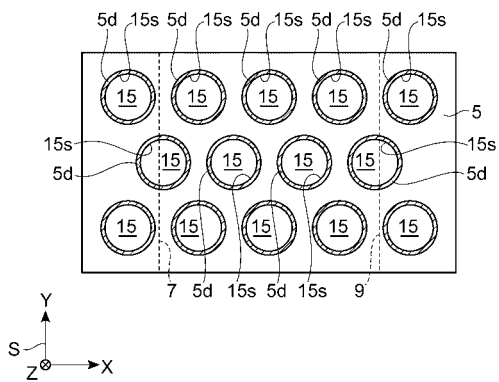
【 0 1 1 9 】

1・・・センサ、3・・・半導体基板、3 m・・・半導体基板の主面、3 b・・・半導体基板の裏面、5・・・半導体領域、5 g・・・オープンゲート、7・・・ソース電極、9・・・ドレイン電極、11・・・バックゲート電極、15・・・孔部、15 s・・・孔部の側面、J・・・pn 接合。

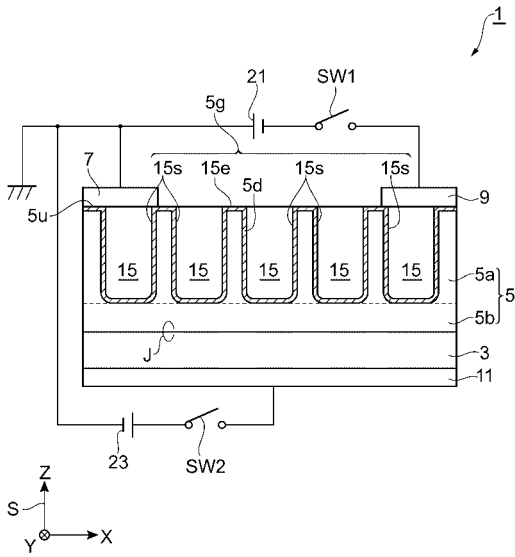
【 図 1 】



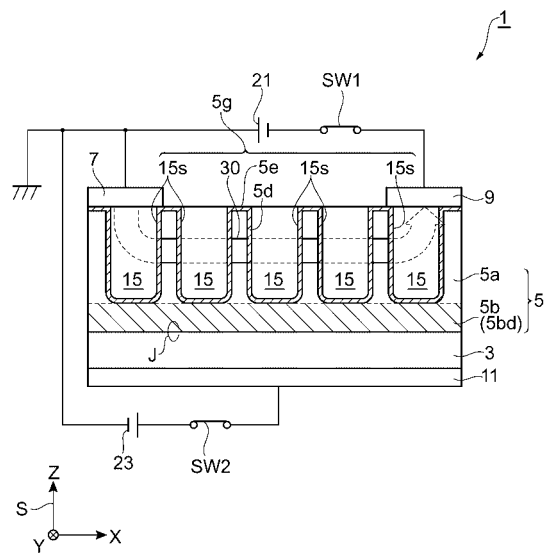
【 図 2 】



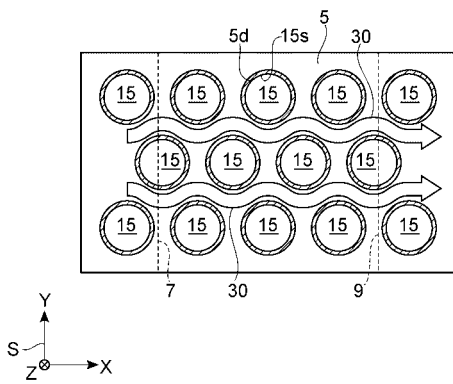
【 図 3 】



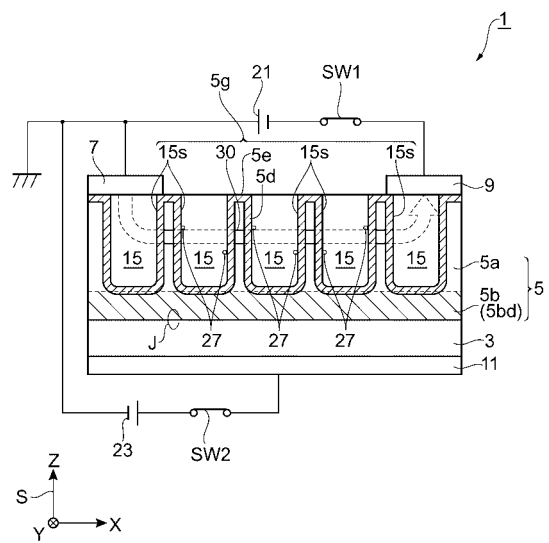
【 図 4 】



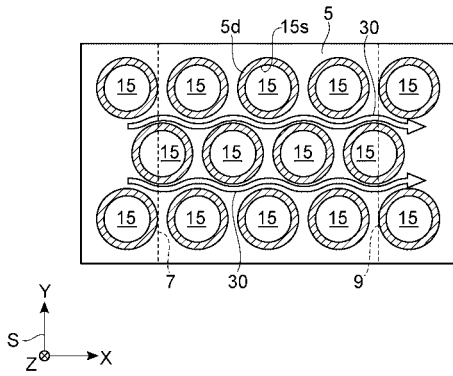
【 図 5 】



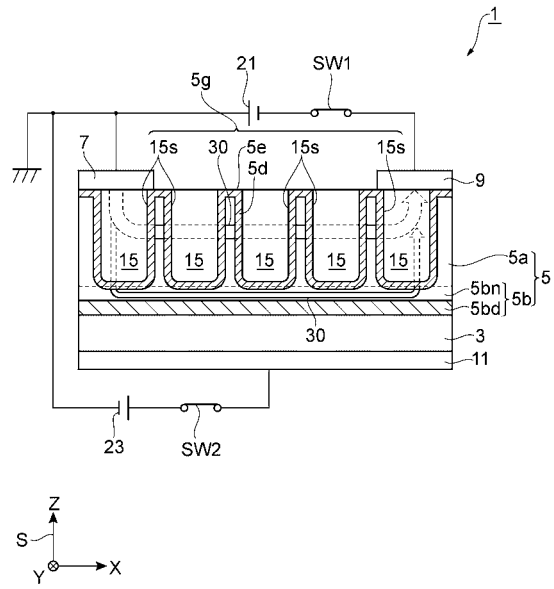
【 図 6 】



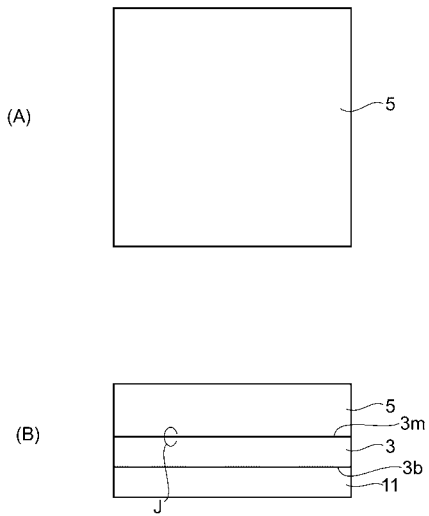
【 図 7 】



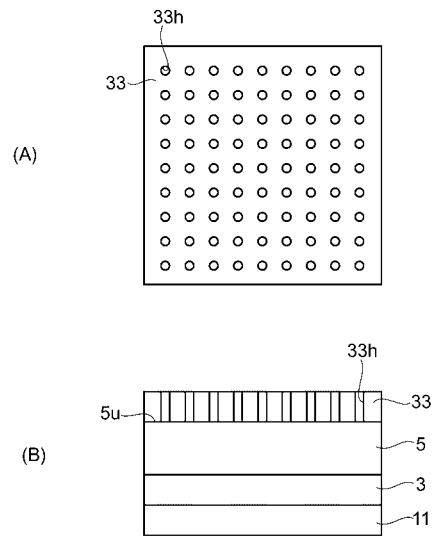
【 図 8 】



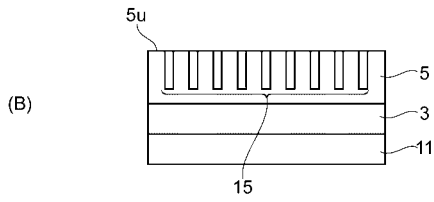
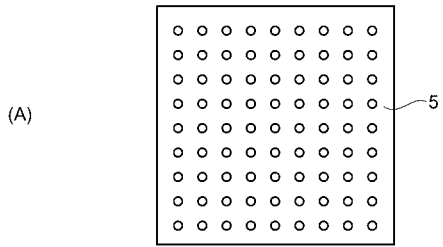
【 図 9 】



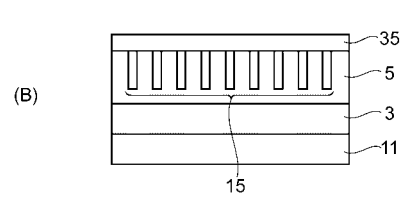
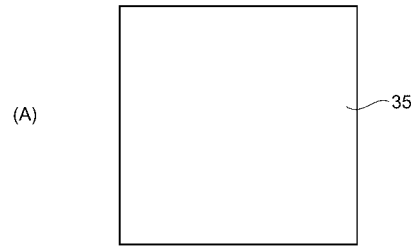
【 図 10 】



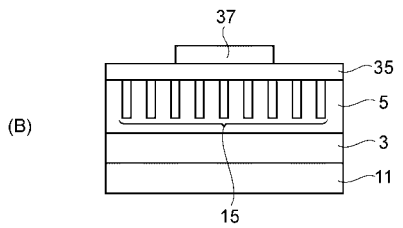
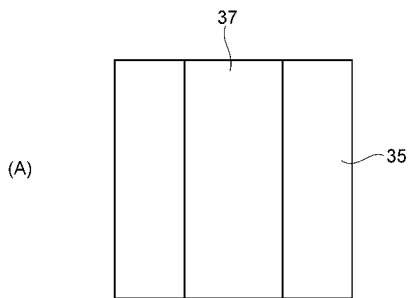
【 図 1 1 】



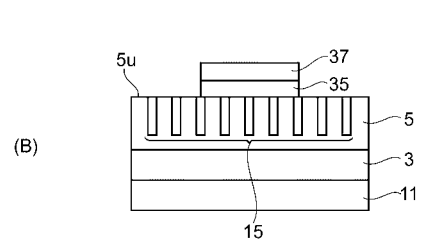
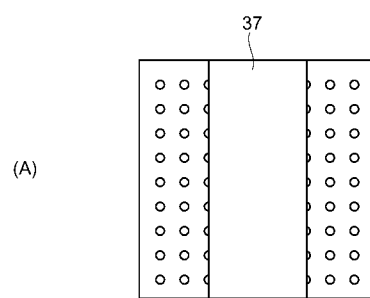
【 図 1 2 】



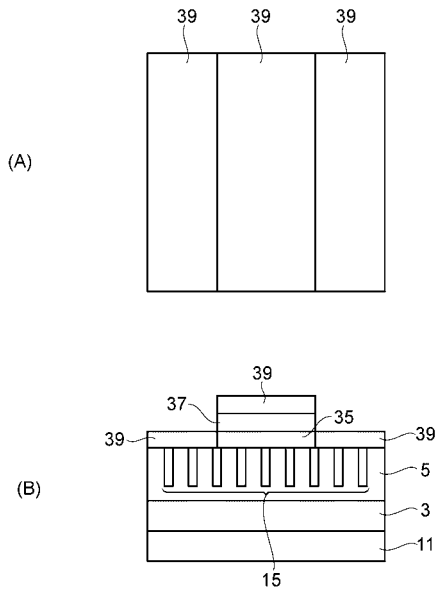
【 図 1 3 】



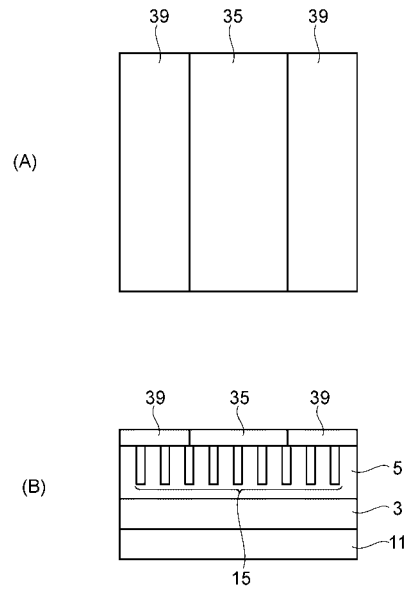
【 図 1 4 】



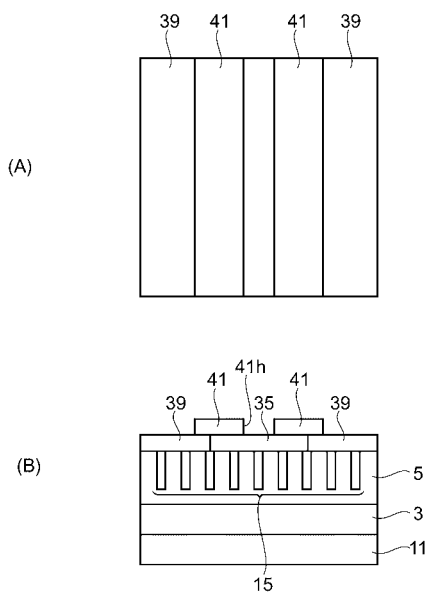
【 図 1 5 】



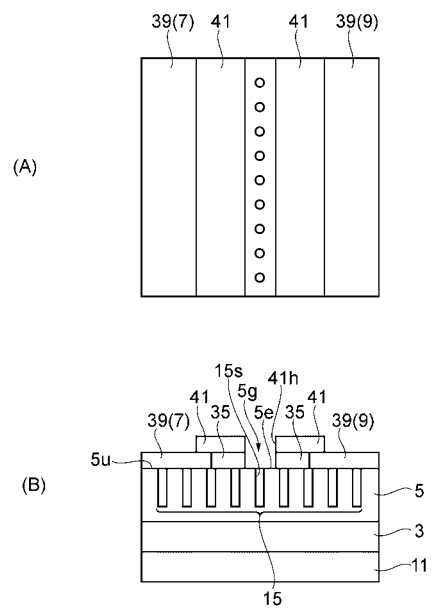
【 図 1 6 】



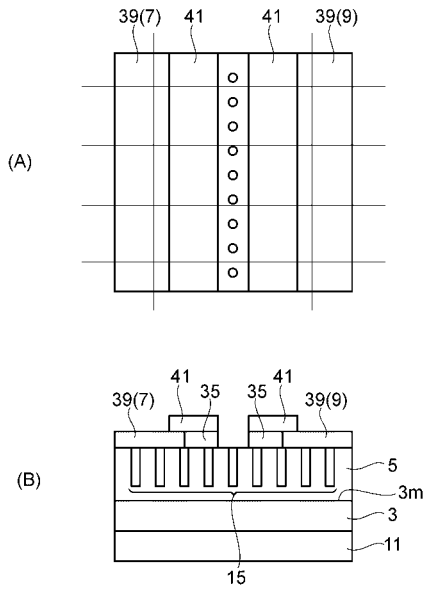
【 図 1 7 】



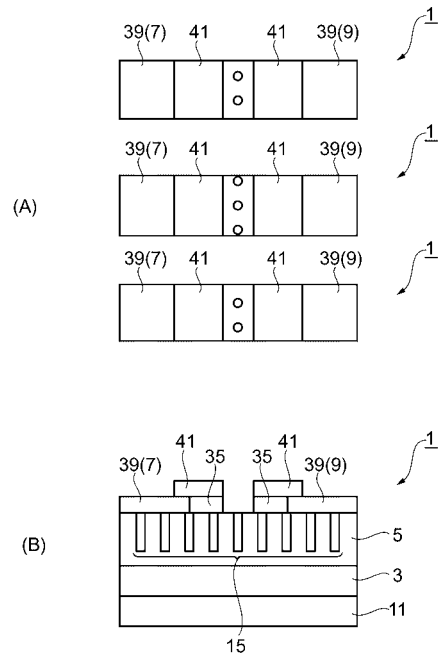
【 図 1 8 】



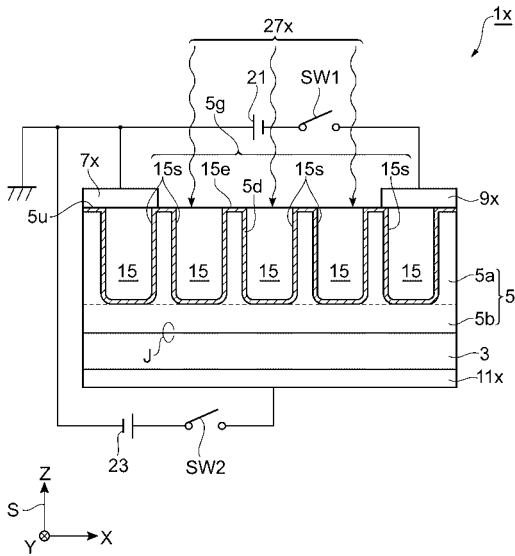
【 図 1 9 】



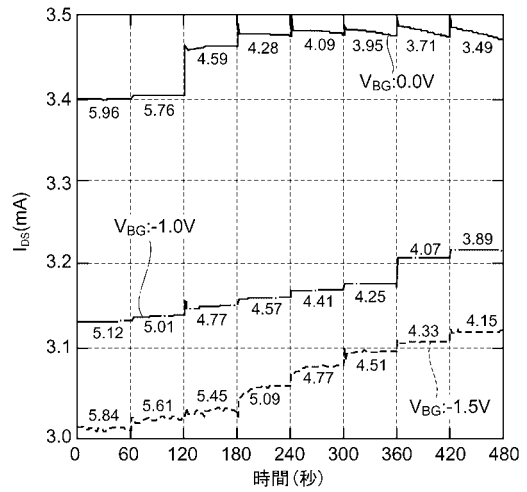
【 図 2 0 】



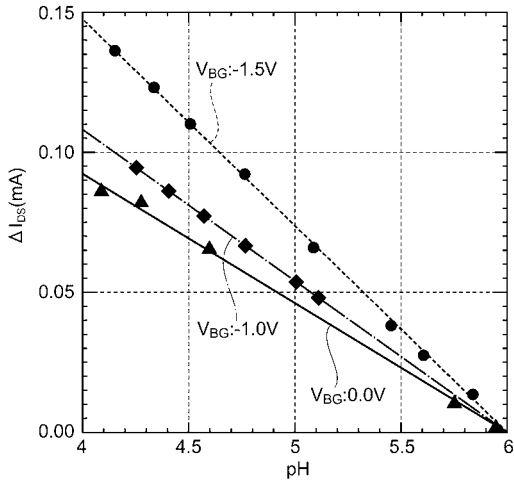
【 図 2 1 】



【 図 2 2 】



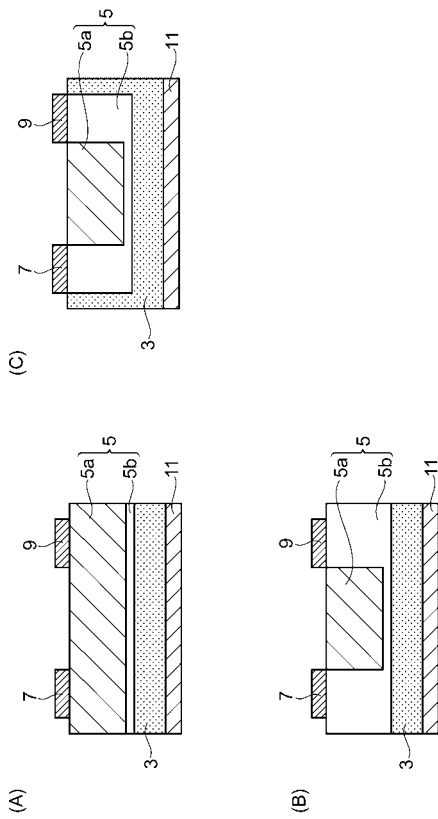
【 図 2 3 】



【 図 2 4 】

感度 ( $\mu A/pH$ )	
比較例1	1.7
$V_{BG}$	0V
実施例1	53.5
	73.0

【 図 2 5 】





フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

テーマコード(参考)

G 0 1 N 27/00

J