

(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2018-4356
(P2018-4356A)

(43) 公開日 平成30年1月11日(2018.1.11)

(51) Int.Cl.		F I	テーマコード (参考)			
GO1N	27/00	(2006.01)	GO1N	27/00	J	2G060
HO1L	29/786	(2006.01)	HO1L	29/78	617M	5F110

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2016-129111 (P2016-129111)
 (22) 出願日 平成28年6月29日 (2016. 6. 29)

(出願人による申告) 平成25年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業(チーム型研究(CREST))、「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」に係る委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 899000079
 学校法人慶應義塾
 東京都港区三田2丁目15番45号

(71) 出願人 504132272
 国立大学法人京都大学
 京都府京都市左京区吉田本町36番地1

(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 100124800
 弁理士 諏澤 勇司

(72) 発明者 内田 建
 神奈川県横浜市港北区日吉三丁目14番1号 慶應義塾大学理工学部内

最終頁に続く

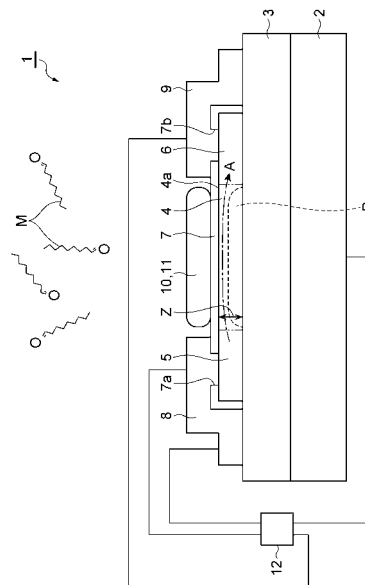
(54) 【発明の名称】 センサ素子

(57) 【要約】

【課題】 寄生抵抗を低減させると共に特性ばらつきを抑制しつつ、感度を向上させる。

【解決手段】 センサ素子1は、導電性の支持基板2と、支持基板2上に設けられた第1絶縁層3と、第1絶縁層3上に設けられ、n型又はp型の導電性を有する半導体からなるチャンネル部4と、チャンネル部4に電気的に接続されたソース電極部5及びドレイン電極部6と、チャンネル部4上に設けられた第2絶縁層7と、第2絶縁層7のチャンネル部4とは反対側に設けられ、気体分子Mを捕捉する受容部10と、を備え、チャンネル部4の幅Wは厚さZの2倍以上であり、ソース電極部5及びドレイン電極部6は、チャンネル部4の半導体の導電型と同じ導電型であると共にチャンネル部4と比較して不純物密度の高い半導体からなる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

気体分子を検出するセンサ素子であって、
導電性の支持基板と、
前記支持基板上に設けられた第 1 絶縁層と、
前記第 1 絶縁層上に設けられ、n 型又は p 型の導電性を有する半導体からなるチャンネル部と、

前記チャンネル部の一端に電氣的に接続されたソース電極部と、
前記チャンネル部の他端に電氣的に接続されたドレイン電極部と、
前記チャンネル部上に設けられた第 2 絶縁層と、

前記第 2 絶縁層の前記チャンネル部とは反対側に設けられ、前記気体分子を捕捉する受容部と、を備え、

前記ソース電極部から前記ドレイン電極部に向かう方向において、前記チャンネル部の幅は、前記チャンネル部の厚さの 2 倍以上であり、

前記ソース電極部及び前記ドレイン電極部は、前記チャンネル部の半導体の導電型と同じ導電型であると共に前記チャンネル部と比較して不純物密度の高い半導体からなる、センサ素子。

【請求項 2】

前記厚さは、前記チャンネル部のデバイ長の 8 倍以下である、請求項 1 記載のセンサ素子。

【請求項 3】

前記受容部は、前記気体分子との間で超分子相互作用を示すことにより当該気体分子を捕捉する化合物である、請求項 1 又は 2 記載のセンサ素子。

【請求項 4】

前記受容部は、環状構造を有する有機化合物である、請求項 3 記載のセンサ素子。

【請求項 5】

前記第 2 絶縁層と前記受容部との間に単分子層を更に備える、請求項 1 ~ 4 の何れか一項記載のセンサ素子。

【請求項 6】

前記受容部を浸漬させる有機溶媒を更に備える、請求項 1 ~ 5 の何れか一項記載のセンサ素子。

【請求項 7】

前記チャンネル部の半導体の導電型が n 型である場合において、前記ソース電極部に対する前記支持基板の電位がフラットバンド電圧より小さくなるように、前記支持基板と前記ソース電極部との間に電圧を印加可能、又は、前記チャンネル部の半導体の導電型が p 型である場合において、前記ソース電極部に対する前記支持基板の電位がフラットバンド電圧より大きくなるように、前記支持基板と前記ソース電極部との間に電圧を印加可能な電源部を更に備える、請求項 1 ~ 6 の何れか一項記載のセンサ素子。

【請求項 8】

前記電源部は、前記支持基板と前記ソース電極部との間に印加する前記電圧の正負を逆転可能なスイッチ部を有する、請求項 7 記載のセンサ素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、センサ素子に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、気体分子を検出するためのセンサ素子（ガスセンサ）が知られている。センサ素子は、その用途の一例として、特定の疾病に罹患した患者の呼気中に多く含まれる揮発性有機化合物（VOC：Volatile Organic Compounds）を検出することによって、当該疾病

10

20

30

40

50

の早期判断に利用される。センサ素子は、より精度良く気体分子を検出することを可能とするために、感度を向上させることが望まれている。

【0003】

上述したセンサ素子として、例えば非特許文献1～3には、ゲート電極として機能する導電性の支持基板と、支持基板上に設けられた絶縁層と、絶縁層の上面に沿って延在し、表面に絶縁性の酸化膜を有するシリコンナノワイヤと、シリコンナノワイヤの一端に電氣的に接続された金属からなるソース電極と、シリコンナノワイヤの他端に電氣的に接続された金属からなるドレイン電極と、シリコンナノワイヤの酸化膜に設けられた受容部と、を備えるセンサ素子が開示されている。

【先行技術文献】

10

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】Yair Paska, Thomas Stelzner, Silke Christiansen, Hossam Haick, “Enhanced Sensing of Nonpolar Volatile Organic Compounds by Silicon Nanowire Field Effect Transistors”, ACS NANO, 2011, Vol. 5, No. 7, p. 5620-5626

【非特許文献2】Bin Wang, Hossam Haick, “Effect of Functional Groups on the Sensing Properties of Silicon Nanowires toward Volatile Compounds”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013, Vol. 5, p. 2289-2299

【非特許文献3】Bin Wang, Hossam Haick, “Effect of Chain Length on the Sensing of Volatile Organic Compounds by means of Silicon Nanowires”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013, Vol. 5, p. 5748-5756

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上述したセンサ素子においては、より感度を向上させる観点から、ソース電極、シリコンナノワイヤ、及びドレイン電極における寄生抵抗を低減させることが望まれている。また、上述したセンサ素子では、シリコンナノワイヤの表面の形状及び方位を揃えることが難しいこと、及び、品質を確保することの難しいシリコンナノワイヤの側面にも多くの受容部が設けられてしまうことから、特性ばらつきが生じ易い。

【0006】

30

本発明は、上記課題に鑑みて為されたものであり、寄生抵抗を低減させると共に特性ばらつきを抑制しつつ、感度を向上させることができるセンサ素子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】

【0007】

本発明のセンサ素子は、気体分子を検出するセンサ素子であって、導電性の支持基板と、支持基板上に設けられた第1絶縁層と、第1絶縁層上に設けられ、n型又はp型の導電性を有する半導体からなるチャンネル部と、チャンネル部の一端に電氣的に接続されたソース電極部と、チャンネル部の他端に電氣的に接続されたドレイン電極部と、チャンネル部に設けられた第2絶縁層と、第2絶縁層のチャンネル部とは反対側に設けられ、気体分子を捕捉する受容部と、を備え、ソース電極部からドレイン電極部に向かう方向において、チャンネル部の幅は、チャンネル部の厚さの2倍以上であり、ソース電極部及びドレイン電極部は、チャンネル部の半導体の導電型と同じ導電型であると共にチャンネル部と比較して不純物密度の高い半導体からなる。

40

【0008】

このセンサ素子では、受容部が気体分子を捕捉するとドレイン電極部とソース電極部との間のドレイン電流が変化することを利用して、気体分子が検出される。ここで、センサ素子では、ソース電極部、チャンネル部、及びドレイン電極部の半導体の導電型が互いに同じである。このため、ゲート電極として機能する支持基板とソース電極部との間にゲート-ソース間電圧が印加されると、チャンネル部において、支持基板側から支持基板とは反対

50

側に向かって空乏層が形成される。ここで、ゲート - ソース間電圧は、ソース電極部の電位を基準とした支持基板の電位である。上記のように空乏層が形成されると、キャリアは、チャンネル部において、支持基板とは反対側の端面付近の領域であって、空乏層が形成されていない領域のみを通過することとなる。このような状態において受容部が気体分子を捕捉すると、受容部の分極状態が変化し、チャンネル部の支持基板とは反対側の端面付近の領域の電界が変化して、その結果、チャンネル部の空乏層が形成される領域が変化する。このように、ソース電極部、チャンネル部、及びドレイン電極部の半導体の導電型が互いに同じであることから、チャンネル部において、キャリアが通過する領域と、受容部が気体分子を捕捉したことによって空乏層が影響を受ける領域とを近づけることができる。これにより、受容部が気体分子を捕捉した場合にドレイン電流が変化し易くなるため、当該センサ素子の感度を向上させることができる。また、センサ素子では、ソース電極部及びドレイン電極部の半導体の不純物密度がチャンネル部の半導体の不純物密度よりも高い。このことに起因して、ソース電極部とソース配線との境界、及び、ドレイン電極部とドレイン配線との境界における寄生抵抗が低減されると共に、ソース電極部及びドレイン電極部の半導体の不純物密度を通常よりも高くしてソース電極部内及びドレイン電極部内における寄生抵抗を低減することができる。また、センサ素子では、チャンネル部は、表面の形状及び方位を揃えることが難しいシリコンナノワイヤではないため、当該センサ素子の特性ばらつきが生じ難い。また、センサ素子では、チャンネル部の幅が厚さの2倍以上であることから、チャンネル部の上面の面積が側面の面積以上となる。このため、チャンネル部の上面及び側面の両方に受容部が設けられた場合に、当該センサ素子の特性ばらつきに影響し易いチャンネル部の側面に設けられた受容部の効果と比較して、当該センサ素子の特性ばらつきに影響し難いチャンネル部の上面に設けられた受容部の効果が同等以上になる。従って、当該センサ素子の特性ばらつきが生じ難い。以上により、寄生抵抗を低減すると共に特性ばらつきを抑制しつつ、感度を向上させることができるセンサ素子を提供することが可能となる。

10

20

30

40

50

【0009】

本発明のセンサ素子では、厚さは、チャンネル部のデバイ長の8倍以下であってもよい。ここで、例えばチャンネル部の半導体材料として不純物を含むシリコンを用いる場合に、ゲート電極として機能する支持基板とソース電極部との間にゲート - ソース間電圧が印加されると、チャンネル部において、支持基板側から支持基板とは反対側に向かってデバイ長の約8倍の深さまで空乏層が形成される。このため、上記構成によれば、チャンネル部において、キャリアが通過する領域と、受容部が気体分子を捕捉したことによって空乏層が影響を受ける領域とを近づけることができる。従って、当該センサ素子の感度を向上させることができる。

【0010】

本発明のセンサ素子では、受容部は、気体分子との間で超分子相互作用を示すことにより当該気体分子を捕捉する化合物であってもよい。この場合、受容部を構成する化合物との間で超分子相互作用を示し易い気体分子を選択的に検出することができる。

【0011】

本発明のセンサ素子では、受容部は、環状構造を有する有機化合物であってもよい。この場合、検出すべき気体分子が環状構造の内側に入り込むことによって、受容部を構成する有機化合物は、当該気体分子との間で超分子相互作用を好適に示すことができる。よって、受容部を構成する有機化合物との間で超分子相互作用を示し易い気体分子を選択的に検出することができる。

【0012】

本発明のセンサ素子では、第2絶縁層と受容部との間に単分子層を更に備えてもよい。この場合、外部の水分が第2絶縁層に付着し難くなるため、外部の湿度変化による当該センサ素子の特性変動を抑制することができる。

【0013】

本発明のセンサ素子では、受容部を浸漬させる有機溶媒を更に備えてもよい。この場合

、外部の水分が第2絶縁層に付着し難くなるため、外部の湿度変化による当該センサ素子の特性変動を抑制することができる。

【0014】

本発明のセンサ素子では、チャンネル部の半導体の導電型がn型である場合において、ソース電極部に対する支持基板の電位がフラットバンド電圧より小さくなるように、支持基板とソース電極部との間に電圧を印加可能、又は、チャンネル部の半導体の導電型がp型である場合において、ソース電極部に対する支持基板の電位がフラットバンド電圧より大きくなるように、支持基板とソース電極部との間に電圧を印加可能な電源部を更に備えてもよい。ここで、フラットバンド電圧とは、チャンネル部と第1絶縁層との境界部分の電界が0となるゲート-ソース間電圧である。この場合、電源部が、ゲート電極として機能する支持基板とソース電極部との間にゲート-ソース間電圧を印加することにより、チャンネル部において、支持基板側から支持基板とは反対側に向かって空乏層を形成することができる。

10

【0015】

本発明のセンサ素子では、電源部は、支持基板とソース電極部との間に印加する電圧の正負を逆転可能なスイッチ部を有してもよい。この場合、受容部に気体分子が捕捉されている状態において、ソース電極部に対する支持基板の電位の正負が、当該センサ素子が気体分子を検出する場合とは逆になるように、支持基板とソース電極部との間に電圧を印加することができる。このように電圧を印加することにより、受容部付近に当該センサ素子が気体分子を検出する場合とは逆方向の電界を発生させて、受容部から気体分子を離脱させることができる。よって、例えば受容部を加熱して当該受容部から気体分子を離脱させる場合と比較して、エネルギーの消費量を抑制することができる。

20

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、寄生抵抗を低減すると共に特性ばらつきを抑制しつつ、感度を向上させることができるセンサ素子を提供することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】一実施形態に係るセンサ素子を示す図である。

【図2】図1のセンサ素子を示す平面図である。

30

【図3】図1のセンサ素子の受容部及び単分子層を示す図である。

【図4】受容部の分子構造を示す図である。

【図5】スイッチ部を有する電源部を示す回路図である。

【図6】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図7】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図8】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図9】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図10】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図11】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図12】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

40

【図13】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図14】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図15】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図16】センサ素子の製造工程を説明するための図である。

【図17】気体分子の種類に応じたセンサ素子の反応性の違いを示すグラフである。

【図18】ゲート-ソース間電圧の印加による受容部からの気体分子の離脱の様子をドレイン電流の時間変化で示すグラフである。

【図19】受容部から気体分子を離脱可能なゲート-ソース間電圧をドレイン電流との関係で示すグラフである。

【図20】変形例に係るセンサ素子を示す図である。

50

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明の好適な実施形態について、図面を参照して詳細に説明する。なお、各図において同一又は相当部分には同一符号を付し、重複する説明を省略する。

【0019】

[センサ素子1の構成]

図1は、一実施形態に係るセンサ素子を示す図である。図2は、図1のセンサ素子を示す平面図である。図1及び図2に示すように、センサ素子1は、支持基板2と、第1絶縁層3と、チャンネル部4と、ソース電極部5と、ドレイン電極部6と、第2絶縁層7と、ソース配線8と、ドレイン配線9と、受容部10と、単分子層11と、電源部12とを備える。なお、図2では電源部12が省略されている。センサ素子1では、電源部12によって、ゲート電極として機能する支持基板2とソース電極部5との間にゲート-ソース間電圧が印加されると共に、ドレイン電極部6とソース電極部5との間にドレイン-ソース間電圧が印加される。センサ素子1では、所定のゲート-ソース間電圧及び所定のドレイン-ソース間電圧が印加された状態において、受容部10が気体分子Mを捕捉すると、ドレイン電極部6とソース電極部5との間のドレイン電流が変化する(詳しくは後述)。このことを利用して、センサ素子1は、例えばVOC等の気体分子Mを検出するためのガスセンサとして用いられる。なお、本実施形態では、気体分子Mの一例としてノナールが例示されている。なお、ゲート-ソース間電圧は、ソース電極部5の電位を基準とした支持基板2の電位である。

10

20

【0020】

支持基板2と、第1絶縁層3と、チャンネル部4と、ソース電極部5と、ドレイン電極部6とは、SOI(Silicon on Insulator)基板を用いて作製される。支持基板2は、平板状をなす導電性のシリコン基板である。支持基板2は、ゲート電極として機能する。第1絶縁層3は、支持基板2上に設けられた埋め込みシリコン酸化膜であり、例えば400nmの厚さに形成されている。第1絶縁層3は、ゲート絶縁層として機能する。チャンネル部4と、ソース電極部5と、ドレイン電極部6とは、SOI基板の表面シリコン層を加工することによって第1絶縁層3上に設けられ、例えば40nmの厚さに形成されている。

【0021】

チャンネル部4は、シリコンに不純物がドーピングされたn型の導電性を有する半導体からなる。チャンネル部4は、一例として、ソース電極部5からドレイン電極部6に向かう方向(すなわち、チャンネル部4中をキャリアが通過する方向)に垂直な断面において矩形状をなしている。チャンネル部4は、その厚さZがチャンネル部のデバイ長 L_D の8倍以上となるように形成されている。デバイ長 L_D は、下記の式(1)のように表される長さである。式(1)において、 ϵ_s はチャンネル部4を構成する半導体の誘電率、 k_B はボルツマン定数、Tは絶対温度、qは電子電荷、Nはチャンネル部4を構成する半導体の不純物密度を表す。

30

【数1】

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s k_B T}{q^2 N}} \dots (1)$$

40

【0022】

チャンネル部4のようにシリコンに不純物がドーピングされた半導体において、チャンネル部4の半導体の導電性がn型である場合に、フラットバンド電圧より小さいゲート-ソース間電圧が印加されると、チャンネル部4においてゲート電極側からデバイ長 L_D の約8倍の深さまで空乏層Dが形成されることが知られている。ここで、フラットバンド電圧とは、チャンネル部4と第1絶縁層3との境界部分の電界が0となるゲート-ソース間電圧である。従って、センサ素子1では、ゲート-ソース間電圧が印加されると、チャンネル部4において、支持基板2側から支持基板2とは反対側の端面4a付近まで空乏層Dが形成され

50

る。これにより、キャリア（ここでは、電子）は、支持基板 2 とは反対側の端面 4 a 付近の領域であって、空乏層 D が形成されていない領域のみを通過することとなる（図 1 の矢印 A）。なお、式（1）に示すように、デバイ長 L_D は、チャンネル部 4 を構成する半導体の不純物密度の平方根に反比例する。つまり、チャンネル部 4 を構成する半導体の不純物密度が高いほど、チャンネル部 4 において形成される空乏層 D の深さが浅くなる。

【0023】

また、ソース電極部 5 からドレイン電極部 6 に向かう方向において、チャンネル部 4 の幅 W は、チャンネル部 4 の厚さ Z の 2 倍以上に形成されている。なお、チャンネル部 4 の幅 W とは、平面視におけるチャンネル部 4 の最大幅であり、チャンネル部 4 の厚さ Z とは、側面視におけるチャンネル部 4 の最大厚さである。なお、チャンネル部の長さ L（図 2 参照）は、ソース電極部 5 とチャンネル部 4 との境界から、チャンネル部 4 とドレイン電極部 6 との境界までの最短距離である。

10

【0024】

ソース電極部 5 は、チャンネル部 4 と同様に、シリコンに不純物がドーピングされた n 型の導電型を有する半導体からなる。ソース電極部 5 は、チャンネル部 4 の一端に電氣的に接続されている。また、ドレイン電極部 6 は、チャンネル部 4 と同様に、シリコンに不純物がドーピングされた n 型の導電型を有する半導体からなる。ドレイン電極部 6 は、チャンネル部 4 の他端に電氣的に接続されている。

【0025】

このように、ソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 は、チャンネル部 4 の半導体の導電型と同じ n 型の導電型である。ソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 は、チャンネル部 4 と比較して不純物密度の高い半導体からなる。以下の説明では、相対的に不純物密度の低い半導体からなるチャンネル部 4 の導電型を n^- 型と呼ぶと共に、相対的に不純物密度の高い半導体からなるチャンネル部 4 の導電型を n^+ 型と呼ぶこととする。なお、センサ素子 1 のチャンネル部 4 の半導体の不純物密度は、通常の npn 型及び pnp 型の MOSFET におけるチャンネル部の半導体の不純物密度と同等であり、センサ素子 1 のソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 の半導体の不純物密度は、通常の npn 型及び pnp 型の MOSFET におけるソース電極部及びドレイン電極部の半導体の不純物密度と同等である。

20

【0026】

第 2 絶縁層 7 は、チャンネル部 4、ソース電極部 5、及びドレイン電極部 6 の表面に設けられたシリコン酸化膜であり、少なくともチャンネル部 4 上に設けられている。具体的には、第 2 絶縁層 7 は、チャンネル部 4、ソース電極部 5、及びドレイン電極部 6 の上面と、ソース電極部 5 からドレイン電極部 6 に向かう方向に沿ったチャンネル部 4、ソース電極部 5、及びドレイン電極部 6 の両側面と、ソース電極部 5 からドレイン電極部 6 に向かう方向を横切るソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 の両端面と、の各表面に設けられている。第 2 絶縁層 7 には、ソース電極部 5 の上面に対応する位置の一部にコンタクトホール 7 a が形成されており、また、ドレイン電極部 6 の上面に対応する位置の一部にコンタクトホール 7 b が形成されている。

30

【0027】

ソース配線 8 は、電源部 1 2 に対して電氣的に接続されていると共に、第 2 絶縁層 7 のコンタクトホール 7 a を介してソース電極部 5 に電氣的に接続されている。ドレイン配線 9 は、電源部 1 2 に対して電氣的に接続されていると共に、第 2 絶縁層 7 のコンタクトホール 7 b を介してドレイン電極部 6 に電氣的に接続されている。

40

【0028】

受容部 1 0 は、例えば VOC 等の気体分子 M を捕捉する。受容部 1 0 は、第 2 絶縁層 7 のチャンネル部 4 とは反対側の面上に設けられ、第 2 絶縁層 7 に対して単分子層 1 1 を介して結合されている。具体的には、受容部 1 0 は、第 2 絶縁層 7 の各面の内、チャンネル部 4 の上面（端面 4 a）に対向する面に結合された部分と、ソース電極部 5 からドレイン電極部 6 に向かう方向におけるチャンネル部 4 の両側面に対向する面に結合された部分とを含んでいる。なお、受容部 1 0 は、単分子層 1 1 を介さずに第 2 絶縁層 7 の表面に対して直接

50

結合されていてもよい。

【0029】

図3は、図1のセンサ素子の受容部及び単分子層を示す図である。図4は、受容部の分子構造を示す図である。図3及び図4に示すように、受容部10は、センサ素子1が検出すべき気体分子Mとの間で超分子相互作用を示すことにより当該気体分子Mを捕捉する化合物である。ここで、超分子相互作用とは、配位結合、ファンデルワールス結合、 π - π 相互作用、水素結合、親水疎水相互作用等の相互作用である。受容部10は、気体分子Mとの間で、これらの超分子相互作用の内の少なくとも一つの相互作用を示す。

【0030】

図3には、第2絶縁層7上に単分子層11を介して受容部10が設けられた状態が示されている。受容部10は、図3において簡略化して示された環状構造Rを有する有機化合物である。具体的には、受容部10はシクロデキストリン(α -シクロデキストリン)である。図4には、右辺に図3の受容部10の概略構成を示し、左辺に受容部10の具体的な化学式を示している。

10

【0031】

受容部10を構成するシクロデキストリンは、検出すべき気体分子Mが環状構造Rの内側に入り込むことにより、当該気体分子Mとの間で超分子相互作用を示す。なお、受容部10の一例としてのシクロデキストリンの環状構造Rは、具体的には中心軸線方向に貫通した中空の円錐台形状の構造であるが、受容部10の環状構造Rは必ずしもこのような形状に限定されない。また、受容部10は、シクロデキストリン誘導体であってもよく、或いは、シクロデキストリン及びシクロデキストリン誘導体以外の化合物であってもよい。

20

【0032】

単分子層11は、第2絶縁層7と受容部10との間に設けられている。単分子層11は、外部の水分を遮断する性質(外部からの水分の浸入を抑制する性質)のものが好適に用いられる。ここでは、単分子層11は、シランカップリング部位とエポキシ基とを含んだ飽和アルカンを有している。単分子層11は、第2絶縁層7に対して複数の飽和アルカンが整列して配置されており、全体として飽和アルカン単分子からなる層を形成している。各飽和アルカンの第2絶縁層7とは反対側の端部には、受容部10が結合されている。なお、飽和アルカン中のアルキル鎖の長さは特に限定されない。また、単分子層11において、シランカップリング部位に代えてカルボキシル基、リン酸基等を用いてもよい。また、エポキシ基に代えてアミノ基、アルキニル基、アルケニル基等を用いてもよい。

30

【0033】

図5は、スイッチ部を有する電源部を示す回路図である。図1及び図5に示すように、電源部12は、電源12a、12bとスイッチ部13とを有する。電源12aは、ゲート電極として機能する支持基板2とソース電極部5(ソース配線8)との間にゲート-ソース間電圧を印加する。電源12bは、ドレイン電極部6(ドレイン配線9)とソース電極部5(ソース配線8)との間にドレイン-ソース間電圧を印加する。スイッチ部13は、電源12aによって支持基板2とソース電極部5(ソース配線8)との間に印加される電圧の正負を逆転可能である。

【0034】

具体的には、センサ素子1ではチャンネル部4の半導体の導電型がn型(n^+ 型)であることから、電源12aは、ソース電極部5に対する支持基板2の電位がフラットバンド電圧より小さくなるように、支持基板2とソース電極部5との間にゲート-ソース間電圧を印加可能とされている。また、センサ素子1ではキャリアが電子であるため、電源12bは、ソース電極部5に対するドレイン電極部6の電位が正となるように、ドレイン電極部6とソース電極部5との間にドレイン-ソース間電圧を印加可能とされている。

40

【0035】

なお、チャンネル部4の半導体の導電型がp型(p^+ 型)である場合においては、電源12aは、ソース電極部5に対する支持基板2の電位がフラットバンド電圧より大きくなるように、支持基板2とソース電極部5との間にゲート-ソース間電圧を印加可能とされる

50

。また、この場合、キャリアがホールであるため、電源 1 2 b は、ソース電極部 5 に対するドレイン電極部 6 の電位が負となるように、ドレイン電極部 6 とソース電極部 5 との間にドレイン - ソース間電圧を印加可能とされる。

【 0 0 3 6 】

スイッチ部 1 3 は、スイッチ 1 3 a , 1 3 b , 1 3 c , 1 3 d を含む Hブリッジ回路によって構成されている。スイッチ部 1 3 において、図中のスイッチ 1 3 a , 1 3 d を ON とすると共にスイッチ 1 3 b , 1 3 c を OFF とした場合、電源 1 2 a によって、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に負のゲート - ソース間電圧が印加される。一方、スイッチ部 1 3 において、図中のスイッチ 1 3 b , 1 3 c を ON とすると共にスイッチ 1 3 a , 1 3 d を OFF とした場合、電源 1 2 a によって、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に正の電圧が印加される。なお、スイッチ部 1 3 は、支持基板 2 とソース電極部 5 (ソース配線 8) との間に印加する電圧の正負を逆転することができれば、Hブリッジ回路に限定されない。

10

【 0 0 3 7 】

[センサ素子 1 の動作]

続いて、センサ素子 1 の動作について説明する。図 1 ~ 図 5 に示すように、センサ素子 1 では、まず、電源部 1 2 のスイッチ部 1 3 において、スイッチ 1 3 a , 1 3 d が ON とされると共にスイッチ 1 3 b , 1 3 c が OFF とされる。この状態で、電源 1 2 a は、接地されたソース電極部 5 に対する支持基板 2 の電位フラットバンド電圧より小さくなるようにゲート - ソース間電圧を印加する。チャンネル部 4 の半導体の導電型が n 型であることから、これにより、チャンネル部 4 において、支持基板 2 側から支持基板 2 とは反対側に向かって空乏層 D が形成される。

20

【 0 0 3 8 】

ここで、ドレイン電極部 6 とソース電極部 5 との間に電源 1 2 b によってドレイン - ソース間電圧が印加されると、キャリアである電子は、チャンネル部 4 の支持基板 2 とは反対側の端面 4 a 付近の領域であって、空乏層 D が形成されていない領域のみを通過する (図 1 の矢印 A) 。

【 0 0 3 9 】

このような状態において、受容部 1 0 を構成するシクロデキストリンが、例えばノナール等の気体分子 M との間で超分子相互作用を示して当該気体分子 M を捕捉すると、受容部 1 0 の分極状態が変化する。これにより、チャンネル部 4 の支持基板 2 とは反対側の端面 4 a 付近の領域の電界が変化する。その結果、チャンネル部 4 において、例えば、空乏層 D の一端がチャンネル部 4 の支持基板 2 側に押し戻される、或いは、チャンネル部 4 の支持基板 2 とは反対側の端面 4 a から支持基板 2 側に向かって新たな空乏層が更に形成される等の変化が生じる。このように、受容部 1 0 が気体分子 M を捕捉すると、チャンネル部 4 において、キャリアである電子が通過することができる領域に変化が生じる。従って、ゲート - ソース間電圧及びドレイン - ソース間電圧のそれぞれを一定に保った状態におけるドレイン電流の変化を検出することによって、受容部 1 0 が気体分子 M を捕捉したことを検知することができる。よって、センサ素子 1 は、外部に検出対象となる気体分子 M が存在することを検知することができる。

30

40

【 0 0 4 0 】

更に、センサ素子 1 では、電源部 1 2 のスイッチ部 1 3 において、スイッチ 1 3 b , 1 3 c が ON とされると共にスイッチ 1 3 a , 1 3 d が OFF とされる。これにより、受容部 1 0 付近に逆方向の電界が発生し、その結果、受容部 1 0 に捕捉された気体分子 M が受容部 1 0 から離脱し (徐放され) 、センサ素子 1 がリセットされる。

【 0 0 4 1 】

[センサ素子 1 の製造工程]

続いて、図 6 ~ 図 1 6 を参照しつつ、センサ素子 1 の製造工程について説明する。図 6 ~ 図 1 6 は、センサ素子の製造工程を説明するための図である。まず、図 6 に示すように、SOI 基板 2 0 を用意する。SOI 基板 2 0 は、支持基板 2 1 と、埋め込みシリコン酸

50

化膜 22 と、表面シリコン層 (SOI 層) 23 と、を備える。支持基板 21 は、平板状をなす導電性のシリコン基板である。支持基板 21 は、センサ素子 1 における支持基板 2 である。埋め込みシリコン酸化膜 22 は、支持基板 21 上に設けられており、ゲート絶縁層として機能する。埋め込みシリコン酸化膜 22 は、例えば 400 nm の厚さに形成されている。埋め込みシリコン酸化膜 22 は、センサ素子 1 における第 1 絶縁層 3 である。表面シリコン層 23 は、埋め込みシリコン酸化膜 22 上に設けられている。表面シリコン層 23 は、例えば 40 nm の厚さに形成されている。

【0042】

次に、図 7 に示すように、表面シリコン層 23 の上面 (すなわち、埋め込みシリコン酸化膜 22 とは反対側の面) に絶縁膜 24 を形成する。具体的には、SOI 基板 20 に対して、900 °C の酸素中にて 60 分間の加熱処理を行う。絶縁膜 24 は、例えば 20 nm の厚さになるように形成される。

10

【0043】

次に、表面シリコン層 23 に対して、イオン注入及び活性化アニールを行う。具体的には、表面シリコン層 23 に対して、P (リン) イオンの不純物密度が例えば $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度となるようにイオン注入を行い、その後、1000 °C の窒素中にて 20 分間の加熱処理 (活性化アニール) を行う。これにより、表面シリコン層 23 の中央部がチャンネル部 4 として使用可能な状態となる。

【0044】

次に、図 8 に示すように、表面シリコン層 23 及び絶縁膜 24 に対して、デバイス領域の形成を行う。具体的には、表面シリコン層 23 及び絶縁膜 24 に対して、フォトリソグラフィによるレジストパターニングを行う。そして、 CF_4 と O_2 との混合ガスのプラズマによるドライエッチングを行い、その後、レジストを剥離する。

20

【0045】

次に、図 9 に示すように、表面シリコン層 23 の両端部に対して不純物イオン注入を行う。具体的には、表面シリコン層 23 の両端部に対して、フォトリソグラフィによるレジストパターニングを行う。そして、表面シリコン層 23 の両端部に対して、P (リン) イオンの不純物密度が例えば $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度となるようにイオン注入を行い、その後、1000 °C の窒素中にて 20 分間の加熱処理 (活性化アニール) を行う。これにより、表面シリコン層 23 の両端部がソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 となり、これらのソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 に挟まれた表面シリコン層 23 の中央部がチャンネル部 4 となる。

30

【0046】

次に、図 10 に示すように、表面シリコン層 23 の上面の絶縁膜 24 を剥離し、第 2 絶縁層 7 を形成する。具体的には、絶縁膜 24 をフッ酸にて剥離し、露出した表面シリコン層 23 の表面を洗浄する。その後、900 °C の酸素中にて 20 分間の加熱処理を行って第 2 絶縁層 7 を形成する。第 2 絶縁層 7 は、例えば 10 nm の厚さになるように形成される。

【0047】

次に、図 11 に示すように、表面シリコン層 23 において、ソース電極部 5 の上面に対応する位置の一部にコンタクトホール 7a を形成すると共に、ドレイン電極部 6 の上面に対応する位置の一部にコンタクトホール 7b を形成する。具体的には、表面シリコン層 23 において、ソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 の上面に対応する位置のそれぞれの一部に対して、フォトリソグラフィによるレジストパターニングを行う。そして、フッ酸にて第 2 絶縁層 7 のエッチングを行い、その後、レジストを剥離する。これにより、コンタクトホール 7a, 7b が形成される。

40

【0048】

次に、図 12 に示すように、ソース配線 8 及びドレイン配線 9 を形成する。具体的には、フォトリソグラフィによるソース配線 8 及びドレイン配線 9 のレジストパターニングを行い、電子線蒸着装置によって、Al (アルミニウム) が 10 nm の厚さとなるように蒸着

50

されると共にAu（金）が80nmの厚さとなるように蒸着される。ソース配線8は、一端がコンタクトホール7aを介してソース電極部5に接続されると共に、他端が埋め込みシリコン酸化膜22上に位置するように形成される。ドレイン配線9は、一端がコンタクトホール7bを介してドレイン電極部6に接続されると共に、他端が埋め込みシリコン酸化膜22上に位置するように形成される。そして、リフトオフプロセスによってレジストを剥離する。その後、400 の水素4%、窒素96%の混合気体中にて30分間の加熱処理を行う。

【0049】

続いて、チャンネル部4の上面及び両側面に設けられた第2絶縁層7に対して、単分子層11及び受容部10の分子修飾を行う。まず、図13に示すように、第2絶縁層7の表面において H_2SO_4/H_2O_2 及びHFを反応させることにより、第2絶縁層7の表面に水酸基を持たせたケイ素酸化物が形成される。

10

【0050】

次に、図14に示すように、表面に水酸基を持たせたケイ素酸化物が形成された第2絶縁層7に、シランカップリング剤を作用させる。ここで、シランカップリング剤はSi-O-C結合を有している。Si-O結合はC-O結合と比較して強い結合であることから、上記Si-O-C結合にはSi-O-Si結合になろうとする力が働く。その結果、Si-O-Si結合を介してシランカップリング剤と第2絶縁層7との間で化学結合が形成される。

20

【0051】

次に、図15に示すように、シランカップリング剤が第2絶縁層7とは反対側の端部に有するエポキシドをアジド化する。エポキシドは、炭素2つと酸素1つとが無理のある角度で三角形に結合しているため、炭素と結合し得る物質に対して容易に反応して三角形の構造を解消する。ここでは、 N_3 （アジドイオン）を用いてエポキシドをアジド化（アジド構造を導入）している。

【0052】

次に、図16に示すように、アジド構造に対して、シクロデキストリンを結合させる。ここでは、銅イオンを触媒として用いたクリック反応であるヒュスゲン環化付加によって、シクロデキストリンを導入している。

30

【0053】

次に、電源部12を用意し、電源12aに対してスイッチ部13を介してソース配線8及び支持基板2を電氣的に接続すると共に、電源12bに対してソース配線8及びドレイン配線9を電氣的に接続する（図5参照）。以上により、センサ素子1が製造される。

【0054】

[センサ素子1の作用及び効果]

以上説明したように、センサ素子1では、受容部10が気体分子Mを捕捉するとドレイン電極部6とソース電極部5との間のドレイン電流が変化することを利用して、気体分子Mが検出される。ここで、センサ素子1では、ソース電極部5、チャンネル部4、及びドレイン電極部6の半導体の導電型が互いに同じである。このため、ゲート電極として機能する支持基板2とソース電極部5との間にチャンネルがn型半導体の場合にはフラットバンド電圧より小さいゲート-ソース間電圧が印加されると、チャンネル部4において、支持基板2側から支持基板2とは反対側に向かって空乏層Dが形成される。これにより、キャリアは、チャンネル部4において、支持基板2とは反対側の端面4a付近の領域であって、空乏層Dが形成されていない領域のみを通過することとなる。このような状態において、受容部10が気体分子Mを捕捉すると、受容部10の分極状態が変化し、チャンネル部4の支持基板2とは反対側の端面4a付近の領域の電界が変化して、その結果、チャンネル部4の空乏層Dが形成される領域が変化する。このように、ソース電極部5、チャンネル部4、及びドレイン電極部6の半導体の導電型が互いに同じであることから、チャンネル部4において、キャリアが通過する領域と、受容部10が気体分子Mを捕捉したことによって空乏層Dが影響を受ける領域とを近づけることができる。これにより、受容部10が気体分子Mを

40

50

捕捉した場合にドレイン電流が変化し易くなるため、当該センサ素子 1 の感度を向上させることができる。また、センサ素子 1 では、ソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 の半導体の不純物密度がチャンネル部 4 の半導体の不純物密度よりも高い。このことに起因して、ソース電極部 5 とソース配線 8 との境界、及び、ドレイン電極部 6 とドレイン配線 9 との境界における寄生抵抗が低減されると共に、ソース電極部 5 及びドレイン電極部 6 の半導体の不純物密度を通常よりも高くしてソース電極部 5 内及びドレイン電極部 6 内における寄生抵抗を低減することができる。また、センサ素子 1 では、チャンネル部 4 は、表面の形状及び方位を揃えることが難しいシリコンナノワイヤではないため、当該センサ素子 1 の特性ばらつきが生じ難い。また、センサ素子 1 では、チャンネル部 4 の幅 W が厚さ Z の 2 倍以上であることから、チャンネル部 4 の上面の面積が側面の面積以上となる。このため、チャンネル部 4 の上面及び側面の両方に受容部 10 が設けられた場合に、当該センサ素子 1 の特性ばらつきに影響し易いチャンネル部 4 の側面に設けられた受容部 10 の効果と比較して、当該センサ素子 1 の特性ばらつきに影響し難いチャンネル部 4 の上面に設けられた受容部 10 の効果が同等以上になる。更に、チャンネル部 4 の幅 W を厚さ Z の 2 倍よりも大きくしていくことに伴って、チャンネル部 4 の側面に設けられた受容部 10 の効果よりも、チャンネル部 4 の上面に設けられた受容部 10 の効果を一層支配的にすることができる。従って、当該センサ素子 1 の特性ばらつきが生じ難い。以上により、寄生抵抗を低減すると共に特性ばらつきを抑制しつつ、感度を向上させることができるセンサ素子 1 を提供することが可能となる。

10

20

【0055】

また、センサ素子 1 では、厚さ Z は、チャンネル部 4 のデバイ長の 8 倍以下である。ここで、例えばチャンネル部 4 の半導体材料として不純物を含むシリコンを用いる場合に、ゲート電極として機能する支持基板 2 とソース電極部 5 との間にゲート - ソース間電圧が印加されると、チャンネル部 4 において、支持基板 2 側から支持基板 2 とは反対側に向かってデバイ長の約 8 倍の深さまで空乏層 D が形成される。このため、チャンネル部 4 において、キャリアが通過する領域と、受容部 10 が気体分子 M を捕捉したことによって空乏層 D が影響を受ける領域とを近づけることができる。従って、当該センサ素子 1 の感度を向上させることができる。

【0056】

また、センサ素子 1 では、受容部 10 は、気体分子 M との間で超分子相互作用を示すことにより当該気体分子 M を捕捉する化合物である。このため、受容部 10 を構成する化合物との間で超分子相互作用を示し易い気体分子 M を選択的に検出することができる。

30

【0057】

また、センサ素子 1 では、受容部 10 は、環状構造 R を有する有機化合物である。このため、検出すべき気体分子 M が環状構造 R の内側に入り込むことによって、受容部 10 を構成する有機化合物は、当該気体分子 M との間で超分子相互作用を好適に示すことができる。よって、受容部 10 を構成する有機化合物との間で超分子相互作用を示し易い気体分子 M を選択的に検出することができる。

【0058】

また、センサ素子 1 では、第 2 絶縁層 7 と受容部 10 との間に単分子層 11 を更に備える。このため、外部の水分が第 2 絶縁層 7 に付着し難くなるため、外部の湿度変化による当該センサ素子 1 の特性変動を抑制することができる。

40

【0059】

また、センサ素子 1 では、チャンネル部 4 の半導体の導電型が n 型である場合において、ソース電極部 5 に対する支持基板 2 の電位がフラットバンド電圧より小さくなるように、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に電圧を印加可能、又は、チャンネル部 4 の半導体の導電型が p 型である場合において、ソース電極部 5 に対する支持基板 2 の電位がフラットバンド電圧より大きくなるように、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に電圧を印加可能な電源部 12 を更に備える。このため、電源部 12 が、ゲート電極として機能する支持基板 2 とソース電極部 5 との間にゲート - ソース間電圧を印加することにより、チャンネル部 4

50

において、支持基板 2 側から支持基板 2 とは反対側に向かって空乏層 D を形成することができる。

【0060】

また、センサ素子 1 では、電源部 1 2 は、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に印加する電圧の正負を逆転可能なスイッチ部 1 3 を有する。このため、受容部 1 0 に気体分子が捕捉されている状態において、ソース電極部 5 に対する支持基板 2 の電位の正負が、当該センサ素子 1 が気体分子を検出する場合とは逆になるように、支持基板 2 とソース電極部 5 との間に電圧を印加することができる。このように電圧を印加することにより、受容部 1 0 付近に当該センサ素子 1 が気体分子を検出する場合とは逆方向の電界を発生させて、受容部 1 0 から気体分子 M を離脱させることができる。よって、例えば受容部 1 0 を加熱して当該受容部 1 0 から気体分子 M を離脱させる場合と比較して、エネルギーの消費量を抑制することができる。

10

【0061】

[実施例]

以下、センサ素子の特性に関する実測結果について説明する。なお、それぞれの実測結果は、上記実施形態に係るセンサ素子 1 において、チャンネル部 4 の幅 W を $20\ \mu\text{m}$ 、厚さ Z を $34\ \text{nm}$ 、長さ L を $50\ \mu\text{m}$ とすると共にソース電極部 5 の電位を $0\ \text{V}$ として測定した結果を示している。

【0062】

図 1 7 は、気体分子の種類に応じたセンサ素子の反応性の違いを示すグラフである。この試験では、 25°C の環境下で、センサ素子に $1.16\ \text{V}$ のゲート - ソース間電圧及び $0.05\ \text{V}$ のドレイン - ソース間電圧を印加した状態において、センサ素子に対して窒素中に $479\ \text{ppm}$ のノナールを含む気体、窒素中に $1000\ \text{ppm}$ の水素を含む気体、及び乾燥空気を吹き付けた。図 1 7 の横軸は時間 (分) を表し、左側の縦軸はドレイン電流 (nA) を表し、右側の縦軸はセンサ素子に対する気体分子の吹き付け量を表す。図中のグラフ G 1 は、センサ素子に対して窒素中にノナールを含む気体を吹き付けたときのドレイン電流の時間変化を示す。グラフ G 2 は、センサ素子に対して窒素中に水素を含む気体を吹き付けたときのドレイン電流の時間変化を示す。グラフ G 3 は、センサ素子に対して乾燥空気を吹き付けたときのドレイン電流の時間変化を示す。また、図中の右側の縦軸には二点鎖線で示すグラフ G 4 が対応している。グラフ G 4 の読みが 1 であるときには、センサ素子に対して各気体分子を $0.5\ \text{L}/\text{min}$ で吹き付けており、グラフ G 4 の読みが 0 であるときには、センサ素子に対して窒素を $0.5\ \text{L}/\text{min}$ で吹き付けている。

20

30

【0063】

図 1 7 に示すように、センサ素子に対して窒素中にノナールを含む気体を吹き付けているときには、ドレイン電流が増大する。一方、センサ素子に対して窒素中にノナールを含む気体を吹き付けることを止めると、ドレイン電流は増大しなくなる。このことから、センサ素子が、外部にノナールが存在することを検知可能であることが確認された。

【0064】

また、図 1 7 に示すように、センサ素子に対して窒素中に水素を含む気体及び乾燥空気を吹き付けても、ドレイン電流は増大しない。このことから、センサ素子が、外部に窒素、水素、及び乾燥空気が存在することを検知しないことが確認された。以上により、センサ素子は、少なくともノナール、窒素、水素、及び乾燥空気の内からノナールを選択的に検出可能であることが確認された。

40

【0065】

図 1 8 は、ゲート - ソース間電圧の印加による受容部からの気体分子の離脱の様子をドレイン電流の時間変化で示すグラフである。この試験では、センサ素子に $0.05\ \text{V}$ のドレイン - ソース間電圧を印加した状態において、センサ素子に正 (約 $2\ \text{V}$) のゲート - ソース間電圧と負 (約 $-4\ \text{V}$) のゲート - ソース間電圧とを交互に印加すると共に、所定のドレイン - ソース間電圧を印加した。また、センサ素子に対して窒素を吹き付ける (区間 Q 1) と共に、センサ素子に正のゲート - ソース間電圧を印加している途中で、窒素に代

50

えて、窒素中に47.9ppmのノナナルを含む気体を吹き付けた(区間Q2)。図18の横軸は時間(分)を表し、左側の縦軸はドレイン電流 I_d (nA)を表し、右側の縦軸はゲート-ソース間電圧 V_g (V)を表す。また、図中の縦軸に沿って示されている複数の破線は、センサ素子に対する窒素中にノナナルを含む気体の吹き付けの開始又は停止のタイミングを表す。グラフG5は、ドレイン電流 I_d の時間変化を示す。グラフG6は、ゲート-ソース間電圧 V_g の時間変化を示す。

【0066】

図18の区間P1に示すように、センサ素子に正のゲート-ソース間電圧 V_g を印加すると、ドレイン電流 I_d は徐々に増大する。ここで、区間P2に示すように、センサ素子に対する窒素中にノナナルを含む気体の吹き付けを開始すると、ドレイン電流 I_d は、急激に増大し、その後も徐々に増大し続ける。センサ素子に対して窒素中にノナナルを含む気体の吹き付けを停止した後、区間P3に示すように、センサ素子に負のゲート-ソース間電圧 V_g を印加すると、ドレイン電流 I_d は流れなくなる。その後、区間P4に示すように、再びセンサ素子に正のゲート-ソース間電圧 V_g を印加すると、ドレイン電流 I_d は、センサ素子に負のゲート-ソース間電圧 V_g を印加する直前の電流値から低下して、区間P1においてセンサ素子への正のゲート-ソース間電圧 V_g の印加を開始した直後、すなわちノナナルを含む気体の吹き付けを開始する前の電流値に近い値となっている。このことから、センサ素子は、負のゲート-ソース間電圧 V_g が印加されることによって、受容部によって捕捉された気体分子を離脱させることが確認された。

【0067】

ここで、図19は、受容部から気体分子を離脱可能なゲート-ソース間電圧をドレイン電流との関係で示すグラフである。この試験では、24℃の環境下で、センサ素子に0.05Vのドレイン-ソース間電圧を印加した状態において、センサ素子に対して窒素を0.5L/minで吹き付けた。そして、ゲート-ソース間電圧を正(約7V)と負(約-4V)との間で変化させつつ、ドレイン電流を測定した。図19の横軸はゲート-ソース間電圧(V)を表し、縦軸はドレイン電流(A)を表す。グラフG7は、ゲート-ソース間電圧に応じたドレイン電流を示す。

【0068】

図19に示すように、センサ素子では、約1V以下のゲート-ソース間電圧ではドレイン電流は流れず、約1Vから約3Vまでのゲート-ソース間電圧の増大に伴ってドレイン電流も増大し、約3V以上のゲート-ソース間電圧では、ゲート-ソース間電圧の増大に対するドレイン電流の増大は飽和している。このことから、このセンサ素子では、約1.68Vの正のゲート-ソース間電圧を、気体分子を検出する際のセンシング電圧(例えば、図中の縦軸に沿って示されている破線参照)とすることが好適であることが確認された。また、受容部からのノナナルの離脱に用いる電圧を約-4Vとすることが好適であることが確認された。

【0069】

[変形例]

以上、本発明の一実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではない。例えば、図20は、変形例に係るセンサ素子を示す図であり、図20に示すように、センサ素子1は、受容部10を浸漬させる有機溶媒14を更に備えてもよい。なお、図20では電源部12が省略されている。有機溶媒14としては、例えばジメチルスルホキシド等を用いてもよい。この場合、外部の水分が第2絶縁層7に付着し難くなるため、外部の湿度変化による当該センサ素子1の特性変動を抑制することができる。

【0070】

また、上記実施形態では、チャンネル部4、ソース電極部5、及びドレイン電極部6のそれぞれは、n型の導電型を有する半導体からなるとした。しかし、チャンネル部4、ソース電極部5、及びドレイン電極部6のそれぞれは、p型の導電型を有する半導体からなってもよい。この場合、チャンネル部4は相対的に不純物密度の低いp⁻型の半導体からなり、ソース電極部5及びドレイン電極部6は、相対的に不純物密度の高いp⁺型の半導体

10

20

30

40

50

からなる。なお、このようにチャンネル部 4、ソース電極部 5、及びドレイン電極部 6 のそれぞれが p 型の導電型を有する半導体からなる場合には、図 5 に示す電源 12 a, 12 b のそれぞれの正負の向きが逆であると共に、キャリアは電子ではなくホールである。

【0071】

また、上記実施形態では受容部 10 はシクロデキストリンであるとした。しかし、受容部 10 は、気体分子 M を捕捉する他の構成であってもよく、例えば、気体分子 M との間で超分子相互作用を示すことにより当該気体分子 M を捕捉する他の化合物であってもよい。例えば、受容部 10 は、カリックスアレーン、クラウンエーテル、シクロファン、キューカピチュリル等であってもよい。ここで、カリックスアレーンは、フェノールの 2, 6 位がメチレン基を介して数個環状に繋がったオリゴマーの総称である。また、クラウンエーテルは、一般構造式 $(-CH_2-CH_2-O-)_n$ で表される大環状のエーテルである。また、シクロファンは、芳香環の 2 箇所以上が、炭素等の鎖状構造の架橋によって環状に結びついた構造を持つ大環状化合物の総称である。また、キューカピチュリルは、数個のグリコウリルがメチレン単位を介して環状に繋がった化合物の総称である。

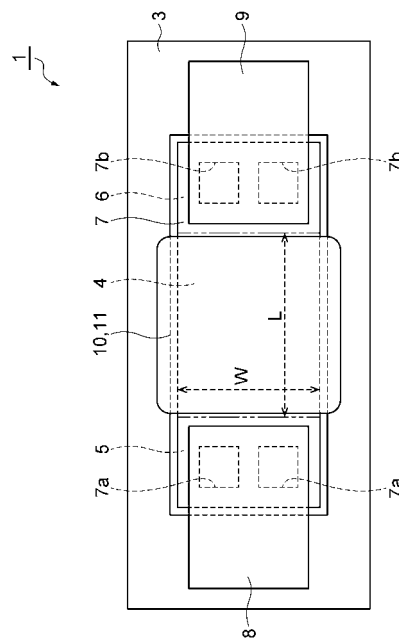
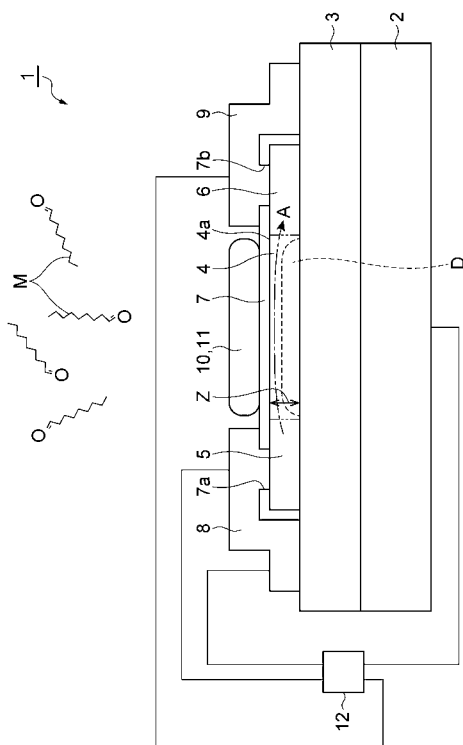
【符号の説明】

【0072】

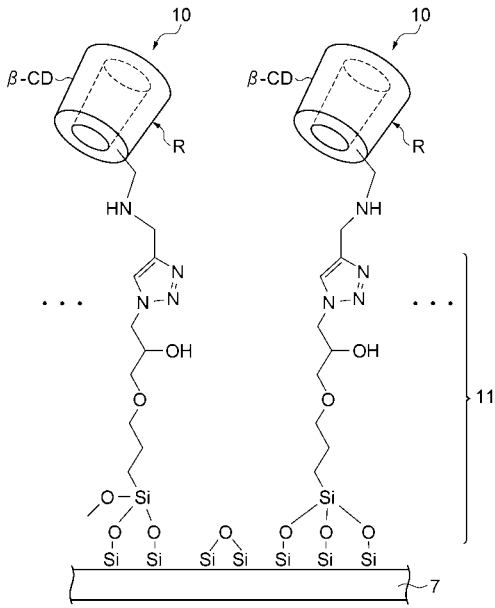
1 ... センサ素子、2 ... 支持基板、3 ... 第 1 絶縁層、4 ... チャンネル部、5 ... ソース電極部、6 ... ドレイン電極部、7 ... 第 2 絶縁層、10 ... 受容部、11 ... 単分子層、12 ... 電源部、13 ... スイッチ部、14 ... 有機溶媒、M ... 気体分子、W ... 幅、Z ... 長さ。

【図 1】

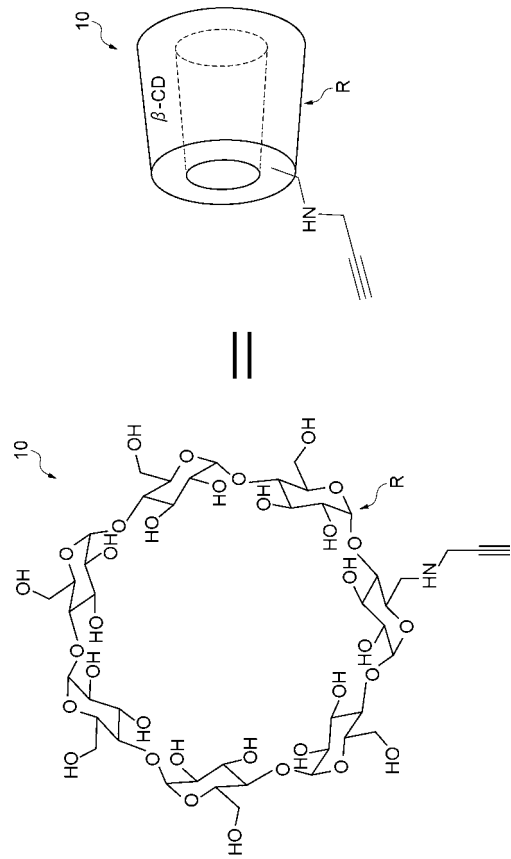
【図 2】



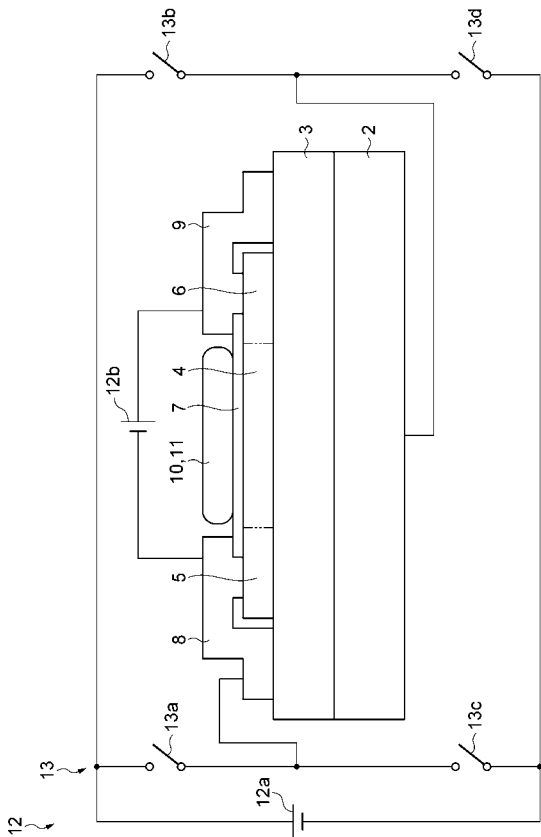
【 図 3 】



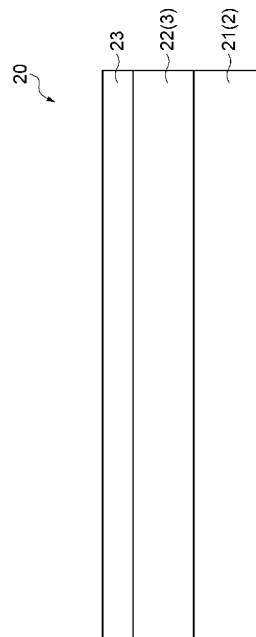
【 図 4 】



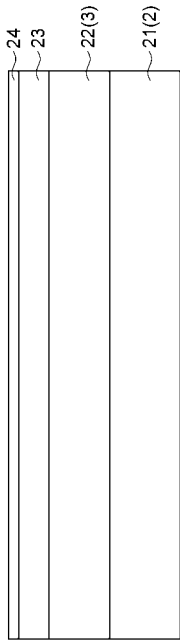
【 図 5 】



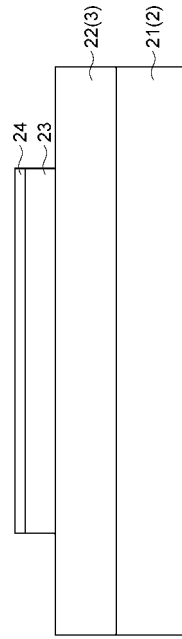
【 図 6 】



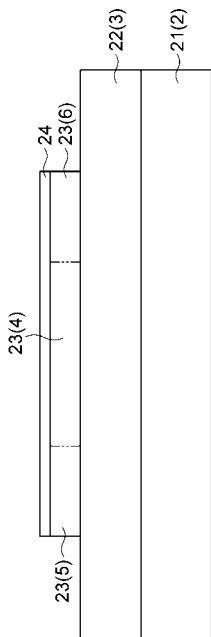
【 図 7 】



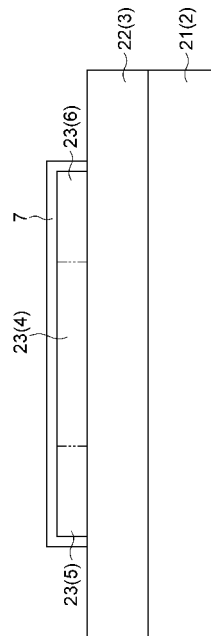
【 図 8 】



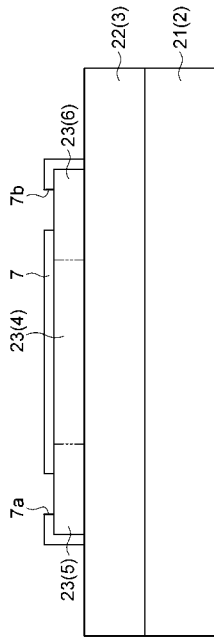
【 図 9 】



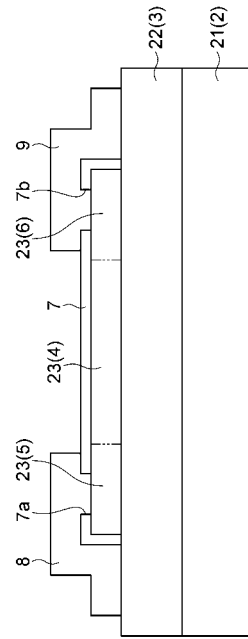
【 図 10 】



【 図 1 1 】



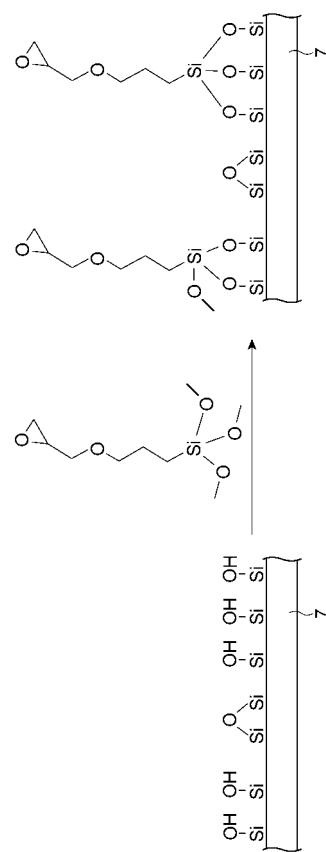
【 図 1 2 】



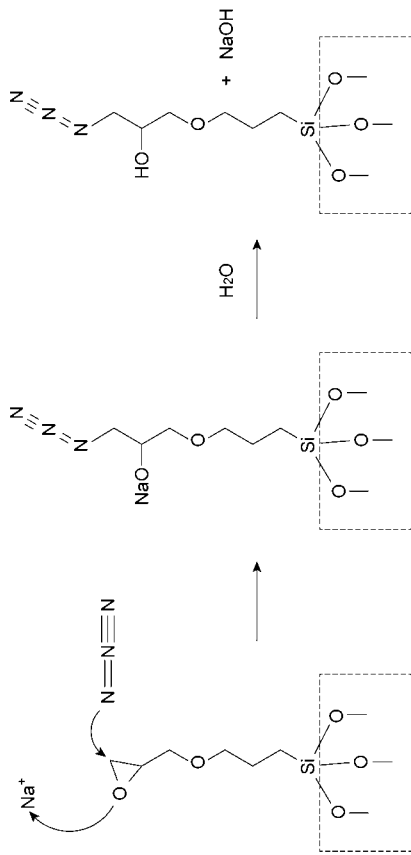
【 図 1 3 】



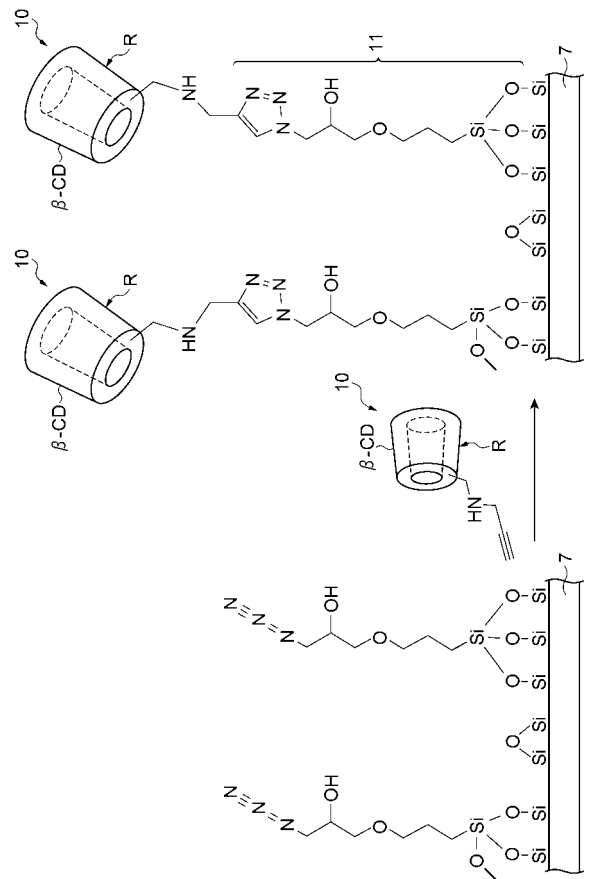
【 図 1 4 】



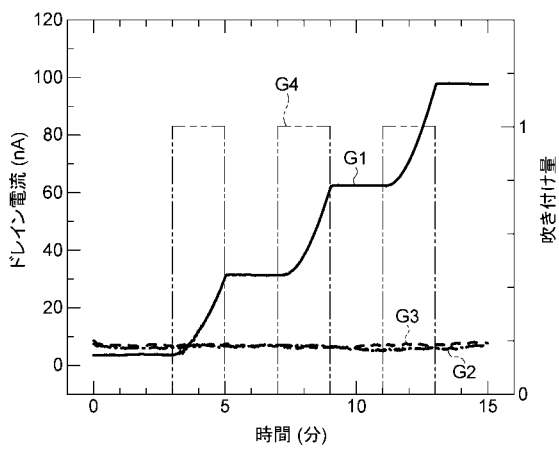
【図 15】



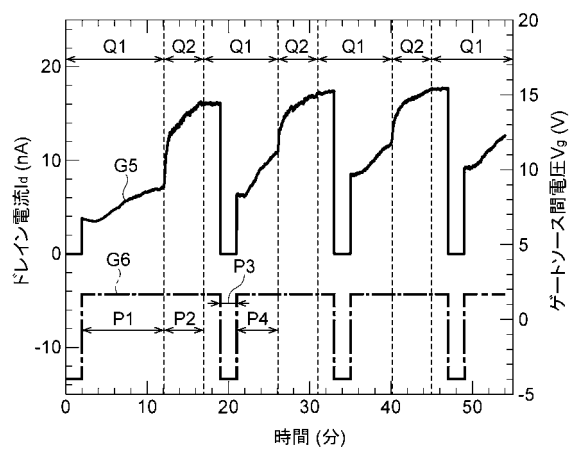
【図 16】



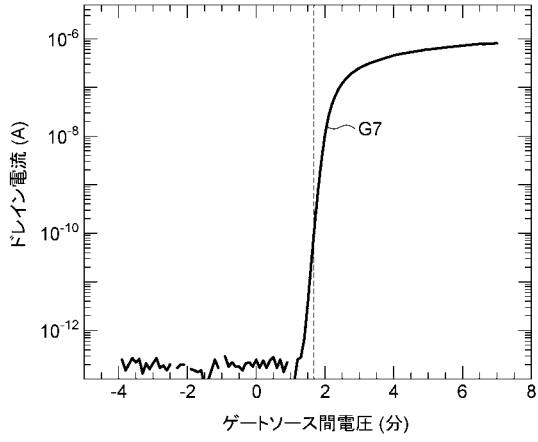
【図 17】



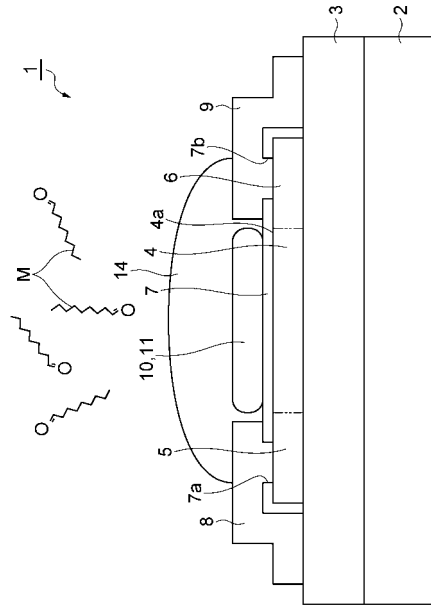
【図 18】



【図 19】



【図 20】



フロントページの続き

(72)発明者 寺尾 潤

京都府京都市左京区吉田本町3番地1 国立大学法人京都大学内

(72)発明者 高橋 綱己

神奈川県横浜市港北区日吉三丁目1番1号 慶應義塾大学工学部内

Fターム(参考) 2G060 AA01 AB15 AE19 DA02 DA06 DA09 DA12 DA27 JA01 KA01
5F110 AA03 BB09 BB13 DD05 DD13 EE08 FF02 GG02 GG12 GG22
GG25 GG32 GG34 GG58 HJ01 HJ13 HJ23 HL02 HL03 HL11
HL22 HL27 NN04 NN23 NN37 NN71