



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007101659/28, 07.07.2005

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.07.2005(30) Конвенционный приоритет:
07.07.2004 FR 0407583

(43) Дата публикации заявки: 20.08.2008

(45) Опубликовано: 27.08.2010 Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: LORENZ H et all. "NEW SUSPENDED GATE FET TECHNOLOGY FOR PHYSICAL DEPOSITION OF CHEMICALLY SENSITIVE LAYERS" SENSORS AND ACTUATORS A, ELSEVIER SEQUOIA S.A., LAUSANNE, CH, vol. A23, no.1/3, April 1990, p. 1023-1026. H. MAHFOZ-KOTB ET AL.: "High performance poly silicon air-gap thin film transistor on low temperature substrates", PROCEEDINGS OF SPIE, (см. прод.)

(85) Дата перевода заявки РСТ на национальную фазу: 07.02.2007

(86) Заявка РСТ:
FR 2005/001761 (07.07.2005)(87) Публикация РСТ:
WO 2006/013289 (09.02.2006)

Адрес для переписки:
119034, Москва, Пречистенский пер., 14, стр. 1, 4-ый этаж, "Гоулингз Интернэшнл, Инк.", пат.пов. В.А.Клюкину, рег. № 005

(72) Автор(ы):

МОХАММЕД-БРАИМ Тайеб (FR),
САЛОН Анн-Клер (FR),
ЛЁ БИАН Франс (FR),
КОТБ Ишам (FR),
БАНДРИАА Фарид (FR),
БОНО Оливер (FR)

(73) Патентообладатель(и):

УНИВЕРСИТЕ ДЕ РЕН 1 (FR)

(54) ДАТЧИК ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И/ИЛИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

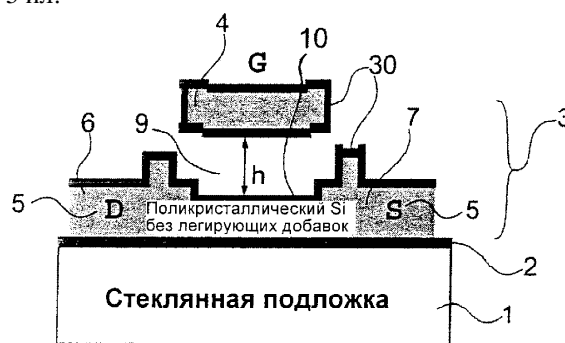
(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике. Сущность изобретения: датчик для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся в среде, содержит структуру полевого транзистора,

включающую мостик, формирующий затвор и проходящий над активным слоем, размещенным между областями стока и истока. На мостик подается напряжение затвора, имеющее заданное значение. Между мостиком и активным слоем или изолирующим слоем,

осажденным на активном слое, размещается зона так называемого воздушного зазора, имеющего заданную высоту. В воздушном зазоре создается электрическое поле E , напряженность которого определяется как отношение напряжения на затворе к высоте воздушного зазора. Напряженность электрического поля, созданного в воздушном зазоре, имеет величину, равную заданному пороговому значению 50000 В/см и более, которое достаточно для того, чтобы электрическое поле E воздействовало на распределение электрических зарядов, имеющих в среде и присутствующих в воздушном зазоре, и обеспечивало высокую чувствительность датчика, достигаемую в результате накопления электрических зарядов на активном слое, при этом поверхность

мостика покрыта изолирующим материалом. Техническим результатом изобретения является создание датчика, используемого в газовой или в жидкой среде и имеющего более высокую чувствительность. 2 н. и 13 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 3

(56) (продолжение):

SMART SENSORS, ACTUATORS, AND MEMS, no. 5116, April 2003, p. 168-175. DE 19849932 A1, 11.05.2000. US 4020830 A, 03.05.1977. FLEISCHER M et al. "Low-power gas sensors based on work-function measurement in low-cost hybrid flip-chip technology" SENSORS AND ACTUATORS B, ELSEVIER SEQUOIA S.A, LAUSANNE, CH, vol.80, no.3, 1 December 2001 (2001-12-01), p. 169-173. EP 1104884 A, 06.06.2001. US 4514263 A, 30.04.1985. RU 2188411 C1, 27.08.2002.

RU 2 3 9 8 2 2 2 C 2

RU 2 3 9 8 2 2 2 C 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
G01N 27/414 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2007101659/28, 07.07.2005**
 (24) Effective date for property rights:
07.07.2005
 (30) Priority:
07.07.2004 FR 0407583
 (43) Application published: **20.08.2008**
 (45) Date of publication: **27.08.2010 Bull. 24**
 (85) Commencement of national phase: **07.02.2007**
 (86) PCT application:
FR 2005/001761 (07.07.2005)
 (87) PCT publication:
WO 2006/013289 (09.02.2006)
 Mail address:
**119034, Moskva, Prechistenskij per., 14, str. 1,
4-yj ehtazh, "Goulingz Internehshnl, Ink.",
pat.pov. V.A.Kljukinu, reg. № 005**

(72) Inventor(s):
**MOKhAMMED-BRAIM Tajeb (FR),
SALON Ann-Kler (FR),
LE BIAN Frans (FR),
KOTB Isham (FR),
BANDRIAA Farida (FR),
BONO Oliver (FR)**
 (73) Proprietor(s):
UNIVERSITE DE REN 1 (FR)

(54) SENSOR FOR DETECTING AND/OR MEASURING CONCENTRATION OF ELECTRIC CHARGES AND USE THEREOF

(57) Abstract:
 FIELD: physics.
 SUBSTANCE: sensor for detecting and/or measuring concentration of electric charges in a medium has a field-effect transistor structure which has a bridge which forms the gate and passes over an active layer which lies between drain and source regions. Gate voltage of given value is applied across the bridge. Between the bridge and the active layer or insulating layer deposited on the active layer there is zone known as an air gap which has a given height. An electric field E is created in the air gap, where strength of the said field is defined as the ratio of voltage across the gate to the height of the air gap. Strength of the electric field created in the air gap has a value equal to or greater than the given threshold value of 50000 V/cm which is sufficient for the electrical field E to have an effect on distribution of electric charges in

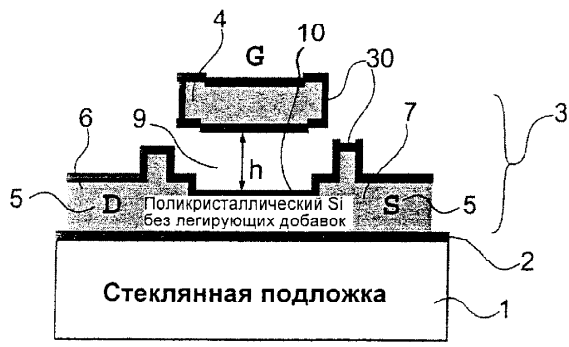
the medium and the air gap, and ensure high sensitivity of the sensor which is achieved as a result of accumulation of electric charges on the active layer. The surface of the bridge is coated with insulating material.

EFFECT: design of a sensor which is used in a gas or liquid medium and has higher sensitivity.

15 cl, 5 dwg

RU 2 398 222 C2

RU 2 398 222 C2



Фиг. 3

RU 2398222 C2

RU 2398222 C2

Область техники

Изобретение относится к химическим и биологическим датчикам, которые могут использоваться в газовой или жидкой среде.

5 Более конкретно изобретение относится к высокочувствительным датчикам для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, имеющих в газовой или жидкой среде.

Предлагаемый в изобретении датчик относится к категории датчиков, содержащих структуру полевого транзистора, в которую входит мостик, формирующий затвор 10 полевого транзистора и проходящий над активным слоем, размещенным между стоковой и истоковой областями полевого транзистора.

Изобретение имеет многочисленные применения, например в датчиках, чувствительных к NH_3 , NO_2 , влажности или дыму в газовых средах или чувствительных к величине рН растворов в жидких средах.

15 В общем случае такой датчик может использоваться в любой газовой или жидкой среде, содержащей электрические заряды. Однако важно заметить, что изобретение не может применяться в отношении электрически нейтральных сред.

Предпосылки создания изобретения

20 История полевых транзисторов (или МОП-транзисторов), которые чувствительны к химическим веществам, насчитывает около 30 лет. Они обеспечивают создание структур, селективно чувствительных к газам в газовых средах, а также ион-селективных структур для работы в жидких средах.

25 Обычно полевые транзисторы, селективно чувствительные к газам (МОП-структуры), изготавливают с использованием:

- либо проницаемого затвора, выполненного из палладия или из полимеров, который размещен напротив активного слоя, находящегося между стоковой и истоковой областями, причем газ достигает активного слоя, пройдя через отверстия в проницаемом затворе;

30 - либо плавающего затвора (также называемого "висячим мостиком"), который обеспечивает прохождение газа в так называемую зону "воздушного зазора", между затвором и активным слоем, расположенным между стоковой и истоковой областями, или между затвором и изолирующим слоем, осажденным на активном слое.

35 МОП-структура с плавающим затвором была описана Д.Джаната в патентах США №4411741 (1983) и №4514263 (1985). В этой структуре используется обычный кремниевый полевой транзистор на одном кристалле р-типа с плавающим перфорированным затвором, формирующим мостик. При этом чувствительным параметром является работа выхода мостика, которая изменяется в зависимости от поглощения диполей, содержащихся в жидкости, что вызывает изменение напряжения структуры, соответствующего плоским энергетическим зонам.

40 В другом патенте (С.К.Пайк, патент США №4671852 (1987)) раскрывается способ формирования плавающего затвора химического полевого транзистора, который основан на удалении жертвенного слоя. Как и в предыдущем патенте, в качестве плавающего мостика используется металлический затвор.

50 Б.Флитнер, Т.Долл, Д.Лечнер, М.Лью и А.Эйсел ("Датчики и приводы", 18-19, 1994, стр.632-636) предложили гибридный полевой транзистор с плавающим затвором, в котором обеспечивается простой способ осаждения чувствительных слоев между затвором и каналом транзистора (то есть между затвором и активным слоем транзистора). В указанном способе затвор формируется независимо и затем устанавливается в ранее сформированном полевом транзисторе без затвора.

После этих патентов появилось большое количество публикаций и патентов, целью которых была оптимизация газоселективных МОП-структур с плавающим затвором. Эти работы в основном относились к оптимизации выбора материалов, используемых для изготовления чувствительного слоя, на котором происходит поглощение.

Селективность в отношении газов этих известных МОП-структур связана с изменением работы выхода чувствительного слоя под действием газов, в результате чего происходит смещение порогового напряжения. Иначе говоря, чувствительным параметром является работа выхода, которая изменяется в зависимости от поглощения чувствительным слоем молекул (например, диполей), содержащихся в области (в так называемом воздушном зазоре) между мостиком и активным слоем (и более точно, в случае поглощения, между мостиком и чувствительным слоем).

Известно, что традиционно для того, чтобы получить отсчет количества молекул определяемого газа, присутствующих в воздушном зазоре, измеряют ток между стоковой и истоковой областями (ток I_{DS} , который протекает в активный слой) и определяют изменения измеряемого тока. Использование вышеуказанных современных технологий, которые основываются на явлении поглощения, позволяет оценивать поглощение молекул чувствительным слоем по изменению измеренного тока. Например, как указывается в вышеупомянутом патенте США №4514263, когда на мостике имеется положительный заряд, то чем большее количество диполей поглощается чувствительным слоем, осажденным на активном слое, тем выше величина тока I_{DS} . Действительно, в этом случае все поглощенные диполи выравниваются так, что их положительные концы направлены в сторону активного слоя, в результате чего увеличивается число притянутых электронов, и, соответственно, увеличивается ток I_{DS} ; который течет в активный слой.

Ион-селективные структуры в жидкой среде (или в растворе) называются ион-селективными полевыми транзисторами Бергвельда. Это структуры без затвора, которые, с одной стороны, содержат чувствительный слой, который покрывает изолятор канала, и, с другой стороны, эталонный электрод, погруженный в раствор, и при этом смещение затвора фиксировано.

Хотя первая публикация о такой структуре принадлежит П.Бергвельду ("Разработка ион-селективных твердотельных приборов для измерений в нейрофизиологии", IEEE Trans. Biomed. Eng., 17, 1970, стр.70-71), однако первый патент "Химические МОП-датчики" (США, №4020830, 1977) принадлежит следующим авторам: К.К.Джонсон, С.Д.Мосс, Д.А.Джаната).

Со времени выдачи этого патента появилось более 500 публикаций и было выдано более 150 патентов, которые посвящены ион-селективным полевым транзисторам. Первоочередными задачами этих работ было улучшение чувствительности и избирательности чувствительного слоя, на котором происходит поглощение (патенты США 5319226, 5350701, 5387328), изучение дрейфа, а также влияния температуры и использования эталонной МОП-структуры (Д.М.Шовелан, "Датчики и приводы", В8, 1992, стр.221-225).

Так же, как и в случае газоселективных МОП-структур, чувствительность ион-селективных МОП-структур связана с изменением порогового напряжения, которое вызвано изменением напряжения V_{FB} , соответствующего плоским энергетическим зонам. Иными словами, в известных ион-селективных МОП-структурах используется только явление поглощения.

Величина V_{FB} определяется уравнением:

$$V_{FB} = V_{ref} - \Psi_{0-\chi^{*01}} - \frac{\Phi_s}{q}$$

где V_{ref} - это напряжение эталонного электрода, χ^{sol} - это поверхностный потенциал диполей раствора, Ψ_0 - поверхностный потенциал на границе раздела между изолятором и раствором, Φ_s - работа выхода для полупроводника.

Только величина Ψ_0 изменяется в зависимости от значения рН. Зависимость Ψ_0 - рН описывается следующим уравнением (Р.Е.Г. Ван Галь, Д.К.Т.Эйкель, П.Бергвельд, "Общая модель, описывающая электростатический потенциал на границах раздела электролита и оксида", Adv. Colloid. Interface Sci., 69, 1966, стр.31-62):

$$\frac{\partial \Psi_0}{\partial \text{pH}_{\text{bulk}}} = -2.3 \frac{kT}{q} \alpha$$

где α - безразмерный параметр, изменяющийся в диапазоне 0-1. Когда значение α 59 мВ/рН, которая также называется чувствительностью Нернста.

Ни в одном из существующих патентов или в опубликованных работах не указывается о повышении чувствительности без использования схемы усиления.

Известные датчики, содержащие МОП-структуры, имеют ограниченную чувствительность, и это является их недостатком. Обычно эта чувствительность ограничена величиной 59 мВ/рН для случая жидкой среды.

Цели изобретения

В частности, целью настоящего изобретения является преодоление недостатков известных устройств.

Более конкретно, одной из целей изобретения, по меньшей мере в одном из вариантов его реализации, является создание датчика, содержащего полевой транзистор и имеющего более высокую чувствительность по сравнению с известными устройствами.

Целью изобретения также является, по меньшей мере в одном из вариантов его реализации, создание вышеуказанного датчика, который может использоваться в газовой среде.

Другой целью изобретения является, по меньшей мере в одном из вариантов его реализации, создание вышеуказанного датчика, который может использоваться в жидкой среде.

Дополнительной целью изобретения является, по меньшей мере в одном из вариантов его реализации, создание вышеуказанного датчика, который прост и дешев в изготовлении.

Еще одной целью изобретения является, по меньшей мере в одном из вариантов его реализации, создание вышеуказанного датчика, который позволяет снять ограничения на выбор материала, используемого для чувствительного слоя (на котором происходит поглощение).

Существенные признаки изобретения

Указанные цели, а также и другие, которые станут ясными из нижеприведенного описания, достигаются с помощью предлагаемого в изобретении датчика для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся во внешней среде, причем датчик содержит структуру полевого транзистора, в которую входит мостик, формирующий затвор и проходящий над активным слоем, размещенным между стоковой и истоковой областями. На мостик подается напряжение затвора, имеющее заданное значение. Между мостиком и активным слоем или изолирующим слоем, осажденным на активном слое, размещается зона так называемого воздушного зазора, имеющего заданную высоту. В воздушном зазоре создается электрическое поле E , напряженность которого определяется как отношение напряжения на затворе к высоте воздушного зазора. В соответствии с

изобретением электрическое поле E , создаваемое в воздушном зазоре, имеет величину, превышающую или равную заданному пороговому значению, которое достаточно велико для того, чтобы электрическое поле E воздействовало на распределение электрических зарядов, содержащихся в среде и присутствующих в воздушном зазоре, и обеспечивало получение высокой чувствительности датчика в результате накопления электрических зарядов на активном слое. Поверхность мостика покрыта изолирующим материалом.

Основная идея изобретения независимо от того, используется датчик в газовой или жидкой среде, заключается в создании сильного электрического поля в воздушном зазоре, в результате чего обеспечивается возможность направления электрических зарядов к активному слою, а также улучшение чувствительности датчика. Поэтому настоящее изобретение не применимо к электрически нейтральным средам, в которых нет электрических зарядов, на которые могло бы действовать электрическое поле, создаваемое в воздушном зазоре.

Важно отметить, что настоящее изобретение основывается на эффекте, создаваемом новым распределением зарядов в воздушном зазоре, получаемым в результате действия сильного электрического поля, а не на эффекте поглощения. В датчиках предшествующего уровня, основанных на эффекте поглощения, эффект, на котором основано настоящее изобретение, не используется, поскольку электрическое поле, создаваемое в воздушном зазоре, имеет слишком низкую напряженность. Фактически авторы изобретения исходят из того, что эффект, на котором основывается настоящее изобретение, возникает только в том случае, когда напряженность электрического поля, создаваемого в воздушном зазоре, превышает или равна 50000 В/см. Что же касается электрического поля, создаваемого в воздушном зазоре известных датчиков, то оно имеет низкую напряженность, обычно гораздо меньше, чем 1000 В/см.

Необходимо также отметить, что специалисты в данной области техники всегда придерживались взглядов, в соответствии с которыми не было необходимости слишком повышать напряженность электрического поля в воздушном зазоре, чтобы не происходило насыщения поглощения поверхностями воздушного зазора.

Таким образом, возможны два принципиальных варианта реализации предлагаемого в изобретении датчика:

- в первом варианте в датчике используется только эффект, являющийся отличительным признаком изобретения (изменение распределения зарядов в воздушном зазоре благодаря применению сильного электрического поля), а эффект поглощения не используется. В этом случае нет необходимости в использовании чувствительного слоя, в результате изобретение позволяет снять ограничения на выбор материала, используемого для чувствительного слоя (на котором происходит поглощение);

- во втором варианте в датчике используется эффект, являющийся отличительным признаком изобретения (изменение распределения зарядов в воздушном зазоре благодаря применению сильного электрического поля), совместно с эффектом поглощения. В этом случае для поглощения необходимо использование чувствительного слоя.

Изобретение относится к любым конструкциям, в которых действие поля, возникающего в результате подачи напряжения на висячий мостик, имеет достаточно высокую напряженность для воздействия на распределение электрических зарядов, имеющихся в среде. Известно, что модуляция тока между стоковой и истоковой

областями возникает прежде всего в результате изменения распределения зарядов, присутствующих в воздушном зазоре между мостиком и активным слоем (или между мостиком и изолирующим слоем, осажденным на активном слое).

Предпочтительно напряженность электрического поля, создаваемого в воздушном зазоре, должна иметь величину, превышающую или равную 100000 В/см.

Еще более предпочтительно, чтобы напряженность электрического поля, создаваемого в воздушном зазоре, имела величину, превышающую или равную 200000 В/см.

Для получения необходимого результата высота воздушного зазора должна быть меньше, чем 1 мкм.

Предпочтительно высота воздушного зазора меньше, чем 0,5 мкм.

Ясно, что уменьшая высоту воздушного зазора, можно получить электрическое поле с более высокой напряженностью без увеличения напряжения V_{GS} на затворе, приложенного к мостику, или, иначе говоря, можно получить ту же самую напряженность электрического поля при меньшем значении напряжения V_{GS} на затворе.

В одном из вариантов реализации изобретения по меньшей мере некоторая часть структуры, включая области стока и истока и активный слой, покрыта изолирующим материалом так, чтобы датчик мог быть погружен в жидкую среду.

В этом варианте, предназначенном для использования в жидких средах, предлагаемый в изобретении датчик отличается от известных ион-селективных структур на полевых транзисторах (см. выше) тем, что затвор (висячий мостик) служит в качестве эталонного электрода, и тем, что высота воздушного зазора и напряжение на затворе, приложенное к мостику, выбраны таким образом, чтобы в этом воздушном зазоре возникало сильное электрическое поле, которое направляло бы электрические заряды к активному слою.

Изобретение также относится к применению вышеуказанного датчика (в соответствии с изобретением) для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся в среде.

Среда, содержащая электрические заряды, относится к группе, включающей газы и жидкие среды.

В первом предпочтительном варианте применения предлагаемого в изобретении датчика электрическими зарядами являются молекулы NH_3 , содержащиеся в газовой среде.

Во втором предпочтительном варианте применения предлагаемого в изобретении датчика электрическими зарядами являются молекулы NO_2 , содержащиеся в газовой среде.

Необходимо отметить, что молекулы NH_3 и NO_2 являются полярными и в связи с этим могут рассматриваться как электрические заряды в значении, используемом в настоящем изобретении. Действительно, электрическое поле, создаваемое в воздушном зазоре, действует на движение полярных молекул, присутствующих в этом воздушном зазоре (даже если эти полярные молекулы в целом электрически нейтральны).

В третьем предпочтительном варианте применения предлагаемого в изобретении датчика электрическими зарядами являются ионы H^+ , содержащиеся в жидкой среде.

В четвертом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для обнаружения и/или измерения удельной влажности газовой среды путем обнаружения и/или измерения концентрации ионов OH^- , содержащихся в

этой газовой среде.

В пятом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для обнаружения и/или измерения концентрации дыма в газовой среде путем обнаружения и/или измерения электрических зарядов, содержащихся в дыме и в этой газовой среде.

В шестом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для измерения качества воздуха путем измерения количества отрицательных электрических зарядов в воздухе.

В седьмом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для обнаружения и/или измерения степени разрежения газовой среды путем обнаружения и/или измерения электрических зарядов, которые не удалены из этой газовой среды.

Действительно, при создании разрежения воздух и, соответственно, заряды, содержащиеся в среде, удаляются.

В восьмом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для измерения величины рН жидкой среды путем измерения концентрации ионов H^+ , содержащихся в этой жидкой среде.

Чувствительность к рН зависит от действия поля, определяемого воздушным зазором. Она снижается при увеличении высоты воздушного зазора.

В девятом предпочтительном варианте применения предлагаемый в изобретении датчик используется для обнаружения электрически заряженных биологических образований, содержащихся в этой среде.

Термин "биологические образования" означает, в частности, клетки ДНК или разветвленные молекулы и др.

Ясно, что могут быть предложены и другие многочисленные применения без выхода за пределы объема изобретения.

Изобретение также относится к способу изготовления вышеописанного датчика (в соответствии с изобретением). В этом способе структура полевого транзистора с висячим мостиком выполняется с использованием технологии поверхностных микроструктур.

Преимуществом использования технологии поверхностных микроструктур является возможность простого получения воздушного зазора, имеющего малую высоту, как это указано в настоящем изобретении (высота, которая меньше или равна 0,5 мкм и предпочтительно меньше или равна 1 мкм).

Перечень фигур чертежей

Другие признаки и достоинства изобретения станут понятными из нижеприведенного описания предпочтительного варианта реализации изобретения, который используется лишь в целях иллюстративного примера, не ограничивающего объем изобретения, а также из прилагаемых фигур, на которых показано:

Фигуры 1a и 1b - схематичный вид сечения и вид в перспективе, соответственно, первого варианта реализации предлагаемого в изобретении датчика, который может использоваться в газовой среде.

Фигура 1c - вид изображения, полученного с помощью электронного микроскопа, предлагаемого в изобретении датчика, схематичные виды которого представлены на фигурах 1a и 1b.

Фигура 1d - увеличенный вид участка изображения, приведенного на фигуре 1c, на котором, в частности, можно видеть воздушный зазор.

Фигура 2a - два графика передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток -

напряжение V_{GS} затвора) для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика: один график получен для датчика, помещенного в среду сухого воздуха, и другой - после введения в среду 100 ppm NH_3 .

5 Фигура 2b - два графика передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора) для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика: один график получен для датчика, помещенного в среду воздуха с относительной влажностью 10%, и другой - после введения в эту среду 2 ppm NO_2 .

10 Фигура 2c - графики передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика в различные последовательные моменты подачи дыма в среду.

15 Фигура 2d - дополнение фигуры 2c, на котором показана кривая изменения порогового напряжения в зависимости от времени, прошедшего от момента начала подачи дыма.

Фигура 2e - линейные графики (не логарифмические, как на предыдущих фигурах) передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика в различные последовательные моменты подачи в среду дыма.

20 Фигура 2f - графики передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика для различных величин относительной влажности среды.

25 Фигура 2g - дополнение 2f, на котором показана кривая изменения порогового напряжения в зависимости от величины удельной влажности.

Фигура 2h - графики передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика для значений относительной влажности 10% и 20% до и после подачи дыма в среду.

30 Фигура 3 - схематический вид сечения второго варианта предлагаемого в изобретении датчика, который может использоваться в жидкой среде.

Фигура 4 - график изменения напряжения затвора в зависимости от величины рН для величины тока сток-исток, равного 100 мкА, и для воздушного зазора 0,5 мкм.

35 Фигура 4 - график изменения напряжения затвора в зависимости от величины рН для величины тока сток-исток, равного 400 мкА, и для воздушного зазора 0,8 мкм.

40 Фигура 5 - графики передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика, погруженного в следующие жидкие среды: деонизированная вода, раствор КОН, раствор KCl и раствор NaCl.

Описание варианта реализации изобретения

Настоящее изобретение относится к высокочувствительным датчикам, предназначенным для обнаружения и измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся в среде. Эффект усиления чувствительности возникает в результате действия поля, создаваемого мостиком, подвешенным (на малой высоте) над проводящей зоной (активным слоем), имеющейся между стоковой и истоковой областями. Модуляция тока, измеряемого между стоковой и истоковой областями ("ток сток-исток" I_{DS}) возникает прежде всего в результате изменения распределения зарядов, присутствующих в воздушном зазоре между мостиком и активным слоем (или между мостиком и изолирующим слоем, осажденным на активном слое).

Первый иллюстративный вариант предлагаемого в изобретении датчика, пригодного для использования в газовой среде, описан ниже со ссылками на

фигуры 1a, 1b, 1c и 1d.

В этом первом варианте реализации изобретения датчик содержит обычную структуру 3 полевого транзистора (МОП-структуру), полученную осаждением на стеклянной подложке, покрытой пленкой 2 нитрида кремния.

МОП-структура 3 содержит висячий мостик 4, служащий затвором (G), выполненным из сильнолегированного поликристаллического кремния.

В данном примере, полевой транзистор фактически является тонкопленочным транзистором. Мостик из поликристаллического кремния изготавливается с использованием технологии поверхностных микроструктур. Структура, которая изготовлена таким образом с использованием технологии поверхностных микроструктур, называется "тонкопленочный транзистор с плавающим затвором" (SGTFT).

Однако должно быть ясно, что изобретение относится ко всем МОП-структурам, в которых электрическое поле имеет достаточную величину, для воздействия на распределение электрических зарядов, имеющихся в окружающей среде.

МОП-структура 3 содержит пленку поликристаллического кремния (активный слой) 10 без добавления легирующих присадок, осажденного на стеклянной подложке 1, покрытой слоем 2 нитрида кремния. Также могут использоваться и другие изолирующие подложки, или подложки, покрытые любым изолирующим материалом. Слой поликристаллического кремния может быть получен путем осаждения его в аморфной форме и последующей кристаллизации. Однако он может быть осажден сразу в кристаллическом состоянии. Может также использоваться любой другой полупроводник, не содержащий легирующих присадок или содержащий их в минимальных количествах.

Затем осуществляют осаждение и травление второго слоя 5 поликристаллического кремния, который на этот раз является сильнолегированным, для формирования областей истока 7 (S) и стока 6 (D). Он также может быть осажден в аморфной форме и затем кристаллизован, или же может быть осажден сразу в кристаллической форме. Также затем может быть выполнено легирование с использованием любого известного способа. Также может быть использован любой другой материал, имеющий высокую проводимость.

Затем дополнительно может быть осуществлено осаждение и травление двухслойной структуры (диоксид кремния-нитрид кремния) или только одного слоя 8 нитрида кремния так, чтобы покрыть поверхность между областями стока и истока. Также может быть использован слой любого электроизолирующего материала.

Затем осаждается слой германия (не показан), который используется в качестве жертвенного слоя. В качестве жертвенного слоя также может быть использован слой SiO_2 или любого материала, совместимого с другими слоями структуры. Толщина h жертвенного слоя определяет окончательную величину воздушного зазора 9 (пространство под мостиком).

Как известно, напряженность электрического поля E , создаваемого в воздушном зазоре, определяется отношением напряжения V_{GS} на затворе к высоте воздушного зазора. В соответствии с изобретением напряженность электрического поля, создаваемого в воздушном зазоре, имеет величину, которая больше или равна заданному пороговому значению (50000 В/см, предпочтительно 100000 В/см или даже 200000 В/см). Высота h воздушного зазора и напряжение V_{GS} на затворе выбираются таким образом, чтобы удовлетворялось указанное условие в отношении величины напряженности E электрического поля.

Эта высота h воздушного зазора для заданной величины напряжения V_{GS} на затворе должна быть достаточно малой, чтобы электрическое поле в воздушном зазоре было достаточно сильным, чтобы оно было доминирующим фактором, влияющим на чувствительность. Иными словами, эта высота h должна быть
5 достаточно малой для того, чтобы напряжение V_{GS} на затворе, поданное на мостик, создавало достаточно сильное электрическое поле, которое могло бы воздействовать на распределение электрических зарядов, содержащихся в окружающей среде и, соответственно, присутствующих в воздушном зазоре. В соответствии с изобретением
10 эта высота меньше, чем 1 мкм, или равна этой величине и предпочтительно меньше или равна 0,5 мкм.

Так, для высоты воздушного зазора, равного 0,5 мкм, величина напряженности электрического поля равна по меньшей мере 50000 В/см, 100000 В/см или 200000 В/см в зависимости от величины напряжения V_{GS} на затворе, которое имеет величину не
15 меньше чем 2,5 В, 5 В или 10 В соответственно.

Затем осуществляется осаждение и травление высоколегированного слоя 4 поликристаллического кремния для формирования мостика, который служит в качестве затвора (G). Может также использоваться любой другой материал, имеющий
20 высокую проводимость, который совместим с другими слоями, используемыми в структуре, и который имеет достаточную механическую прочность для поддержания мостика.

Затем может быть осуществлено осаждение и травление металлического слоя (не показан) для формирования электрических контактов истока, стока и затвора
25 (служащего мостиком). МОП-структура 3 может быть выполнена также и без этого металлического слоя.

Жертвенный слой травится (то есть удаляется) так, чтобы освободить пространство 9 (воздушный зазор) под мостиком, либо до осаждения металлических
30 контактов, либо после их осаждения, в зависимости от совместимости между различными используемыми материалами. В этом случае газовая среда может проникать в это пространство 9.

Первый вариант предлагаемого в изобретении датчика, описанный выше, чувствителен к различным газам. Была продемонстрирована его чувствительность в
35 различных газовых средах. Эта структура не обладает чувствительностью в отношении электрически нейтральных сред. Характеристика транзистора одинакова, например, для вакуума, для среды, содержащей O_2 или N_2 . Для всех этих сред пороговое напряжение имеет очень большую величину. Высокая величина порогового
40 напряжения - это нормально, принимая во внимание обычные уравнения теории для структур металл-оксид-полупроводник, в которых диэлектрическая постоянная равна 1, а изолятор затвора имеет толщину, превышающую или равную 0,5 мкм. Характеристика транзистора изменяется в электрически заряженных средах.

Ниже будет дано объяснение эффекта, являющегося существенным признаком изобретения (новое распределение зарядов в воздушном зазоре благодаря
45 использованию сильного электрического поля), а также его возможного сочетания с явлением поглощения.

В описании рассматривается случай предлагаемого в изобретении датчика, в
50 котором смещение порогового напряжения транзистора происходит благодаря:
- действию поля (эффект, являющийся существенным признаком данного изобретения): в зоне воздушного зазора создается сильное электрическое поле, которое вызывает новое распределение зарядов в воздушном зазоре; и

- эффекту поглощения (хорошо известное явление) на поверхности чувствительного слоя, осажденного на активном слое транзистора. Однако, как уже было указано, ясно, изобретение также может применяться в случае, когда используется только эффект поля (без эффекта поглощения).

В таком случае пороговое напряжение V_{TH} датчика (то есть величина напряжения V_{GS} на затворе, для которого происходит насыщение тока I_{DS} сток-исток) записывается следующим образом:

$$V_{TH} = \Phi_{MS} + 2\phi_F + \frac{Q_{sc}}{C} - \frac{1}{C\epsilon_{ox}} \int_0^{e_0} x\rho(x)dx \quad (1)$$

где Φ_{MS} - разница работ выхода для затвора и полупроводника, ϕ_F - положение уровня Ферми по отношению к середине запрещенной энергетической зоны, Q_{sc} - пространственный заряд в полупроводнике, C - общая емкость на единицу поверхности между мостиком и полупроводником, ϵ_{ox} - общая толщина изолятора (сумма высоты h воздушного зазора и толщины изолирующего слоя 8, например двухслойной структуры оксид кремния (SiO_2) - нитрид кремния (Si_3N_4) или только слоя нитрида кремния (Si_3N_4)), и $\rho(x)$ - заряд в изоляторе на расстоянии x от мостика.

Любое изменение среды в воздушном зазоре вызывает изменение общего заряда в изоляторе и возможное изменение его распределения. Кроме того, на внутренней поверхности воздушного зазора могут происходить химические реакции (явление поглощения), в результате чего изменяется параметр Φ_{MS} .

В устройствах предшествующего уровня техники использовался только этот последний эффект, связанный с поглощением.

Однако, в соответствии с изобретением, когда в воздушном зазоре создается сильное электрическое поле, распределение зарядов в зазоре изменяется, и это приводит к изменению величины $\rho(x)$. Кроме того, сильное электрическое поле может оказывать влияние на поглощение, направляя заряды на поверхность чувствительного слоя.

Все эти факторы вызывают изменение величины Φ_{MS} , но при этом также изменяется и последний член вышеприведенного уравнения (1). Следовательно, изменение порогового напряжения V_{TH} может быть очень значительным, если в соответствии с изобретением учитывать эффекты сильного электрического поля.

Ниже будет приведено несколько примеров применения этого первого варианта предлагаемого в изобретении датчика со ссылками на фигуры 2a-2h. В примерах применения датчика в качестве транзистора используется тонкопленочный транзистор с плавающим затвором из поликристаллического кремния n-типа. Воздушный зазор имеет высоту 0,5 мкм. Ясно, что могут быть предложены и другие многочисленные применения без выхода за пределы объема изобретения.

На фигурах 2a и 2b видно, что в среде NH_3 (фигура 2a) и в среде NO_2 (фигура 2b) МОП-структура имеет достаточно высокую чувствительность. NO_2 и NH_3 были выбраны в качестве испытательных газов из-за их противоположного действия на характеристики транзисторов. На фигуре 2a видно, что при вводе NH_3 кривая I_{DS} (V_{GS}) смещается в сторону наименьших значений напряжений (отрицательное смещение порогового напряжения). На фигуре 2b видно, что введение NO_2 оказывает противоположное действие. Так, смещение порогового напряжения на 6 В может быть получено при концентрации 100 ppm газа NH_3 или 2 ppm газа NO_2 .

Также на фигурах 2a и 2b можно видеть, что для данного варианта предлагаемого в изобретении датчика напряжение V_{GS} на затворе должно быть больше, чем 10 В, для

того, чтобы обеспечить возможность обнаружения, и, таким образом, величина напряженности электрического поля должна быть больше, чем 200000 В/см (=10 В/0,5 мкм).

5 На фигурах 2c и 2d видно, что в случае подачи дыма пороговое напряжение и наклон ниже порога резко падают и происходит насыщение передаточной характеристики. Это особенно отчетливо видно на линейном графике фигуры 2e.

Аналогично на фигурах 2f и 2g видно, что в случае изменения влажности пороговое напряжение и наклон ниже порога резко падают и происходит насыщение передаточной характеристики. Таким образом, пороговое напряжение изменяется более чем на 18 В, когда относительная влажность изменяется от 25% до 70%.

10 На фигуре 2h можно видеть, что чувствительность МОП-структуры имеет селективность в отношении дыма при сравнительно невысоких уровнях относительной влажности (например, когда относительная влажность поддерживается на постоянном уровне, который ниже 25%).

15 Второй вариант предлагаемого в изобретении датчика, который пригоден для использования в жидкой среде, будет рассмотрен со ссылкой на фигуру 3.

20 Структура, приведенная на фигуре 3, отличается от структуры, изображенной на фигуре 1a (первый вариант датчика, пригодного для использования в газовой среде), тем, что осуществляется осаждение слоя 30 нитрида кремния на поверхность структуры (и в частности, на поверхности стока 6 и истока 5, активного слоя 10 и висячего мостика 4). Модифицированная таким образом структура может быть погружена в жидкость для измерения на месте характеристик жидкости. Может быть использован также и любой другой материал, обеспечивающий изоляцию структуры от раствора. Далее, контактные площадки покрываются смолой или любым другим электроизолирующим материалом.

25 Такая структура может использоваться для измерения количества зарядов в жидкости. Она называется "ион-селективный тонкопленочный транзистор".

30 На фигуре 4a можно видеть, что чувствительность порядка 285 мВ/рН получают с воздушным зазором, имеющим высоту, равную 0,5 мкм. При такой высоте воздушного зазора изменение напряжения на затворе от примерно 6,5 В до 9 В соответствует изменению напряженности электрического поля (в воздушном зазоре) в интервале от примерно 130000 В/см до 180000 В/см. На фигуре 4b можно видеть, что чувствительность падает до 90 мВ/рН для воздушного зазора, высота которого равна 0,8 мкм. При такой высоте воздушного зазора изменение напряжения на затворе от примерно 6,25 В до 7,25 В соответствует изменению напряженности электрического поля (в воздушном зазоре) в интервале от примерно 62500 В/см до 72500 В/см. Это уменьшение чувствительности по сравнению с предыдущим случаем (фигура 4a) показывает, что эффект поля является доминирующим для получения высокой чувствительности. Иными словами, модифицированная структура в соответствии с изобретением обеспечивает в жидкости высокую чувствительность в отношении рН, которая примерно в 2-6 раз выше, чем чувствительность, обеспечиваемая обычными ион-селективными структурами на полевых транзисторах, причем в этом случае чувствительность зависит от толщины воздушного зазора.

45 В общем случае, и как указывалось выше по поводу формулы (1), высокая чувствительность предлагаемого в изобретении датчика к электрически заряженным средам объясняется действием сильного поля, которое создается (то есть создание сильного электрического поля в воздушном зазоре, величина напряженности которого превышает или равна 50000 В/см или даже 200000 В/см), в частности,

благодаря воздушному зазору, имеющему малую толщину (например, $h \leq 1$ мкм, если $V_{GS} \geq 10$ В, или $h \leq 0,5$ мкм, если $V_{GS} \geq 5$ В для того, чтобы получить электрическое поле E , напряженность которого больше или равна 100000 В/см). Если толщина воздушного зазора велика и напряженность электрического поля в воздушном зазоре меньше, чем 50000 В/см (для датчиков предшествующего уровня типичной является сила поля E много меньше, чем 1000 В/см), то действие поля недостаточно, и распределение электрических зарядов будет однородным внутри воздушного зазора. Однако это распределение не будет больше однородным, если напряженность электрического поля E будет достаточно высокой (больше или равно 50000 В/см) благодаря тому, что толщина воздушного зазора уменьшается (как это предлагается в настоящем изобретении). Чувствительность предлагаемого в изобретении датчика повышается благодаря большому накоплению зарядов на одной из поверхностей воздушного зазора (чего не происходит в датчиках предшествующего уровня, в которых распределение зарядов однородно). Такое накопление существенно увеличивается при увеличении напряжения затвор-исток, и, таким образом, эффект поля усиливается. Насыщение передаточной характеристики объясняется насыщением поверхности воздушного зазора, когда электрические заряды накапливаются в результате действия поля. Это насыщение проявляется при небольших напряжениях затвор-исток (эффект более слабого поля), когда количество зарядов, содержащихся в среде, увеличивается. Наконец, четко демонстрируется сила действия поля, поскольку чувствительность в отношении рН уменьшается, когда толщина воздушного зазора увеличивается (см. выше пояснения со ссылками на фигуры 4а и 4б).

Действие поля, являющегося существенным признаком изобретения (новое распределение зарядов в воздушном зазоре благодаря использованию сильного электрического поля), а также его возможное сочетание с явлением поглощения будет теперь проиллюстрировано на примере и со ссылками на фигуру 5.

Были приготовлены солевые растворы KCl и $NaCl$ и щелочной раствор KOH , имеющие одинаковые концентрации.

При использовании солевых растворов, таких как KCl и $NaCl$, величина рН не изменяется. Соответственно, при измерении передаточных характеристик предлагаемого в изобретении датчика, помещенного в эти растворы, наблюдается только действие электрического поля на распределение зарядов.

С другой стороны, в присутствии KOH величина рН изменяется, и в результате наблюдается не только эффект нового распределения зарядов (под действием электрического поля), но также и эффект поглощения.

На фигуре 5 представлены графики передаточных характеристик (ток I_{DS} сток-исток - напряжение V_{GS} затвора), полученных для одного и того же варианта предлагаемого в изобретении датчика, погруженного в различные жидкие среды: деионизированная вода и растворы KOH , KCl и $NaCl$, имеющие одинаковые концентрации.

Для растворов KCl и $NaCl$, имеющих одинаковые концентрации, наблюдалось одинаковое смещение передаточных характеристик по отношению к передаточной характеристике, полученной для деионизированной воды. Это смещение происходит только благодаря новому распределению электрических зарядов в воздушном зазоре, которое возникло в результате действия сильного электрического поля. Смещение порогового напряжения V_{TH} происходит в результате изменения последнего члена вышеприведенного уравнения (1). Одно и то же распределение зарядов приводит к одному и том же смещению. Для раствора KOH , имеющего такую же концентрацию,

наблюдается дополнительное смещение. Это происходит благодаря величине рН данного раствора и, соответственно, зарядам, которые поглощаются на поверхности изолирующего слоя (указанного ссылочным номером 30 на фигуре 3), который

5 состоит из нитрида кремния Si_3N_4 (первый член упомянутого уравнения (1)).
Необходимо отметить, что в данном примере изолирующий слой также служит в качестве чувствительного слоя для процесса поглощения. Соответственно, в присутствии КОН смещение передаточной характеристики происходит благодаря, с одной стороны, новому распределению зарядов (под действием электрического поля) и, с другой стороны, благодаря поглощенному заряду. Таким образом, в данном

10 примере оба явления действуют совместно и обеспечивают хорошую чувствительность к рН предлагаемого в изобретении датчика.
Хотя изобретение было описано в отношении ограниченного числа вариантов реализации изобретения, однако для специалистов в данной области техники после

20 Формула изобретения

1. Датчик для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся в среде, который содержит структуру полевого транзистора, в состав которой входит мостик (4), формирующий затвор и проходящий над активным

25 слоем (10), размещенным между областями стока (6) и истока (7), причем напряжение на затворе, приложенное к мостику, имеет заданную величину, и между мостиком (4) и активным слоем (10) или изолирующим слоем (8), осажденным на активном слое, имеется зона воздушного зазора (9), имеющего заданную высоту, где в воздушном зазоре создается электрическое поле E , напряженность которого определяется как

30 отношение между напряжением на затворе и высотой воздушного зазора, отличающийся тем, что напряженность электрического поля, созданного в воздушном зазоре, имеет величину, равную заданному пороговому значению 50 000 В/см и более, которое достаточно для того, чтобы электрическое поле E воздействовало на распределение электрических зарядов, имеющих в среде и присутствующих в

35 воздушном зазоре, и обеспечивало высокую чувствительность датчика, достигаемую в результате накопления электрических зарядов на активном слое, при этом поверхность мостика покрыта изолирующим материалом (30).

2. Датчик по п.1, отличающийся тем, что высота воздушного зазора не превышает 1

40 мкм.

3. Датчик по п.1, отличающийся тем, что высота воздушного зазора не превышает 0,5 мкм.

4. Датчик по п.1, отличающийся тем, что по меньшей мере часть поверхности структуры, включая области стока и истока, и активный слой, покрыта изолирующим

45 материалом (30) так, чтобы датчик мог быть погружен в жидкую среду.

5. Способ для обнаружения и/или измерения концентрации электрических зарядов, содержащихся в среде, с использованием:

датчика, содержащего структуру полевого транзистора, в состав которой входит мостик, формирующий затвор и проходящий над активным слоем, размещенным

50 между областями стока и истока, и которая имеет поверхность, покрытую изолирующим слоем, и зону воздушного зазора, имеющего заданную высоту, расположенную между мостиком и активным слоем или изолирующим слоем,

осажденным на активном слое, при этом поверхность мостика покрыта изолирующим материалом (30), включающий

подачу напряжения на затвор, приложенного к мостику, имеющего заданную величину, для создания в воздушном зазоре электрического поля E , напряженность которого определяется как отношение между напряжением на затворе и высотой воздушного зазора, где напряженность электрического поля, созданного в воздушном зазоре, имеет величину, равную заданному пороговому значению 50000 В/см и более, которого достаточно для того, чтобы электрическое поле E воздействовало на распределение электрических зарядов, имеющихся в среде и присутствующих в воздушном зазоре, и обеспечивало высокую чувствительность датчика, достигаемую в результате накопления электрических зарядов на активном слое; и измерение изменений в характеристике полевого транзистора, происходящих в результате накопления электрических зарядов на активном слое.

6. Способ по п.5, отличающийся тем, что среда, содержащая электрические заряды, относится к группе, включающей газы и жидкие среды.

7. Способ по п.6, отличающийся тем, что среда является газовой средой, содержащей молекулы NH_3 .

8. Способ по п.6, отличающийся тем, что среда является газовой средой, содержащей молекулы NO_2 .

9. Способ по п.6, отличающийся тем, что электрические заряды являются ионами H^+ , содержащимися в жидкой среде.

10. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает обнаружение и/или измерение удельной влажности газовой среды путем обнаружения и/или измерения концентрации ионов OH^- , содержащихся в этой газовой среде.

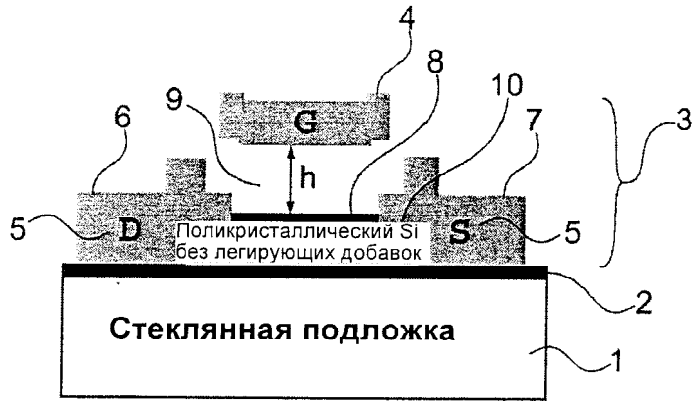
11. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает обнаружение и/или измерение концентрации дыма в газовой среде путем обнаружения и/или измерения электрических зарядов, содержащихся в дыме и в этой газовой среде.

12. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает измерение количества отрицательных электрических зарядов в воздухе.

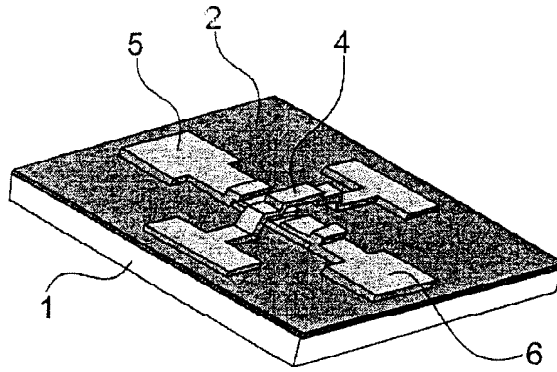
13. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает обнаружение и/или измерение степени разрежения в газовой среде путем обнаружения и/или измерения электрических зарядов, которые не удалены из этой газовой среды.

14. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает измерение величины рН жидкой среды путем измерения концентрации ионов H^+ , содержащихся в этой жидкой среде.

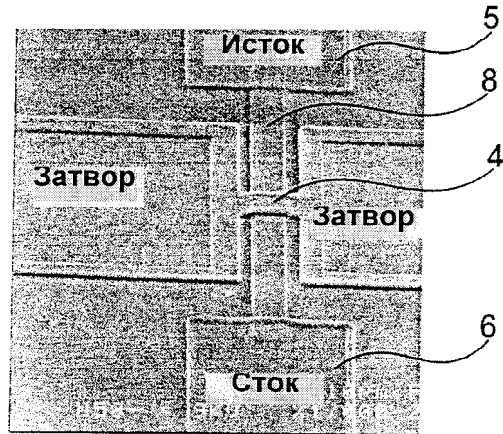
15. Способ по п.5, отличающийся тем, что включает обнаружение электрически заряженных биологических образований, содержащихся в этой среде.



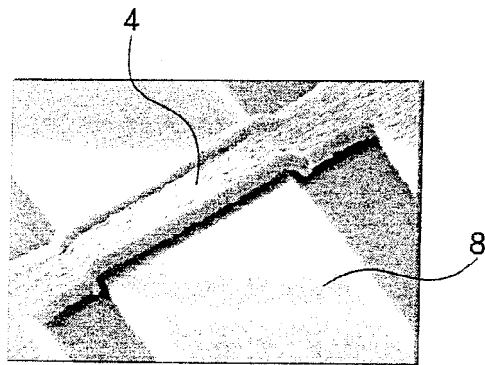
Фиг. 1а



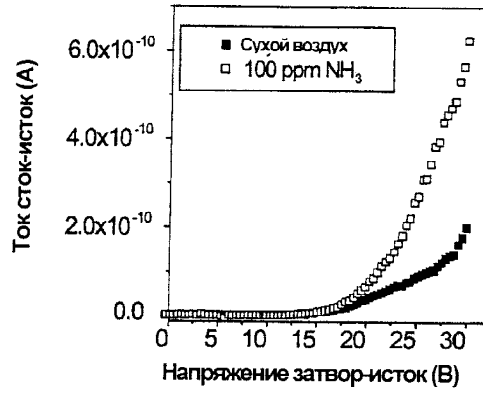
Фиг. 1b



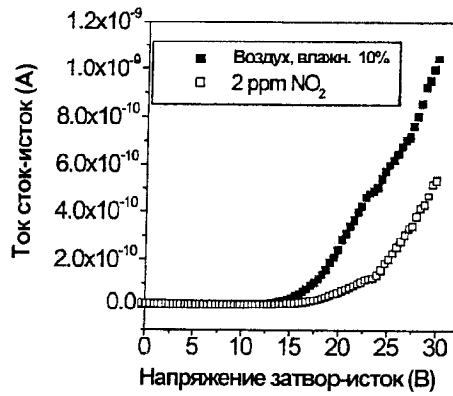
Фиг. 1с



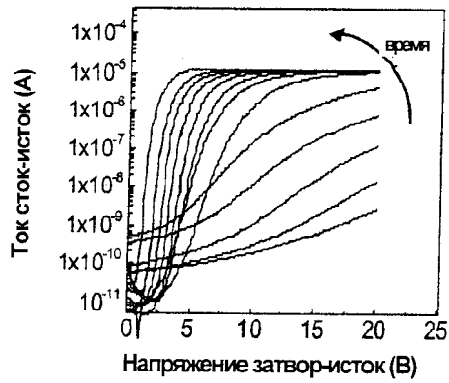
Фиг. 1d



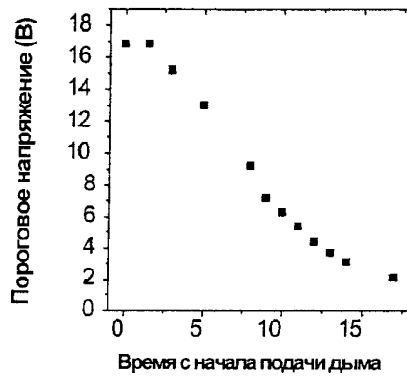
Фиг. 2а



Фиг. 2б



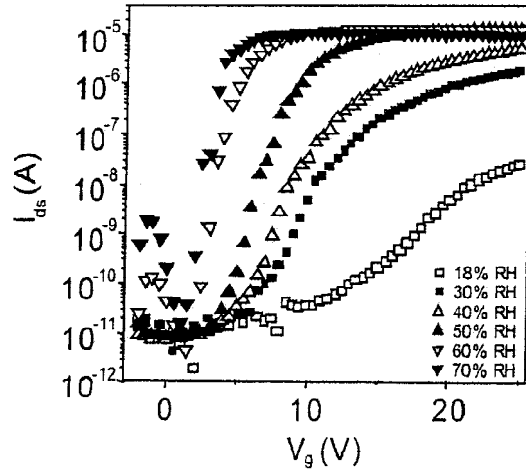
Фиг. 2с



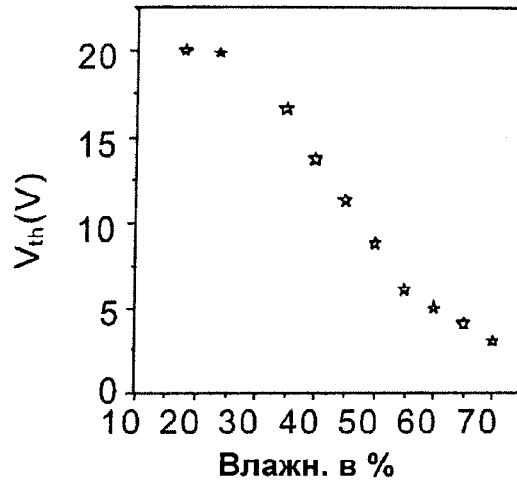
Фиг. 2д



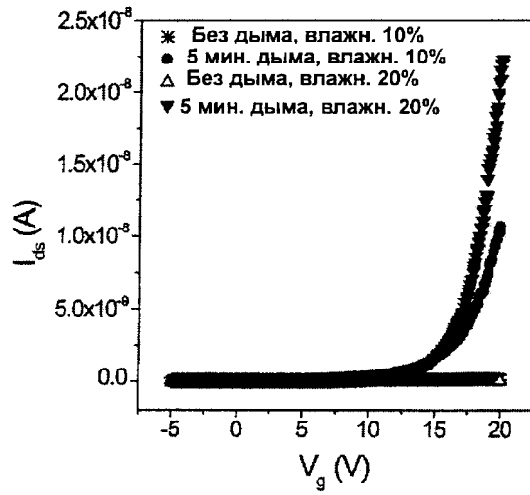
Фиг. 2е



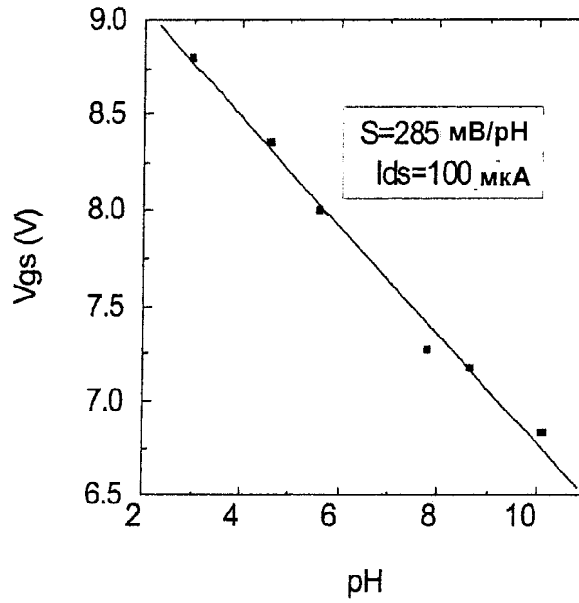
Фиг. 2f



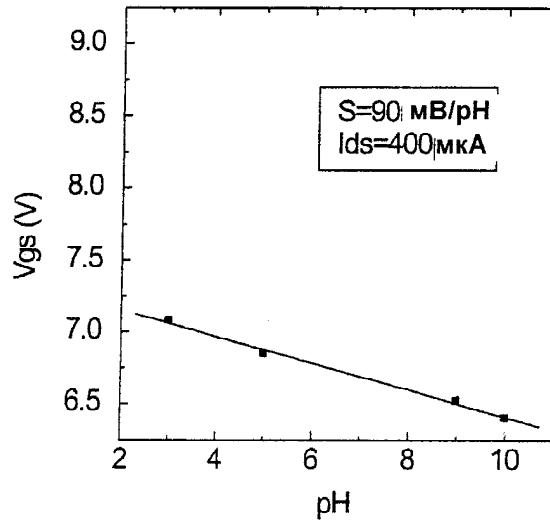
Фиг. 2г



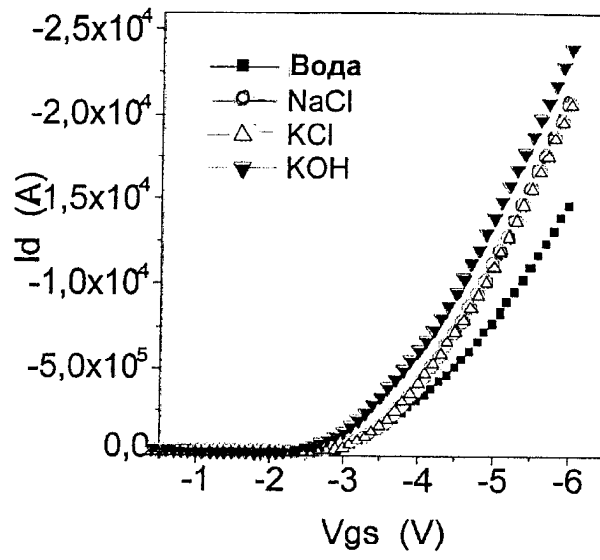
Фиг. 2h



Фиг. 4а



Фиг. 4б



Фиг. 5