

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.2.082:621.3:53.082.7

РЕУТСКАЯ
Ольга Геннадьевна

**МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ МИКРОСИСТЕМА ПОВЫШЕННОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ
ПОДЛОЖЕК ИЗ КРЕМНИЯ И ПОРИСТОГО
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ Юрий Михайлович**,
член-корреспондент Национальной академии наук
Беларуси, доктор технических наук, профессор, за-
служенный деятель науки Республики Беларусь, за-
ведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Бело-
русского национального технического университета

Официальные
оппоненты: **МУХУРОВ Николай Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
лабораторией «Микро- и наносенсорика» Государ-
ственного научно-производственного объединения
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»;

ЗЕЛЕНИН Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, главный научный сотруд-
ник Государственного научного учреждения «Физи-
ко-технический институт Национальной академии
наук Беларуси»

Оппонирующая
организация Государственное научно-производственное объеди-
нение «Научно-практический центр Национальной
академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита диссертации состоится 13 декабря 2018 г. в 15.30 на заседании
совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном
техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независи-
мости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря: +375 (17) 293 96 18,
e-mail: d.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского наци-
онального технического университета.

Автореферат разослан « 8 » ноября 2018 г.

Ученый секретарь Совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Ризноокая

© Реутская О. Г., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития техники одним из актуальных направлений приборостроения является разработка приборов и методов измерения концентрации газов и определения химического состава воздуха в окружающей среде, обеспечение безопасности на ранней стадии возгорания в жилищно-коммунальном хозяйстве и на производстве. Учитывая значительные объемы производства продукции промышленных предприятий, непрерывный синтез новых химических веществ, возрастающие требования к экологии и противопожарной безопасности, необходимо создание и совершенствование чувствительных элементов как одного из основных компонентов химических датчиков и систем для детектирования газов CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 . Химические датчики обладают рядом существенных недостатков, таких как высокое энергопотребление, связанное с несовершенством конструкций микронагревателей, зависимость от температуры окружающей среды и влажности воздуха, низкая селективность к горючим и токсичным газам, дрейф характеристик из-за ускорения процессов диффузии в газочувствительных элементах при воздействии высоких рабочих температур.

В этой связи возникает необходимость создания широкой номенклатуры датчиков, обеспечивающих высокую чувствительность, надежность и экологичность, низкое энергопотребление при умеренных ценах. Основным направлением создания химических датчиков, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, является использование технологии микроэлектромеханических систем, на основе которой возможно создание высокочувствительных датчиков с низким энергопотреблением, высокой надежностью и доступной стоимостью. Таким образом, необходима реализация ряда конструкторско-технологических решений для получения газовых датчиков с применением технологии микроэлектромеханических систем и методов измерения, обеспечивающих надежное определение газов в окружающей атмосфере. Наибольшую чувствительность к изменению электрофизических свойств и реакционной способности газочувствительных слоев получают при использовании мелкодисперсных нанокристаллических оксидов металлов (SnO_2 , In_2O_3 и др.) с легирующими добавками. Такие газочувствительные слои изготавливают золь-гель методом. Важным направлением газовой сенсорики является поиск новых чувствительных материалов с высокой адсорбцией и десорбцией горючих и токсичных газов, методов их нанесения с целью повышения адгезионных свойств, совершенствование конструкций и технологии изготовления для повышения надежности и снижения себестоимости. Перспективным для решения

этих задач может быть использование мультисенсорных микросистем на основе кремния и пористого оксида алюминия.

В соответствии с обозначенной выше актуальностью направлений исследований и их практической значимостью, настоящая диссертационная работа посвящена разработке мультисенсорных микросистем на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия, исследованию характеристик и методов измерения сенсорного отклика, обеспечивающих надежный и эффективный контроль состава газовой среды при мощном энергопотреблении.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с крупными научными программами и темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, принятым в Республике Беларусь на 2011–2015 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22 июля 2010 г. № 378 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 годы» и постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585 «Об утверждении перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы»): пунктам 6.10, 7.6, 8.4, 10.11, и приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности Республики Беларусь на 2016–2020 гг.») пунктам 2 и 5. Результаты настоящей диссертационной работы получены при выполнении следующих научных программ: СГ «Микросистемотехника» 2010–2014 гг. опытно-конструкторская работа «Разработка конструкции, изготовление и технологии производства низкоэнергопотребляющих унифицированных сенсоров CO и H₂ для датчиков пожарных извещателей раннего предупреждения возгораний на основе кремниевых мембранных структур» по заданию 1.15 (гос. рег. № 20102000), ГПНИ «Электроника и фотоника» 2011–2015 гг. научно-исследовательская работа «Разработка и изготовление макета газовой микросистемы на основе кремния и наноструктурированного Al₂O₃» по заданию 1.3.11 (гос. рег. № 20113515); программы СГ «Микросистемотехника» 2010–2014 гг. опытно-конструкторская работа «Разработка типовой архитектуры системы противопожарной безопасности на основе газового пожарного извещателя с матричным сенсором» по заданию 1.40 (гос. рег. № 20132138).

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка мультисенсорной микросистемы на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия, методов определения горючих и токсичных газов в окружающей среде при повышенной эффективности их контроля.

Для достижения поставленной цели определены **следующие задачи:**

– построить модели мультисенсорных микросистем с использованием метода конечных элементов, и изучить влияние режимов нагрева на уровень термомеханических деформаций сенсорных элементов;

– исследовать влияние высоких температур на адгезию слоев платины к пористому оксиду алюминия, разработать методы снижения энергопотребления полупроводниковых датчиков с тонкопленочными нагревателями из платины;

– провести анализ процессов хемосорбции и десорбции газов CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 на поверхности газочувствительных элементов, состоящих из мелкодисперсных нанокристаллических пленок оксидов металлов (SnO_2 , In_2O_3 и др.) при различных температурах с использованием катализатора для увеличения сенсорного отклика полупроводниковых датчиков;

– изучить особенности дрейфа электросопротивления мультисенсорной микросистемы при различных мощностях нагрева и диссоциативной адсорбции и десорбции горючих и токсичных газов на поверхности чувствительных слоев;

– разработать конструкции мультисенсорных микросистем на подложках из кремния и пористого оксида алюминия, формируемых методами планарной интегральной технологии и технологии электрохимического окисления алюминия;

– провести экспериментальные исследования выходных характеристик разработанных мультисенсорных микросистем для определения наличия горючих и токсичных газов в окружающей среде;

– разработать методику измерения выходного сигнала мультисенсорной микросистемы путем определения сенсорного отклика в режиме импульсного нагрева для расширения функциональных способностей мультисенсорных датчиков в составе пожарного извещателя и повышения эффективности контроля горючих и токсичных газов в окружающей среде.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем:

– предложена мультисенсорная микросистема на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия для контроля состава газовой среды со стабильными параметрами нагревателей, позволяющая значительно снизить потребляемую электрическую мощность полупроводниковых датчиков. Оригинальное конструктивное решение мультисенсорной микросистемы на основе пористого оксида алюминия обеспечивает повышение

селективности, работоспособности при циклическом режиме контроля состава окружающей среды;

– показана возможность увеличения сенсорного отклика с использованием полученных золь-гель методом активных слоев $\text{SnO}_2\text{–Pt–Pd+Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3\text{–Al}_2\text{O}_3\text{+Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3\text{–Ga}_2\text{O}_3\text{+Pt}$ -чернь при воздействии газов CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 , вызванного обратимыми изменениями концентрации носителей заряда в приповерхностном слое при температурах нагрева от $150\text{ }^\circ\text{C}$ до $450\text{ }^\circ\text{C}$. Предложен метод формирования газочувствительных слоев на поверхности чувствительных элементов мультисенсорных микросистем послойным нанесением растворов с толщиной отдельного слоя порядка 100 нм , что при нанесении катализатора на сформированный чувствительный слой увеличивает сенсорный отклик в $1,5\text{–}2,0$ раза;

– предложена конструкция диэлектрической мембраны $\text{SiO}_2\text{–Si}_3\text{N}_4\text{–Al}_2\text{O}_3$, устойчивой к воздействию высоких температур, и обеспечивающая на ее поверхности долговременную высокую адгезию платиновых нагревателей при воздействии температур до $450\text{ }^\circ\text{C}$, что позволяет снизить энергопотребление полупроводниковых датчиков до 60 мВт в режиме постоянного нагрева;

– разработана методика измерения выходных характеристик мультисенсорной микросистемы в режиме импульсного нагрева, обеспечивающая возможность аппроксимации сигнала степенными функциями с учетом требований по концентрации горючих и токсичных газов, предъявляемых к пожарным извещателям. При помощи специализированной терминальной программы смоделирован алгоритм измерения электросопротивления мультисенсорной микросистемы, который заключается в поочередном опросе каждого сенсора и обработке полученного сигнала, что позволяет определять наличие различных по составу газов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные мультисенсорные микросистемы на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия, отличающиеся эффективной конструкцией нагревателей и повышенной избирательностью к определяемым предельно допустимым концентрациям газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 , которые позволяют контролировать в циклическом режиме состав горючих и токсичных газов в окружающей среде с потребляемой микросистемой мощностью $25\text{–}100\text{ мВт}$, что в $1,5\text{–}2,0$ раза меньше, чем у известных систем аналогичного назначения.

2. Методы повышения стабильности характеристик мультисенсорной микросистемы на подложках из кремния и пористого оксида алюминия, включающие формирование в диэлектрических подложках сквозной перфорации вокруг нагревателей, что обеспечивает снижение тепловых потерь и величины потребляемой мощности в $2\text{–}3$ раза за счет уменьшения

объема контактирующего с нагревателем материала подложки; мембраны нового типа $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$, устойчивые к воздействию высоких температур и обеспечивающие высокую адгезию платиновых нагревателей на кремниевых подложках; технологию формирования полупроводниковых газочувствительных слоев послойным нанесением $\text{SnO}_2 - \text{Pt} - \text{Pd} + \text{Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ с толщиной каждого слоя порядка 100 нм, что в совокупности позволяет повысить чувствительность определения ниже предельно допустимых концентраций газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 в 1,5–2,0 раза.

3. Методика определения наличия составляющих многокомпонентной газовой среды четырьмя сенсорами одновременно за счет диссоциативной адсорбции и десорбции на поверхности газочувствительного слоя каждого из сенсоров микросистемы, которая позволяет проводить одновременные измерения различных по составу газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 при значениях температур нагрева сенсоров от 150 °С до 450 °С.

4. Методика измерения электросопротивления мультисенсорной микросистемы в режиме импульсного нагрева обеспечивает, по сравнению с режимом постоянного нагрева, повышенную чувствительность к детектируемому газу в 1,5–2,0 раза и неизменность рабочих параметров микросистемы при эксплуатации с периодическими отжигами чувствительных слоев, что достигается за счет последовательного опроса всех сенсоров микросистемы в течение не более 90 с при суммарной потребляемой мощности до 150 мВт.

Личный вклад соискателя ученой степени заключается в разработке конструкции и технологии изготовления мультисенсорных микросистем, методики измерения определяемого газа в сенсорном отклике микросистемы при воздействии ряда газов, проведении экспериментальных исследований, апробации полученных результатов, изложенных в диссертационной работе, и оформлении их в виде научных публикаций и докладов. Совместно с научным руководителем, членом-корреспондентом Национальной академии наук Беларуси, доктором технических наук, профессором Плескачевским Ю.М. определен предмет исследований, разработан эскизный проект мультисенсорной микросистемы, а также сформулированы цель, основные задачи исследования, положения, выводы и рекомендации диссертационной работы.

Соваторы публикаций по теме диссертации участвовали в изготовлении конструкций мультисенсорных микросистем (к.т.н., доц. Таратын И.А., Сафрошкина И.В.), в проведении экспериментальных исследований и разработке методик измерений (Таратын И.А.), подготовке золь-гелей SnO_2 , In_2O_3 , $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Ga}_2\text{O}_3$ и $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ для газочувствительных слоев сенсоров (Гайдук Ю.С.), расчете параметров мультисенсорных микросистем (Бело-

гуров Е.А.), в проведении отдельных экспериментов, обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций по результатам исследований (д.ф.-м.н. Хатько В.В., к.т.н. Горох Г.Г., Захлебаева А.И.). Результаты, полученные другими соавторами, не вошли в диссертационную работу.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований были доложены и обсуждены на следующих международных научно-практических конференциях: «Приборостроение» (Минск, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017); «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2012, 2013, 2016, 2017); «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2014, 2015, 2016); «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2013, 2014); «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015); «Всероссийский конгресс молодых ученых» (Санкт-Петербург, 2016), «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина» (Минск, 2016). Результаты диссертации использованы в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» и НИИ ПБиЧС Беларуси.

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты работы опубликованы в 25 печатных работах, включая: 5 статей (2,3 а. л.) в научных рецензируемых журналах согласно перечню научных изданий ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, 10 статей и докладов в сборниках международных и республиканских конференций, 7 тезисов докладов, 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 121 страницу, в том числе 64 рисунка и 6 таблиц на 34 страницах. Библиографический список содержит 139 наименований, из них 114 наименований использованных источников на 9 страницах, 25 наименований авторских публикаций на 4 страницах, 6 приложений на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

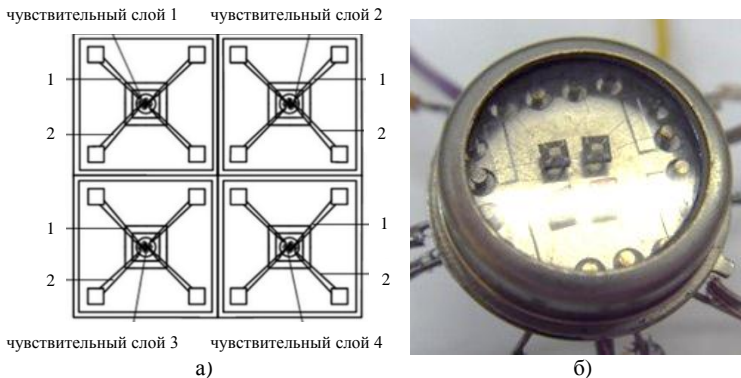
Во **введении** диссертационной работы обосновывается актуальность и значимость выбранной темы диссертации, определены направления диссертационного исследования, представлена общая характеристика работы.

В **первой главе** определены приоритетные направления газовой сенсорики на современном этапе развития приборостроения, обобщены литературные сведения о существующих конструктивных и технологических решениях известных мультисенсорных микросистем на полупроводниковых и диэлектрических подложках. Рассмотрены методы измерения пара-

метров микросистем. Особое внимание уделено существующим конструкциям мультисенсорных микросистем, методам измерения газочувствительных характеристик с целью снижения их энергопотребления, повышения чувствительности к концентрации опасных газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 . На основании литературного обзора сделан вывод о необходимости разработки мультисенсорной микросистемы повышенной эффективности контроля газовой среды на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия, позволяющей значительно снизить потребляемую мощность, повысить стабильность параметров нагревателей полупроводниковых датчиков. Сформулирована цель и определены задачи исследования для ее достижения.

Во **второй главе** описаны конструктивные особенности разработанных мультисенсорных микросистем на основе кремния и пористого оксида алюминия. Проведен сравнительный анализ конструкций датчиков, изготовленных на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия.

При разработке мультисенсорной микросистемы на подложках из кремния (рисунок 1) на одной стороне подложки сформированы: диэлектрическая мембрана $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ толщиной $(2,0 \pm 0,1)$ мкм, устойчивая к воздействию высоких температур, нагреватели и информационные электроды из платины толщиной $(0,5 \pm 0,1)$ мкм. Данный тип мембран позволяет снизить потребляемую мощность полупроводниковых датчиков до 60 мВт в режиме постоянного нагрева.



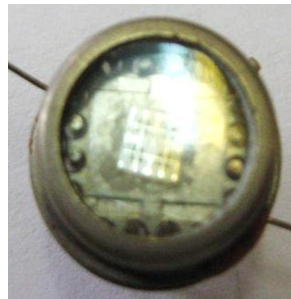
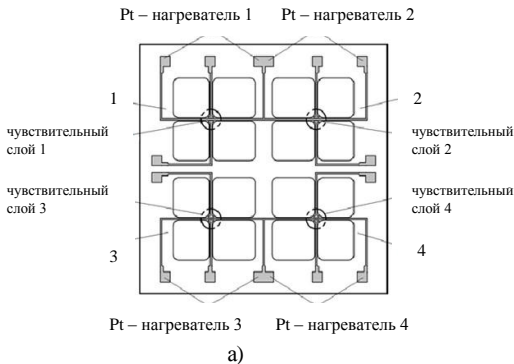
а) кристалл микросистемы (1 – нагреватели, 2 – информационные электроды);
б) фотография кристалла микросистемы в стандартном 16-ти выводном корпусе
Рисунок 1. – Мультисенсорная микросистема на подложке из кремния

Установлено, что такие мультисенсорные микросистемы предназначены для определения предельно допустимых концентраций газов, которые

вступают в обратимые реакции с полупроводниковыми активными слоями при повышенных температурах.

Известна мультисенсорная микросистема для определения наличия газов в окружающей среде, изготовленная на керамических подложках с диэлектрической мембраной. Нагревательные элементы и информационные электроды расположены на разных сторонах мембраны, подложка выполнена с возможностью соединения гибкой связью с корпусом, снабженным газопроницаемым колпаком. Недостатком данного датчика является сложность его изготовления. Чувствительный элемент на тонкой диэлектрической мембране должен быть небольшого размера, в то время как сама мембрана должна иметь большую площадь.

Нами разработаны два вида мультисенсорных микросистем на основе подложек из пористого оксида алюминия, толщиной 50–60 мкм (фирма *Sincera*, США): из четырех и двух сенсоров. Четырехсенсорная микросистема имеет размер $3,7 \times 3,7$ мм² (рисунок 2). Мультисенсорная микросистема включает в себя корпус, в котором размещена подложка с диэлектрической мембраной, выполненной с перфорацией в области расположения нагревателей. На поверхности мембраны размещены четыре нагревателя, четыре пары электродов, четыре чувствительных слоя, расположенные между нагревательными элементами и электродами. Подложка выполнена с возможностью соединения гибкой связью с корпусом, снабженным газопроницаемым колпаком, а чувствительные слои выполнены из оксида галлия, оксида индия, оксида олова, оксида алюминия. Оригинальность конструктивного исполнения подтверждена патентами на изобретение и полезные модели.



а) топология микросистемы: 1 – сенсор №1; 2 – сенсор №2;
3 – сенсор №3; 4 – сенсор №4;

б) фотография макета микросистемы в стандартном 16-ти выводном корпусе
Рисунок 2. – Мультисенсорная микросистема на основе пористого оксида алюминия

По результатам построения конечно-элементной модели установлено, что форма нагревателя (типы – «меандр», «полоска») не оказывает существенного влияния на изменение потребляемой электрической мощности микросистемы в целом ($\Delta P \sim 1,1$ мкВт), относительные термомеханические деформации, возникающие в конструкции микросистемы, составляют $(5,9-6,0) \cdot 10^{-3}$.

В двухсенсорных микросистемах информационные электроды и нагреватели расположены с разных сторон диэлектрической подложки, размером $1,25 \times 1,25$ мкм². Нами установлено, что применение в топологии датчика на диэлектрических подложках сквозных щелей, приводит к снижению потребляемой мощности за счет уменьшения объема контактирующего с нагревателем материала подложки. Использование в конструкции мультисенсорных микросистем подложек из пористого оксида алюминия позволяет создавать развитые поверхности большой площади для формирования газочувствительных слоев, что способствует повышению ее сенсорных свойств.

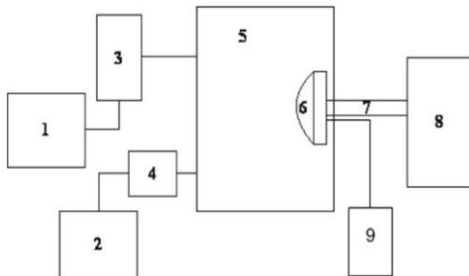
Установлена зависимость потребляемой мощности мультисенсорной микросистемы от пористости диэлектрических мембран и подложек. Результаты изучения температурных полей датчика показали, что максимум температуры нагрева локализован в области расположения газочувствительного слоя.

Третья глава посвящена технологическим решениям, применяемым при изготовлении мультисенсорных микросистем на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия. Разработан метод формирования газочувствительных слоев путем послойного нанесения раствора мелкодисперсных полупроводниковых материалов с платиновым катализатором на поверхности нагревателей из платины.

Процесс изготовления мультисенсорной микросистемы на основе кремния состоит из трех основных этапов: формирование мембраны $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$, нагревателей и информационных электродов на ее поверхности, нанесение и термообработка полупроводниковых газочувствительных слоев. Химическое травление кремния позволяет создавать мембраны толщиной $2,0 \pm 0,1$ мкм, тем самым снижая потребляемую мощность микросистем на кремниевых подложках. Основные технологические этапы изготовления мультисенсорных микросистем на подложках из пористого оксида алюминия включают: формирование нагревателей и информационных электродов, сквозных щелей и газочувствительных слоев на поверхности информационных электродов. Разработан новый метод послойного нанесения растворов мелкодисперсных материалов $\text{SnO}_2 - \text{Pt} - \text{Pd}$, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Ga}_2\text{O}_3$, $\text{SnO}_2 - \text{In}_2\text{O}_3$, который позволяет формировать на поверхности информационных электродов активные слои, способные вы-

держивать высокотемпературные отжиги без нарушения их газочувствительных свойств. Нанесение на сформированные активные слои катализатора Pt-чернь предназначено для повышения сенсорного отклика при воздействии газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 , что обусловлено обратимыми изменениями концентрации носителей заряда в приповерхностном слое при температурах нагрева 150–450 °С. Методами планарной технологии и технологии электрохимического окисления алюминия изготовлены макеты мультисенсорных микросистем на подложках из кремния и пористого оксида алюминия для контроля предельно допустимых концентраций горючих и токсичных газов в окружающей среде. При изготовлении датчика была использована технология обработки пористого оксида алюминия. Установлено, что процесс изготовления мультисенсорных микросистем на диэлектрических подложках состоит из меньшего числа этапов и является более простым по отношению к микросистемам на подложках из кремния.

В **четвертой главе** представлены результаты измерения вольтамперных характеристик, исследования теплофизических свойств, сенсорных откликов мультисенсорных микросистем на подложках из кремния и пористого оксида алюминия. В результате исследований сенсорного отклика в режимах постоянного и импульсного нагрева была проведена оптимизация режимов работы датчиков, разработаны методики контроля наличия горючих и токсичных газов на основе конструкций мультисенсорных микросистем на подложках из пористого оксида алюминия. Измерения характеристик мультисенсорных микросистем проводились на специализированном стенде, состоящем из системы подачи газов с различной концентрацией, источников питания сенсоров датчика, универсальных мультиметров для контроля электросопротивления, подключенных к персональному компьютеру. Структурная схема стенда представлена на рисунке 3.



- 1 – баллон с одним из газов CO , H_2 , CO_2 или C_3H_8 ; 2 – баллон с искусственным воздухом; 3, 4 – ротаметр; 5 – рабочий объем с исследуемым газом; 6 – мультисенсорная микросистема; 7 – интерфейсный кабель *RS 485 – RS 232*; 8 – персональный компьютер; 9 – источник питания

Рисунок 3. – Структурная схема газового стенда для измерения характеристик мультисенсорных микросистем

Для управления мультиметром через персональный компьютер было разработано приложение в программе *AgilentVEEPro* для представления результатов в графическом и табличном виде. Величина сенсорного отклика (ΔR) определялась, как разность между электросопротивлением сенсора при воздействии активного газа (R_{gas}) и электросопротивлением сенсора без наличия газа в окружающей среде (R_{air}):

$$\Delta R = R_{gas} - R_{air} \cdot \quad (1)$$

Чувствительность (S) сенсорных элементов мультисенсорной микросистемы рассчитывали по формуле:

$$S = \left(\left| R_{air} - R_{gas} \right| / R_{air} \right) \cdot 100 \% \cdot \quad (2)$$

Результаты измерений чувствительности мультисенсорной микросистемы к C_3H_8 , NO_2 и CO в различных режимах приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Чувствительность мультисенсорной микросистемы к C_3H_8 , NO_2 , CO

Потребляемая мощность, мВт	Концентрация детектируемого газа, ppm	Чувствительность, %
48	$C(C_3H_8) = 100,0$	55
	$C(NO_2) = 4,0$	82
60	$C(C_3H_8) = 100,0$	73
	$C(NO_2) = 4,0$	72
85	$C(CO) = 11,8$	12
	$C(CO) = 2,8$	15
15	$C(CO) = 11,8$	90
	$C(CO) = 2,8$	40

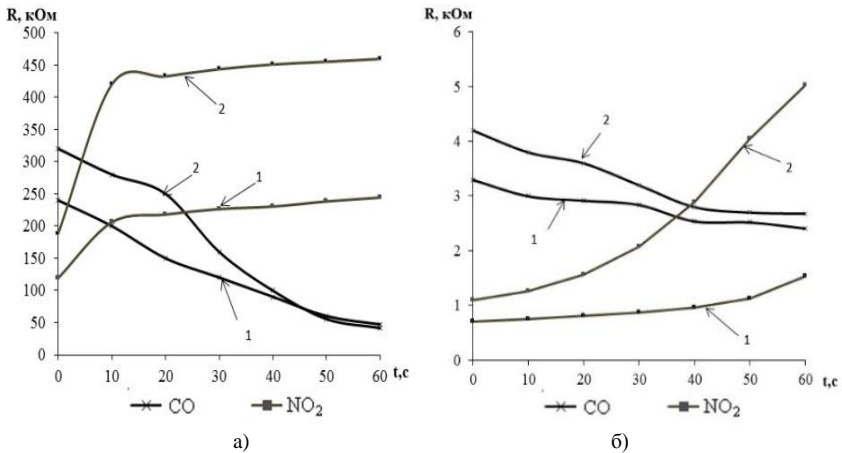
Установлено, что время насыщения сенсорных элементов микросистемы на подложках из кремния при определении CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 наступает не менее, чем через 140 с, а время восстановления сигнала составляет от 5 мин и более, в зависимости от потребляемой мощности.

Для мультисенсорных микросистем на подложках из пористого оксида алюминия время насыщения составляет 30–60 с, а возврат характеристик после отключения подачи газа не превышает 4,5 мин при мощности нагрева 10–15 мВт, 1–3 мин – при мощности 20–40 мВт. Таким образом, варьируя составом чувствительных слоев можно управлять избирательностью мультисенсорной микросистемы к различным газам.

С использованием конечно-элементной модели мультисенсорной микросистемы установлена зависимость пористости мембран и подложек из пори-

стого оксида алюминия от мощности нагрева. Оптимальное значение пористости подложек и мембран из оксида алюминия должна составлять ~30 %.

Изучение выходных характеристик двухсенсорных микросистем на подложках из пористого оксида алюминия проводилось в режиме импульсного и постоянного нагревов (рисунок 4). При малых мощностях потребления сенсорных элементов микросистемы наблюдается дрейф электросопротивления в режиме постоянного нагрева.



1 – режим постоянного нагрева; 2 – режим импульсного нагрева
 Рисунок 4. – Зависимость электросопротивления мультисенсорной микросистемы при воздействии CO с концентрацией 0,02 % и NO_2 – 0,00004 %: сенсор с чувствительным слоем $SnO_2-Pd+Pt$ -чернь (а), сенсор с чувствительным слоем $In_2O_3-Al_2O_3+Pt$ -чернь (б)

Установлено, что чувствительность к воздействию CO и NO_2 увеличивается в 1,5 и 3,0 раза соответственно в режиме импульсного нагрева при средней потребляемой мощности 25 мВт по отношению к режиму постоянного нагрева.

В пятой главе описана методика повышения эффективности контроля концентраций газов CO , C_3H_8 , H_2 , CO_2 ниже предельно допустимого уровня, выделяющихся на этапе тления горючих материалов, с помощью мультисенсорной микросистемы на подложках из пористого оксида алюминия. Перечень газов определен на основании анализа данных о чувствительных элементах газовых пожарных извещателей.

Результаты измерений показали, что время реакции датчика, состоящего из четырех сенсоров, не превышает 90 с (таблица 2). На основании результатов сенсорного отклика мультисенсорной микросистемы, получен-

ных в режиме импульсного нагрева, предложена и экспериментально реализована оригинальная модель алгоритма измерения сигнала датчика, учитывающая возможность аппроксимации сигнала степенными функциями в соответствии с требованиями по концентрации горючих и токсичных газов, предъявляемых к пожарным извещателям.

Таблица 2. – Результаты измерений мультисенсорной микросистемы

Параметры	№ Сенсора	Газы			
		H ₂	CO	CO ₂	C ₃ H ₈
		концентрации, об. %			
		0,001	0,02	1,00	0,01
Время реакции, $\tau_{ср}$, с	1	14	20	35	25
	2	14	29	32	24
	3	15	20	34	28
	4	14	22	35	25
Чувствительность сенсора (№ - номер сенсора) через 90 с измерения, S^{90} при воздействии газа, об. %	1	60	230	36	75
	2	52	180	32	78
	3	48	240	34	68
	4	64	160	36	72

Методика измерения заключается в поочередном разогреве и опросе каждого сенсора микросистемы, последовательном выводе значений электросопротивления с помощью интерфейсной базы персонального компьютера. Измерение сигнала проводится в течение 90 с при максимальной потребляемой мощности микросистемы до 150 мВт. Установлено, что при подборе газочувствительных слоев с частичной избирательностью к определенным горючим и токсичным газам, разработанная мультисенсорная микросистема способна определять вид детектируемого газа. Данную особенность рекомендуется учитывать при проектировании газовых пожарных извещателей в системах раннего обнаружения возгораний.

Мультисенсорная микросистема также позволяет проводить измерения четырьмя или двумя сенсорами одновременно для определения газов CO, C₃H₈, H₂, CO₂. Эта особенность датчика позволяет распознавать многокомпонентные среды различного газового состава в зависимости от выбранных газочувствительных слоев.

Разработанные мультисенсорные микросистемы были использованы в составе датчиков при разработке типовой архитектуры противопожарной безопасности в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» и НИИ ПБиЧС Беларуси. Результаты диссертационного исследования использованы в опытно-конструкторской и научно-исследовательской работах программ ГПНИ «Электроника и фотоника» и Союзного государства «Микросистемотехника».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны конструктивные и технологические решения для изготовления мультисенсорных микросистем на подложках из кремния, состоящих из четырех сенсоров, и пористого оксида алюминия, включающие два и четыре сенсора. Оригинальность конструктивного исполнения подтверждена патентами на изобретение и полезные модели [1, 23–25].

На основе разработанной конечно-элементной модели мультисенсорной микросистемы на подложках из пористого оксида алюминия установлено, что термомеханические деформации, возникающие в конструкции датчика, не оказывают влияния на его работоспособность; использование топологии нагревателей типа меандр позволяет повысить температуру чувствительного слоя с 400 °С до 440 °С при электрическом напряжении питания ($2,0 \pm 0,1$) В и потребляемой мощности не более 90 мВт [2–4, 14, 15, 18].

2. Разработан новый тип диэлектрической мембраны $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ толщиной не более ($2,0 \pm 0,1$) мкм на поверхности кремниевой подложки. Установлено, что использование данной мембраны позволяет снизить энергопотребление полупроводниковых датчиков до 60 мВт в режиме постоянного нагрева, устойчивой к воздействию высоких температур, и обеспечивает долговременную адгезию платиновых нагревателей на поверхности кремниевой подложки [2, 11, 16].

Исследовано влияние высоких температур на адгезию слоя платины к пористому оксиду алюминия. Установлено, что использование диэлектрических подложек из оксида алюминия пористостью 15–35 % и наличие в них сквозной перфорации вокруг нагревательных элементов позволяют снизить потребляемую мощность мультисенсорных микросистем до ($25,0 \pm 0,5$) мВт в режиме импульсного нагрева [12, 17–20].

3. Получены новые активные слои $\text{SnO}_2 - \text{Pt} - \text{Pd} + \text{Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ -чернь, $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ -чернь, $\text{SnO}_2 - \text{In}_2\text{O}_3 + \text{Pt}$ -чернь, обеспечивающие высокий сенсорный отклик при воздействии газов CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 . Разработан метод формирования активных слоев на поверхности сенсорных элементов микросистемы послойным нанесением раствора с толщиной каждого слоя порядка 100 нм [1, 5–11, 22–25].

4. Предложена методика определения наличия различных по составу газов CO , C_3H_8 , H_2 , NO_2 четырьмя сенсорами микросистемы одновременно за счет диссоциативной адсорбции и десорбции на поверхности газочувствительного слоя каждого из сенсоров в диапазоне температур нагрева от 150 °С до 450 °С [1, 4, 15].

5. Установлено, что в режиме импульсного нагрева чувствительность активных слоев сенсорных элементов увеличивается в 1,5–3,0 раза по от-

ношению к аналогичным характеристикам в режиме постоянного нагрева [4, 13, 15–17].

Разработана методика измерения электросопротивления мультисенсорной микросистемы, обеспечивающая повышенную чувствительность к детектируемому газу в 1,5–2,0 раза. Измерение выходных характеристик проводится в течение не более 90 с при максимальной потребляемой мощности микросистемы до 150 мВт. Установлено, что данная методика контроля наличия газов, выделяющихся на ранней стадии возгорания, позволяет применять мультисенсорную микросистему в составе газовых пожарных извещателей [4, 8, 19–23].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные мультисенсорные микросистемы позволяют эффективно проводить определение предельно допустимых концентраций газов CO , H_2 , C_3H_8 , NO_2 в окружающей среде.

Результаты данной работы могут быть использованы также при проектировании систем противопожарной безопасности для обеспечения защиты при возгораниях в жилищно-коммунальном хозяйстве и на производстве, мониторинга концентраций горючих газов в автомобилях, газоаналитическом оборудовании для измерения концентрации и определения состава газов в окружающей среде.

Результаты, полученные в диссертации, были использованы при разработке типовой архитектуры противопожарной безопасности в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» и НИИ ПБиЧС Беларуси, а также использованы в опытно-конструкторской и научно-исследовательской работах, в учебном процессе, что отражено в актах о практическом использовании результатов исследования.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи в рецензируемых научных изданиях**

1. Реутская, О.Г. Четырех сенсорная газовая микросистема на подложке из пористого анодного оксида алюминия: конструкция, технология, моделирование / О.Г. Реутская, Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборы и методы измерений, – 2013 г. – Т. 7, № 2. – С. 47–51.

2. Белогуров, Е.А. Маломощный газовый сенсор на наноструктурированной диэлектрической мембране / Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько, О.Г. Реутская, А.И. Захлебаева // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 6. – С. 34–42.

3. Гайдук, Ю.С. Газовые датчики на основе композиции оксида вольфрама и многостенных углеродных нанотрубок / Ю.С. Гайдук, О.Г. Реутская, А.А. Савицкий, И.А. Таратын // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 41–49.

4. Реутская, О.Г. Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO, H₂, C₃H₈, CO₂ / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, Ю.М. Плескачевский // Приборы и методы измерений. - 2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.

5. Реутская, О.Г. Измерения концентрации газов CO и NO₂ мультисенсорной микросистемой в режиме импульсного нагрева / О.Г. Реутская, Ю.М. Плескачевский // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 160–167.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Реутская, О.Г. Полупроводниковые сенсоры с низким энергопотреблением для контроля H₂ / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, А.П. Гринчук // Приборостроение–2012: Материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 21-23 ноября 2012 г. – Минск, 2012. – С. 54-55.

7. Гринчук, А.П. Датчики пожарных извещателей для раннего обнаружения возгораний / А.П. Гринчук, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина, О.Г. Реутская // Приборостроение–2012: Материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 21–23 ноября 2012 г. – Минск, 2012. – С. 355–357.

8. Реутская, О.Г. Полупроводниковые газовые сенсоры с низким энергопотреблением для контроля H₂ и CO на подложке из наноструктурированного γ -Al₂O₃ / О.Г. Реутская // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. – 2013. / Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; ред. кол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 293–298.

9. Реутская О.Г. Разработка 4-х сенсорной газовой микросистемы на подложках из пористого анодного оксида алюминия / О.Г. Реутская, Е.А. Белогуров И.А. Таратын, В.В. Хатько // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение–2013”, Минск, Республика Беларусь, 20–22 ноября 2013 г. – С. 267–269.

10. Реутская, О.Г. Разработка 2-х сенсорной газовой микросистемы на подложках из пористого анодного оксида алюминия / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборостроение-2014: Материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19–21 ноября 2014 г. – Минск, 2014. – С. 362–364.

11. Хатько, В.В. Пути снижения потребляемой мощности тонкопленочных химических сенсоров / В.В. Хатько, А.И. Захлебаева, О.Г. Реутская, Г.Г. Горох, И.А. Таратын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: КрыМиКо`2015: Материалы 25-й Международной Крымской конференции, Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.: в 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 2. – С. 645–648.

12. Гайдук, Ю.С. Датчики диоксида азота на основе композиции $WO_3-In_2O_3$ / Ю.С. Гайдук, О.Г. Реутская, А.А. Савицкий, И.А. Таратын // «Приборостроение-2016», Материалы 9 Междунар. конф. Минск, 23–25 ноября 2016 г. / Белорусский национальный технический университет. – Мн., 2016. – С. 294–295.

13. Плескачевский, Ю.М. Нанопористый анодный оксид алюминия в конструкции газовых сенсоров / Ю.М. Плескачевский, О.Г. Реутская, Г.Г. Горох, А.И. Захлебаева, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина. НАНО – 2016. Материалы V Международной научной конференции, Минск, 22-25 ноября 2016 г. – С. 67–69.

14. Плескачевский, Ю.М. Нанопористый анодный оксид алюминия в конструкции газовых сенсоров. / Ю.М. Плескачевский, О.Г. Реутская, Г.Г. Горох, А.И. Захлебаева, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Сб. ст. «Наноструктурные материалы: технологии, свойства, применение», Минск, – 2017. С. 270–279.

15. Реутская, О.Г. Влияние процесса импульсного нагрева на газовую чувствительность полупроводниковых двухсенсорных микросистем // Приборостроение-2017, Матер. 10 Междунар. конф. Минск, 1–3 ноября 2017 г. / Белорусский национальный технический университет. – Мн., 2017. – С. 275–277.

Тезисы докладов научных конференций

16. Реутская, О.Г. Полупроводниковые газовые сенсоры с нагревателем на основе кремния / О.Г. Реутская, И.А. Таратын // Новые направления развития приборостроения: Сборник материалов 5-й международной студенческой научно-технической конференции, Минск, – Минск, 2012. – С. 178.

17. Реутская, О.Г. Мультисенсорные системы для контроля газовых сред / О.Г. Реутская // Новые направления развития приборостроения–2013: Материалы 6-ой международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 24-26 апреля 2013 г. – Минск, 2013. – С. 155.

18. Реутская, О.Г. Матричный сенсор для пожарных извещателей / О.Г. Реутская // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, – Минск, 2014. – Т.3. – С. 410.

19. Реутская, О. Г. Матричный сенсор для детектирования горючих газов / О.Г. Реутская // Материалы Тринадцатой международной научно-технической конференции «Наука - образованию, производству, экономике», Минск: БНТУ, – 2015, в 4-х томах. Т.3. – С. 414.

20. Реутская, О.Г. Сравнительный анализ одиночного химического сенсора и газовой микросистемы для определения состава окружающей среды / О.Г. Реутская, А.В. Клещова // Новые направления развития приборостроения–2016: Материалы 9-ой международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 20–22 апреля 2016 г. – Минск, – 2016. – Т.2. – С.68–69.

21. Реутская, О.Г. Мультисенсорная газовая микросистема для определения концентрации горючих газов в окружающей среде / О.Г. Реутская // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». – Минск. – 2016. – Т.3. – С. 410.

22. Янкина, Я.В. Методы обработки данных электрических параметров полупроводниковых сенсоров / Я.В. Янкина, А.С. Роговцова, О.Г. Реутская // Новые направления развития приборостроения–2017: Материалы 10-ой международной студенческой научно-технической конференции, Минск. – 2017. – Т. 2. – С.429.

Патенты

23. Мультисенсор для определения концентрации метана, водорода и монооксида углерода: патент № 9965 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 08B 17/10/ О.Г. Реутская, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина; заявитель ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» – № u20130534; заявл. 2013.06.20; опубл. 2014.02.28 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 209.

24. Микросенсорная газовая система для определения концентрации газов в окружающей среде: патент № 20011 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01N 27/00 / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина; заявитель ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» – №a20130836; заявл. 2013.07.08; опубл. 2016.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 109.

25. Сенсор матричный для определения концентрации газов в окружающей среде: патент № 11334 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 08B 17/10 / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина; заявитель ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» – №u20160287; заявл. 2016.09.09; опубл. 2017.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 2. – С. 152.

РЭЗІЮМЭ

Рэуцкая Вольга Генадзьеўна

Мульцісэнсарная мікрасістэма павышанай эфектыўнасці кантролю газавага асяроддзя на аснове падкладак з крэмнію і порыстага аксіду алюмінія

Ключавыя словы: мульцісэнсарная мікрасістэма, вымярэнне сэнсарнага водгуку, кантроль складу газавага асяроддзя, падкладкі з крэмнію і порыстага аксіду алюмінія.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка мульцісэнсарнай мікрасістэмы на аснове падкладак з крэмнію і порыстага аксіду алюмінія, метадаў вызначэння гаручых і таксічных газаў у навакольным асяроддзі пры павышанай эфектыўнасці іх кантролю.

Метады даследавання і апаратура: у ходзе працы праводзіліся эксперыментальныя даследаванні з выкарыстаннем оптаэлектронных прыбораў з зарадавай сувяззю, сканавальнай электроннай мікраскапіі, камбінаваных шматфункцыянальных мульціметраў, газааналітычнага стэнда.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны і выраблены мульцісэнсарныя мікрасістэмы на аснове падкладак з крэмнію і порыстага аксіду алюмінія. Атрыманы актыўныя слаі, якія забяспечваюць высокі сэнсарны водгук пры ўздзеянні гаручых і таксічных газаў. Распрацаваны метады фарміравання газаадчувальных слаёў на паверхні сэнсарных элементаў мікрасістэмы. Распрацаваны новы тып дыэлектрычнай мембраны $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ таўшчынёй не больш за 2 мкм на аснове падкладак з крэмнію, выкарыстанне якой дазваляе знізіць энергаспажыванне паўправадніковых датчыкаў да 60 мВт. Прапанавана метадыка кантролю газавага асяроддзя адначасова чатырма сэнсарамі пры пастаянным і імпульсным рэжымах работы. Распрацавана метадыка вызначэння наяўнасці газаў CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 мульцісэнсарнай мікрасістэмай за 90 с з энергаспажываннем да 150 мВт.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: мульцісэнсарная мікрасістэма павышанай эфектыўнасці кантролю газавага асяроддзя можа прымяняцца ў сістэмах маніторынгу канцэнтрацый гаручых газаў у жыллёва-камунальнай гаспадарцы і на вытворчасці, у газааналітычным абсталяванні.

Вобласць прымянення: аналіз і дыягностыка шматкампанентнага газавага асяроддзя, паўправадніковая тэхніка і мікраэлектроніка, газааналітычнае абсталяванне, датчыкі кантролю рабочага асяроддзя прамысловых памяшканняў, жыллёва-камунальная гаспадарка, супрацьпажарная бяспека.

РЕЗЮМЕ

Реутская Ольга Геннадьевна

Мультисенсорная микросистема повышенной эффективности контроля газовой среды на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия

Ключевые слова: мультисенсорная микросистема, измерение сенсорного отклика, контроль состава газовой среды, подложки из кремния и пористого оксида алюминия.

Цель работы является разработка мультисенсорной микросистемы на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия, методов определения горючих и токсичных газов в окружающей среде при повышенной эффективности их контроля.

Методы исследования и аппаратура: в ходе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования с использованием оптоэлектронных приборов с зарядовой связью, сканирующей электронной микроскопии, комбинированных многофункциональных мультиметров, газоаналитического оборудования.

Полученные результаты и их новизна: разработаны и изготовлены мультисенсорные микросистемы на основе подложек из кремния и пористого оксида алюминия повышенной эффективности контроля газовой среды. Получены активные слои, обеспечивающие высокий сенсорный отклик при воздействии горючих и токсичных газов. Разработан метод формирования газочувствительных слоев на поверхности сенсорных элементов микросистемы. Разработан новый тип диэлектрической мембраны $\text{SiO}_2\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--Al}_2\text{O}_3$ толщиной не более 2 мкм на основе подложек из кремния, использование которой позволяет снизить энергопотребления полупроводниковых датчиков до 60 мВт. Предложена методика контроля газовой среды одновременно четырьмя сенсорами при постоянном и импульсном режимах работы. Разработана методика определения наличия газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 мультисенсорной микросистемой в течении 90 с с потребляемой мощностью до 150 мВт.

Рекомендации по использованию: мультисенсорная микросистема повышенной эффективности контроля газовой среды может применяться в системах мониторинга концентраций горючих газов в жилищно-коммунальном хозяйстве и на производстве, в газоаналитическом оборудовании.

Область применения: анализ и диагностика многокомпонентных газовых сред, полупроводниковая техника и микроэлектроника, газоаналитическое оборудование, датчики контроля рабочей среды промышленных помещений, жилищно-коммунальное хозяйство, противопожарная безопасность.

SUMMARY

Olga G. Reutskaya

Multisensor microsystem increased effectiveness of the gas environment control based on silicon and porous aluminum oxide substrates

Key words: multisensor microsystem, the measurement of the sensor response, control of the composition of the gas environment, silicon and porous aluminum oxide substrates.

Goal of the work: development of multisensor microsystem based on silicon and porous alumina substrates, methods for determining flammable and toxic gases in the environment with increased efficiency of their control.

Research methods and equipment: during the work theoretical and experimental research were carried out using optoelectronic devices with charging connection, scanning electron microscopy, combined multi-functional multimeters, gas-analysis equipment.

The received results and their novelty: developed and produced multisensor microsystems based on the silicon and porous aluminum oxide substrates for increased gas environment control. The active layers providing a high sensitive response under the influence of flammable and toxic gases was obtained. Developed a method of forming gas-sensitive layers on the surface of the sensitive elements of the microsystems. A new type of dielectric membrane $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ with thickness no more than 2 μm on the silicone substrate was develop. This allows to reduce power consumption of semiconductor sensors up to 60 mW. Suggested a new method of gas environments control with four sensors simultaneously at the constant and pulse work mode. The developed method of determining the presence of gases CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 multisensor measuring transducer for 90 s with a power consumption up to 150 mW.

Recommendations for use: the multisensor microsystem of high effectivity of gas environment control can be use in systems of monitoring of combustible gases concentrations in housing and communal services and in production, in gas analysis equipment.

The field of application: analysis and diagnostics of multicomponent gas environments, semiconductor equipment and microelectronics, gas analysis equipment, control sensors of working environment in the industrial rooms, housing and communal service, firefighting safety.

Научное издание

РЕУТСКАЯ
Ольга Геннадьевна

**МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ МИКРОСИСТЕМА ПОВЫШЕННОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ
ПОДЛОЖЕК ИЗ КРЕМНИЯ И ПОРИСТОГО
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения

Подписано в печать 01.11.2018. Формат 60×84¹/₁₆ Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 75. Заказ 936.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный
технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014, пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.