

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.2:546.28

**ВЫСОЦКИЙ**  
Виктор Борисович

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ  
РАСХОДА ГАЗА С ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫМИ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Минск 2009

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и научно-производственном объединении «Интеграл»

Научный руководитель

Сокол Виталий Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий НИЛ 4.2 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Гурский Леонид Ильич, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Залесский Валерий Борисович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей государственного научного учреждения «Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси»

Опонирующая организация: ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 24 сентября в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovnet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «10» августа 2009 г.

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство датчиков расхода газов и жидкостей составляет порядка 19 % общего объема производства датчиков, относящихся к классу микроэлектромеханических систем (МЭМС). Увеличение потребностей в датчиках расхода газа класса МЭМС обусловлено возникновением новых технологических процессов в области медицины, микрохимии и микробиологии, где требуются точные измерения небольших расходов газа. Стандартные процессы микроэлектроники не позволяют получить необходимые механические свойства полупроводниковых и диэлектрических пленок, составляющих мембраны и балки датчиков. Для производства датчиков класса МЭМС, имеющих трехмерную структуру, необходимо решить проблему получения тонких мембран с высокими механическими свойствами, что является новой задачей для технологии микроэлектроники.

Диссертационная работа посвящена разработке конструктивно-технологических методов создания микроэлектромеханического датчика расхода газа. Актуальность представленных в диссертационной работе исследований обусловлена тем, что последнее десятилетие характеризуется появлением и развитием изделий нового класса МЭМС, в которых использование технологии формирования объемных структур обеспечивает получение изделий микросистемной техники с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками (весогабаритными, энергетическими и др.). Другой проблемой является разработка тонкопленочных терморезистивных чувствительных элементов, предназначенных для работы в широком диапазоне температур.

Исследование данных проблем позволит решить задачу разработки в республике Беларусь широкого спектра мембранных датчиков класса МЭМС, конкурентоспособных на отечественном и зарубежном рынках.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол №7 от 28.02.2002 г.) и соответствует подразделам 7.5 «Материалы с новыми свойствами, обеспечивающие создание опто-, микро- и наноэлектронных устройств, схемотехнические решения для построения таких устройств» и 7.6 «Оптические, электронные приборы и оборудование, включая лазерно-оптические оборудование и технологии; аналитическое оборудование и приборы контроля качества и сертификации; опто-, микро- и наноэлектронные системы и устройства» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных

научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 г. № 512.

Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники и НПО «Интеграл» в рамках заданий Республиканских научно-технических программ, а также международных проектов:

1. Международная программа «Supply of Silicon Detectors for the ALISE Tracker» (2000 г., № MS-2957/EP/ALICE).

2. ГНТП «Наноматериалы и нанотехнологии», НИР – «Разработка оптических межсоединений, включающих светоизлучающие, фотоприемные, волноводные структуры на основе наноструктурированного кремния и  $Al_2O_3$ , и интеграция их с электронными межсоединениями ИС» (2005 – 2008 гг., № ГР 20061887).

3. ГНТП «Электроника 1.14», НИР – «Исследовать закономерности формирования диэлектрических слоев окисленного пористого кремния и анодного оксида алюминия и разработать технологию создания межкомпонентной и внутриуровневой изоляции полупроводниковых приборов и интегральных схем на основе этих материалов» (2005 – 2008 гг., № ГР 20061885).

4. ГНТП «Электроника», НИР – «Разработка и исследование физико-технологических методов создания микромеханических, микроэлектромеханических и микросенсорных систем на основе тонкопленочной технологии и процессов формирования и модифицирования аллюмооксидных микроструктур» (2006 – 2010 гг., № ГР 2006698).

## **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является формирование мембранных датчиков расхода газа с терморезистивными чувствительными элементами. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследовать режимы формирования и характеристики тонкопленочных терморезистивных чувствительных элементов на основе никеля (Ni) и платины (Pt).

2. Исследовать технологический процесс и выбрать оптимальные режимы осаждения диэлектрических пленок нитрида кремния ( $Si_xN_y$ ) и диоксида кремния ( $SiO_2$ ) для использования в качестве элементов мембраны с заданными значениями остаточных напряжений.

3. Исследовать технологический процесс химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении для создания пленок поликристаллического кремния (ПКК) и выбрать режимы их получения с заданными значениями остаточных напряжений.

4. Разработать технологический процесс создания многослойной мембраны с введением наноструктурированного материала – оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ).

5. Разработать технологический маршрут изготовления датчика расхода газа.

В качестве объекта исследования выбрана многослойная мембрана с терморезистивными чувствительными элементами на основе пленок никеля и платины, наноструктурированные пленки, получаемые электрохимическим анодированием алюминия, пленки ПКК,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ , используемые в конструкции датчиков расхода газа. Предмет исследования – физико-химические свойства получаемых пленок и закономерности изменения этих свойств в зависимости от условий создания, последующих технологических операций обработок и эксплуатации датчиков.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Конструкция многослойной мембраны датчика расхода газа в интегральном исполнении, включающая нитрид кремния, поликристаллический кремний, диоксид кремния, терморезистивные чувствительные элементы на основе пленок никеля или платины и наноструктурированный слой оксида алюминия, обладающий развитой внешней поверхностью, позволяет увеличить чувствительность датчика на 10 – 15 % по сравнению с планарной конструкцией мембраны и обеспечивает расширение рабочего диапазона измерений расхода газа от  $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

2. Процесс высоковакуумного (давление  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па) отжига пленок никеля при температуре  $773 \pm 3 \text{ К}$  в течение  $20 \pm 2$  мин в сравнении с отжигом в среде водорода позволяет повысить значения температурного коэффициента сопротивления металлизированных пленок на 15 – 20 % за счет предотвращения химических реакций между поверхностью металла и газовым окружением, что в конечном счете обеспечивает значение температурного коэффициента сопротивления таких пленок  $0,0042 - 0,0046 \text{ 1/К}$ .

3. Добавление  $2 \pm 0,2 \%$  кислорода к аргону при нанесении пленок платины методом магнетронного распыления при температуре кремниевой подложки  $570 - 590 \text{ К}$  позволяет увеличить значение температурного коэффициента сопротивления таких пленок на 25 %, т. е. до величины  $0,0025 - 0,0032 \text{ 1/К}$ , за счет удаления летучих соединений углерода.

4. Методика определения толщины диэлектрических мембран, основанная на положении интерференционных максимумов в спектре пропускания света видимой области, позволяющая рассчитывать толщину мембраны с точностью до  $\pm 4 \%$  и отличающаяся от известных методик тем, что процесс измерения совместим с технологическим процессом изготовления мембран на кремниевых подложках без их разрушения в процессе измерения.

## Личный вклад соискателя

В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных работах автором осуществлялись постановка задачи, обоснование направлений решения научных проблем, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены: процесс высоковакуумного ( $10^{-2} - 10^{-3}$  Па) высокотемпературного ( $773 \pm 3$  К) отжига пленки никеля для повышения температурного коэффициента сопротивления (ТКС); метод улучшения структуры пленки платины для получения терморезистивных чувствительных элементов с высокими значениями ТКС; технологический процесс осаждения нитрида кремния и поликристаллического кремния с заданными значениями остаточных напряжений; метод управления остаточными внутренними напряжениями в пленках поликристаллического кремния и нитрида кремния; конструктивно-технологические принципы построения мембранных структур.

Научный руководитель В. А. Сокол принимал участие в обсуждении задач и полученных результатов, оказывал консультативную помощь в процессе выполнения и оформления работы. Технология формирования наноструктурированных алюмооксидных пленок для металлизации была разработана совместно с И. Л. Барановым, А. В. Демьяновичем, С. К. Лазаруком и В. В. Становским. Технология формирования пленок поликристаллического кремния и диэлектрических пленок с минимальными остаточными напряжениями была разработана совместно с Н. С. Ковальчук. Методика определения толщины мембран была разработана совместно с А. С. Лобко и Э. В. Лобко. Анализ образцов методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и атомно-силовой микроскопии проводился при участии О. В. Мильчанина, В. А. Ухова, А. Н. Петлицкого. Изготовление образцов датчика расхода газа осуществлялось при участии Н. С. Ковальчук, Л. Н. Белоус, Т. И. Ореховской.

## Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 7-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники», Россия, Дивноморское, 2000 г.; 4-я Международная научно-практическая конференция «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество», Беларусь, Минск, 2002 г.; Международная научно-техническая конференция «Новые технологии изготовления многокристалльных

модулей», Беларусь, Минск – Нарочь, 2002 г.; 5-я Международная научно-практическая конференция «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество», Беларусь, Минск, 2004 г.; Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров», Беларусь, Минск, 2007 г.; 12-я Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Беларусь, Минск, 2007 г.; 9-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2008 г.; 5-я Международная научно-практическая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы», Беларусь, Новополоцк, 2008 г.; 13-я Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Беларусь, Минск, 2008 г.; 10-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные и электронные технологии», Украина, Одесса, 2009 г.

### **Опубликованность результатов**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 22 научные работы, в том числе 4 статьи в рецензируемых научно-технических журналах, 9 статей в материалах конференций, 9 тезисов докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 4,6 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения.

Логика построения работы заключается в последовательно представленных анализе проблемы формирования мембранных датчиков (глава 1), описании методов формирования тонкопленочных терморезистивных чувствительных элементов в составе мембранных датчиков расхода газа, методик исследования и контроля их свойств (глава 2), результатов исследований технологических процессов получения тонкопленочной мембраны и формирования наноструктурированных материалов и их электрофизических свойств (главы 3, 4), а также разработок конструкции и технологического маршрута изготовления датчика расхода газа (глава 5).

Общий объем диссертационной работы составляет 119 страниц, из которых 78 страниц основного текста, 67 рисунков на 53 страницах, 6 таблиц на

6 страниц, библиография из 70 источников, включая 22 собственные публикации автора, приложения на 2 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении и в общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, показана связь работы с научными программами и темами, сформулированы цели и задачи исследований, представлены сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, об апробации результатов диссертации, их опубликованности, а также о структуре и объеме диссертации.

В первой главе проанализированы конструктивно-технологические особенности датчиков расхода газа. Рассмотрены физические принципы работы датчиков различных типов. Выполнена классификация по принципу работы, диапазону рабочих параметров и сферам применения датчиков. Проведен анализ материалов, используемых в конструкции датчиков, для изготовления мембраны и терморезистивных чувствительных элементов. Показано, что конструкция датчиков с асимметрией теплового поля по методам изготовления наиболее близка к технологии микроэлектроники. В качестве материала мембраны предлагаются пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ,  $\text{SiO}_2$  и ПКК, а в качестве терморезистивных чувствительных элементов – пленки на основе никеля и платины. Установлено, что необходима разработка технологических процессов получения диэлектрических пленок и пленок ПКК с минимальными остаточными напряжениями для получения стабильных и стойких к температурным изменениям мембран, а также терморезистивных чувствительных элементов на основе никеля с высоким значением ТКС и на основе платины для работы в агрессивной среде.

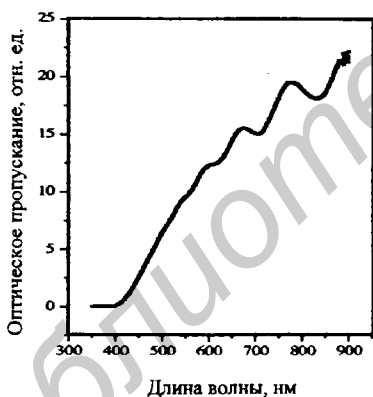
Во второй главе обоснован выбор методов формирования тонкопленочных терморезистивных чувствительных элементов: электронно-лучевого распыления для никеля и магнетронного распыления для платины. Определены методики контроля и исследования свойств тонкопленочных терморезистивных чувствительных элементов как элементов мембраны. Толщина пленок измерялась микроинтерферометрическим методом, поверхностное сопротивление – четырехзондовым методом, контроль ТКС проводился с помощью климатической камеры «Sabzero 81». Для получения адгезионного подслоя был выбран метод термического распыления алюминия с последующим электрохимическим анодированием. Для формирования тонкопленочных элементов мембраны на основе диэлектрических и полупроводниковых пленок выбран метод химического осаждения из газовой фазы (наносились слои ПКК,  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ,  $\text{SiO}_2$ ). Определены методики исследования структурно-морфологических свойств пленок.



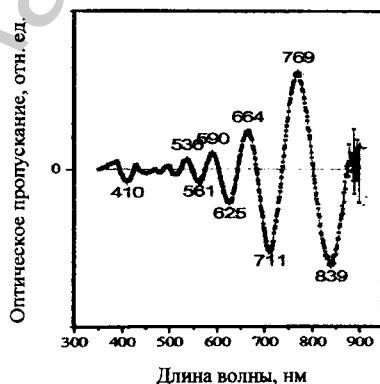
Для определения среднего размера зерна пленок ПКК выбран метод электронно-дифракционного анализа с помощью просвечивающего электронного микроскопа Н-800 (Hitachi, Япония). Для оценки толщины мембран была разработана методика, основанная на определении экстремумов интерференционных биений в спектре оптического пропускания. На спектре просматриваются интерференционные максимумы, точное положение которых может быть получено после вычитания базовой линии (рисунок 1). Комбинируя соотношение значений показателей преломления и длины волны соответствующей интерференционной полосы, получаем следующее выражение для определения толщины  $d$  мембраны:

$$d = \frac{\lambda_N \lambda_{N+1}}{2(n_{N+1} \lambda_N - n_N \lambda_{N+1})}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны в максимуме интерференционных биений, мкм;  
 $N$  – целое число, номер в соответствующих максимумах;  
 $n$  – коэффициент преломления.



а



б

а – спектры пропускания мембран; б – спектры после вычитания базовой линии

**Рисунок 1 – Оптическое пропускание мембраны и положение интерференционных максимумов**

Остаточные напряжения в пленках измерялись при помощи рентгеновской двукристалльной топографической установки, коэффициент преломления определялся эллипсометрическим методом. Выбраны методы формирования мем-

бран химическим травлением, а также получения подслоя пористого оксида алюминия путем электрохимического анодирования пленки алюминия.

В третьей главе проведен расчет пленочного резистора как терморезистивного чувствительного элемента многослойной мембраны, учитывающий эффект электродиффузии при работе с высокими температурами, приводящими к увеличению дрейфовой скорости ионов и уменьшению среднего времени разрушения пленки.

Определено соотношение, описывающее эти зависимости:

$$b \frac{d}{t_p} = K j^2 \exp(-\Delta H / kT), \quad (2)$$

где  $b$  – ширина пленки, м;

$d$  – толщина пленки, м;

$t_p$  – время разрушения пленки, с;

$K$  – постоянная, зависящая от удельного объемного сопротивления металла, среднего времени между столкновениями, коэффициента диффузии, сечения рассеяния электронов на ионах и т. д.;

$j$  – плотность тока,  $A/m^2$ ;

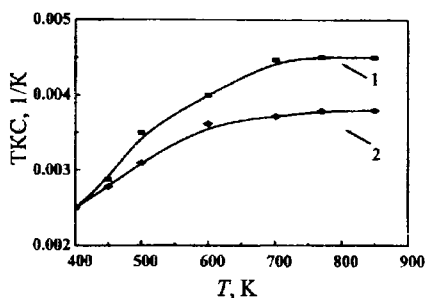
$\Delta H$  – энергия активации, эВ;

$k$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $V/m^2 K^4$ ;

$T$  – температура пленки, К.

Использование пленки никеля в качестве терморезистивного чувствительного элемента в составе многослойной мембраны обусловлено тем, что он обладает наиболее высоким ТКС, поэтому максимально чувствителен, а также стабилен при рабочей температуре  $420 \pm 10$  К. Экспериментально установлено, что для увеличения ТКС необходимо проводить высоковакуумный (при давлении  $10^{-3}$  Па) отжиг пленок никеля при температуре  $773 \pm 3$  К в течение  $20 \pm 2$  мин. Применение высоковакуумного отжига при изготовлении терморезистивных чувствительных элементов на основе никеля позволяет повысить значения ТКС на 15 – 20 % по сравнению с отжигом в среде водорода (рисунок 2). Такие режимы позволяют достичь значений ТКС 0,0042 – 0,0046 1/К. Толщина пленки никеля для терморезистивных чувствительных элементов выбрана в диапазоне 0,2 – 0,3 мкм, так как при меньшей толщине чувствительность пленки недостаточна из-за низких значений ТКС, а при толщине более 0,3 мкм значения остаточных напряжений высокие, что влияет на стабильность. Для датчиков, работающих в агрессивных средах, применяются пленки платины, полученные методом магнетронного распыления в атмосфере  $Ar + O_2$ . Исследование зависимости ТКС от толщины пленки показало значительное

уменьшение ТКС при толщинах менее 0,3 мкм (рисунок 3). При толщинах более 0,6 мкм ТКС меньше зависит от толщины пленки, однако происходит снижение адгезии за счет увеличения остаточных напряжений на границе диэлектрик – металл (Pt).



1 – вакуумный отжиг, 2 – водородный отжиг

Рисунок 2 – Зависимость ТКС пленки никеля от температуры отжига

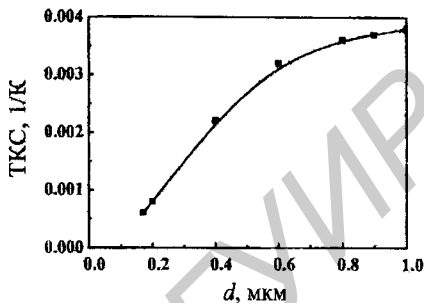


Рисунок 3 – Зависимость ТКС от толщины пленки платины

Исследования, проводимые с составом газовой смеси, показали, что оптимальным соотношением является состав 98 % Ag + 2 % O<sub>2</sub> (рисунок 4). Механизм воздействия добавки O<sub>2</sub> заключается в удалении органических примесей в процессе напыления и получении более чистых пленок. Процент добавки менее 2 % O<sub>2</sub> недостаточен для полного удаления органических примесей. Более высокий процент добавки O<sub>2</sub> приводит к увеличению степени окисления и уменьшению ТКС. Таким образом, пленки Pt, полученные методом магнетронного распыления с добавкой 2 ± 0,2 % O<sub>2</sub> толщиной 0,3 – 0,4 мкм с ТКС 0,0025 – 0,0032 1/К, можно использовать для создания терморезистивного чувствительного элемента датчиков расхода газа.

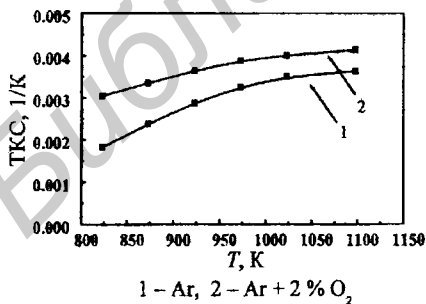


Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленки платины от температуры отжига при различном составе газа

На основе результатов проведенных исследований выбраны режимы нанесения пленок никеля как элемента мембраны: температура подложки  $T = 570 - 590$  К; толщина пленки  $d = 0,2 - 0,3$  мкм; вакуумный отжиг при  $T = 773 \pm 3$  К,  $t = 20 \pm 2$  мин. Получены режимы нанесения пленок платины: температура подложки  $T = 573 \pm 3$  К; состав газовой смеси 98 % Ag + 2 % O<sub>2</sub>; толщина пленки  $d = 0,3 - 0,4$  мкм; термический отжиг при  $T = 873 \pm 3$  К,  $t = 30 \pm 3$  мин.

В четвертой главе представлены результаты исследований свойств диэлектрических пленок  $\text{Si}_x\text{N}_y$ ,  $\text{SiO}_2$  и пленок ПКК, используемых в качестве элементов мембран датчика. Мембрана датчика состоит из пленки ПКК толщиной 1,5 – 1,8 мкм, диэлектрической пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$  толщиной 0,9 – 1,0 мкм, на которой находится металлизированная разводка терморезистивных чувствительных элементов на основе пленок никеля (платины), закрытая пассивирующей пленкой  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,5 – 0,6 мкм. Минимизация величин остаточных напряжений и увеличения механической прочности мембраны обеспечивается за счет оптимизации параметров технологического процесса и соотношения толщин слоев с противоположными знаками значений остаточных напряжений. ПКК наносится методом химического вакуумного осаждения. Стандартный режим: температура осаждения 918 К, общее давление в реакторе 40 Па, скорость подачи силана ( $\text{SiH}_4$ ) 3 – 4 л/ч. Остаточные напряжения достигают значений порядка 0,9 ГПа. Такие высокие остаточные напряжения не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к технологии МЭМС.

Зависимость остаточных напряжений в пленке ПКК от температуры осаждения представлена на рисунке 5. Исследовались пленки толщиной 1,5 мкм. Проведение процесса при температуре 888 К и общем давлении в реакторе 40 Па создавало в пленках напряжения сжатия 66 МПа. Процесс высокотемпературного отжига при температуре 1273 К в атмосфере  $\text{N}_2$  в течение 1 ч. позволяет снизить значения остаточных напряжений до величины порядка 6 МПа. При изготовлении датчика расхода газа пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$  использовались как элемент мембраны, а также в качестве маски при химическом и плазменном травлении благодаря своим высоким электромеханическим характеристикам.

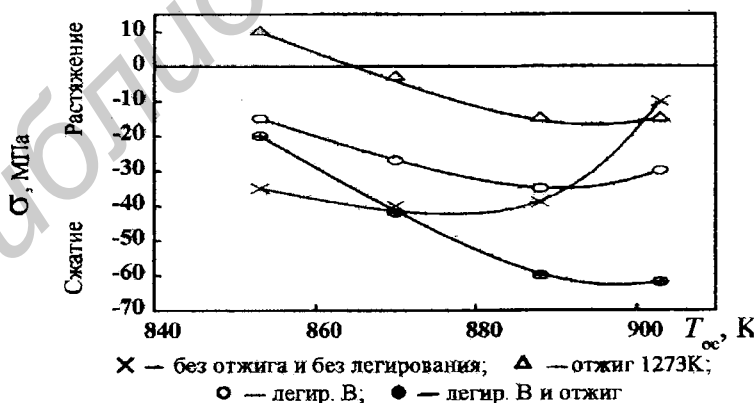
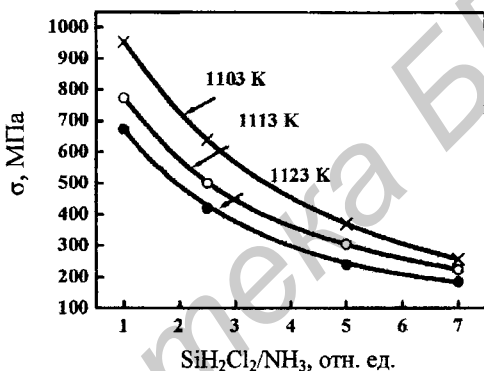


Рисунок 5 – Зависимость остаточных напряжений в ПКК от температуры осаждения

Пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , как и ПКК, осаждались на установке «Изотрон 4–150». Проводилось исследование остаточных напряжений пленок  $\text{Si}_x\text{N}_y$  при различных соотношениях дихлорсилана к аммиаку ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ ). Соотношение варьировалось от 1:1 до 7:1 (рисунок 6). Исходя из критерия минимальных остаточных напряжений, анализ зависимостей параметров пленки  $\text{Si}_x\text{N}_y$  от соотношения газов и температуры осаждения показал следующие оптимальные режимы нанесения: общее давление – 30 Па; температура осаждения – 1123 К; соотношение газов  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$  как 5:1 (в противном случае при большем соотношении увеличивается кремниевая фаза в пленке, и ее невозможно использовать как маску при травлении). При этом значения остаточных напряжений составили 180 МПа, что в несколько раз меньше, чем у стехиометрического нитрида кремния. Пленки  $\text{SiO}_2$  в технологии МЭМС используются в качестве защиты.



**Рисунок 6 – Зависимость остаточных напряжений в пленке  $\text{Si}_x\text{N}_y$  от соотношения газов при различных температурах осаждения**

Оптимальный режим нанесения пленки  $\text{SiO}_2$  следующий: расход силана  $\text{SiH}_4$  – 3,6 л/мин; расход кислорода  $\text{O}_2$  – 4,5 л/мин; расход фосфорного ангидрида  $\text{Pn}_3$  – 0,3 л/мин; общее давление – 40 Па; скорость нанесения – 15 нм/мин. При таких режимах нанесения количество фосфора достигает 5–8 % вес. ед., что значительно снижает остаточные напряжения в пленке  $\text{SiO}_2$ . Остаточные напряжения в пленке  $\text{SiO}_2$  при толщине 0,6 мкм достигают значений 180–200 МПа.

Изотропное травление кремния (Si) проводилось в травителе состава  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 1:4:3$  и потребовало использования нестандартной защиты планарной стороны пластины (сапфир, воск). В связи с тем, что процесс травления является экзотермическим и сопровождается выделением тепла, температура травителя повышается. Необходимо проводить постоянный визуаль-

ный контроль травления до появления цветной диэлектрической пленки на дне мембраны.

Выбран режим анизотропного щелочного травления Si: температура травителя 348 – 353 К и концентрация KOH в водном растворе 20 – 30 %. В качестве маски при анизотропном щелочном травлении используется подслоя  $\text{Si}_x\text{N}_y + \text{SiO}_2$ . Скорость травления в направлении [100] в 100 раз выше, чем в направлении [111]. Этот травитель растворяет  $\text{SiO}_2$  со скоростью 2,8 нм/мин и инертен по отношению к  $\text{Si}_x\text{N}_y$ . При любой концентрации примеси *p*-типа идет процесс травления. Область концентрации *n*-типа в диапазоне  $10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$  является стоп-слоем, в котором не происходит процесс электрохимического травления.

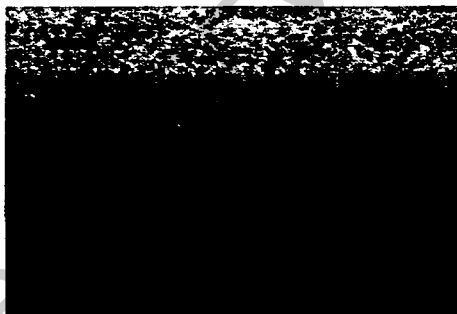
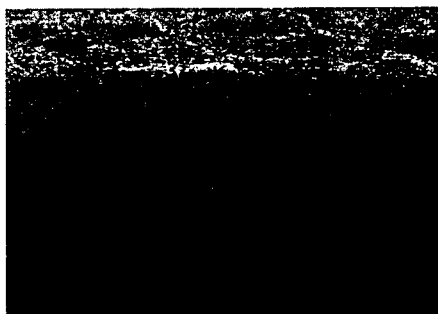


Рисунок 7 – Пленка анодированного  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Рисунок 8 – Пленка анодированного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после раскрытия пор

С целью повышения адгезии металлических пленок к диэлектрикам и увеличения эффективной площади мембраны методом термического распыления наносится пленка алюминия толщиной порядка 200 нм. Затем она подвергается электрохимическому анодированию в электролите, состоящего из 5 %-ого водного раствора щавелевой кислоты в потенциостатическом режиме при постоянном токе, напряжении 50 – 80 В и температуре 285 – 290 К (рисунок 7). Для увеличения размера пор проводится обработка в ортофосфорной кислоте ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) (рисунок 8). Пористость алюмооксидной пленки за счет травления оксида в течение 20 мин в 30 %-ном водном растворе ортофосфорной кислоты при 303 К увеличивается с 10 до 50 %. Пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученные в данных режимах, имеют пористость 50 % с размером пор порядка 50 – 100 нм.

В пятой главе предложен расчет электрофизических параметров терморезистивного чувствительного элемента датчика расхода газа с учетом предложенного слоя наноструктурированного алюминия и увеличения эффективной

площади мембраны. Основной целью расчетов является определение зависимости падения напряжения на терморезистивном чувствительном элементе от расхода газа при постоянном токе, которое выражается формулой

$$V = V_{\text{ср}}(h_{\text{конв}} + C) / ((h_{\text{конв}} + C) - I \cdot \alpha \cdot V_0 / 2S_{\text{эф}}), \quad (3)$$

где  $V$  – изменение напряжения на терморезисторе, В;

$V_{\text{ср}}$  – напряжение при температуре окружающей среды, В;

$h_{\text{конв}}$  – коэффициент конвекции,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ;

$C$  – постоянная  $\sim 20 \text{ Вт/м}^2$ ;

$I$  – постоянный ток датчика, А;

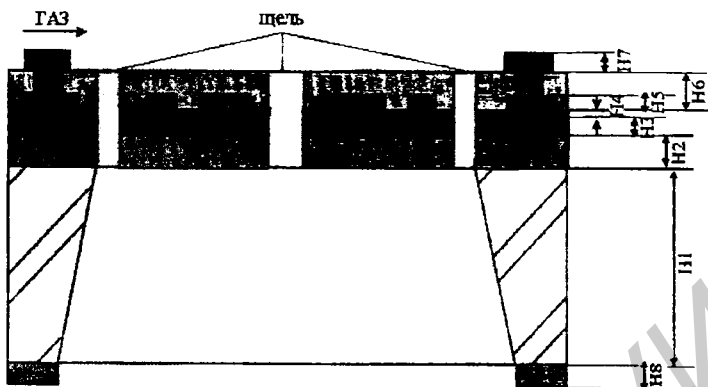
$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $1/\text{К}$ ;

$V_0$  – падение напряжения на терморезистивном чувствительном элементе при нулевой скорости потока, В;

$S_{\text{эф}}$  – площадь наноструктурированной мембраны,  $\text{м}^2$ .

Терморезистивные чувствительные элементы на основе пленок никеля, используемые в датчике, обладают более высокой чувствительностью, чем на основе пленок платины, так как ТКС первых составляет  $0,0042 - 0,0046 \text{ 1/К}$ , а вторых –  $0,0025 - 0,0032 \text{ 1/К}$ .

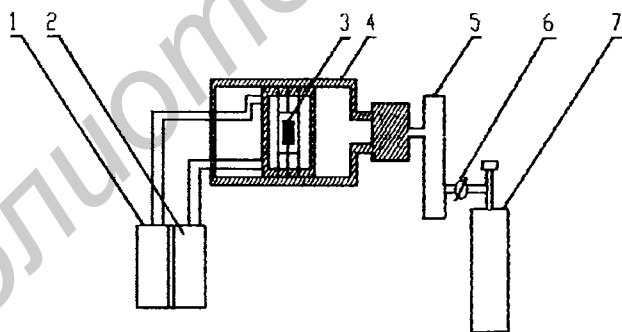
Мембранные датчики предложенной конструкции предназначены для измерения расхода газов в диапазоне  $0,01$  до  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  и чувствительностью  $0,003 - 0,002 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Датчик с площадью мембраны  $3 \text{ мм}^2$  имеет коэффициент конвекции  $110 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  при рабочей температуре  $393 - 423 \text{ К}$ . Разработанная конструкция датчика для контроля расхода газа представляет собой кристалл кремния размером  $4 \times 10 \text{ мм}$  с мембраной размером  $1,5 \times 2 \text{ мм}$ , на которой расположены три терморезистивных чувствительных элемента и шесть контактных площадок под пайку размером  $700 \times 1200 \text{ мкм}$ . Максимальный номинал сопротивления нагревательного терморезистивного элемента составляет  $1000 \text{ Ом}$ , двух измерительных терморезистивных чувствительных элементов  $100 \text{ Ом}$ , ширина которых составляет  $10 - 15 \text{ мкм}$  с зазором между ними  $10 \text{ мкм}$ . Для подгонки номиналов сопротивлений в конструкции предусмотрены подгоночные секции, позволяющие осуществлять регулирование в пределах  $25 - 30 \%$ . На мембране предусмотрено размещение щелей для уменьшения теплоотвода. Они имеют ширину порядка  $200 \text{ мкм}$  по контуру мембраны и порядка  $100 \text{ мкм}$  в центре. Конструкция многослойной мембраны датчика расхода газа изображена на рисунке 9. Разработан технологический маршрут изготовления кристалла датчика на основе диэлектрической многослойной мембраны.



H1 – кремний КДБ 12 [100],  $d = 360$  мкм; H2 – ПКК,  $d = 1,5$  мкм; H3 –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $d = 1,0$  мкм;  
 H4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $d = 0,2$  мкм; H5 – Ni (Pt),  $d = 0,3$  мкм; H6 –  $\text{SiO}_2$ ,  $d = 0,6$  мкм;  
 H7 – контактные площадки ПОС-61; H8 – Cr,  $d = 0,2$  мкм

**Рисунок 9 – Конструкция многослойной мембраны датчика расхода газа**

Разработана методика измерения параметров датчика и изготовлен стенд для калибровки датчиков расхода газа. Схема стенда для калибровки датчика расхода газа представлена на рисунке 10.



1 – блок питания; 2 – блок контроля; 3 – датчик расхода газа; 4 – кварцевая ячейка; 5 – ротаметр; 6 – манометр; 7 – баллон со сжатым газом

**Рисунок 10 – Схема стенда для калибровки датчика расхода газа**

Измерение характеристик датчика расхода газа проводилось по разработанной методике: он помещается в кварцевую ячейку, через которую продувается осушенный воздух или азот. Датчик подключается к блоку питания, с помощью нагревательного терморезистора мембрана датчика нагревается до температуры



420 – 470 К. Проводится контроль величины сопротивления измерительных терморезистивных чувствительных элементов ТР1 и ТР3. Величина расхода газа контролируется по разности сопротивлений терморезистивных чувствительных элементов. Зависимость температуры измерительных терморезистивных чувствительных элементов (ТР1, ТР3) от расхода газа представлена на рисунке 11.

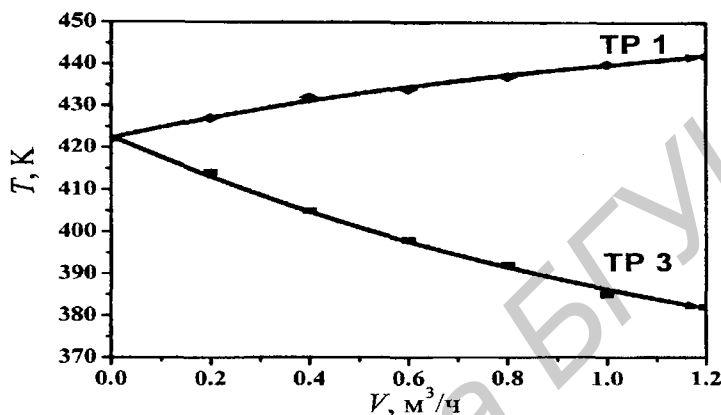


Рисунок 11 – Зависимость температуры измерительных терморезистивных чувствительных элементов от расхода газа

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Проведены исследования зависимости остаточных напряжений и структуры полупроводниковых и диэлектрических пленок от технологических режимов осаждения. На их основе разработан технологический процесс получения многослойной мембраны, состоящей из полупроводниковой пленки поликристаллического кремния и диэлектрических пленок нитрида кремния и диоксида кремния с низкими значениями суммарных остаточных напряжений (до 50 МПа), являющейся основой для создания элементов МЭМС широкой номенклатуры [9-А, 12-А, 13-А].

2. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложена конструкция и разработана технология получения терморезистивных чувствительных элементов на основе пленок никеля и платины. Полученные терморезистивные чувствительные элементы обладают  $\text{TKC}(\text{Ni}) = 0,0042 - 0,0046 \text{ 1/К}$  и  $\text{TKC}(\text{Pt}) = 0,0025 - 0,0032 \text{ 1/К}$  [7-А, 9-А, 19-А].

3. Разработаны технологические процессы получения многослойной мембраны с минимальными значениями остаточных напряжений 50 – 100 МПа, которая состоит из пленок поликристаллического кремния толщиной 1,5 – 2,0 мкм, нитрида кремния толщиной 0,9 – 1,0 мкм и диоксида кремния толщиной 0,5 – 0,6 мкм и является перспективной для создания мембранных датчиков [16–А, 17–А, 20–А, 21–А].

4. На основе полученных результатов разработан технологический процесс получения наноструктурированного слоя оксида алюминия толщиной 0,2 мкм с диаметром пор 50 – 100 нм, обладающего развитой поверхностью, позволяющей увеличить эффективную площадь мембраны на два порядка, и обеспечивающего увеличение адгезии металлических пленок [1–А, 2–А, 5–А, 6–А, 12–А, 18–А].

5. Предложены конструктивно-технологические методы изготовления датчика расхода газа на основе многослойной мембраны, в состав которой входит наноструктурированный слой оксида алюминия, с использованием терморезистивных чувствительных элементов, обеспечивающих увеличение чувствительности датчика от 0,003 м<sup>3</sup>/ч до 0,002 м<sup>3</sup>/ч, что позволило расширить рабочий диапазон измерений расхода газа от 0,01 м<sup>3</sup>/ч до 1,5 м<sup>3</sup>/ч [3–А, 14–А, 15–А, 16–А, 19–А, 20–А, 21–А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная конструкция многослойной мембраны с введением наноструктурированного материала оксида алюминия может быть использована при изготовлении широкого спектра мембранных датчиков расхода газа.

2. Разработанная технология формирования терморезистивных чувствительных элементов на основе никеля и платины может быть использована для изготовления широкого класса как непосредственно терморезистивных чувствительных элементов датчиков, так и других полупроводниковых приборов.

3. Пленки поликристаллического кремния и нитрида кремния с низкими значениями остаточных напряжений могут быть использованы при изготовлении элементов полупроводниковых приборов и изделий силовой электроники, обеспечивающих стабильность их параметров.

4. Разработанная методика определения толщины мембраны может широко использоваться и для определения толщины тонких диэлектрических пленок, используемых в кремниевой технологии изготовления интегральных микросхем.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе БГУИР на кафедре «Микро- и нанозлектроники».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи в научных журналах*

1–А. Porous alumina as low- $\epsilon$  insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Leshok, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotsky and V. Ponomar // *Microelectronic Engineering*. – 2000. – Vol. 50, №1–4. – P. 321–327.

2–А. Reliability of built in aluminum interconnection with low- $\epsilon$  dielectric based on porous anodic alumina / S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotsky, V. Ponomar // *Solid-State Electronics*. – 2000. – Vol. 44, №5. – P. 815–818.

3–А. Формирование трехмерных структур сложной формы ионно-лучевым травлением полиимида в кислороде / А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, Ю.В. Тишников, Т.И. Ореховская, В.Б. Высоцкий, В.И. Курмашев // *Известия Белорусской инженерной академии*. – 2001. – №1(11). – С. 30–32.

4–А. The muon system of the Run II DØ detector / V.M. Abazov, G.D. Alexeev, V.B. Vysotsky, V.V. Tokmenin // *Nuclear instruments and Methods in Physics Research A*. – 2005. – Vol. 552. – P. 372–398.

### *Статьи в материалах конференций*

5–А. Lazarouk, S. Reliability of built in aluminium interconnection with low- $\epsilon$  dielectric based on porous anodic alumina / S. Lazarouk, V. Stanovski, V. Vysotsky // *International Symposium MRS, Strasburg, 25 – 29 may 1999*. – Vol. 4-4/3. – P. 1–4.

6–А. Lazarouk, S. Porous alumina as low- $\epsilon$  insulator for multilevel metallization / S. Lazarouk, V. Stanovski, V. Vysotsky // *International Conference MAM-99, Ostende, 24–27 February 1999*. – Vol. 1.4.5. – P. 1–7.

7–А. Разработка процесса формирования алюминиевых столбиков на основе электрохимического анодирования алюминия для многоуровневых межсоединений СБИС / В.Н. Пономарь, В.Б. Высоцкий, С.К. Лазарук, Н.Я. Ларина, А.В. Демьянович, В.В. Становский // *Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: труды VII Междунар. науч.-техн. конф., Дивноморское, Россия, 22–24 сентября, 2000 г.* – С. 112–114.

8–А. Восьмиканальная микросхема низкошумящего токового усилителя-формирователя для газонаполненных детекторов в физике высоких и средних энергий / Г.Д. Алексеев, В.Б. Высоцкий, О.В. Дворников, В.А. Михайлов, В.В. Токменин // *Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–12 сент. 2002.* – Минск, 2002. – С. 130–136.

9—А. Высоцкий, В.Б. Технология изготовления и контроля тонких мембран из кристаллического кремния / В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко, А.С. Лобко // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–15 окт. 2004 г. / Белорус. гос. ун-т. — Минск, 2004. — С. 268–270.

10—А. Vysotsky, V.B. Technology for production of Ultra-Thin Crystal Silicon Membranes / V.B.Vysotsky, E.V. Lobko, A.S. Lobko // International Conference, Belarus, Minsk, August 12th, 2005: arXiv:physics/0508079. — Minsk, 2005. — V. 1. — P. 1–3.

11—А. Кремниевый сенсор малых расходов газа / В.Б. Высоцкий, Р.Н. Хомич, С.А. Бартошик, Ю.А. Родионов // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–11 апр. 2007 г. / Минский гос. высш. Колледж связи. — Минск, 2007. — С. 116–120.

12—А. Увеличение чувствительности датчиков скорости потока газа за счет использования наноструктурированных алюмооксидных мембран / В.Б. Высоцкий, С.Н. Войтех, Э.В. Лобко, С.К. Лазарук // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: материалы Междунар. Науч.-практ. Конф., Минск, 10–11 апр. 2007 г. / Минский гос. высш. Колледж связи. — Минск, 2007. — С. 113–116.

13—А. Высоцкий, В.Б. Датчик малых расходов газа / В.Б.Высоцкий, А.Р.Янкина, Ю.А.Родионов // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы V Междунар. науч. -практ. конф., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. — Новополоцк, 2008. — С. 162–165.

#### *Тезисы докладов на научных конференциях*

14—А. Высоцкий, В.Б. Никелевые терморезисторы для датчиков расхода газа / В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко, Н.Э. Калинина // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Междунар. науч. конф., Минск — Нарочь, 30 сент. — 4 окт. 2002 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2002. — С. 97–99.

15—А. Высоцкий, В.Б. Платиновая металлизация для газовых датчиков / В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко, Н.Э. Калинина // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Междунар. науч. конф., Минск — Нарочь, 30 сент. — 4 окт. 2002 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2002. — С. 120–121.

16—А. Высоцкий, В. Б.Технология резистивных пленок на основе силицида молибдена / В.Б. Высоцкий, Э.В. Лобко, Н.Э. Калинина // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Междунар. науч. конф.,

Минск – Нарочь, 30 сент. – 4 окт. 2002 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2002. – С. 124.

17–А. Создание матрицы нанокатодов на основе пористого кремния / В.Б.Высоцкий, Н.Э.Калинина, С.В.Корякин, Э.В.Лобко // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Междунар. науч. конф., Минск – Нарочь, 30 сент. – 4 окт. 2002 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2002. – С. 116.


18–А. Кремниевые диоды с изоляцией на основе окисленного пористого кремния / С.К.Лазарук, Н.Я.Ларина, С.Н.Войтех, В.Б.Высоцкий // Современные средства связи: тез. докл. XII междунар. техн. конф., Минск, 24 – 28 сент. 2007 г. – Минск, 2007. – С. 125–127.

19–А. Оптимизация конструкции мембранных датчиков / Л.П.Ануфриев, В.Б.Высоцкий, Н.С.Ковальчук, Э.В.Лобко // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 19 – 23 мая, 2008. – Одесса, 2008. – С. 138.

20–А. Система металлизации для высокотемпературных датчиков / В.Б.Высоцкий, Н.С.Ковальчук, Э.В.Лобко, Т.И.Ольшевская // Современные средства связи: тез. докл. XIII междунар. техн. конф., Минск, 23 – 26 сент. 2008 г. – Минск, 2008. – С. 135–137.

21–А. Формирование металлической пленки для газовых датчиков / Л.П.Ануфриев, В.Б.Высоцкий, Н.С.Ковальчук, Э.В.Лобко, Т.И.Ореховская // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18 – 22 мая, 2009 г. – Одесса, 2009. – С. 106.

22–А. Баранов, В. В. Формирование мембран для сенсоров в микроэлектронном исполнении / В.В.Баранов, В.Б.Высоцкий, Н.С.Ковальчук // Современные информационные и электронные технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18 – 22 мая 2009 г. – Одесса, 2009. – С. 140.



ВЫСОЦКІ Віктар Барысавіч

## **Фарміраванне мембранных датчыкаў расходу газу з тэрмарэзістыўнымі адчувальнымі элементамі**

*Ключавыя словы:* датчык, мембрана, тэрмарэзістар, нікель, плаціна, механічныя напружанні, нітрыд крэмнія, полікрэмній, нанаструктурыраваны матэрыял.

*Аб'ект даследавання:* датчыкі расходу газу, а таксама металы іх атрымання.

*Прадмет даследавання:* заканамернасці атрымання саставу, структуры, механічных і электрафізічных уласцівасцей дыэлектрычных і полікрэмніевых элементаў трохмерных датчыкаў расходу газу.

*Мэта работы:* распрацоўка новых канструктыўна-тэхналагічных метадаў фарміравання танкашпелачных ненапружаных дыэлектрычных і полікрэмніевых мембран, якія з'яўляюцца адным з асноўных элементаў датчыкаў расходу газу, а таксама распрацоўка метадаў і выбар аптымальных рэжымаў атрымання тэрмарэзістыўных адчувальных элементаў на аснове тонкіх плёнак нікелю і плаціны. Эксперыментальна устаноўлена залежнасць уласцівасцей тонкіх плёнак, атрыманых метадам электроннапрамянёвага і магнетроннага напылення ад значэнняў складу рабочага газу, тэмпературы адпальвання, пры якіх дасягаецца максімальнае значэнне ТКС. Вызначаны аптымальныя рэжымы асаджэння ненапружаных плёнак полікрысталічнага крэмнія, нітрыда і дыаксіда крэмнія з напружаннем да 100 – 200 МПа і іх спалучэнняў, якія дазваляюць мінімізаваць гэтыя напружанні за кошт кампенсацыі. Увядзенне ў склад мембраны нанаструктурыраванага матэрыялу на аснове  $Al_2O_3$  дазволіла павялічыць эфектыўную плошчу мембраны на два парадкі, што забяспечыла адчувальнасць датчыка ад  $0,003 \text{ м}^3/\text{ч}$  да  $0,002 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Распрацаваны тэхналагічны маршрут, які вызначае парадак і ўстанаўлівае аптымальныя рэжымы тэхналагічных аперацый фарміравання мнагаслойных мембран. Прапанавана арыгінальная метадыка ацэнкі таўшчынні тонкіх мембран ў дыяпазоне 1 – 3 мкм з дакладнасцю  $\pm 4 \%$ .

Распрацавана канструкцыя датчыка расходу газу з размерам крышталю  $4 \times 10$  мм, які ўключае ў сябе мембрану размерам  $1,5 \times 2$  мм. Мембрана дазваляе вызначаць расход газу ад  $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$  да  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  з дакладнасцю  $\pm 5 \%$ .

Укараненне вынікаў дысертацыйнай працы на НВА «Інтэграл» дазваляе правесці распрацоўку і вырабленне новага класу прыбораў трохмерных мікраэлектрамеханічных сістэм для шырокай наменклатуры.

ВЫСОЦКИЙ Виктор Борисович

## Формирование мембранных датчиков расхода газа с терморезистивными чувствительными элементами

*Ключевые слова:* датчик, мембрана, терморезистор, никель, платина, механические напряжения, нитрид кремния, поликристаллический кремний, наноструктурированный материал.

*Объект исследования:* датчики расхода газа, а также методы их получения.

*Предмет исследования:* закономерности получения состава, структуры, механических и электрофизических свойств диэлектрических и поликремниевых элементов трехмерных мембранных датчиков расхода газа.

*Цель работы:* разработка новых конструктивно-технологических методов формирования тонкопленочных многослойных мембран, являющихся одним из основных элементов датчиков расхода газа, а также разработка методов и выбор оптимальных режимов получения терморезистивных чувствительных элементов на основе пленок никеля и платины. Экспериментально установлены зависимости свойств тонких пленок, полученных методом электронно-лучевого и магнетронного напыления, от значений состава рабочего газа, температуры отжига, при которых достигается максимальное значение ТКС. Определены оптимальные режимы осаждения пленок поликристаллического кремния, нитрида и оксида кремния с заданными напряжениями различных знаков и их сочетания, позволяющие минимизировать эти напряжения до 100 – 200 МПа за счет компенсации. Введение в состав мембраны наноструктурированного материала на основе  $Al_2O_3$  позволило увеличить эффективную площадь мембраны на два порядка, что обеспечило чувствительность датчика от  $0,003 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $0,002 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Разработан технологический маршрут, определяющий порядок и устанавливающий оптимальные режимы технологических операций формирования многослойных мембран. Предложена оригинальная методика оценки толщины тонких мембран в диапазоне 1 – 3 мкм с точностью  $\pm 4 \%$ .

Разработана конструкция датчика расхода газа с размером кристалла  $4 \times 10 \text{ мм}$  с размером мембраны  $1,5 \times 2 \text{ мм}$ , позволяющая измерять расход газа от  $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  с точностью  $\pm 5 \%$ .

Внедрение результатов диссертационной работы на НПО «Интеграл» позволяет проводить разработку и изготовление изделий нового класса МЭМС широкой номенклатуры.

## SUMMARY

Victor V. Vysotsky

### Formation of Diaphragm Gas Flow Sensors with Thermoresistive Sensing Elements

*Key words:* sensor, diaphragm, thermistor, nickel, platinum, stresses, silicon nitride, polysilicon, nanostructured material.

*Object of investigation:* gas flow sensors and also the methods of their implementation.

*Subject of investigation:* the mechanism for identification of the composition, structure, mechanical and electrophysical properties of dielectric and polysilicon elements of three-dimensional diaphragm gas flow sensors.

*Objective of research:* is the development of the new constructive and technological methods for formation of thin-film multilayer diaphragms which constitute one of the major elements of gas flow sensors, and also the development of the methods and selection of the optimal conditions for implementing Ni and Pt thermistors as sensing elements (SE) of the sensor. There have been experimentally identified the properties of thin films (SE) produced by methods of electron-beam evaporation and magnetron sputtering versus the composition of the actuation gas, deposition rates and temperatures, at which maximal ratings of the temperature coefficient of resistance (TCR) are gained. Optimal conditions for a deposition of polysilicon, nitride, and silicon oxide films with specified residual stresses and their combinations, which allow to minimize those stresses to 100 - 200 MPa at the expense of compensation have been determined. Introduction of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  based nanostructured material in composition of the diaphragm has allowed to enlarge an effective area of the diaphragm by a factor of  $10^2$ , which has provided to enhance the sensitivity level of the sensor from  $0,003 \text{ m}^3/\text{h}$  to  $0,002 \text{ m}^3/\text{h}$ .

The process flow which specifies the sequence of process steps and defines the optimal conditions of process steps for the formation of multilayer diaphragms has been developed. Original methods for evaluation of the thickness of thin diaphragms in the range 1 – 3  $\mu\text{m}$  with an accuracy  $\pm 4 \%$  have been proposed.

Gas flow sensor design on the chip size  $4 \times 10 \text{ mm}$  and with a diaphragm size  $1.5 \times 2 \text{ mm}$ , which provides for measurements of gas flows from  $0,01 \text{ m}^3/\text{h}$  to  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  with an accuracy  $\pm 5 \%$  has been developed.

An introduction of the results of the dissertation paper at SPA Integral allows to develop and manufacture a wide range of MEMS products of a new class.



*Научное издание*

**ВЫСОЦКИЙ ВИКТОР БОРИСОВИЧ**

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ  
РАСХОДА ГАЗА С ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫМИ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 23.07.2009.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 486.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.