

**На правах рукописи**



**ГУРИН Сергей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

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

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2016**

Работа выполнена на кафедре нано- и микроэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет».

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор  
**Печерская Римма Михайловна**

**Официальные оппоненты:** **Гридчин Виктор Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», профессор  
кафедры полупроводниковых приборов  
и микроэлектроники;

**Пятышев Евгений Нилович**,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный политехнический  
университет Петра Великого», заведующий  
научно-исследовательской лабораторией  
нано- и микросистемной техники

**Ведущая организация** – ОАО «Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов»  
(г. Пенза)

Защита диссертации состоится 8 декабря 2016 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте: <http://www.eltech.ru/>

Автореферат разослан 7 октября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.04  
д.ф.-м.н., профессор



**Мошников В. А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время наиболее широкое распространение для регистрации давления в системах контроля параметров энергетических установок специальной техники получили интегральные металлопленочные тензорезистивные датчики давления (ИМТДД), изготовленные по технологии тонкопленочной микроэлектроники. Качество и стабильность ИМТДД во многом определяют технический уровень информационно-измерительных и управляющих систем эксплуатируемых объектов.

Изменение начального выходного сигнала ( $U_0$ ) ИМТДД за время эксплуатации составляет  $\pm(2...25) \%$  вместо прогнозируемых значений  $\pm(0,01...0,05) \%$  за год, т.е. не более  $\pm 1 \%$  за весь период эксплуатации. Это обуславливает создание методов и технологий стабилизации ИМТДД, обеспечивающих значительное улучшение параметров при одновременном повышении надежности и долговечности, а также переход к принципиально новым методам исследования и технологиям получения перспективных материалов и структур, основанным на детальном анализе процессов в реальных средах.

Основным узлом любого ИМТДД является чувствительный элемент (ЧЭ), представляющий собой тонкопленочную гетерогенную структуру, сформированную на подложке из специального упругого сплава. Зачастую в основе тонкопленочной гетерогенной структуры используются диэлектрик SiO с подслоем Cr, тензорезисторы (ТР) из сплавов X20H75Ю или П65ХС и контакты типа «V–Au». ЧЭ находится в наиболее жестких условиях эксплуатации, поскольку на него воздействует весь комплекс дестабилизирующих факторов [1, 2]. В связи с этим выходные параметры ЧЭ фактически определяют метрологические характеристики датчиков. Исследования причин нестабильности ИМТДД показали, что процессы деградации, развивающиеся в тонких пленках ЧЭ в процессе эксплуатации, являются основными факторами, нарушающими их структуру и фазовый состав, в результате чего меняются электрические параметры [3–5].

Другим важнейшим направлением исследований является разработка технологий синтеза тонкопленочных структур на основе карбида кремния на подложке из упругого сплава, являющегося перспективным материалом для экстремальных условий.

**Цель диссертационной работы** – совершенствование технологий, обеспечивающих стабильность выходных параметров тонкопленочных гетерогенных структур ЧЭ ИМТДД с различными топологическими решениями, и разработка технологий синтеза перспективных материалов и структур для создания высокочувствительных термостабильных тензорезисторов на основе композиции «Si–C–Cr» с изолирующим слоем SiC.

### **Основные задачи:**

– анализ принципов построения и работы ИМТДД, механизмов возникновения температурных погрешностей и методов их компенсации применительно к чувствительному элементу;

- обоснование выбора диэлектрических, резистивных и проводящих слоев тонкопленочных гетерогенных структур ЧЭ;
- изучение кинетики процессов деградации в тонкопленочных гетерогенных структурах ЧЭ ИМТДД и механизмов дефектообразования;
- разработка режимов стабилизации параметров тонкопленочных гетерогенных структур ЧЭ ИМТДД для различных топологий ТР из сплава Х20Н75Ю путем модификации режимов термообработки;
- разработка технологических режимов высокоэнергетической обработки тонкопленочной структуры на основе ТР из П65ХС излучением в высоком вакууме для управления значением температурного коэффициента сопротивления (ТКС), обеспечения низкого уровня шумов, термодинамического равновесия и устойчивых соединений в структуре сплава;
- исследование и разработка технологических режимов синтеза высокочувствительных термостабильных ТР на основе композиции «Si–C–Cr» и изолирующего слоя SiC методом магнетронного распыления.

**Методы исследований.** В работе использованы экспериментальные методы исследований, в том числе методы измерения и анализа электрофизических характеристик тонкопленочных структур, методы электрического измерения неэлектрических величин, методы исследования физики тонких пленок. Эти методы реализовывались на базе последних технологических достижений тонкопленочной микроэлектроники.

**Объектом исследования** являются чувствительные элементы ИМТДД, работающие в экстремальных условиях эксплуатации.

**Предмет исследования** – свойства и технические характеристики ЧЭ ИМТДД, созданных с применением модифицированной технологии термостабилизации, высокоэнергетической обработки излучением тонкопленочной структуры ЧЭ в высоком вакууме, термостабильной высокочувствительной композиции «Si–C–Cr» с изолирующим слоем SiC.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Установлено, что в изменении свойств сплава Х20Н75Ю доминируют деградация переходных сопротивлений для тензорезисторов из многокомпонентных звеньев (составные ТР и ТР с низкоомными перемычками) и окисление для полосковых ТР. В сплаве П65ХС доминируют окисление при температурах ниже 340 °С и необратимые изменения значений ТКС и сопротивлений при температурах выше 340 °С за счет эффекта спекания, способности силицида к образованию проводящих мостиков в SiO-матрице.

2. Впервые разработаны технологические режимы стабилизации параметров тонкопленочных гетерогенных структур ЧЭ ИМТДД на основе ТР из сплава Х20Н75Ю, основанные на комбинации трехстадийного циклического воздействия температуры с выдержкой в вакууме и отжигом на воздухе, позволяющие связать в устойчивые соединения молекулы остаточных газов и материалов тонкопленочных структур.

3. Разработана технология высокоэнергетической обработки ТР из сплава П65ХС излучением в высоком вакууме, основанная на кратковре-

менном прямом воздействии на них излучения с разогревом верхних слоев до (550...700) °С, уменьшающая барьерную проводимость за счет формирования в структуре сплава устойчивых соединений и обеспечивающая управление значением ТКС.

4. Определены технологические режимы получения высокочувствительных термостабильных ТР на основе композиции «Si–C–Cr» и изолирующего слоя SiC на подложке из упругого сплава методом магнетронного распыления, позволяющие получать ТР с заданными свойствами и усиленным теплоотводом при повышенных электрических нагрузках.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Показана эффективность влияния режимов модифицированной технологии термостабилизации параметров тонкопленочных гетерогенных структур с ТР из сплава Х20Н75Ю, основанной на комбинации трехстадийного циклического воздействия температуры с выдержкой в вакууме и отжигом на воздухе, на активность внутренних и поверхностных окислительных процессов в тонких пленках для полосковых ТР и деградацию переходных сопротивлений для ТР, состоящих из многокомпонентных звеньев.

2. Управление сопротивлением и ТКС ТР на основе сплава П65ХС, а также их температурно-временная стабильность обеспечены высокоэнергетической обработкой тонкопленочных гетерогенных структур прямым излучением в высоком вакууме с разогревом ТР до (550...700) °С.

3. Использование в качестве материала ТР композиции «Si–C–Cr» и в качестве изолирующего слоя – SiC на подложке из упругого сплава, полученных по оптимизированным режимам магнетронного распыления, позволяет увеличить тензочувствительность ТР в 3–5 раз и снизить рабочий разогрев структуры более чем на 100 °С.

#### **Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Разработана технология стабилизации параметров ЧЭ ИМТДД, обеспечивающая температурную и временную стабильность электрических сопротивлений тензорезисторов, состоящих из многокомпонентных звеньев, и ТР полоскового типа на основе сплава Х20Н75Ю, основанная на комбинации многоступенчатого воздействия температуры в вакууме и отжиге на воздухе. Это до трех раз уменьшает дрейф сопротивлений ТР во времени и при воздействии температуры.

2. Разработана технология высокоэнергетической обработки тонкопленочной структуры на основе ТР из сплава П65ХС излучением в высоком вакууме для управления ТКС, низкого уровня шумов, термодинамического равновесия и устойчивых соединений в структуре. Установлено, что при высокоэнергетической обработке исходное сопротивление ТР (3...3,5) кОм уменьшается на (350...400) Ом, а ТКС увеличивается более чем в 1,5 раза.

3. Созданы высокочувствительные термостабильные структуры на основе композиции «Si–C–Cr» на подложке из упругого сплава методом магнетронного распыления. Их чувствительность в 3–5 раз превышает со-

ответствующий параметр металлопленочных ТР. Для преобразования малых давлений применим ЧЭ мембранного типа без дополнительного преобразования давления в силу.

4. Разработана технология получения изолирующего слоя SiC магнетронным распылением, позволяющая уменьшить разогрев структур при повышенных электрических и температурных нагрузках благодаря улучшению теплоотвода.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались на таких конференциях, как XVII и XVIII Международные научно-методические конференции «Университетское образование» (Пенза, 2013, 2014); IV Научно-техническая конференция «Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, наноэлектроники» (Пенза, 2013); 16-я научная молодежная школа с международным участием «Материалы и технологии гибкой электроники» (Санкт-Петербург, 2013); VIII Международная научно-техническая конференция «Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем» (Пенза, 2013); XX Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-20) (Красноярск, 2014); XXV Научно-практическая конференция студентов и профессорско-преподавательского состава ПГУ «Актуальные проблемы науки и образования» (Пенза, 2014); XVIII Молодежная научная школа по твердотельной электронике «Микро- и нанотехника нового поколения» (Санкт-Петербург, 2015).

**Внедрение полученных результатов.** Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в производство ЧЭ датчиков давления АО «НИИФИ» (г. Пенза), а также на кафедре нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета при подготовке бакалавров и магистров в рамках учебных дисциплин: «Основы технологии материалов электронной техники», «Материалы электронной техники» направления подготовки «Электроника и наноэлектроника».

**Результаты работы использованы** при создании ЧЭ датчика абсолютного давления ДДВ-021 (ОКР «Удар», ФКП ГК 783-к422/12 от 25.07.2012); при выполнении работ по созданию ЧЭ датчика давления МИД-2 по теме ОКР «Элинвар» (ФКП ГК 783-к694/13/146 от 17.04.2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 4 патента, 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 свидетельств о регистрации топологии интегральной микросхемы. Без соавторов опубликовано 4 работы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 103 наименований. Общий объем работы составляет 156 страниц машинописного текста, включая 39 рисунков и 35 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований; сформулированы цель и задачи работы; изложены ее научная новизна, практическая значимость и представленные к защите научные положения.

**В первой главе** приведена краткая характеристика ИМТДД специального назначения. Рассмотрены перспективные требования к ИМТДД, проанализированы и обобщены принципы построения, конструктивное исполнение и схемные решения ИМТДД. Представлены механизмы возникновения температурных погрешностей, и рассмотрены известные методы их минимизации. Определен объект исследований – чувствительные элементы ИМТДД, состоящие из тонкопленочной гетероструктуры на основе SiO с подслоем Cr, ТР из сплавов Х20Н75Ю или П65ХС и контактов типа «V–Au». Проанализированы свойства материалов, необходимые для создания тонкопленочной гетероструктуры ЧЭ ИМТДД, обладающей высокой температурной и временной стабильностью.

Показано, что схемные методы компенсации температурных погрешностей эффективны при некорректном выборе материалов, технологических разбросах их физических параметров и некоторых конструктивных особенностях.

Выявлены основные причины температурно-временной нестабильности ИМТДД. Для их стабильной работы в экстремальных условиях необходимо исключить процессы деградации тонких пленок за счет совершенствования технологий стабилизации и применения термостабильной высокочувствительной композиции «Si–C–Cr». Кроме того, необходимо усилить теплоотвод применением изолирующего слоя SiC.

**Во второй главе** представлены модифицированные технологии стабилизации выходных параметров ЧЭ ИМТДД и управления ими для ТР из сплавов Х20Н75Ю и П65ХС.

На практике используются две основные топологии ТР для сплава Х20Н75Ю:

– топология с ТР, расположенными в зоне действия механических напряжений сжатия и растяжения, где тензорезисторы имеют П-образную или полосковую структуру;

– топология, представляющая собой сформированный тензометрический мост из многозвенных ТР в зонах максимальных тангенциальных (тензорезисторы с золотыми перемычками) и радиальных (составные тензорезисторы) деформаций, где ТР выполнены в виде идентичных элементов – квадратов, размещенных по периферии мембраны, соединенных низкоомными золотыми перемычками.

Временной дрейф сопротивлений полосковых ТР имеет положительное направление, что свидетельствует о доминирующей роли окисления, несмотря на компенсацию в результате добавления алюминия. Это связано с фракционированием сплава Х20Н75Ю из-за различия температур плавления его компонентов (рисунок 1).

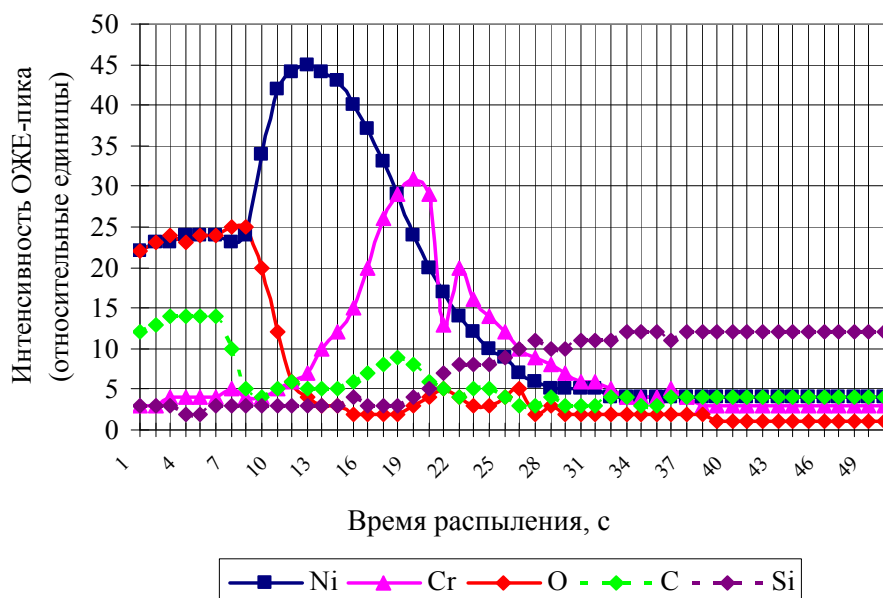


Рисунок 1 – Профиль распределения элементов тензорезистора из сплава X20H75Ю

В результате при распылении навески сплава X20H75Ю алюминий испаряется первым, причем большая часть его попадает на заслонку, а в ТР остается минимум. На поверхности диэлектрика лежит Cr. Ближе к центру пленки соотношение Ni/Cr меняется, и на поверхности тонкой пленки остается Ni, покрытый окислом.

В многозвенных ТР особенно подвержены деградации переходные сопротивления, а определяющий вклад в нестабильность вносит металлургическая совместимость металлических пар контакта и резистивного слоя. Модель части многозвенного ТР, учитывающая сопротивления резистивной пленки  $R_s$ , материала контактов  $R'_s$  и переходного слоя  $R_l$ , характеризующегося собственной удельной электропроводностью  $G$  (рисунок 2), показывает, что временной дрейф сопротивлений из-за различных видов деградации переходных сопротивлений может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

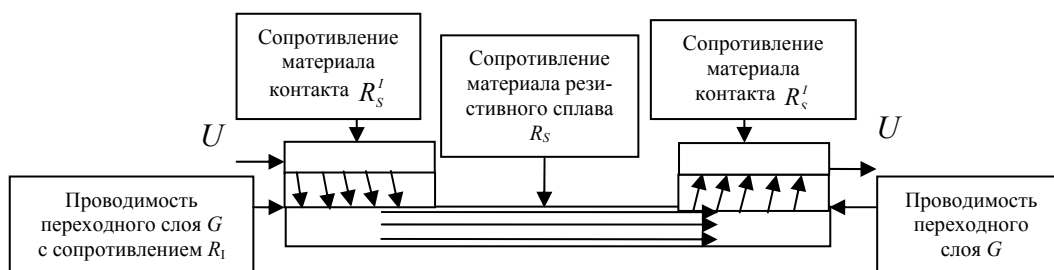


Рисунок 2 – Модель распределенного переходного сопротивления

Замедление процессов деградации в ТР удалось достичь применением модифицированной технологии термостабилизации. ЧЭ подвергались двукратному воздействию перепадов температур при  $(1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-6})$  мм рт. ст. в вакуумной камере с выдержкой в течение 30 мин после двухчасового



достижения максимальной температуры  $350 \pm 10$  °С. Затем они остывали до 100 °С и (4...6) ч отжигались на воздухе при  $280 \pm 10$  °С. Установлено, что модифицированные режимы термообработки снижают дрейф сопротивления многозвенных ТР в три раза. После первого цикла испытаний изменение сопротивлений составило (1,2...1,3) Ом для ЧЭ, изготовленных по модифицированным режимам, и 8,8...11,3 Ом – для ЧЭ, изготовленных по стандартным режимам.

Определено влияние режимов высокоэнергетической обработки излучением в высоком вакууме на свойства ТР из сплава П65ХС. Такие ТР состоят из кристаллитов хрома и его силицидов, диспергированных в матрице SiO и окруженных присадками редкоземельных элементов (лантана и иттрия), обеспечивающих связывание вредных примесей. Термическая и временная стабильность сплава П65ХС вызвана тем, что зерна металла в таких пленках надежно защищены окисной матрицей. Для ТР из П65ХС характерна параболическая зависимость роста сопротивления от времени. Механизм старения ТР на всех временных интервалах определяется окислением пленки.

Для ИМТДД нового поколения, работающих в условиях нестационарных тепловых потоков, где температура превышает 350 °С, кинетика процессов деградации меняется. При 340 °С структурный отжиг идет более активно. Пленка сплава П65ХС при повышенных температурах спекается, что вызвано способностью силицида образовывать в SiO-матрице проводящие мостики. Рост доли  $Cr_3Si$  ведет к увеличению металлической проводимости тонкой пленки сплава П65ХС, уменьшению сопротивления ТР и росту их ТКС. Особенно критичен необратимый переход ТКС в процессе эксплуатации датчика из области отрицательных значений в область положительных значений, что требует создания ТР с положительным и стабильным ТКС.

Проведен сравнительный анализ морфологии поверхности резистивных пленок с отрицательным и положительным ТКС с помощью СЗМ с кремниевыми кантилеверами как при постоянной высоте, так и при постоянной силе взаимодействия «зонд–подложка» (рисунок 3).

3D-профиль образца с отрицательным ТКС позволяет предположить, что ТР имеют мелкодисперсную (близкую к поликристаллической) структуру. Для образца с положительным ТКС морфология ТР состоит из элементов размером (85...520) нм. Внешний вид пленки близок к виду аморфных пленок с крупнозернистой структурой.

ТР с положительным ТКС имеют большую толщину пленки. В их структуре доминируют металлические кристаллиты, что ведет к уменьшению сопротивлений, среднее значение которых по ЧЭ составляет  $\sim 3424,6$  Ом. Металлическая проводимость обуславливает положительный знак ТКС. У ТР с поликристаллической структурой превалирует окисление металла, что приводит к уменьшению проводимости и образованию  $Cr_2O_3$ , имеющего полупроводниковые свойства и отрицательное значение ТКС.

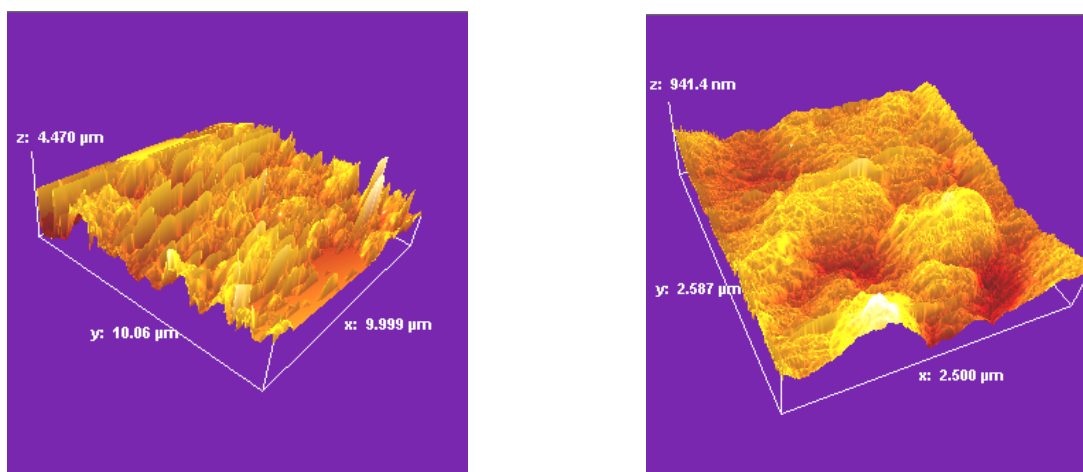


Рисунок 3 – Профили сканирования зон:  
*a* – образец с отрицательным ТКС; *б* – образец с положительным ТКС

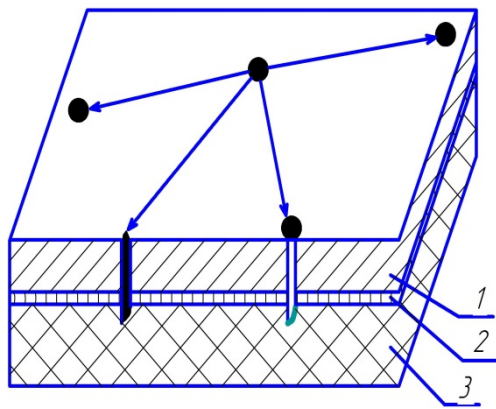
Поликристаллическая структура с высоким содержанием кремния также обуславливает вклад барьерной проводимости в общую проводимость и возможные отрицательные значения ТКС. В связи с этим сопротивление ТР у ЧЭ составляет  $\sim 3559,7$  Ом.

Управление ТКС и стабилизация свойств ТР обеспечивались высокоэнергетической обработкой тонкопленочных гетероструктур ЧЭ прямым излучением при  $(1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-6})$  мм рт. ст. в течение  $(0,5 \dots 3)$  мин. При этом температура верхних слоев составляла  $(550 \dots 700)$  °С, а температура подложки  $\sim 340$  °С.

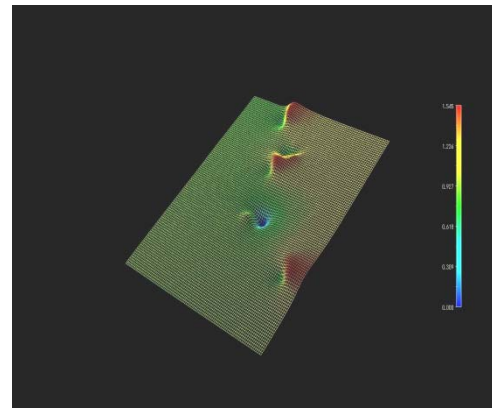
Установлено, что такая обработка позволяет химически связать молекулы (атомы) остаточных газов, а также свободные атомы материалов тонкопленочных структур (например, Si в изолирующей пленке SiO или Cr в резистивной пленке сплава П65ХС) как внутри пленок, так и в зонах их контактирования. При этом уменьшается барьерная проводимость за счет образования устойчивых соединений в структуре ТР, сокращаются непроводящие и малопроводящие участки (что позволяет управлять ТКС), уменьшаются разброс сопротивлений ТР и шумы.

**Третья глава** посвящена разработке режимов синтеза высокочувствительной термостабильной композиции «Si–C–Cr» в качестве тензорезисторов и SiC в качестве изолирующего слоя, а также расчету одномерной модели теплопереноса в исследуемых структурах ЧЭ.

Возникновение электродиффузии обусловлено градиентом температуры, а также структурой и дефектами пленки. Первостепенное значение приобретает выгорание тензорезистивной пленки в местах концентрации дефектов: утоньшение при переходах через границы недостаточно отполированных мембран ЧЭ, в местах изолирующих карманов, на дефектах и неоднородностях диэлектрика, в местах царапин и рисок от средств полировки) (рисунок 4).



а)



б)

Рисунок 4 – Проявление дефектов тонкой пленки диэлектрика и резистивного слоя на дефектах подложки:  
 а – схематическое изображение проявления дефектов в виде карбонитридов титана; б – трехмерное изображение поверхности ЧЭ;  
 1 – диэлектрик; 2 – адгезионный подслоя; 3 – мембрана

Наибольший интерес представляют скрытые дефекты диэлектрического слоя, образованные на пиках карбонитридов титана, которые после напыления тензорезисторов приводят к появлению неравномерного канала проводимости в последнем (рисунок 5).

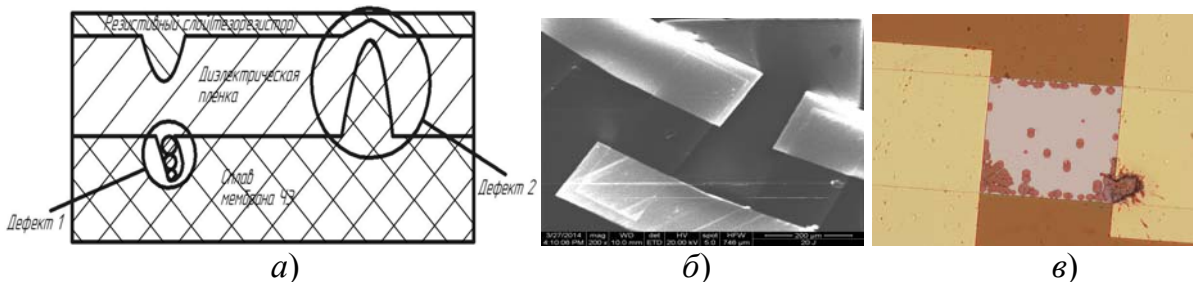


Рисунок 5 – Характерные дефекты подложки, проявляющиеся в тонкопленочной структуре, и выгорание ТР:  
 а – схематическое изображение; б – РЭМ-изображение; в – выгорание части ТР

Распределение температуры по длине тензорезистора определяется теплоотводом в подложку. Осаждение слоя SiO<sub>2</sub>, имеющего низкую теплопроводность, на ЧЭ ИТМДД значительно снижает теплопроводность структуры. Усиление теплоотвода от элементов сформированной схемы при повышенных электрических нагрузках обеспечено использованием SiC в качестве изолирующего слоя.

Пленки SiC с диэлектрическими свойствами получались магнетронным распылением в атмосфере аргона, в камере, предварительно откаченной до 10<sup>-8</sup> Па. Это позволило исключить влияние фоновых примесей из остаточной атмосферы (в первую очередь азота) на свойства получаемого материала и уменьшить влияние примесей на адгезию и остаточные

внутренние напряжения. Температура подложки варьировалась в пределах (150...350) °С. При подборе режимов подгонки ТР лазерным лучом на установке «МЛ 5-1» с изолирующим слоем SiC потребовались большая мощность и большее время воздействия, чем в случае пленки SiO.

При использовании балочных конструкций ЧЭ напряжения, вносимые на сварных операциях неразъемного соединения штока, приводят к скручиванию балки, изменению ее формы, разрушению сформированных пленок. В связи с этим возрастает нелинейность градуировочной характеристики ИМТДД.

При совместном магнетронном распылении мишеней SiC и Cr в едином вакуумном цикле получена керметная пленка, представляющая собой механическую смесь материалов, распыленных из мишеней (таблица 1).

Таблица 1 – Режимы получения тензорезистивного слоя

| Параметры распыления мишеней                                                                    | Рабочий газ | Давление рабочего газа, Торр | Температура подложки, °С | Скорость роста пленки, Å/с |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cr – 370 кВт; 87 мА</li> <li>• SiC – 610 Вт</li> </ul> | Аргон       | $1,02 \cdot 10^{-3}$         | 320                      | 0,42 Cr<br>1,97 SiC        |

Чувствительность ТР на основе композиции «Si–C–Cr» оценивалась на специальном измерительном модуле для измерения малых и сверхмалых давлений (рисунок 6).

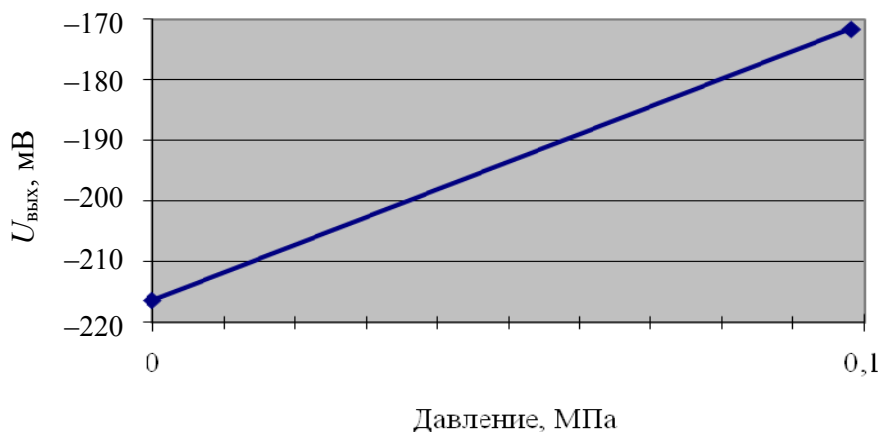


Рисунок 6 – Зависимость выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  от давления

Установлено, что выходной сигнал ЧЭ с ТР на основе композиции «Si–C–Cr» при воздействии давления в 1 кгс/см<sup>2</sup> составляет 43 мВ при  $U_{\text{пит}} = 27$  В. Для ТР балочных конструкций из сплавов Х20Н75Ю и П65ХС выходной сигнал не превышает (20...25) мВ.

Кинетика деградации ТР в значительной степени определяется процессами, которые активируются температурой.

Модель ЧЭ, определяемая уравнениями теплопереноса, характеризуется следующими граничными условиями (рисунок 7).

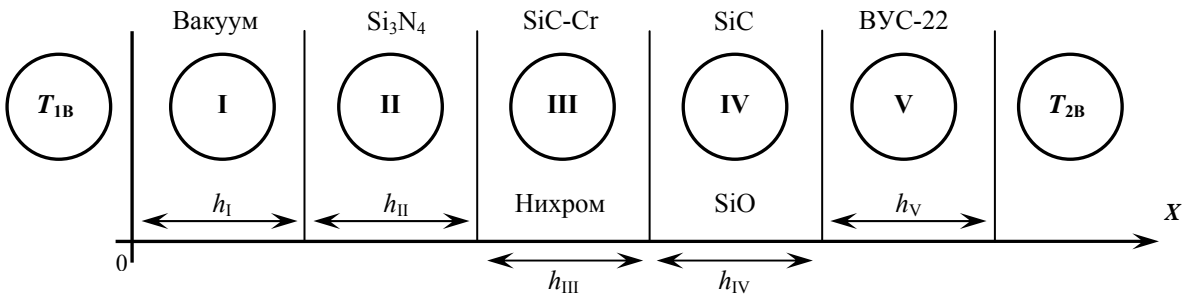


Рисунок 7 – Одномерная модель ЧЭ ИМТДД  
( $h_I \dots h_V$  – толщины I...V слоев)

Структура упрощенной математической модели представляет собой ЧЭ ИМТДД, состоящий из следующих компонентов:

- подложки из упругого сплава на базе материала ВУС-22 ( $h_V$ );
- диэлектриков SiO или SiC ( $h_{IV}$ );
- ТР на основе композиции «Si–C–Cr» или сплава X20H75Ю ( $h_{III}$ ) с пассивацией  $Si_3N_4$  ( $h_{II}$ );
- вакуумированной полости ( $h_I$ ).

Со стороны вакуумированной полости датчик подвергается воздействию окружающей среды при температуре  $T_{1B}$ , а со стороны мембраны – воздействию рабочей среды при температуре  $T_{2B}$ . Для твердотельных областей II...V выполняются следующие условия сопряжения решений:

$$\begin{aligned}
 T_{II} \Big|_{\Gamma_{II-III}} &= T_{III} \Big|_{\Gamma_{II-III}}, \quad \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{II-III}} = \lambda_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{II-III}}, \\
 T_{III} \Big|_{\Gamma_{III-IV}} &= T_{IV} \Big|_{\Gamma_{III-IV}}, \quad \lambda_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{III-IV}} = \lambda_{IV} \frac{\partial T_{IV}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{III-IV}}, \\
 T_{IV} \Big|_{\Gamma_{IV-V}} &= T_V \Big|_{\Gamma_{IV-V}}, \quad \lambda_{IV} \frac{\partial T_{IV}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{IV-V}} = \lambda_V \frac{\partial T_V}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{IV-V}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $T_i$  и  $\lambda_i$  ( $i = II, III, IV, V$ ) – локальные температуры и теплопроводности соответствующих областей.

В области I тепло переносится излучением (лучистый перенос) согласно закону Стефана–Больцмана. Для границы  $\Gamma_{I-II}$  с учетом влияния области с температурой  $T_{1B}$  будет справедливо выражение

$$-\lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{I-II}} = \sigma_0 \varepsilon_P (T_{II}^4 \Big|_{\Gamma_{I-II}} - T_{1B}^4), \tag{2}$$

где  $\varepsilon_P$  – приведенная степень черноты поверхностей  $\Gamma_{I-II}$  и  $\Gamma_{T_{1B}-I}$ ;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана–Больцмана.

Условие на границе  $\Gamma_{V-T_{2B}}$  описывается уравнением

$$-\lambda_V \frac{\partial T_V}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{V-T}} = \alpha_{2B} (T_V - T_{2B}), \quad (3)$$

где  $\alpha_{2B}$  – коэффициент теплоотдачи из области V в среду  $T_{2B}$ .

Область III является тензорезистивным слоем, по которому протекает ток, поэтому вследствие саморазогрева уравнение теплопроводности будет неоднородным:

$$c_{III} \rho_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial t} = \lambda_{III} \Delta T_{III} + q_{III}, \quad (4)$$

где  $\rho_{III}$  – плотность области III;  $c_{III}$  – удельная теплоемкость области III,  $q_{III} = \frac{j^2}{\gamma_{III}}$ ;  $\gamma_{III}$  – удельная электропроводимость области III;  $j$  – плотность тока.

В остальных областях (II, IV, V) однородные уравнения теплопроводности имеют следующий вид:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \Delta T_i, \quad i = II, IV, V, \quad (5)$$

где  $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ .

Решение для каждой области можно представить в следующем виде:

$$T(x, t) = \exp(\pm \beta t) f(x) + ax + b, \quad (6)$$

где  $f(x)$  – функция, удовлетворяющая внешним однородным граничным условиям и условиям сшивки на внутренних границах;  $\beta = g^2$ .

Первое слагаемое в (6) отвечает за переходные процессы в структуре и должно уменьшаться при  $t \rightarrow +\infty$  (т.е. либо  $+\beta > 0$ , либо  $-\beta > 0$ ).

Для области III, кроме описанных выше слагаемых, в решение также входит и слагаемое от неоднородной правой части  $q_{III}$ , называемое частным решением:

$$T_q(x) = \frac{q_{III}}{2\lambda_{III}} (x - (h_I + h_{II}))(x - (h_I + h_{II} + h_{III})). \quad (7)$$

Граничные условия в областях II...V дают следующие выражения для коэффициентов:

– на внутренних границах:

$$\begin{aligned} a_{II}(h_I + h_{II}) + b_{II} &= a_{III}(h_I + h_{II}) + b_{III}; \quad \lambda_{II} a_{II} = \lambda_{III} (a_{III} + T_{qx}^{\infty}); \\ a_{III}(h_I + h_{II} + h_{III}) + b_{III} &= a_{IV}(h_I + h_{II} + h_{III}) + b_{IV}; \quad \lambda_{III} (a_{III} - T_{qx}^{\infty}) = \lambda_{IV} a_{IV}; \\ a_{IV}(h_I + h_{II} + h_{III} + h_{IV}) + b_{IV} &= a_V (h_I + h_{II} + h_{III} + h_{IV}) + b_V; \\ \lambda_{IV} a_{IV} &= \lambda_V a_V; \end{aligned} \quad (8)$$

– на внешних границах:

$$-\lambda_{II}a_{II} = \sigma_0\varepsilon_P \left( (a_{II}h_I + b_I)^4 - T_{1B}^4 \right);$$

$$-\lambda_V a_V = \alpha_{2B} (a_V (h_I + h_{II} + h_{III} + h_{IV} + h_V) + b_V - T_{2B}).$$

Данные уравнения сводятся к системе линейных алгебраических уравнений с нелинейной правой частью:

$$\mathbf{Az} = \mathbf{y} + \mathbf{f}(\mathbf{z}),$$

где  $\mathbf{A}$  – матричный оператор вида:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} (h_I + h_{II}) & -(h_I + h_{II}) & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & (h_I + h_{II} + h_{III}) & -(h_I + h_{II} + h_{III}) & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & (h_I + h_{II} + h_{III} + h_{IV}) & -(h_I + h_{II} + h_{III} + h_{IV}) & 0 & 0 & 1 & -1 \\ \lambda_{II} & -\lambda_{III} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{III} & -\lambda_{IV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{IV} & -\lambda_V & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\alpha_{2B}(h_I + \dots + h_V) + \lambda_V) & 0 & 0 & 0 & \alpha_{2B} \\ -\lambda_{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Получившаяся система уравнений реализует метод последовательных приближений:

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{y} + \mathbf{f}(\mathbf{z})) = \mathbf{F}(\mathbf{z}). \quad (10)$$

Результаты решения уравнений в системе MathCAD при плотности тока  $j = 5 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$  показали, что ЧЭ с диэлектрическим слоем SiO и тензорезисторами из сплава X20H75Ю разогревается на 130 °C больше, чем ЧЭ с изоляцией из SiC и тензорезисторами на основе композиции «Si–C–Cr» (рисунок 8). Для ЧЭ с новыми функциональными слоями также характерно снижение температуры в вакуумированной полости ( $h_I$ ), что свидетельствует об усиленном теплоотводе в окружающую среду благодаря SiC.

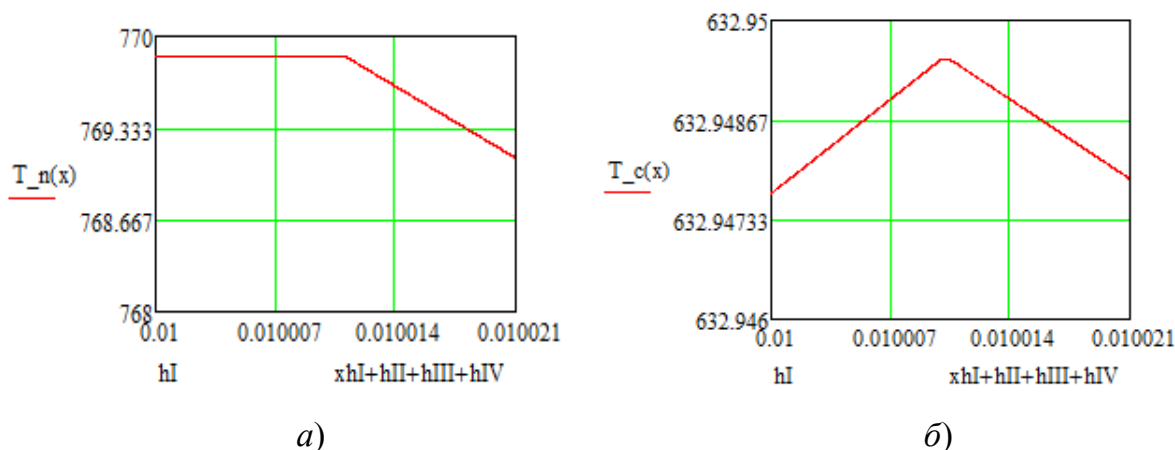


Рисунок 8 – Распределение температуры в структуре ЧЭ:  
 а – ЧЭ базовой конструкции; б – ЧЭ с изолирующим слоем SiC и TP  
 на основе композиции «Si–C–Cr»

В четвертой главе представлены результаты исследований температурно-временной стабильности параметров датчиков, изготовленных с применением модифицированной технологии термостабилизации.

Дрейф сопротивлений ТР после формирования структуры и ее термостабилизации на всех этапах температурных испытаний ЧЭ на воздухе при 250 °С подтвердил установленную стабильность характеристик (рисунок 9). Изменения сопротивлений ТР составили десятые доли ома (результаты усреднялись по 9 ЧЭ).

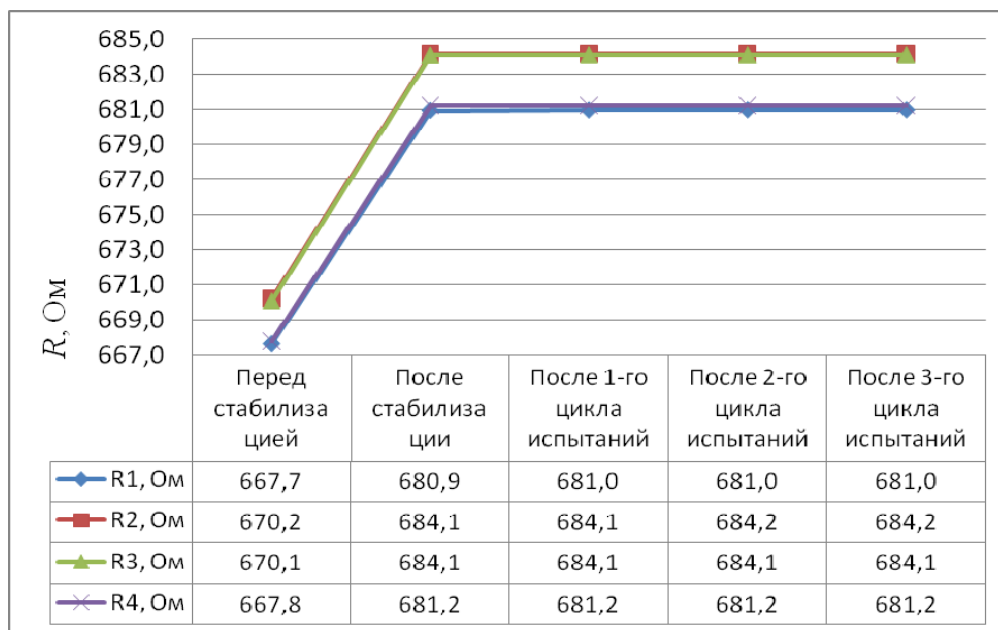


Рисунок 9 – Диаграмма изменений сопротивлений тензорезисторов

Выполнена настройка ЧЭ ИМТДД по температурной компенсации начального выходного сигнала. Результаты измерения сопротивлений тензорезисторов в рабочем диапазоне температур представлены на рисунке 10.

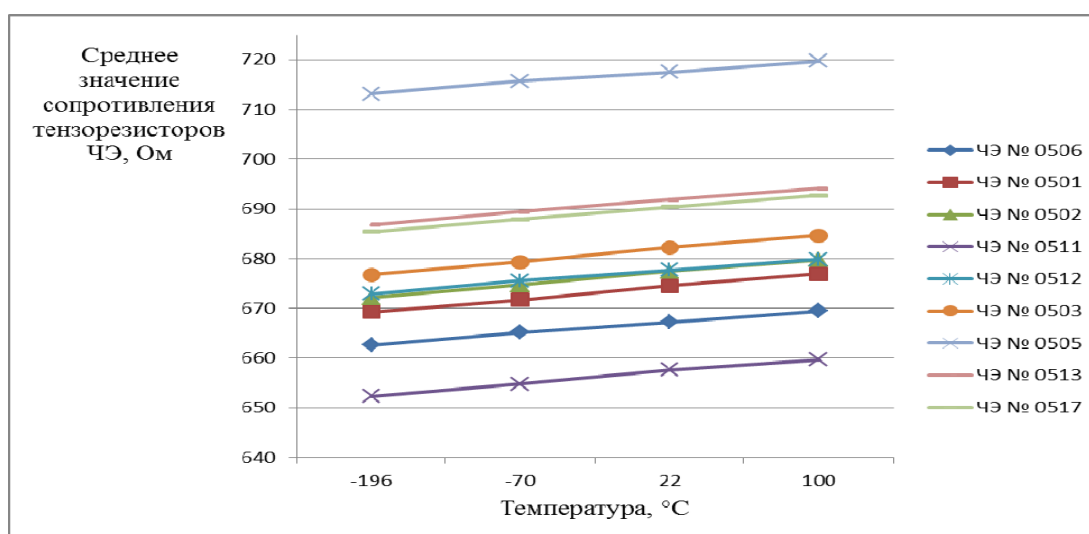


Рисунок 10 – Сопротивления тензорезисторов



ТКС и  $\Delta$ ТКС ТР (таблица 2) определяются по выражениям:

$$\text{ТКС} = \frac{R_{100^\circ\text{C}} - R_{-196^\circ\text{C}}}{R_{22^\circ\text{C}} \cdot \Delta T} \cdot 100\%, \quad (11)$$

$$\Delta\text{ТКС} = (\alpha_{R_1} + \alpha_{R_3}) - (\alpha_{R_2} + \alpha_{R_4}). \quad (12)$$

Таблица 2 – Значения ТКС и  $\Delta$ ТКС тензорезисторов

| Номер ЧЭ | $R_1$<br>ТКС · 10 <sup>5</sup> ,<br>1/°C | $R_2$<br>ТКС · 10 <sup>5</sup> ,<br>1/°C | $R_3$<br>ТКС · 10 <sup>5</sup> ,<br>1/°C | $R_4$<br>ТКС · 10 <sup>5</sup> ,<br>1/°C | $\Delta$ ТКС · 10 <sup>5</sup> ,<br>1/°C |
|----------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 0505     | 3,1                                      | 3,3                                      | 3,2                                      | 2,9                                      | -1,3                                     |
| 0512     | 3,6                                      | 3,4                                      | 3,5                                      | 3,5                                      | -1,5                                     |
| 0513     | 3,5                                      | 3,6                                      | 3,7                                      | 3,5                                      | -0,5                                     |
| 0501     | 4,0                                      | 3,9                                      | 3,9                                      | 3,7                                      | -1,9                                     |
| 0511     | 3,9                                      | 3,7                                      | 3,8                                      | 3,8                                      | -1,6                                     |
| 0506     | 3,6                                      | 3,5                                      | 3,5                                      | 3,5                                      | -0,9                                     |
| 0502     | 3,8                                      | 3,8                                      | 4,0                                      | 3,8                                      | -1,4                                     |
| 0503     | 4,0                                      | 3,9                                      | 4,0                                      | 3,9                                      | -2,1                                     |
| 0517     | 3,6                                      | 3,6                                      | 3,6                                      | 3,6                                      | 1,0                                      |

Из таблицы 2 видно, что ТКС ТР имеют близкие значения внутри ЧЭ. Это подтверждается разностью значений  $\Delta$ ТКС, которая у всех элементов не превышает  $2 \cdot 10^{-6}$  1/°C. Правомерность этого утверждения подтверждается также линейной зависимостью сопротивлений ТР от температуры и одинаковым углом наклона кривых (см. рисунок 10).

Были проведены температурные испытания ЧЭ, позволившие определить значение коэффициента влияния температуры на начальный выходной сигнал  $Q_{1t}$  и значение термокомпенсационного сопротивления резистора  $R_{\beta}$  (таблица 3).

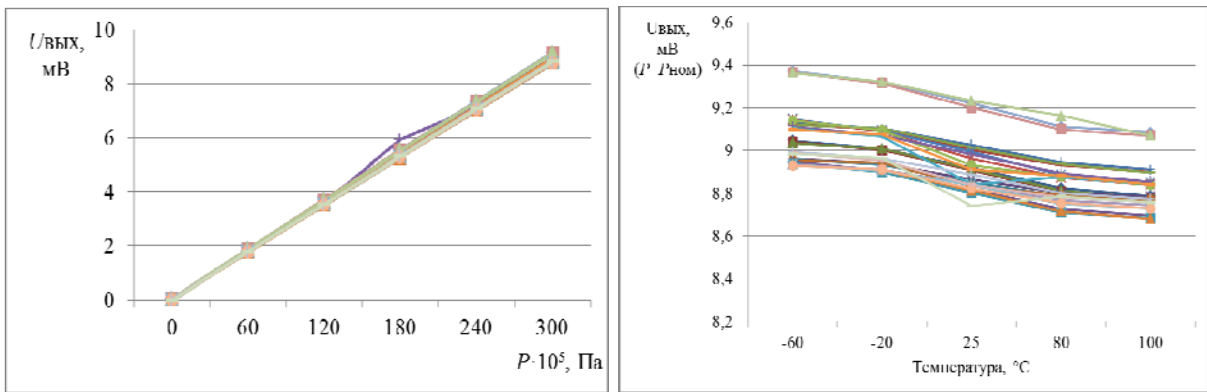
Таблица 3 – Значения  $R_{\beta}$  и  $Q_{1t}$

| Номер ЧЭ         | 0505    | 0512    | 0513   | 0501  | 0511   | 0506   | 0502    | 0503    | 0517    |
|------------------|---------|---------|--------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $Q_{1t}$         | -0,0065 | -0,0065 | 0,0008 | 0,003 | -0,032 | -0,032 | -0,0006 | -0,0026 | -0,0011 |
| $R_{\beta}$ , Ом | 1,56    | 1,62    | 1,68   | 1,64  | 1,65   | 1,59   | 2,67    | 1,74    | 1,66    |

Полученные значения  $Q_{1t}$  иллюстрируют минимальное влияние температуры на выходные характеристики ЧЭ.

Градуировочная характеристика изготовленных датчиков и приведенное значение коэффициента функции влияния температуры на  $U_{\text{вых}}$  представлены на рисунке 11.

На заключительном этапе работы исследованы временная стабильность и надежность датчиков, созданных по модифицированной технологии термостабилизации.



а)

б)

Рисунок 11 – Зависимости  $U_{\text{вых}}$  :  
 а – от давления; б – от температуры

Совокупность результатов этих исследований свидетельствует о том, что срок службы датчиков в номинальных условиях может составлять до 15 лет. Испытания на воздействие влияющих факторов проводились ускоренно, изменения нормированного  $U_0$  представлены на рисунке 12.

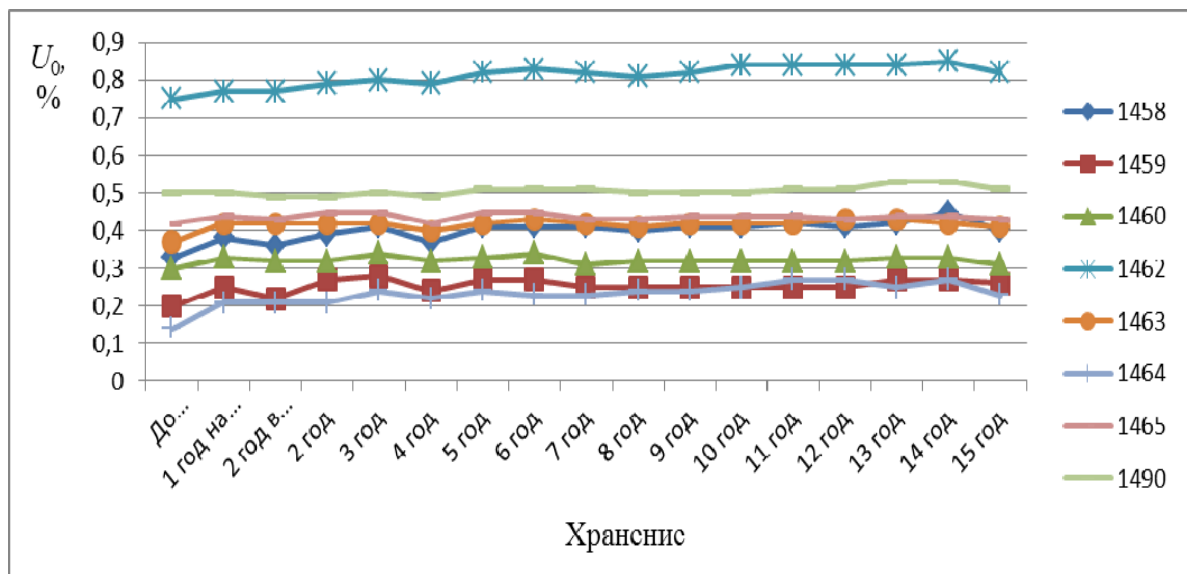


Рисунок 12 – Нормированный  $U_0$  при испытаниях

Проведенные исследования и анализ метрологических и эксплуатационных характеристик опытных образцов ЧЭ ИМТДД, созданных на базе модифицированных режимов термостабилизации, свидетельствуют о том, что датчики выдержали испытания и их контролируемые параметры полностью соответствуют требуемым значениям. Максимальное изменение  $U_0$  за период проведения испытаний датчиков не превысило 0,13 % (ЧЭ № 0511).

Таким образом, разработанная технология термостабилизации позволяет получать равновесные тонкопленочные гетерогенные структуры ЧЭ

ИМТДД, что является необходимым условием для создания датчиков давлений с повышенной температурно-временной стабильностью, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации.

**В заключении** сформулированы наиболее важные результаты исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что в изменении свойств ТР из сплава Х20Н75Ю доминируют деградация переходных сопротивлений для ТР из многокомпонентных звеньев и окисление для полосковых и П-образных ТР. У сплава П65ХС преобладают окисление при температуре ниже 340 °С и необратимые изменения значений ТКС и сопротивлений при температуре выше 340 °С за счет эффекта спекания.

2. Разработана модифицированная технология термостабилизации тонкопленочных гетероструктур ЧЭ ИМТДД на основе ТР из сплава Х20Н75Ю, основанная на трехкратном воздействии температуры в вакууме с выдержкой и отжиге на воздухе.

3. Разработана технология высокоэнергетической обработки ТР из сплава П65ХС, основанная на кратковременном прямом воздействии излучения в высоком вакууме с разогревом верхних слоев до (550...700) °С. Она уменьшает барьерную проводимость за счет формирования «монолитных» соединений в структуре сплава и увеличивает управляемость ТКС и стойкость к термоударам.

4. Созданы термостабильные высокочувствительные тензорезисторы на основе композиции «Si–C–Cr» и изолирующего слоя SiC на подложке из упругого сплава по оптимизированным режимам магнетронного распыления.

Кроме того, можно дополнительно выделить следующие результаты работы, перспективные для практического применения:

– использование режимов модифицированной технологии термостабилизации в три раза уменьшает дрейф сопротивлений ТР во времени и при воздействии температуры;

– высокоэнергетическая обработка ЧЭ с ТР из сплава П65ХС с сопротивлениями (3...3,5) кОм уменьшает сопротивление на (350...400) Ом и увеличивает ТКС более чем в 1,5 раза;

–  $U_{\text{вых}}$  ЧЭ мембранного типа с ТР на основе композиции «Si–C–Cr» при воздействии одного килограмма силы составляет 43 мВ при  $U_{\text{пит}} = 27$  В, что в два-три раза превышает нормированные значения металлопленочных ТР;

– использование изолирующего слоя SiC в паре с ТР на основе композиции «Si–C–Cr» уменьшает разогрев всей структуры при повышенных токовых нагрузках более чем на 100 °С.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин, В. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету / В. Лучинин, Ю. Таиров // Современная электроника. – 2009. – № 7. – С. 12–15.
2. Корляков, А. В. Датчик давления на основе SiC для экстремальных условий эксплуатации / А. В. Корляков, В. В. Костромин, В. В. Лучинин // Известия ЛЭТИ. Перспективные материалы и приборы для оптоэлектроники и сенсорики : сб. науч. тр. – 1998. – Вып. 517. – С. 115–119.
3. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. – М. : Физматлит, 2006. – С. 552.
4. Волохов, И. В. Технологические методики повышения стабильности параметров тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления : дис. ... канд. техн. наук / Волохов И. В. – Пенза, 2008. – 137 с.
5. Быкова, Л. Е. Твердофазный синтез в двухслойных тонких металлических пленках, связанный с мартенситными превращениями в продуктах реакции : дис. ... канд. техн. наук / Быкова Л. Е. – Киев, 2005. – 105 с.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Охранные документы интеллектуальной собственности

1. Пат. 2566538 Российская Федерация, МПК G 01 L 7/02. Способ стабилизации упругого элемента датчика давления с тензорезисторами / Гурин С. А., Песков Е. В., Ворожбитов А. И., Чебурахин И. Н. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ». – № 2014129534 ; заявл. 17.07.2014 ; опубл. 29.09.2015, Бюл. № 30.
2. Пат. 2568812 Российская Федерация, МПК H 01 C 17/00. Способ изготовления тонкопленочных резисторов / Гурин С. А., Песков Е. В., Ворожбитов А. И., Чебурахин И. Н. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ». – № 2014134247 ; заявл. 20.08.2014 ; опубл. 22.10.2015, Бюл. № 32.
3. Пат. 2555190 Российская Федерация, МПК G 01 L 9/04. Полупроводниковый преобразователь давления / Баринов И. Н., Волков В. А., Гурин С. А., Тареева Ю. А., Евдокимов С. П. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ». – № 2014110803 ; заявл. 20.03.2014 ; опубл. 04.06.2015, Бюл. № 19.
4. Пат. 2572051 Российская Федерация, МПК H 01 L 41/22. Способ изготовления интегрального микромеханического реле / Гурин С. А., Вергазов И. Р., Волков В. А. ; заявитель и патентообладатель АО «НИИФИ». – № 2014154615 ; заявл. 31.12.2014 ; опубл. 01.12.2015, Бюл. № 36.

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Гурин, С. А. Особенности технологии получения структуры «нитрид алюминия на карбиде кремния» / С. А. Гурин, Р. М. Печерская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 46–52.
2. Гурин, С. А. Методика термостабилизации тонкопленочных гетерогенных структур / С. А. Гурин, И. Р. Вергазов, Е. В. Песков // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 11. – С. 12–16.
3. Гурин, С. А. Технологические методы повышения стабильности тонкопленочных датчиков давления / С. А. Гурин // Приборы. – 2015. – № 2. – С. 36–42.

4. Гурин, С. А. Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы / С. А. Гурин, И. Н. Барин, В. А. Волков, Е. В. Кучумов, С. П. Евдокимов // Измерительная техника. – 2015. – № 6. – С. 49.

5. Гурин, С. А. Топологические решения чувствительного элемента тонкопленочного датчика давления / С. А. Гурин, Р. М. Печерская, В. А. Петрин // Приборы. – 2015. – № 9. – С. 36–42.

6. Гурин, С. А. Исследование свойств высокочувствительных термостабильных тонкопленочных тензорезисторов для интегральных датчиков давления / С. А. Гурин, И. В. Волохов, И. Р. Вергазов // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 55–60.

#### Публикации в других изданиях

1. Гурин, С. А. Получение диэлектрических слоев нитрида алюминия методом магнетронного распыления / С. А. Гурин, А. В. Хошев // Университетское образование (МКУО-2013) : сб. ст. XVII Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 70-летию образования университета (г. Пенза, 11–12 апреля 2013 г.) / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Вып. 17. – С. 260–261.

2. Гурин, С. А. Основы технологии формирования пьезоэлектрических балок вакуумными методами на механически прочных подложках для высокоэффективных МЭМС/НЭМС приборов. Расчет изгиба балки на основе пьезокерамики, полученной магнетронным методом распыления / С. А. Гурин // Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, наноэлектроники : сб. ст. IV Науч.-техн. конф. (г. Пенза, 4–6 июня 2013 г.) / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ: Приволжский дом знаний, 2013. – С. 56.

3. Гурин, С. А. Технология получения микроантилеверной балки на основе интеграции гетероструктуры из смарт-материала / С. А. Гурин, А. Г. Дмитриенко, Р. М. Печерская, И. Р. Вергазов // Материалы и технологии гибкой электроники : тез. докл. 16-й науч. молодежной школы с междунар. участием. – СПб., 2013. – С. 48.

4. Гурин, С. А. Гетероструктуры интегрированных слоев углеродных материалов и пьезокерамики для датчиковой аппаратуры / С. А. Гурин, Р. М. Печерская // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. И. В. Бойкова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – С. 198–203.

5. Гурин, С. А. Применение поликристаллического алмаза для разработки высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / С. А. Гурин, И. Н. Барин, В. А. Волков, С. П. Евдокимов // Университетское образование (МКУО-2013) : сб. ст. XVII Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 70-летию образования университета (г. Пенза, 11–12 апреля 2013 г.) / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Вып. 18. – С. 534–535.

6. Гурин, С. А. Моделирование схемы температурной компенсации высокотемпературного полупроводникового датчика давления / С. А. Гурин, И. Н. Барин, В. А. Волков, С. П. Евдокимов, Д. А. Кудрявцева // Университетское образование (МКУО-2013) : сб. ст. XVII Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 70-летию образования университета (г. Пенза, 11–12 апреля 2013 г.) / под ред.

В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Вып. 18. – С. 537–539.

7. Гурин, С. А. Конструктивно-технологические решения по снижению дрейфа нуля полупроводниковых датчиков абсолютного давления / С. А. Гурин, И. Н. Баринов, В. А. Волков, С. П. Евдокимов, А. В. Федулов // Университетское образование (МКУО-2013) : сб. ст. XVII Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 70-летию образования университета (г. Пенза, 11–12 апреля 2013 г.) / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Вып. 18. – С. 535–537.

8. Гурин, С. А. Перспективы применения адаптивных смарт-материалов и структур для решения задач контроля и управления / С. А. Гурин, И. Н. Баринов, В. А. Волков, Д. А. Кудрявцева // Университетское образование (МКУО-2014) : сб. ст. XVII Междунар. науч.-метод. конф. / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – Вып. 18. – С. 539–541.

9. Гурин, С. А. Низкоразмерные структуры нитрид алюминия на карбиде кремния: технология, применение / С. А. Гурин // Актуальные проблемы науки и образования : сб. ст. XXV Науч.-практ. конф. / под ред. И. И. Артемова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 289–292.

10. Гурин, С. А. Применение химического осаждения из газовой фазы для создания чувствительных элементов датчиков на основе поликристаллического алмаза / С. А. Гурин, В. А. Волков, Н. В. Волкова // Актуальные проблемы химического образования : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 123–124.

11. Гурин, С. А. Формирование тонкопленочных гетерогенных МЭМС на основе тонких пленок сегнетоэлектриков и полупроводников / С. А. Гурин, Р. М. Печерская // Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики сегнетоэлектриков» : тез. докл. XX Всерос. конф. по физике сегнетоэлектриков. – Красноярск, 2014. – С. 339–340.

12. Гурин, С. А. Технология получения высокочувствительных термостабильных тонкопленочных тензорезисторов / С. А. Гурин, Р. М. Печерская // Материалы и технологии гибкой электроники : тез. докл. XVIII Науч. молодежной школы с междунар. участием. – СПб., 2015. – С. 30–31.

*Научное издание*

ГУРИН Сергей Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

Редактор *Н. А. Сидельникова*  
Технический редактор *Н. В. Иванова*  
Компьютерная верстка *Н. В. Ивановой*

Подписано в печать 06.10.2016. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 009075. Тираж 100.

---

Издательство ПГУ.  
440026, Пенза, Красная, 40.  
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru

