

На правах рукописи



ПАУТКИН Валерий Евгеньевич

**Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных
чувствительных элементов микромеханических акселерометров**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ПЕНЗА-2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет» и Открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт физических измерений», г.Пенза

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Аверин Игорь Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет», профессор кафедры информационных технологий и систем (ИТС)

Михайлов Петр Григорьевич

Кандидат технических наук, ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», доцент кафедры конструирования и технологии электронных и лазерных средств

Филонов Олег Михайлович

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук» (ИПТМ РАН), 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.6.

Защита состоится «07» апреля 2015 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного Совета Д. 212.233.01 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» и на сайте www.guap.ru

Автореферат разослан « » 201_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.233.01

доктор технических наук, профессор



Шелест Д.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Отличительной особенностью развития науки и техники на рубеже XX-XXI века является массовое применение контрольно-управляющих устройств на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) для получения достоверной информации о протекающих процессах. При отработке и штатной эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) широко применяются пьезорезистивные акселерометры, имеющие широкий частотный и динамический диапазон измерений, малые габариты, высокую ударную прочность. Их основное применение – контроль высокочастотной вибрации, измерение ударных процессов однократного и многократного воздействий.

Существенный вклад в развитие теоретической и методологической базы проектирования микромеханических датчиков, в том числе акселерометров, внесли научные отечественные и зарубежные школы, руководимые учеными д.т.н. Ваганов В.И., д.т.н. Распопов В.Я., д.т.н. Папко А.А., д.т.н. Тимошенко С.П., д.т.н. Гридчин В.А., *R.Jackson, J. Fraden, A. Kurtz* и др. В Российской Федерации разработку и изготовление микромеханических акселерометров ведут научные коллективы ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений» (г. Пенза) и ОАО «Темп-Авиа» (г. Арзамас).

Существующие в настоящее время микромеханические пьезорезистивные акселерометры не удовлетворяют современным требованиям по работоспособности в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов, в частности при повышенной температуре. Известные пьезорезистивные акселерометры имеют в своем составе кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы (ЧЭ) на основе изолирующего *p-n*-перехода, что ограничивает температурный диапазон работы прибора до 85 °С. В тоже время, необходимы измерения ускорения при отладке изделий РКТ при температурах более 100°С, что возможно с использованием пьезорезистивных акселерометров. Таким образом, разработка технологии кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°С является актуальной задачей, отвечающей потребностям РКТ и общепромышленного применения и соответствующей приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и Перечню критических технологий Российской Федерации, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899, п.14 «Технологии наноустройств и микросистемной техники».

Цель работы: расширение температурного диапазона измерений, снижение начального выходного сигнала при воздействии температуры и температурной погрешности измерений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

Задачи диссертационной работы:

1. Анализ методов и средств формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

2. Разработка аналитической модели управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на этапе технологического процесса и параметрами микромеханического акселерометра.

3. Разработка технологической модели кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, учитывающей влияние температуры на параметры чувствительных элементов.

4. Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений и пониженным влиянием воздействующей температуры.

5. Разработка методик и проведение исследований выходных параметров кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов при различных температурах и ускорениях для подтверждения работоспособности элементов при заданных условиях.

Объект разработки: технологические процессы формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C , сформированных на основе МЭМС-технологий.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы современные автоматизированные методы исследования выходных параметров чувствительных элементов, математическое моделирование распределений деформаций в кремниевом чувствительном элементе, численные и аналитические методы описания электрофизических свойств кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов, методы механики сплошных сред для анализа оптимальных конструктивно-технологических решений, статистические методы обработки экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана оригинальная технология формирования пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C , в отличие от известных технологий формирования

микромеханических акселерометров пьезорезисторы измерительной мостовой схемы формируются в виде пленки поликристаллического кремния на слое диоксида кремния, исключая обратно-смещенные *p-n* – переходы, что позволяет расширить температурный диапазон измерений с 85 до более 100⁰С и снизить начальный выходной сигнал при воздействии повышенной температуры с ±15 мВ до ±4 мВ, а температурную погрешность измерений с ±1,5 % до ±0,5% (пп. 3,5 паспорта специальности).

2. Разработана оригинальная аналитическая модель управления электрическими параметрами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на этапе технологического процесса за счет выбора технологических режимов формирования, в отличие от известных учитывающая влияние температуры окружающей среды на выходные параметры чувствительного элемента, что обеспечивает создание кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С (пп. 1,3 паспорта специальности).

3. На основе разработанной аналитической модели управления впервые установлены закономерности между технологическими режимами формирования и выходными параметрами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С, учитывающие технологические режимы получения и воздействие температуры окружающей среды на выходные параметры чувствительного элемента, что обеспечивает развитие научных основ создания новых технологий информационно-измерительных приборов нового поколения (п. 1 паспорта специальности).

4. Разработана технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, учитывающая влияние температуры на параметры чувствительных элементов, что позволило разработать технологию кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С (пп. 3,5 паспорта специальности).

Практическая ценность работы:

1. Разработана оригинальная технология и впервые изготовлены кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы микромеханических акселерометров с расширенным диапазоном рабочих температур более 100⁰С и пониженным начальным выходным сигналом более чем в 3 раза (с ±15 мВ до ±4 мВ) при воздействии температуры и температурной погрешностью измерений меньшей в 3 раза (с ±1,5 % до ±0,5%) по сравнению с аналогами.

2. В рамках технологической модели разработана топология кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С, обеспечивающая увеличение чувствительности на 10% по сравнению с существующими аналогами.

3. Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на предприятии ОАО "НИИФИ" (г. Пенза) при производстве кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, что подтверждается соответствующими документами.

4. Результаты диссертационной работы используются в конструктивно-технологических решениях приборов, разрабатываемых в рамках НИОКР в интересах Роскосмоса.

Апробация работы.

Отдельные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и межвузовских научно-практических и научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: «Датчики и системы» (Пенза, 2006, 2012; п.Абрау-Дюрсо, 2011), «Микротехнологии в космосе» (Москва, 2010), «Информационно-управляющие и измерительные системы – 2007» (г. Королев, Московская область, 2007), «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог, 2008), «Надежность и качество» (Пенза, 2004).

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 20 статьях, среди которых 4 – в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК. Новизна технических решений подтверждена 4 патентами РФ на изобретения и 4 свидетельством на топологию интегральной микросхемы.

Личный вклад автора.

Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.11.14 – Технология приборостроения: п. 1 – Разработка научных основ технологии приборостроения при создании нового поколения чувствительных элементов микромеханических акселерометров; п.3 – Разработка и исследование методов и средств повышения надежности микромеханических акселерометров; п.5 – Разработка и исследование методов организации технологической

подготовки приборостроительного производства, удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка литературы и содержит 176 страниц машинописного текста: иллюстраций - 74 (рисунки, схемы, графики), таблиц - 12, список литературы - 139 наименований. Приложения представлены на 18 страницах.

На защиту выносятся:

1. Технология формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С, включающая формирование оригинальной измерительной схемы в виде пленочных пьезорезисторов из поликристаллического кремния, осажденных на слое диоксида кремния, что обеспечивает расширение температурного диапазона измерений более 100⁰С и снижение температурной погрешности измерений в 3 раза.

2. Аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров на этапе технологического процесса за счет выбора технологических режимов формирования.

3. Технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, учитывающая влияние температуры на параметры чувствительных элементов.

4. Технология формирования пьезорезисторов измерительной мостовой схемы, учитывающая дестабилизирующее действие окружающих температур, и основанная на зависимости между выходными параметрами чувствительных элементов и технологическими режимами их получения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, на основе анализа методов и конструктивно-технологических решений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров сформулированы цель, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию современного состояния технологии формирования чувствительных элементов (ЧЭ) микромеханических акселерометров, проведен обзор конструктивно-технологических решений формирования ЧЭ, сделан сравнительный анализ их характеристик. Рассмотрены отечественные и зарубежные аналоги и выявлены преимущества и недостатки чувствительных элементов микромеханических

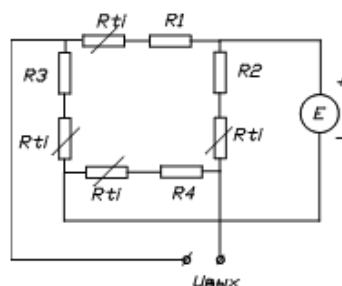
акселерометров с точки зрения технологичности формирования. Проанализированы технологические процессы формирования пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, конструкции исполнения и характеристики ЧЭ. В результате анализа выбраны для исследования чувствительные элементы микромеханических акселерометров пьезорезистивного типа из поликристаллического кремния.

Во второй главе представлено обоснование и выбор конструктивно-технологических решений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на основе разработанной аналитической модели управления электрическими параметрами чувствительных элементов, учитывающей влияние температуры окружающей среды на выходные параметры ЧЭ.

Существующие модели кремниевых пьезорезистивных ЧЭ микромеханических акселерометров не отражают в явном виде влияние на параметры выходного сигнала внешних факторов, таких как температура. Кроме того, в литературе встречаются неоднозначные зависимости, связывающие технологические режимы формирования чувствительных элементов и их выходные характеристики, такие как начальный выходной сигнал и чувствительность.

При протекании электрического тока через измерительную мостовую схему из пьезорезисторов происходит их саморазогрев, что приводит к появлению дополнительных носителей заряда, как в области кремниевой подложки, так и в пьезорезисторах. Как следствие, увеличиваются токи утечки, которые вызывают рост погрешности измерений. Кроме того, увеличивается емкость обратно-смещенных *p-n*-переходов, что также увеличивает токи утечки.

Для учета влияния технологических режимов получения и температурных воздействий на параметры чувствительных элементов на основе пьезорезисторов разработана аналитическая модель управления электрическими свойствами ЧЭ, в рамках которой эквивалентная мостовая схема ЧЭ имеет вид (рисунок 1).



R_{it} – сопротивление пьезорезисторов, вызванное саморазогревом

Рисунок 1 – Эквивалентная мостовая схема ЧЭ при воздействии температур

Электрические свойства чувствительных элементов на основе пьезорезисторов, в основном, определяются температурами осаждения поликристаллической пленки $T_{\text{осаж}}$ и отжига кристалла $T_{\text{отж}}$, которые в процессе исследований задавались в следующих диапазонах:

$$T_{\text{осаж}}=580-650^{\circ}\text{C}; T_{\text{отж}}=870-1060^{\circ}\text{C}.$$

На основе литературных источников выбраны возможные режимы осаждения и отжига поликристаллического кремния.

Обработка результатов экспериментов статистическими методами позволила представить в аналитическом виде зависимость сопротивления пьезорезисторов от технологических параметров их получения:

$$R_i(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}) = (A + BT_{\text{осаж}}) \exp[(A_1 + B_1 T_{\text{осаж}})T_{\text{отж}}] + (A_2 + B_2 T_{\text{осаж}}), \quad (1)$$

где A, A_1, A_2, B, B_1 и B_2 – эмпирические коэффициенты, найденные из условия максимального совпадения экспериментальных и рассчитанных значений; $A=1,599 \cdot 10^5$ Ом; $A_1=-2,99 \cdot 10^{-5}$ ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$; $A_2= 6,76$ Ом; $B= -9,467 \cdot 10^5$ (Ом/ $^{\circ}\text{C}$); $B_1=7,71 \cdot 10^{-3}$ ($^{\circ}\text{C}$) $^{-2}$; $B_2=- 2,182 \cdot 10^3$ (Ом/ $^{\circ}\text{C}$).

Пьезорезисторы чувствительных элементов акселерометров включаются в измерительную мостовую схему, где сопротивление схемы равно сопротивлению единичного пьезорезистора при равенстве значений сопротивлений, входящих в схему, в отсутствие ускорения: $R_m = R_i$, где R_m – сопротивление измерительной мостовой схемы.

При разработке технологии формирования микромеханических акселерометров, работающих при температурах более 100°C , необходимо учитывать изменения сопротивления чувствительных элементов на основе пьезорезисторов ΔR_i и контактных площадок при нагревании $\Delta R_{\text{мс}}$. Температурная зависимость мостовой схемы имеет вид:

$$R_m(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}}) = [R_i(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}) + \Delta R_i(T_{\text{изм}})] + \Delta R_{\text{мс}}(T_{\text{изм}}) \quad (2)$$

В рамках разработанной аналитической модели управления электрическими свойствами ЧЭ установлена корреляция между параметрами пьезорезисторов измерительной мостовой схемы, технологическими режимами их получения и температурой измерения, которую иллюстрируют рисунки 2-3.

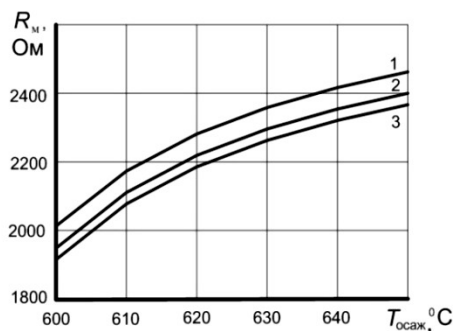
С учетом (1) выражение для расчета начального выходного сигнала измерительной мостовой схемы запишется в следующем виде:

$$U_{\text{вых}} = ((A + BT_{\text{осаж}}) \exp^{((A_1 + B_1 T_{\text{осаж}})T_{\text{отж}})} + (A_2 + B_2 T_{\text{осаж}}) + \Delta R_{\text{мс}}) \cdot I, \quad (3)$$

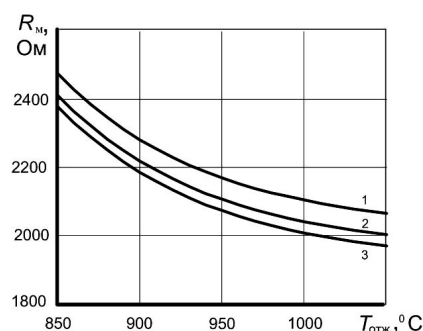
где I – ток через измерительную схему.

Установленные зависимости положены в основу технологии формирования ЧЭ, где управление свойствами материала пьезорезисторов осуществляется посредством

контролируемого изменения технологических режимов: температур осаждения и отжига пленки поликристаллического кремния.



1 – $T_{изм} = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{изм} = 50^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{изм} = 120^{\circ}\text{C}$
 Рисунок 2- Зависимость сопротивления мостовой схемы от температуры осаждения пьезорезисторов, отожженных при $T_{отж}=1000^{\circ}\text{C}$, для различных температур измерения



1 – $T_{изм} = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{изм} = 50^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{изм} = 120^{\circ}\text{C}$
 Рисунок 3 - Зависимость сопротивления мостовой схемы от температуры отжига пьезорезисторов, осажденных при $T_{осаж}=620^{\circ}\text{C}$, для различных температур измерения

В рамках разработанной модели получено выражение для статической чувствительности микромеханических акселерометров, учитывающее параметры кристалла и технологические режимы их получения.

Статическую чувствительность микромеханического акселерометра можно выразить как:

$$S = \frac{\varepsilon R}{g} \cdot Um$$

где εR - рабочая деформация пьезорезисторов, Um – напряжение мостовой схемы, g – ускорение свободного падения.

Рабочую деформацию пьезорезисторов представим в виде:

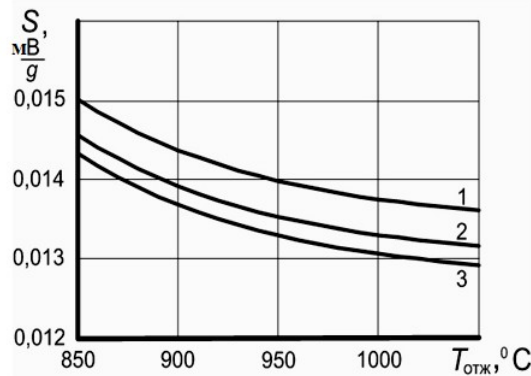
$$\varepsilon R = \frac{6 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

где l, b, h - длина, ширина, высота упругой перемычки (профиля кристалла), P – усилие, прикладываемое к подвижной массе при ускорении свободного падения. Выражая значение P через параметры подвижной массы и напряжение на мосте через ток и сопротивление мостовой схемы, запишем выражение для статической чувствительности микромеханических акселерометров

$$S(T_{осаж}, T_{отж}, T_{изм}, g) = \frac{6 \cdot L_i \cdot B_i \cdot H_i \cdot \rho \cdot 1}{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot g \cdot E} R_m(T_{осаж}, T_{отж}, T_{изм}) \cdot I$$

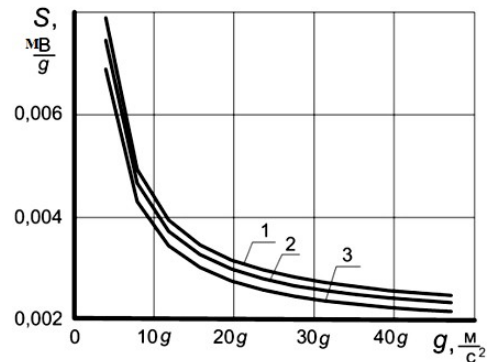
де L_i, B_i, H_i – длина, ширина, высота инерционной массы кристалла, ρ, E – плотность, модуль упругости кремния.

Соотношения между технологическими режимами формирования и выходными параметрами иллюстрируют рисунки 4-5.



1 – $T_{изм} = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_{изм} = 50^\circ\text{C}$; 3 – $T_{изм} = 120^\circ\text{C}$

Рисунок 4 - Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от температуры отжига пьезорезисторов, осажденных при $T_{осаж} = 600^\circ\text{C}$, для различных температур измерения при ускорении $1g$



1 – $T_{осаж} = 620^\circ\text{C}$, $T_{отж} = 850^\circ\text{C}$, $T_{изм} = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_{осаж} = 620^\circ\text{C}$, $T_{отж} = 900^\circ\text{C}$, $T_{изм} = 50^\circ\text{C}$; 3 – $T_{осаж} = 620^\circ\text{C}$, $T_{отж} = 100^\circ\text{C}$, $T_{изм} = 120^\circ\text{C}$

Рисунок 5 - Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от ускорения для пьезорезисторов, полученных при различных технологических режимах и температурах измерения

Полученные зависимости в рамках разработанной модели управления электрическими свойствами ЧЭ позволяют установить корреляцию между чувствительностью ЧЭ и свойствами материала для пьезорезисторов, задаваемые технологическими режимами получения, что обеспечивает разработку технологии формирования ЧЭ на основе пьезорезисторов.

Как видно из графиков, чувствительность ЧЭ акселерометров варьируется от технологических режимов получения. Технологические режимы $T_{осаж} = 620^\circ\text{C}$, $T_{отж} = 1000^\circ\text{C}$ обеспечивают необходимую чувствительность и рекомендуются для создания микромеханических акселерометров.

Разработана технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с учетом предложенных эквивалентной схемы и модели управления электрическими параметрами ЧЭ, приведенная на рисунке 6, и оригинальная топология измерительной схемы микромеханических акселерометров.

Технологическая модель ЧЭ, учитывающая воздействие температуры на выходные параметры ЧЭ, положена в основу разработки технологии формирования ЧЭ микромеханических акселерометров с температурным диапазоном измерений выше 100°C , что отличает их от приборов аналогичного класса.

В предложенной модели кремниевого пьезорезистивного ЧЭ микромеханического акселерометра отсутствуют обратные смещенные *p-n*-переходы, измерительная мостовая схема изолирована от кремниевой пластины, что исключает токи утечки, приводящие к начальному разбалансу мостовой схемы. Это обеспечивает расширение диапазона рабочих температур и улучшение выходных параметров ЧЭ при повышенных температурах.

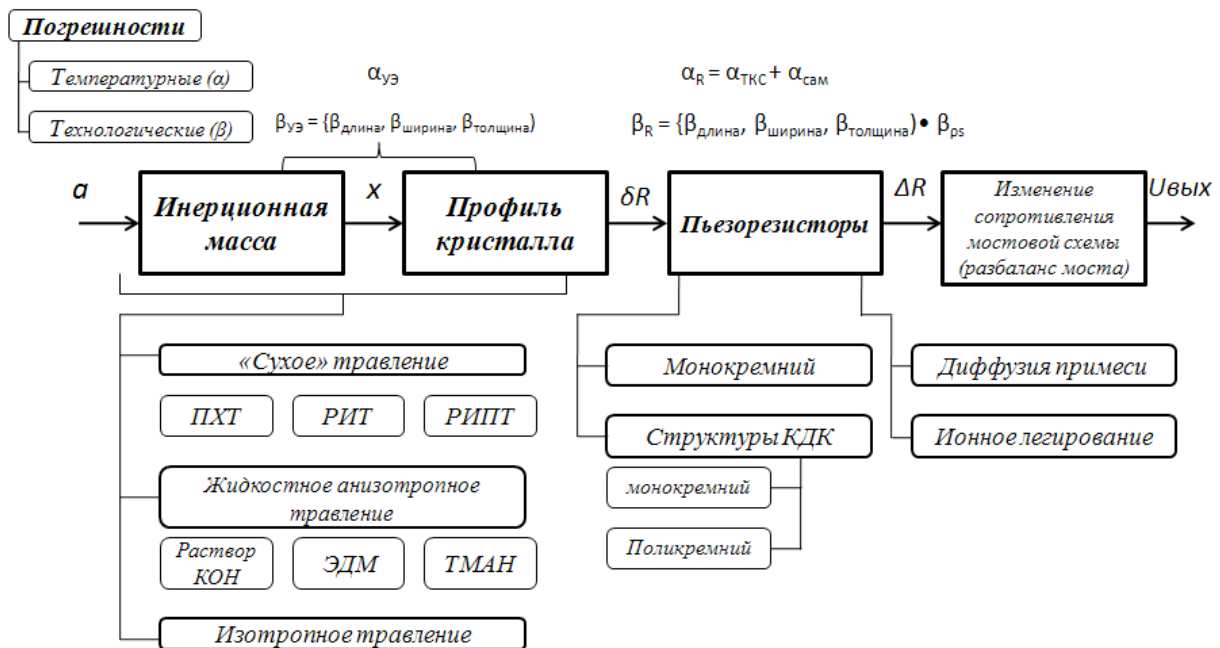


Рисунок 6 – Технологическая модель кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра

В технологической модели учтено влияние на пьезорезисторы температуры и погрешности от саморазогрева ($\alpha_{сам}$), которое вызывает дополнительное термическое сопротивление R_T . Выражение для термического сопротивления имеет вид:

$$R_T = R_{Tpoly} + R_{TSiO2} + R_{TAl} = \frac{H_{poly}}{k_{poly} \cdot S_{poly}} + \frac{H_{SiO2}}{k_{SiO2} \cdot S_{SiO2}} + \frac{L_{Al}}{k_{Al} \cdot W_{Al} \cdot H_{Al}}$$

Выражение учитывает параметры технологических слоев (поликристаллического кремния, оксида кремния, металлизации) пьезорезисторов и позволяет варьировать ими в технологическом процессе формирования для снижения эффекта саморазогрева и снижения погрешности измерений от саморазогрева.

В рамках разработанной модели проведено имитационное моделирование чувствительного элемента в программном модуле *Simulation* программы *SolidWorks* по методу конечных элементов. Определен коэффициент запаса прочности и механические деформации при воздействии заданных ускорений.

Критерием прочности ЧЭ к внешним воздействующим факторам является условие:

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} \geq 1,5,$$

где: k – коэффициент запаса прочности; σ_{max} – максимальное напряжение, возникающее при воздействии ускорения, $[\sigma]$ – предел прочности кремния.

Рассчитаны параметры основных конструктивных элементов (таблица 1) с использованием теории механики сплошных сред, что позволило разработать технологию формирования ЧЭ.

Таблица 1 – Основные параметры структурных элементов

| № п/п | Наименование параметра | Формула | Значение |
|-------|--|---|-------------------------|
| 1 | Прогиб инерционной массы под действием ускорения | $\Delta_b = \frac{P l_1^3}{3EJ} + \frac{M_b l_1^2}{2EJ}$ <p>J – момент инерции, E – модуль упругости кремния, P – сила, M – крутящий момент l – длина упругой перемычки</p> | $0,488 \cdot 10^{-6}$ м |
| 2 | Относительное удлинение балки в месте расположения пьезорезисторов | $\epsilon_{\text{пред}} = \frac{ \sigma_u }{E}$ <p>δ_u – напряжение от действия силы</p> | $0,05 \cdot 10^{-3}$ |
| 3 | Зазор между инерционной массой и ограничивающей поверхностью | $d_{0\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{m \cdot S^2}{m \cdot f_c \cdot \sqrt{2}}}$ <p>μ – коэффициент вязкости воздуха, m – подвижная масса, S – площадь подвижной массы</p> | $17 \cdot 10^{-6}$ м |

Для получения максимальной чувствительности микромеханических акселерометров необходимо определить зоны наибольшей деформации кристалла для расположения пьезорезисторов из поликристаллического кремния. Результаты моделирования ЧЭ представлены на рисунке 7.

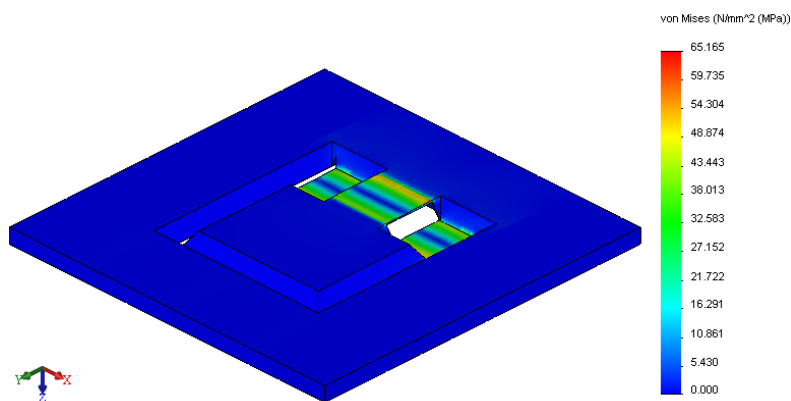
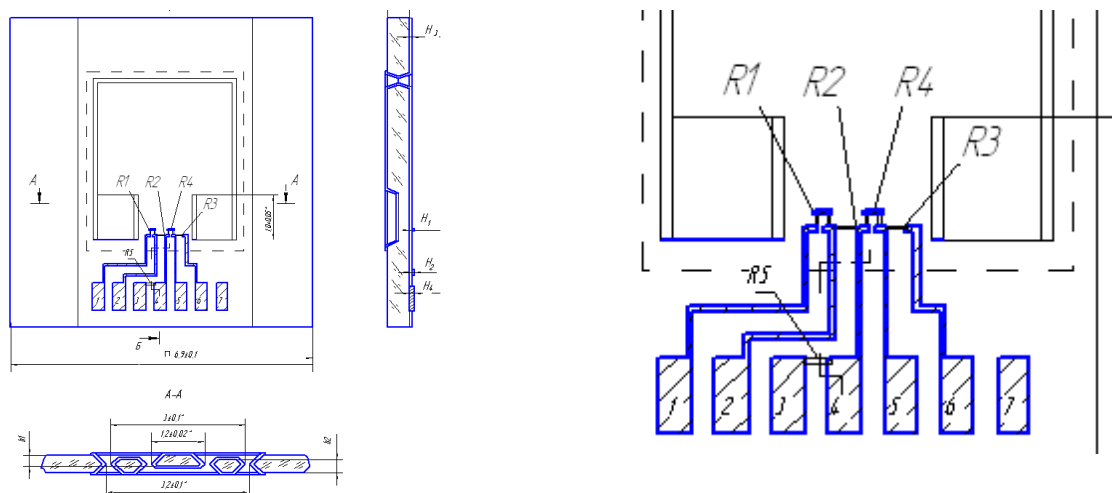


Рисунок 7 – Результаты компьютерного моделирования

Результаты расчета и моделирования позволили выявить места наибольших деформаций для размещения пьезорезисторов, что обеспечивает повышенную чувствительность к ускорению.

В третьей главе приводится технология кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента, работоспособного при температурах окружающей среды выше 100°C.

Внешний вид кремниевого кристалла чувствительного элемента пьезорезистивного типа представлен на рисунке 8.



а) $h1$ – профиль кристалла (20 ± 3 мкм), $h2$ – консоли кристалла (20 ± 3 мкм), $H1$ – пьезорезисторы ($0,6 \pm 0,05$) мкм, $H2$ – терморезистор ($0,6 \pm 0,05$) мкм, $H3$ – изолирующий оксид ($1,2 \pm 0,1$) мкм, $H4$ – металлизация ($1,1 \pm 0,1$) мкм;

Рисунок 8 – Кристалл пьезорезистивного ЧЭ микромеханического акселерометра (а) и топология измерительной мостовой схемы (б)

Кристалл сформирован на монокристаллической кремниевой подложке КЭФ-4,5 ориентации (100) и имеет габаритные размеры ($6,9 \times 6,9 \times 0,3$) мм³. Боковые стороны кристалла ориентированы по кристаллографическому направлению [110]. Кристалл содержит рамку, инерционную массу и концентратор механических напряжений – профиль кристалла. На планарной стороне кристалла в области профиля расположены пьезорезисторы из легированного примесью поликристаллического кремния, объединенные в мостовую схему Уитстона.

Разработан технологический маршрут формирования (рисунок 9), основанный на последовательном формировании трехмерных структур кристалла методами управляемого анизотропного травления кремния, формирования слоя поликристаллического кремния на поверхности кристалла и измерительной схемы.

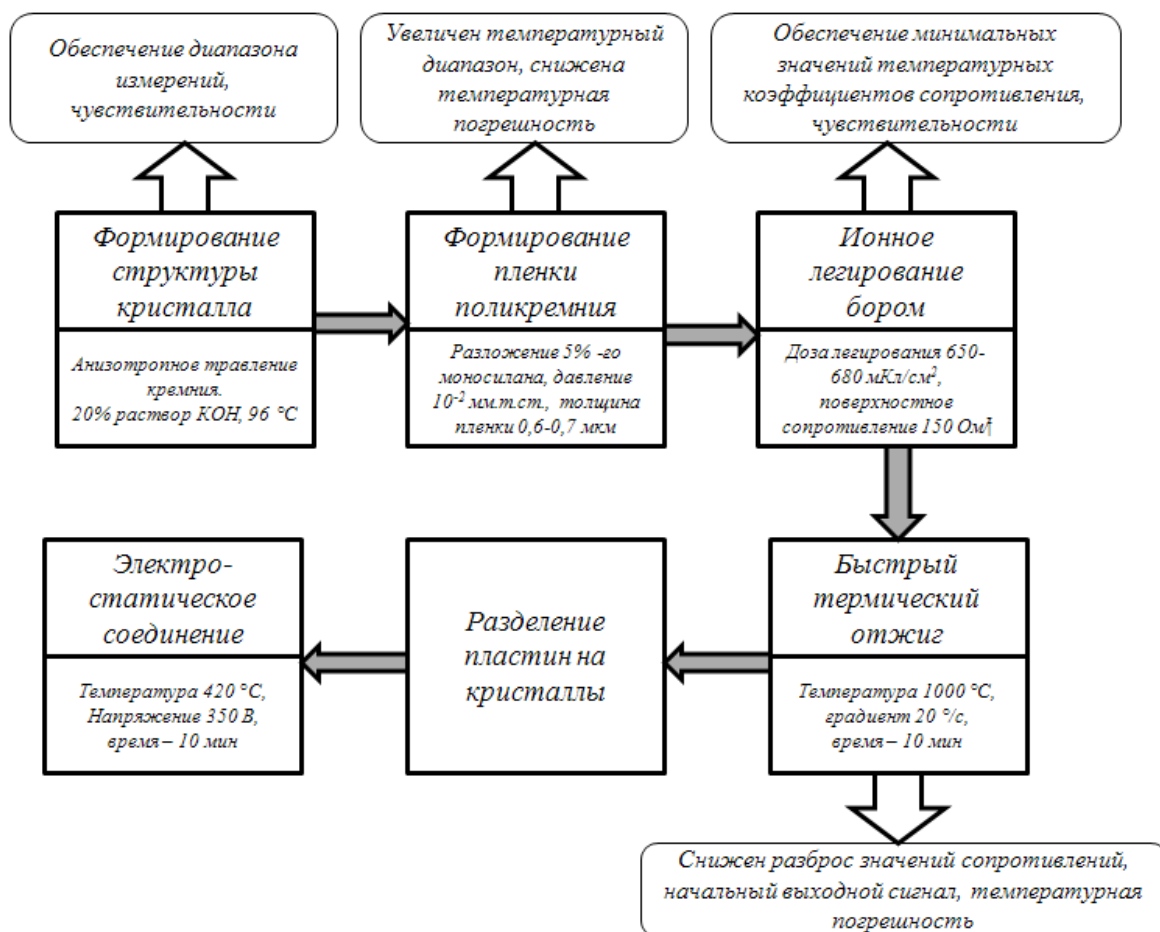


Рисунок 9 – Технологический маршрут формирования ЧЭ. Основные операции

Отличие предложенной технологии от известных технологий формирования поликремниевых чувствительных элементов – введение быстрого термического отжига после операций легирования пленки поликристаллического кремния, что вызвало изменение последовательности технологических операций и режимов (рисунок 10). Основные технологические режимы процесса быстрого термического отжига следующие: температура отжига – 1000 °C; градиент нарастания температуры – 80 °C/с; время отжига – 20 мин. Параметры процесса выбраны исходя из того, что длительное воздействие высоких температур приводит к недопустимому перераспределению примесей в объеме пленки поликристаллического кремния и увеличенному окислению пленки поликремния, что может привести к невоспроизводимости сопротивления пьезорезисторов.

В процессе отработки технологии использовались следующие режимы:

- температура осаждения пленки поликристаллического кремния $T_{\text{осаж}} = (580-650)^\circ\text{C}$;
- температура отжига пленки поликристаллического кремния $T_{\text{отж}} = (870-1060)^\circ\text{C}$.

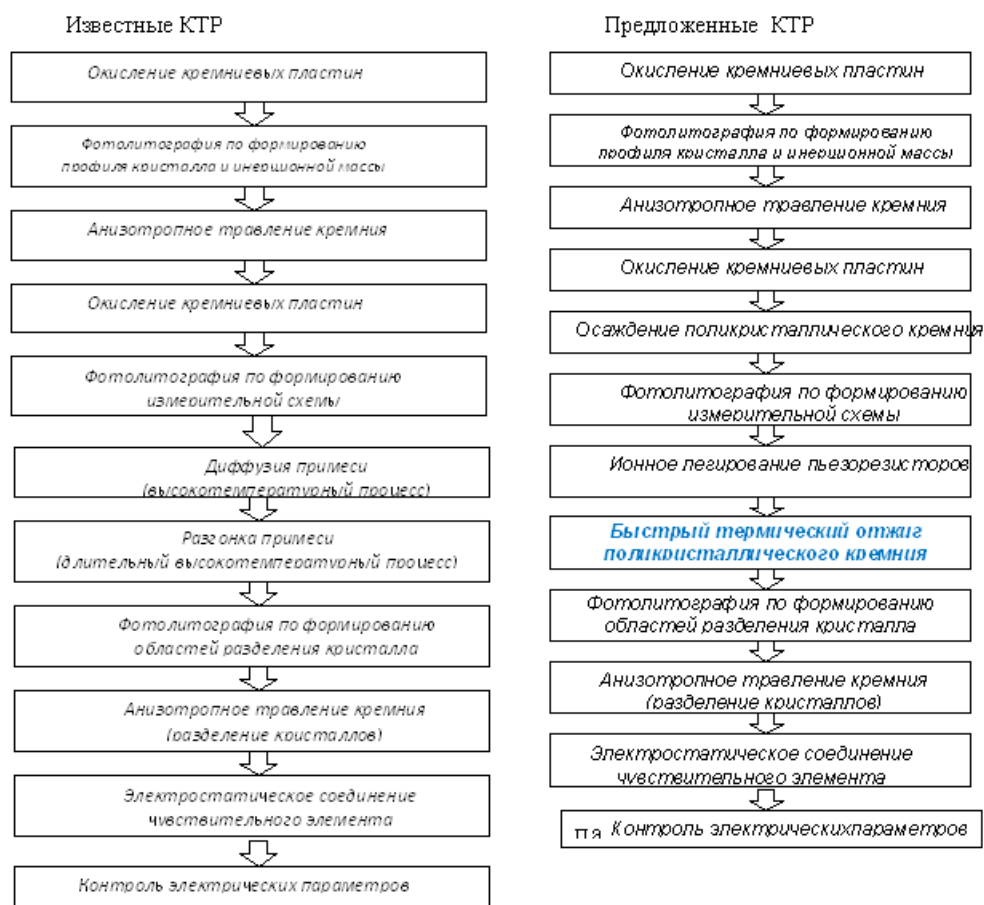


Рисунок 10 – Сравнение известной и предложенной технологии

Так, при использовании режима $T_{\text{осаж}} = 580^{\circ}\text{C}$ наблюдалась плохая адгезия пленки к слою оксида кремния, при $T_{\text{осаж}} = 650^{\circ}\text{C}$ наблюдался значительный разброс сопротивлений пьезорезисторов. Использование режима $T_{\text{отж}} = 870^{\circ}\text{C}$ не приводило к снижению разброса сопротивлений пьезорезисторов, при $T_{\text{отж}} = 1060^{\circ}\text{C}$ наблюдалось сильное окисление пьезорезисторов, что приводит к невозможности их сопротивлений. В результате выбраны оптимальные технологические режимы формирования пьезорезисторов - $T_{\text{осаж}} = (620 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{отж}} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Использование пленки поликристаллического кремния в качестве материала пьезорезисторов измерительной мостовой схемы на слое термически выращенного оксида кремния позволило расширить рабочий температурный диапазон чувствительного элемента выше 100°C за счет исключения в структуре ЧЭ $p-n$ - переходов.

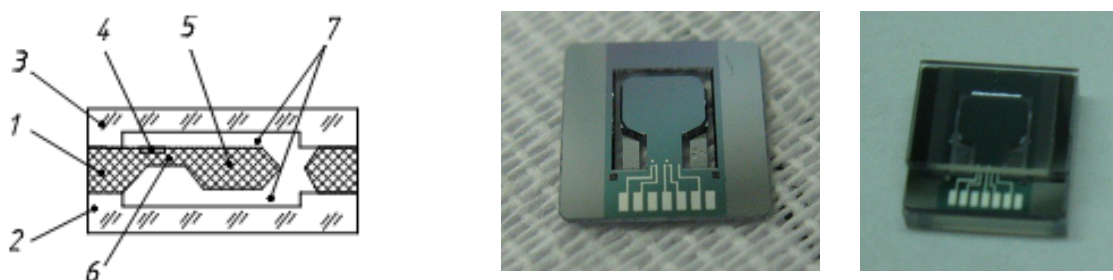
Таким образом, впервые разработана оригинальная технология формирования пьезорезистивных ЧЭ микромеханических акселерометров, обеспечивающая сокращение высокотемпературных операций, длительности технологического процесса. Исключена высокотемпературная диффузия и разгонка примеси, проводимые в течении 60...80 мин при

температурах до 1050°C, что приводит к изменению промежуточных операции снятия окисных пленок и химической обработки.

Исключение высокотемпературной диффузии исключает появление термомеханических напряжений в структуре кристалла. Термомеханические напряжения могут вызывать внутренние напряжения в кристалле, что приводит к изменению начального выходного сигнала, появлению погрешности измерений.

Разработанный технологический процесс обеспечивает уменьшение поверхностного сопротивления пленки поликристаллического кремния, снижение разброса сопротивления пьезорезисторов, при этом уменьшается начальный выходной сигнал мостовой схемы с 3,12 до 2,7 мВ для поликремниевой технологии без отжига, что снижает температурную погрешность. Это связано с упрочнением пленки поликристаллического кремния за счет изменения межкристаллитного расстояния при операции быстрого термического отжига, а также более равномерного перераспределения легирующей примеси в объеме кристаллитов и межзеренных границ при введении операции быстрого термического отжига.

На основе разработанного технологического процесса изготовлены кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C (рисунок 11).



1 – кремниевый кристалл; 2, 3 – нижняя и верхняя стеклянные крышки – изоляторы; 4 – пьезорезисторы; 5 – инерционная масса; 6 – упругая перемычка; 7 – зазоры в стеклах для перемещения инерционной массы.

а)

б)

в)

Рисунок 11–Схематичное изображение ЧЭ (а), кремниевый кристалл (б) и чувствительный элемент (в) пьезорезистивного типа микромеханического акселерометра

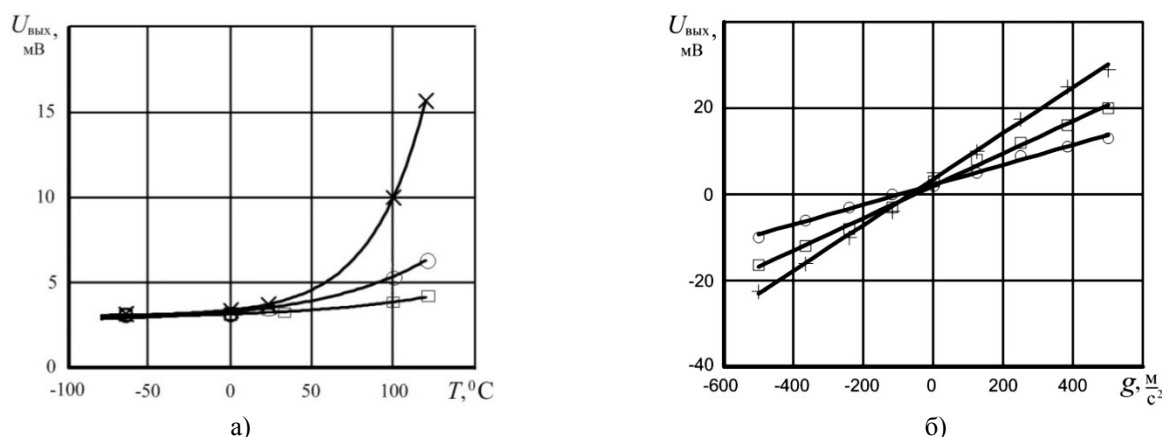
Четвертая глава посвящена разработке методик и исследованиям выходных характеристик кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

Разработаны методики исследования выходных параметров ЧЭ, включающие как измерения сопротивления пьезорезисторов и терморезистора в диапазоне температур от минус 65 до плюс 120 °С, так и воздействия ускорений в диапазоне $\pm 500 \text{ м/с}^2$.

Проведены технологические исследования по разработанной методике для сравнительной оценки чувствительных элементов микромеханических акселерометров. Исследованы электрические параметры и выходной сигнал ЧЭ при воздействии ускорения на партии кремниевых высокотемпературных пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, изготовленных на основе разработанной технологии, диффузионной технологии и поликремниевой технологии без быстрого термического отжига. Результаты исследований выходных параметров пьезорезистивных ЧЭ микромеханических акселерометров представлены на рисунках 12, 13.

Чувствительные элементы, изготовленные по разработанной технологии, имеют меньший дрейф начального выходного сигнала в области повышенных температур (более 100°С), что позволяет использовать их при измерении ускорений при повышенных температурах.

Зависимость выходного напряжения при положительных и отрицательных значениях ускорения носит линейный характер при повторяющихся циклах испытаниях, что указывает на одинаковые величины деформации пьезорезисторов при различных знаках воздействующего ускорения. Результаты испытаний ЧЭ, изготовленных по разработанной технологии, показывают чувствительность выше на 10% по сравнению с ЧЭ, изготовленными по поликремниевой технологии без быстрого термического отжига.



х – диффузионная технология; о – поликремниевая технология без отжига; □ – разработанная технология
Рисунок 12 - Температурная зависимость начального выходного напряжения ЧЭ для различных КТР (а) и Зависимость выходного напряжения ЧЭ от ускорения для различных КТР (б)

Таким образом, разработанная технология позволяет формировать пьезорезисторы с меньшим разбросом сопротивления по поверхности пластины, что обеспечивает значительное снижение температурной зависимости начального выходного сигнала в

отсутствии ускорения при работе ЧЭ в составе акселерометра. Сравнение характеристик акселерометров на основе разработанного ЧЭ и известных аналогов представлено в таблице 2.

Результаты исследований подтверждают правомерность разработанных моделей и конструкторско-технологических решений изготовления ЧЭ, обеспечивающие снижение ухода начального выходного сигнала при воздействии температуры более 100°C с ± 15 мВ до ± 4 мВ, температурной погрешности измерений с $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ % и расширение диапазона рабочих температур с 85°C до 120°C.

Таблица 2 – Сравнение характеристик акселерометров на основе разработанного ЧЭ и известных аналогов

| Характеристика | Тип акселерометров | | | | |
|--|---|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | <i>PCB Group, Inc. (США) Серия 3531</i> | <i>Endevco (США) 7231C-750</i> | <i>Honeywell (США) JTF/AG</i> | НПО ИТ (Россия) АНЭ 211 | Акселерометр на основе разработанного ЧЭ |
| Чувствительность, мВ/g | 0,01... 0,05 | 0,20 | 0,18...8,0 | 0,06...0,6 мВ/g | 0,01...0,015 |
| Температурный диапазон измерений, °С | - 54 ... +120 | - 23 ...+66 | - 40...+120 | - 50...50 | - 65...120 |
| Уход чувствительности от температуры | ± 5 % | -0.10%/°С | - | - | 0,5 % |
| Уход начального выходного сигнала от температуры | ± 5 мВ | ± 25 мВ | - | - | ± 4 мВ |

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана и практически реализована технология формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C, что позволяет создавать на их основе информационно-измерительные приборы нового поколения.

Разработанный технологический маршрут формирования включает быстрый термический отжиг пленки поликристаллического кремния, что повлекло за собой изменение последовательности технологических операций, а также их количество. Исключена высокотемпературная диффузия, что позволяет исключить термомеханические напряжения в структуре кристалла.

2. Проведен анализ методов и средств формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с целью выбора конструктивно-технологических решений, обеспечивающих измерение ускорений при температуре окружающей среды выше +100 °С.

В результате анализа выявлены основные технологии формирования чувствительных элементов, их преимущества и недостатки.

3. Разработана аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров на этапе технологического процесса и параметрами чувствительных элементов.

Данная модель позволяет прогнозировать характеристики чувствительных элементов в зависимости от режимов их формирования.

4. Разработана технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, учитывающая влияние температуры на параметры чувствительных элементов.

Данная модель позволяет оптимизировать конструктивно-технологические решения для формирования чувствительных элементов с заданными параметрами.

5. Реализована технология формирования пьезорезисторов измерительной мостовой схемы, учитывающая дестабилизирующее действие окружающих температур, и основанная на зависимости между выходными параметрами чувствительных элементов и технологическими режимами их получения.

Технология позволяет реализовать измерительную схему с минимальным начальным выходным сигналом.

6. Разработаны методики и проведены исследования выходных параметров кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров при различных температурах и ускорениях для подтверждения работоспособности элементов при заданных условиях.

Методики позволяют оценить параметры чувствительных элементов, такие как начальное выходное напряжение, зависимость выходного напряжения от ускорения. Проведенные исследования чувствительных элементов показали правильность выбора конструктивно-технологических решений чувствительного элемента.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Пауткин В.Е., Аверин И.А. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 24–32.
2. Пауткин В.Е. Разработка технологии и специального оборудования для соединения кремния со стеклом в поле высокого напряжения // Козин С.А., Федулов А.В., Пауткин В.Е. // Датчики и системы. – №9. – 2005. – С. 46-47.

3. Пауткин В. Е. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС. / Козин С.А., Федулов А.В., Акимов И.Г., Пауткин В. Е. //Датчики и системы. – 2005.–№9.–С. 48-51.
4. Пауткин В. Е. Разработка технологии электростатического соединения многослойных стеклокремниевых структур /Косогоров В. М., Федулов А. В., Пауткин В. Е. //Датчики и системы. – 2000. – №7. – С.59-60.

Патенты РФ и свидетельства на топологию ИМС

5. Пат. РФ № 2526789, Российская Федерация, МПК G01P15/08, G01P15/125. Чувствительный элемент интегрального акселерометра / Пауткин В.Е., Прилуцкая С.В. - Заявка: 2013110978/28 от 12.03.2013, опубл. 27.08.2014, бюл.№24.
6. Пат. РФ № 2504866, Российская Федерация, МПК H01L29/84. Интегральный тензопреобразователь ускорения / Пауткин В.Е. - Заявка 2012122850/28 от 01.06.2012, опубл. 20.01.2014, бюл.№ 2.
7. Пат. РФ №2485620 Российская Федерация, МПК H01L21/302, G01C19/22. Способ изготовления микромеханического вибрационного гироскопа / Пауткин В. Е, Мишанин А.Е., Шепталина С.В., Николаев А.А. - Заявка 2011154296/28 от 28.12.2011; опубл. [20.06.2013](#), бюл. №17.
8. Пат. РФ №2457577, Российская Федерация, МПК H01L29/84, G01L9/04. Многофункциональный измерительный модуль / Пауткин В.Е., Соломинская И.В. - Заявка: 2011111239/28 от 24.03.2011, опубл. [27.07.2012](#), бюл.№ 21.
9. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2012630032. Термокомпенсационный измерительный преобразователь-39 / Пауткин В.Е., Шепталина С.В., Николаев А.А. - Заявка №2011630105 от 28.12.2011; опубл. 20.01.2012.
10. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2011630027. Термокомпенсационный измерительный преобразователь-33/ Пауткин В.Е., Мишанин А.Е. - Заявка №2010630103 от 25.11.2010; опубл. 27.01.2011.
11. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2010630101. Тензорезистивный преобразователь давления-32 / Пауткин В.Е., Акутина С.М. - Заявка №2010630066 от 01.09.2010; опубл. 27.10.2010.
12. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы 2008630066. Термокомпенсационный измерительный преобразователь -23. Пауткин В.Е., Акутина С.М., Мишанин А.Е. - Заявка №2008630051 от 07.10.2008, опубл. 27.11.2008.

Публикации в других изданиях

13. Пауткин В.Е., Аверин И.А. Технологические особенности формирования чувствительных элементов микромеханических акселерометров /Математическое моделирование в машино- и приборостроении: сборник научных трудов Пензенского государственного университета, 2013. – №9. – С.83–91.
14. Пауткин В. Микрорезистивные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий. /Козин С., Федулов А., Пауткин В., Баринов И. //Компоненты и технологии. – 2010. - № 1.- С. 24-27.
15. Пауткин В.Е. Датчики механических параметров на основе МЭМС – технологий / Блинов А.В., Козин С.А., Федулов А.В., Акимов И.Г., Пауткин В.Е. // Мир измерений.- 2008.- №1.- С.49- 53.
16. Пауткин В.Е. Разработка технологии электростатического соединения многослойных стеклокремниевых структур./ Косогоров В. М., Федулов А. В., Пауткин В. Е. // «Сборка в машиностроении» 2001. - №5.- С.22-26.
17. Пауткин В.Е., Шепталина С.В. Исследование механизма токопереноса на кремниевых гетероструктурах чувствительных элементов микромеханических акселерометров //Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы - 2012): тр. Междунар. науч.-техн. конф. с элементами

- научной школы для молодых ученых (г. Пенза, 22-26 октября 2012 г.) / под ред. Е.А. Ломтева, А.Г. Дмитриенко.- Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. - С.213-217.
18. Пауткин В.Е. Интегральные датчики давления на основе кремниевой микротехнологии / Блинов А.В., Козин С.А., Пауткин В.Е., Федулов А.В.:// Тез.докл. VIII научн.-технич.Конф. «Микротехнологии в космосе» с международным участием (6-7 октября 2010 г., Москва): – Москва, 2010. – С. 42–43.
19. Пауткин В.Е. Результаты отработки конструктивно-технологических решений микромеханических вибрационных гироскопов / Макаров Е.А., Шепталкина С.В., Пауткин В.Е. // Датчики и системы: Сб.докл. XXXмежрегион. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов (30-31 марта 2011 г., Пенза)/Под ред. А.В.Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 95-98.
20. Пауткин В.Е. Молекулярно-электронные акселерометры / Макаров Е.А., Пауткин В.Е. // Датчики и системы: Сб.докл. XXXмежрегион. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов (30-31 марта 2011 г., Пенза)/Под ред.А.В.Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 112-114.
- 21.Пауткин В.Е. Молекулярно-электронные акселерометры / Макаров Е.А., Пауткин В.Е. // Датчики и системы-2011: Материалы межд. науч.-техн. конф. (5-10 сентября 2011 г., п. Абрау-Дюрсо)/Под ред. Дмитриенко А.Г. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 138-140.
22. Пауткин В.Е. Разработка интегрального монолитного многофункционального модуля датчика физических величин для систем комплексного мониторинга изделий ракетно-космической техники / Мишанин А.Е., Пауткин В.Е. // Датчики и системы: Сборник докл. XXXмежрегион. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов (30-31 марта 2011 г., Пенза)/Под ред. А.В. Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 154-158.
- 23.Пауткин В.Е. Разработка интегрального монолитного многофункционального модуля датчика физических величин для систем комплексного мониторинга изделий ракетно-космической техники / Мишанин А.Е., Пауткин В.Е. // Датчики и системы-2011: Материалы межд. науч.-техн. конф. (5-10 сентября 2011 г., п. Абрау-Дюрсо)/Под ред. Дмитриенко А.Г. – Пенза:ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 163-167.
24. Пауткин В.Е. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС / Блинов А.В., Козин С.А., Федулов А.В., Акимов И.Г., Пауткин В. Е. // Датчики и системы-2006:Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (г.Москва, 30-31 мая 2006г.)/Под ред. Мокрова Е.А., Носенко Ю.И. и Алфимова С.М. - Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИФИ », 2006.-С.72-76.
25. Пауткин В.Е. Разработка полупроводникового чувствительного элемента высокотемпературных датчиков давлений / Баринов И.Н., Пауткин В.Е., Удалов П.А. //Датчики и системы: Сборник докладов XXVI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (28-29 марта 2007 г., Пенза)/Под ред.Блинова А.В.- Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИФИ»,2007.- С.64-67.
26. Пауткин В.Е. Конструктивно- технологические решения для МЭМС датчиков механических параметров / Козин С.А., Федулов А.В., Пауткин В.Е., Баринов И.Н. // Информационно-управляющие и измерительные системы – 2007: Тезисы докладов отраслевой научно- технической конференции приборостроительных организаций Роскосмоса (26-28 сентября 2007 г.).- Королев Московской области: ФКА, ФГУП НПО «Измерительной техники», 2007.-С.56.
27. Пауткин В.Е. Конструктивно – технологические решения для МЭМС – датчиков механических параметров / Козин С.А, Федулов А.В., Пауткин В.Е. // Перспективные системы и задачи управления: Сб. мат. Третьей Всероссийской научн.- практ.конф. Таганрог: Изд – во ТТИ ЮФУ, 2008.- Т.2.-С.68-69.
28. Пауткин В.Е. Разработка конструктивно – технологических решений микромеханической колебательной системы для измерения угловой скорости /Пауткин В.Е., Козин С.А., Федулов А.В. / Международный симпозиум «Надежность и качество», Пенза, ПГУ, 2004.-С.484-485.