

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ПАУТКИН ВАЛЕРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ
ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Аверин Игорь Александрович

ПЕНЗА 2014

Содержание

	Список использованных сокращений, обозначений.....	4
	Введение.....	6
1.	Анализ методов формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	13
1.1	Основные методы и способы формирования кремниевых чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	13
1.2	Конструктивные особенности кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	26
1.3	Конструктивно-технологические решения высокотемпературных пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	34
2	Обоснование и выбор конструктивно-технологических решений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	45
2.1	Обоснование конструктивно-технологических решений кремниевого кристалла чувствительного элемента.....	45
2.2	Аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	55
2.3	Технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	69
2.4	Моделирование кремниевого чувствительного элемента микромеханического акселерометра.....	82
3	Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	89
3.1	Конструктивно-технологическое исполнение кремниевого кристалла чувствительного элемента.....	90
3.2	Формообразование структуры кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра методами управляемого травления.....	95
3.3	Формирование измерительной схемы.....	104
3.4	Разработка технологического маршрута изготовления.....	109
4	Разработка методик и исследование выходных параметров кремниевых	

	пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.....	123
4.1	Методика измерения электрических параметров чувствительных элементов.....	124
4.2	Результаты исследования электрических параметров чувствительных элементов.....	126
4.3	Методика определения температурных коэффициентов сопротивления пьезорезисторов и терморезистора ЧЭ.....	129
4.4	Результаты исследования температурных коэффициентов сопротивления пьезорезисторов и терморезистора чувствительных элементов, изготовленных по различным технологическим режимам.....	131
4.5	Методика исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры.....	135
4.6	Результаты исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры.....	136
4.7	Методика исследования выходного напряжения ЧЭ от воздействия ускорения.....	137
4.8	Результаты исследований выходного напряжения ЧЭ от воздействия ускорения.....	138
	Заключение.....	145
	Список использованных источников.....	147
	Приложения	
	Приложение А. Акт о внедрении технологий	161
	Приложение Б. Расчет конструкции кристалла.....	163
	Приложение В. Маршрутная карта изготовления.....	171

Список сокращений, обозначений

МЭМС – микроэлектромеханическая система.

РКТ – ракетно-космическая техника

ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения

ЧЭ – чувствительный элемент.

ИМС – интегральная микросхема

КНИ – структура «кремний – на – изоляторе»

Чувствительный элемент (ЧЭ) микромеханического акселерометра – трехслойная структурастекло-кремниевый кристалл-стекло, преобразующая внешнее воздействие (ускорение) в выходной сигнал (напряжение), пропорциональный воздействию.

Кремниевый кристалл–деталь чувствительного элемента, выполненная анизотропным травлением кремния со сформированной на его планарной стороне измерительной мостовой схемой.

Профиль кристалла – упругий элемент кристалла, выполненный анизотропным травлением кремния.

Измерительная мостовая схема–мостовая схема Уитстона, в каждое плечо которой включен пьезорезистор с соответствующим знаком приращения сопротивления для увеличения чувствительности.

Элементы измерительной схемы– пьезорезисторы, выполненные из поликристаллического кремния

Начальный выходной сигнал – выходное напряжение пьезорезистивной схемы при отсутствии внешнего воздействия (ускорения)

Дрейф выходного сигнала – изменение начального выходного сигнала при воздействии температуры

Технологическая модель–описание используемых технологий, необходимых для формирования чувствительного элемента. Отражает влияние

технологических операций и режимов на выходные параметры чувствительного элемента.

Введение

Микроэлектронные датчики широко используются в современных управляющих и контрольно-измерительных системах во многих отраслях промышленности: машиностроительной, аэрокосмической, автомобильной и др. Миниатюризация датчиков привела к появлению и развитию нового направления в технологии приборостроения – технологии микромеханики или технология МЭМС (микроэлектромеханические системы), которая основана на базовых технологиях микроэлектроники, таких как окисление кремниевых пластин, диффузия, эпитаксия, осаждение и травление слоев, фотолитография в сочетании со специально разработанными технологиями объемной микрообработки кремния. Технологии микромеханики позволяют вести обработку кремниевых пластин, диэлектрических и пьезоэлектрических пластин для формирования чувствительных элементов датчиков, но наибольшее распространение получила технология кремниевой микромеханики в силу уникальных свойств кремния как конструкционного материала, а именно: его доступность, способность к легкому окислению для формирования защитных слоев при травлении и диффузии примеси, способность к легкому формообразованию фигур с правильной геометрией при анизотропном травлении, а главное – отсутствие гистерезисных явлений и усталостной деформации. Все это делает монокристаллический кремний уникальным материалом при изготовлении чувствительных элементов датчиков.

Отличительной особенностью развития науки и техники на рубеже XX-XXI века является широкое применение датчиков на основе МЭМС для получения достоверной информации о протекающих процессах. При отработке и штатной эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ), исследований конструкций сложных аппаратов и сооружений широко применяются пьезорезистивные акселерометры. Пьезорезистивному классу акселерометров характерны широкий частотный и динамический диапазон измерений, малые габариты, высокая ударная 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 другими. 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 включают кремниевые чувствительные элементы (ЧЭ) с пьезорезисторами на основе изолирующего р-п- перехода, что ограничивает температурный диапазон работы прибора до 85 °С. В тоже время, пьезорезистивные акселерометры необходимы для контроля процессов, протекающих при температурах более 100°С. Примерами таких применений могут служить контроль и диагностика высокочастотной вибрации двигательных установок, отладка изделий РКТ. Таким образом, разработка технологии кремниевых высокотемпературных пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров является актуальной задачей, отвечающей потребностям РКТ и общепромышленного применения, 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 изготовления 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 изготовления кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений и пониженным влиянием воздействующей температуры.

5. Разработка методики проведения 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 изготовления пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C , в отличие от известных технологий изготовления 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 более 100°C и снизить начальный выходной сигнал при воздействии повышенной температуры с ± 15 мВ до ± 4 мВ, а температурную погрешность измерений с $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ %.

2. Разработана оригинальная аналитическая модель управления электрическими параметрами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов за счет выбора технологических режимов изготовления, 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 100°C .

3. На основе разработанной аналитической модели управления впервые установлены закономерности между технологическими режимами изготовления и выходными параметрами кремниевых пьезорезистивных

чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C, 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.

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 100°C.

Практическая ценность работы:

1. Разработана оригинальная технология и впервые изготовлены кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы микромеханических акселерометров с расширенным диапазоном рабочих температур более 100°C 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 $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ %) по сравнению с аналогами.

2. В рамках технологической модели разработана топология кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C, 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 - 84 (рисунки, схемы, графики), таблиц - 12, список литературы - 139 наименований. Приложения представлены на 18 листах.

На защиту выносятся:

1. Технология изготовления кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C , включающая формирование оригинальной измерительной схемы в виде пленочных пьезорезисторов из поликристаллического кремния, осажденных на слое диоксида кремния, что обеспечивает расширение температурного диапазона измерений более 100°C и снижение температурной погрешности измерений в 3 раза.

2. Аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханического акселерометра за счет выбора технологических режимов изготовления.

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

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

1. Анализ методов формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

1.1 Основные методы и способы формирования кремниевых чувствительных элементов микромеханических акселерометров методами объемной микромеханики

При формировании кремниевых микромеханических чувствительных элементов акселерометров применяют технологические операции, которые традиционно используются в микроэлектронике: термическое окисление, осаждение слоев, фотолитография, жидкостное анизотропное и изотропное травление, плазмохимическое и ионностимулированное травление, ионное легирование, металлизация и т.д. При этом с развитием микромеханики получили развитие такие технологии, как анизотропное и изотропное травление кремния, глубокое реактивно-ионное травление кремния. Данные технологии предназначены для формирования трехмерных кремниевых структур микромеханических чувствительных элементов акселерометров с точным соблюдением размеров как на поверхности кремниевых кристаллов, так и по толщине исходных кремниевых пластин. Главное отличие технологий травления в объемной микромеханики от технологических процессов травления при формировании структур ИМС состоит в глубине удаляемого слоя. При изготовлении структур ИМС глубина удаляемого слоя составляет всего несколько микрон [1], при этом в технологии микромеханики она может равняться исходной толщине пластины [2, 3] Это накладывает определенные ограничения, связанные с различными требованиями к геометрическим размерам формируемых элементов, материалу маскирующего покрытия и его толщине.

Технология объемной микромеханики является одной из основных технологий микрообработки кремния, которая используется при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) чувствительных элементов

датчиков параметров движения, например акселерометров. В объемной микромеханике структуры формируются путем травления исходной монокристаллической кремниевой подложки. Различают два типа травления кремния: анизотропное и изотропное, каждый из которых различается своей селективностью (избирательностью) по отношению к материалам, используемым в процессе, скоростью травления, фигурами травления и т.д.

Анизотропное травление кремния является отработанной технологией объемной микромеханики и широко используется при изготовлении наиболее распространенных микромеханических датчиков, таких как датчики ускорения и давления. Селективное удаление кремния основано на анизотропных свойствах кристалла кремния – плотности упаковки атомов в кристаллической решетке кремния в зависимости от кристаллографического направления.

Анизотропные травители удаляют кремний преимущественно вдоль данной кристаллографической плоскости. Это приводит к уникальным структурам, которые могут быть точно predeterminedены, если известен состав травителя, рабочая плоскость пластины и кристаллографическое направление. Могут быть получены квадратные или прямоугольные ямки травления, ограниченные плоскостями $\{111\}$, V-образные канавки, отверстия с прямоугольными стенками и некоторые другие фигуры травления при использовании анизотропных травителей [4, 5].

Анизотропные травители удаляют кремниевую подложку в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ с более высокой скоростью, чем в направлении $\langle 111 \rangle$. В большинстве случаев анизотропные травители представляют собой многокомпонентные растворы, состоящие из окислителя, который преобразует кремний до гидратированного диоксида кремния, и комплексообразователя, предназначенного для того, чтобы в реакции гидратированным диоксидом кремния образовывать растворимый комплексный ион и воду.

Плоскость (100) является единственной из главных плоскостей, при пересечении которой плоскостями (110), (111) и (100) образуются фигуры с прямоугольной симметрией. Этой плоскости отдается предпочтение при

создании приборов, которые изготавливаются с использованием методов анизотропного травления. Плоскость (100) пересекается четырьмя плоскостями (111) под углом $54^{\circ} 44'$ ($54^{\circ} 74'$). При ориентации сторон маски для травления вдоль направления [110] или перпендикулярно ему получаются фигуры травления пирамидальной формы с боковыми стенками, ограниченными плоскостями (111), и дном, ограниченным плоскостью (100) (рисунок 1).

Анизотропные травители растворяют кремний в плоскости (100) до тех пор, пока травление не дойдет до плоскостей {111}, начинающихся у края маски для травления и встречающихся так, что они образуют V - образный профиль (рисунок 1). Глубина V-образной канавки зависит от ширины окна на пластине кремния, полученного с помощью фотолитографии (рисунок 1). Травление прекращается, когда участки плоскостей {100}, выходящих на поверхность, стравливаются. Регулируя время травления, можно изменять профиль канавки от трапецеидального до V-образного.

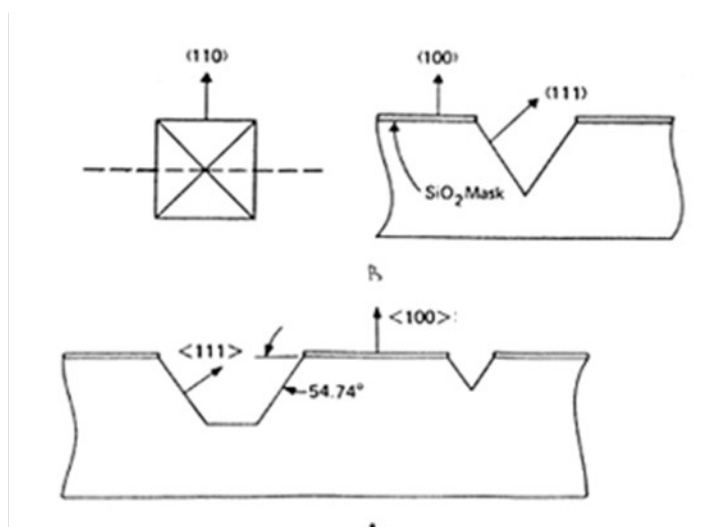


Рисунок 1 – Профили травления плоскости кремния (100)

Основными анизотропными травителями для кремния являются системы гидразин гидрат $\text{NH}_2\text{-H}_2\text{N}$ – вода, гидроксид тетраметиламмония $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$

(ТМАН), этилендиамин $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2$ – пирокатехин $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ - вода, едкое кали KOH – вода [4, 6-11].

Гидразин гидрат – вода – на результаты травления влияют температура и концентрация раствора. Скорость травления кремния в системе составляет 1,0...3,0 мкм/мин. Оптимальная температура травления – 373 К. На шероховатость поверхности кремния влияют температура и концентрация травителя. Для раствора, содержащего равные объемы гидразина и воды характерно образование пирамид травления и волнообразная поверхность профиля травления. При изготовлении структур, где необходимо одновременно реализовать хорошее качество боковых стенок и поверхности дна рельефа, наиболее приемлемая концентрация гидразин гидрата составляет 70...80 %.

Гидразингидрат является сильным ядом, что ограничивает его применение на производстве.

Этилендиамин – пирокатехин – вода – раствор чувствителен к концентрации примеси и типу проводимости: скорость травления значительно уменьшается при достижении p^+ - поверхности раздела. Однородное и контролируемое травление может быть получено при использовании травителя (объемные доли, %) этилендиамина, пирокатехина и воды 46,4:4:46,4. Скорость травления плоскости (100) составляет порядка 1,0 мкм/мин. Скорость травления термически выращенного оксида кремния составляет ~0,25 нм/мин. Низкая скорость травления оксида кремния дает раствору определенные преимущества по сравнению с другими анизотропными травителями, особенно при длительном травлении.

Недостаток этилендиаминовых смесей – токсичность, хотя и меньшая чем у гидразин гидрата, неуправляемые скорости травления при температурах выше 373К, а также образование нерастворимых трудноудаляемых продуктов реакций.

Гидроксид тетраметиламмония (ТМАН) - Типичная температура травления 70-90°C, типичная концентрация 5 %-25% ТМАН по массе в водном растворе. Скорость травления кремния увеличивается с ростом температуры и

падает с ростом концентрации ТМАН. Грубость травления кремниевой поверхности увеличивается с ростом концентрации ТМАН, при концентрации 20 % получается гладкая поверхность травления.

Распространенные материалы для масок при длительном травлении в ТМАН включают в себя [диоксид кремния](#) и [нитрид кремния](#). Нитрид кремния имеет незначительную скорость травления в ТМАН; скорость травления в ТМАН для диоксида кремния зависит от качества пленки и имеет порядок 0,1 нм/мин.

Гидроксид калия – вода – при травлении кремния используют раствор (%) КОН-вода: 33...35:65. Оптимальная температура травителя 353 К. Кремний в направлении $\langle 110 \rangle$ травится в 600 раз быстрее, чем в направлении $\langle 111 \rangle$. Скорость травления кремния (100) составляет 2,0...3,0 мкм/мин, скорость травления термически выращенного оксида кремния составляет ~3,0 нм/мин. В оптимальном режиме травления поверхность блестящая, с небольшим количеством микронеровностей не превышающих 1 мкм. Для неоптимальных режимов травления характерна матовая поверхность с большим числом и большой величиной микронеровностей. Вид поверхности травления зависит от концентрации щелочи. Зеркально полированное дно без бугорков получается при 373К и концентрации *КОН* 350 г/л.

Маскирующее покрытие при анизотропном травлении кремния является одним из определяющих параметров при формировании структур. Широкое распространение получили пленки термического оксида кремния SiO_2 . Устойчивость пленки SiO_2 в щелочном растворе *КОН* зависит от концентрации щелочи. Так, превышение 40%-ной концентрации травителя приводит к резкому увеличению скорости травления оксида кремния, а при стравливании последнего – к потере четкого рельефа формируемых структур. Для правильного выбора толщины пленки оксида необходимо знать некоторое критическое значение толщины пленки SiO_2 . При оптимальной концентрации щелочного травителя (КОН:Н₂О) скорость травления SiO_2 составляет 0,01; Si {100} 3,2; Si {110} 4 мкм/мин.

В зависимости от скорости травления кремния и SiO_2 рассчитывают оптимальную толщину маскирующей пленки для травления кремния на заданную глубину.

Система KOH – вода воздействует на маски из алюминия. Практически не травятся в системе пленки нитрида кремния Si_3N_4 . При травлении сквозных отверстий в толстых пластинах кремния (400 мкм) в качестве маски используют Si_3N_4 толщиной около 0,1 мкм. Пленки SiO_2 практически нерастворимы в гидразингидрате, что позволяет использовать даже тонкие (0,3...0,5 мкм) слои в качестве маски. Маскировка алюминием позволяет травить в гидразингидрате мазаобласти высотой до 30 мкм. Аминопирокатехиновые смеси позволяют использовать в качестве масок не только диоксид кремния, но и ряд металлов: Al, Ag, Au, Cu и др.

Наиболее широко распространенным анизотропным травителем для кремния является система KOH – вода. Это связано со следующими причинами:

- структура формируемых элементов повторяет форму маски для травления при оптимальной ориентации маски на поверхности кремниевых пластин;

- термически выращенный на поверхности кремния оксид кремния является отличным маскирующим материалом при травлении при оптимальном соотношении концентрации KOH – вода;

- не требуется специального дорогостоящего оборудования для проведения процесса травления;

- варьируя концентрацией компонентов системы можно изменять скорость травления кремния;

- система является прозрачной (например, в отличие от тетраметиламмония (ТМАН)), что позволяет визуально контролировать процесс травления;

- система KOH – вода не является токсичной.

Примеры описания технологических процессов анизотропного травления кремния и формируемых структур приведены в ряде источников [12-20], а

микромеханические акселерометры, выполненные по данной технологии, представлены в [21-28].

Характерной особенностью изотропного травления является то, что кристаллографическая ориентация подложки не влияет на профиль травления. Скорость травления одинакова по всем кристаллографическим направлениям. Глубина травления равна величине подтрав под край защитной маски, как показано на рисунке 2.

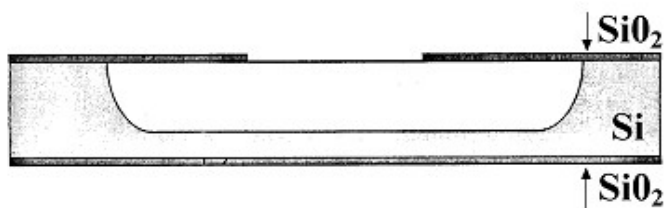


Рисунок 2 - Изотропное травление кремния

Кремниевая подложка изотропно травится при использовании травителей на основе фтористоводородной кислоты HF. Основным механизмом травления является анодное растворение, при котором значительную роль в процессе играет наличие дырок в валентной зоне кремния. Реакцией можно управлять посредством изменения поверхностной концентрацией дырок. Это может быть достигнуто путем применения электрохимической ячейки (процесс анодного растворения), при использовании окислителя (химическое растворение) или при помощи высокой интенсивности освещения поверхности пластины кремния в процессе травления (растворение, индуцируемое излучением) [1, 29, 30].

В производстве МЭМС-изделий наиболее широкое применение получил метод, основанный на применении окислителя. Для изотропного травления кремния наиболее часто используемые травители – это смесь азотной кислоты (HNO_3) и плавиковой кислоты (HF). Вода может быть использована в качестве разбавителя, но уксусная кислота (CH_3COOH) является предпочтительней, поскольку она лучше воды препятствует диссоциации азотной кислоты и

поэтому сохраняет окислительную силу HNO_3 , которая зависит от степени разбавления азотной кислоты.

На рисунке 3 представлены кривые изотропного травления кремния при использовании травителей на основе азотной и плавиковой кислоты при использовании в качестве разбавителя воды и уксусной кислоты.

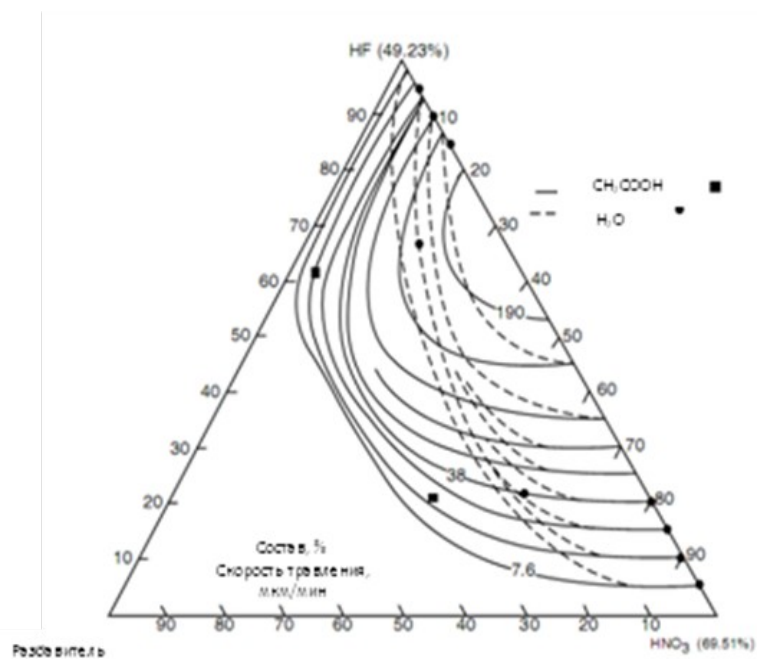


Рисунок 3 - Кривые изотропного травления кремния, вычисленные при одностороннем травлении кремниевой пластины и выраженные в мкм/мин [1].

Механизм изотропного травления может быть представлен следующим образом: азотная кислота окисляет поверхность кремния, переводя его в диоксид кремния. Плавиковая кислота (растворитель) удаляет диоксид с поверхности пластин, вода либо уксусная кислота являются разбавителем, регулирующим процесс травления [31].

Меняя состав раствора, можно добиться различного качества поверхности обрабатываемых пластин, как представлено на рисунке 4 [32].

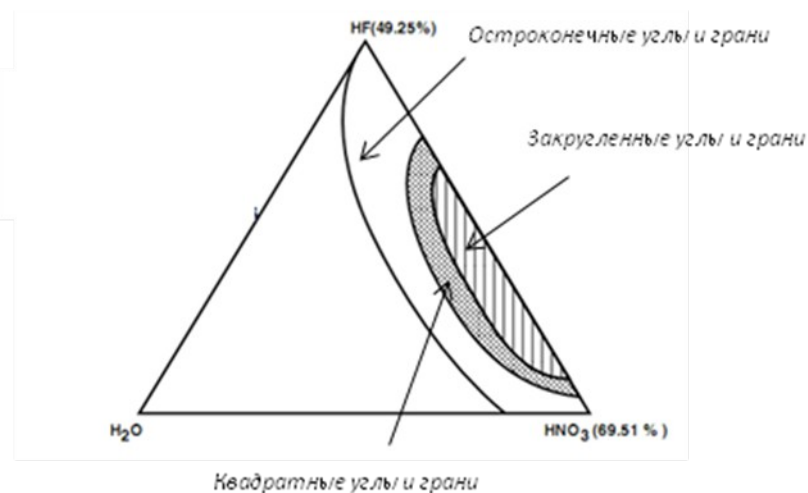


Рисунок 4 - Топология травленной поверхности кремния в зависимости от состава раствора [1].

В технологии МЭМС – приборов изотропное травление используют для следующих целей:

- удаление поврежденных в работе поверхностей;
- округления резких анизотропно вытравленных углов (во избежание появления концентраторов механических напряжений);
- удаления шероховатости поверхности после «сухого» или анизотропного травления
- утонение кремниевых пластин;
- определения *p-n*-переходов и дефектов кристаллической структуры кремния [4].

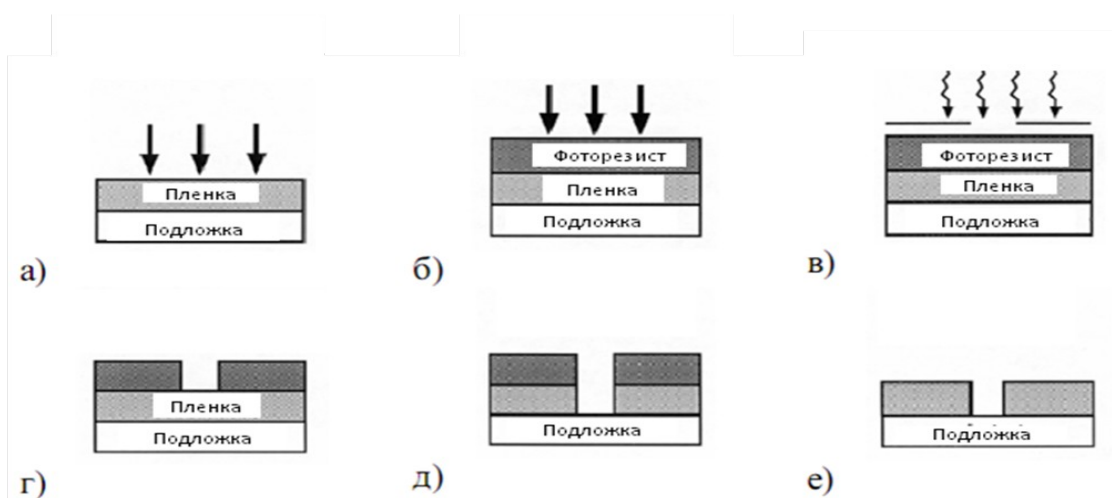
Замена жидкостных методов на «сухие» - плазмохимические и ионно-плазменные – позволяет существенно улучшить анизотропию процесса травления, увеличить разрешающую способность процесса. С помощью методов «сухого» травления можно получать структуры заданной конфигурации и нужных размеров. Меняя состав плазмообразующего газа, параметры разряда можно в широких пределах варьировать скорости процессов

травления, их анизотропию, селективность в соответствии с требованиями, предъявляемыми к размерам и характеристикам изделий.

Процесс плазменного травления характеризуется скоростью, анизотропией, разрешающей способностью, селективностью, равномерностью, текстурой получаемой поверхности, а также загрузочным эффектом.

Процесс плазменного «сухого» травления в технологии ИМС и МЭМС схематично представлен на рисунке 5.

При плазменном травлении также возможен подтрав под край маскирующего покрытия, как представлено на рисунке 6.



а) Осаждение пленки материала, б) нанесение фоторезиста, в) фотолитография, г) проявление фоторезиста, д) плазменное травление, е) удаление фоторезиста

Рисунок 5 – Типовые операции в производстве ИМС [33]

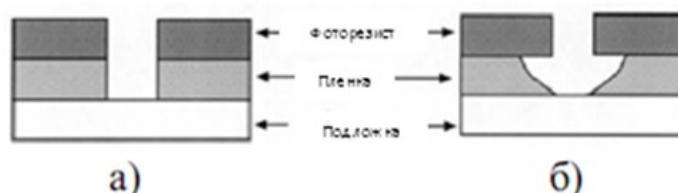


Рисунок 6 – Примеры анизотропного (а) и изотропного (б) травления [33]

В отличие от анизотропного и изотропного травления равномерность плазменного процесса выражается в процентах и может быть определена как:

$$UN = 2 \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} \cdot 100, \quad (1)$$

где R_{\max} и R_{\min} – максимальная и минимальная скорости травления соответственно. Текстурированность поверхности характеризует изменение её шероховатости после травления. В зависимости от условий процесса и рабочего газа текстурированность может как уменьшаться, так и возрастать.

В таблице 1 представлены наименования газов, используемых при плазмохимическом и ионном травлении основных материалов в кремниевой микромеханике.

Таблица 1 - Газы и газовые смеси, используемые при травлении основных материалов в микромеханике

Материал	Газовая среда
Кремний (Si)	CF ₄ /O ₂ ; SF ₆ /O ₂ /Cl ₂ ; CCl ₄ ; SiF ₄ /O ₂ , C ₂ F ₆ /CF ₃ Cl
Диоксид кремния (SiO ₂)	CF ₄ /H ₂ ; C ₂ F ₆ ; C ₃ F ₈ ; CHF ₃ /O ₂
Карбид кремния (SiC)	CF ₄ /O ₂ ; NF ₃ ; SF ₆ /Cl ₂ ; CF ₄ /Cl ₂
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	CF ₄ /O ₂ /H ₂ ; C ₂ F ₆ ; C ₃ F ₈ ; CHF ₃
Алюминий (Al)	BCl ₃ ; BCl ₃ /Cl ₂ ; SiCl ₄ /Cl ₂
Медь (Cu)	Cl ₂ ; Br ₂ ; CCl ₄

Развитие технологии плазменной обработки материалов происходит по пути интенсификации и повышения эффективности уже отработанных и изученных процессов. «Чистое» плазмохимическое травление, обеспечиваемое только химическим взаимодействием активных частиц плазмы с обрабатываемым материалом, начиная со второй половины 90-х годов, используется очень ограниченно [33]. Подавляющее большинство технологических процессов травления в плазме в настоящее время реализуется в виде ионно-стимулированных и ионно-лучевых процессов, которые сочетают

химические и физические эффекты воздействия на обрабатываемый материал.

Наибольшее распространение при производстве кремниевых микромеханических приборов получил такой перспективный метод, как реактивное ионное травление (РИТ). При проведении РИТ обрабатываемые образцы находятся в контакте с плазмой и размещаются на электроде, подключенному к источнику ВЧ – напряжения. Удаление материала происходит как за счет физического распыления ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате химических реакций между свободными атомами и радикалами в плазме, и поверхностными атомами обрабатываемого материала. При проведении РИТ физический и химический механизмы не являются независимыми: физическое распыление активизирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая тем самым скорость физического распыления.

В технологии кремниевой микромеханики существует понятие глубинное реактивно-ионное травление (ГРИТ). Это означает, что в процессе травления удаляется слой кремния, сопоставимый или равный с толщиной исходной подложки. Таким образом, можно сказать, что в данном случае мы имеем дело с объемной «сухой» микромеханикой.

Примеры технологических решений процессов «сухих» методов плазмохимического и глубокого реактивно-ионного травления кремния, а также примеры формируемых структур можно найти в ряде источников [34-43].

Примеры микромеханических акселерометров, выполненных по данной технологии, представлены в [44-51].

На основе литературных источников [1-11, 30-51] составлена таблица, в которую сведены травители, используемые при объемной микрообработке кремния. Примеры травителей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Примеры травителей для объемной микрообработки кремния

	Гидразин гидрат NH ₂ -H ₂ N	Изотропный (HF+ HNO ₃ + CH ₃ COOH)	КОН - вода	ЭДП (этилендиами н- пирокатехин- вода)	ТМАН (гидроксид тетраметил аммония)	SF ₆ (плазмохи мическое травление)	ГРИТ
Тип травления	«мокрое»	«мокрое»	«мокрое»	«мокрое»	«мокрое»	«сухое»	«сухое»
Анизотропия	да	нет	да	да	да	да/нет	да
Доступность	низкая	высокая	высокая	средняя	умеренная	высокая	ограниченна я
Скорость* травления кремния, мкм/мин	1,0...12,0	1,0...12,0	1,0...3,0	0.02...1,0	~1,0	~1,0	>1,0
Скорость* травления оксида кремния, нм/мин	1...10	10...30	1...10	1..80	~1,0	<1,0	<1,0
Шероховатост ь поверхности кремния	низкая	низкая	низкая	низкая	от низкой до высокой	от низкой до высокой	низкая
Стоимость технологии	средняя	низкая	низкая	средняя	средняя	высокая	высокая
Безопасность технологии	низкая	умеренная	умеренная	низкая	высокая	высокая	высокая
* - конкретные значения зависят от особенностей технологических процессов							

На основании анализа литературных источников [1-51] сделаны следующие выводы:

- применение анизотропного травителя на основе системы КОН – вода является предпочтительным вариантом при формообразовании структуры кремниевых микромеханических чувствительных элементов по ряду причин: доступность, получение геометрии кристаллов правильной формы в строгом соответствии с основными кристаллографическими направлениями, управляемость процесса, легкость получения маскирующих покрытий.

- применение изотропного травителя на основе плавиковой и азотной кислот позволит улучшить качество поверхности путем сглаживания рельефа, снятия острых граней для исключения концентраторов механических напряжений.

Формообразование структуры кремниевых микромеханических чувствительных элементов с использованием плазмохимического травления и, в особенности, при использовании глубокого реактивно-ионного травления кремния сопряжено с определёнными трудностями, связанными с необходимостью оснащения технологической линейки производства дорогостоящими установками «сухого» травления. Кроме того, после операций плазмохимического травления необходима более тщательная химическая обработка для удаления остатков травления, вызванная наличием продуктов химических реакций на поверхности кремниевых кристаллов, что может быть не всегда совместимо с технологическим процессом изготовления микромеханических приборов [52, 53].

1.2 Конструктивные особенности кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

Первый пьезорезистивный акселерометр разработан «Roystone и Angell» в Стэнфордском Университете в 1979 году [54].

Период между изготовлением первого акселерометра и массовым производством составил 25 лет [55], что свидетельствует о сложности технологии изготовления данного класса приборов.

С середины 1980-х в промышленных объемах стали доступны акселерометры с пьезорезисторным преобразованием. Самые ранние конструкции были подобны кремниевым датчикам давления, с дополнительной массой в центре мембраны. В современных конструкциях миниатюрная инерционная (сейсмическая) масса подвешивается с помощью опор, в структуру которых входит пьезорезисторный элемент [56].

Акселерометры, реализованные из дискретных компонентов, обладающих индивидуальными температурными характеристиками, подвержены высокой температурной зависимостью выходного напряжения, что

требует тщательного подбора параметров составных элементов каждого датчика. Эта проблема решается при интегральном изготовлении таких датчиков методами кремниевой микротехнологии.

Если в конструкции микромеханического акселерометра используется монокристаллический кремний, свойства которого в обычном состоянии нелинейны, существенным становится тщательный выбор геометрии устройства, особенно если требуется получить линейный выходной сигнал. Пьезорезистивные устройства чувствительны к загрязнениям и их характеристики испытывают температурный дрейф. Для обеспечения стабильной работы датчика его необходимо помещать в корпус и применять схему температурной компенсации, которая может быть выполнена с использованием нерабочего эталонного элемента.

Как и в случае с тензорезистивными датчиками давления, хорошей альтернативой использованию эталонного элемента является применение нескольких чувствительных элементов. Так, при использовании в качестве чувствительных элементов кремниевых пьезорезисторов, возможно их объединение в мостовую схему, как показано на рисунке 7. При правильном расположении пьезорезисторов можно увеличить чувствительность измерительной схемы, а также компенсировать температурный дрейф [56].

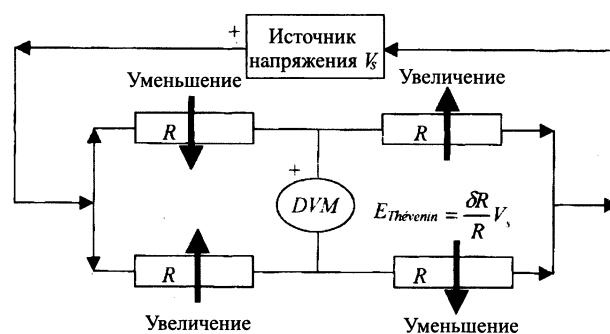


Рисунок 7 – Мостовая схема с четырьмя активными резисторами

[56]

Однако, пьезорезисторным акселерометрам присущи следующие недостатки:

- необходимость калибровки в широком температурном диапазоне - температурной компенсации ухода нуля и чувствительности, так как пьезорезисторы могут изменить свое сопротивление (и токи утечки, в случае диффузионных пьезорезисторов) более чем на порядок при температурах от минус 20 до +120 °С;

- отсутствие комплексной функции самодиагностики [57]. Во многих ответственных применениях, самотестирование предполагает регулярно проверять целостность сенсорных элементов и функциональность электронных схем посредством механического отклонения чувствительного элемента и последующую оценку результирующих электрических сигналов. В акселерометрах пьезорезистивного типа, достаточные возбуждения не существенны для принципа обнаружения движения инерционной массы и требуются дополнительные возбуждающие приводы, такие как электростатические, электротермические или пьезоэлектрические [57], влияющие на движение инерционной массы. Это влечет за собой значительное усложнение конструкции и представляет серьезный недостаток пьезорезисторных акселерометров в области безопасности критически важных приложений.

Чувствительный элемент микромеханического пьезорезистивного акселерометра в общем случае состоит из инерционной массы, поддерживаемой одной или несколькими пружинами. По крайней мере одна из пружин содержит пьезорезисторы, в большинстве случаев это четыре пьезорезистора, соединенные в мостовую схему Уитстона [29, 58-60].

Принцип работы пьезорезистивного акселерометра заключается в следующем. При отклонении инерционной массы под действием внешних сил, пьезорезисторы испытывают механическое напряжение и изменяют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста и появлению выходного сигнала при питании моста электрическим током.

Чувствительным элементом пьезорезисторных акселерометров является пьезодатчик, измеряющий деформацию пружин, поддерживающих инерционную массу. Эта деформация пропорциональна величине и скорости перемещения массы, а значит и ускорению. Пьезорезистивные акселерометры могут измерять ускорения в широком частотном диапазоне 0...13 кГц. При выборе оптимальной конструкции пьезорезистивные акселерометры выдерживают перегрузку, равную 10 000 g. Параметр перегрузки является критическим для многих применений [8].

Кремниевый кристалл со сформированной инерционной массой соединяется между двумя стеклянными пластинами. В стеклянных пластинах выполняются углубления, что позволяет инерционной массе с одной стороны свободно перемещаться, а с другой стороны служат ограничителями перемещений инерционной массы при перегрузках, испытываемых акселерометром [61].

Типичное значение чувствительности для пьезорезисторных акселерометров составляет 1...3 мВ/g, диапазон измерений 5...50 g, некомпенсированный температурный коэффициент 0.2%/°C. Серьезным недостатком пьезорезисторных акселерометров является сильная зависимость выходного сигнала от температуры, так как пьезорезисторы изначально являются источниками тепловых шумов, и относительно небольшой выходной сигнал [61].

В чувствительном элементе акселерометра ионно имплантированные пьезорезисторы могут использоваться в качестве терморезисторов, для того, чтобы компенсировать температурные изменения окружающей среды [3]. Если правильно выбрана схема температурной компенсации, пьезорезистивные акселерометры могут работать в температурном диапазоне от -50 до +120 °C [60].

На рисунке 8 представлен кремниевый твердотельный акселерометр компаний Endevco и Allied Signal Aerospace Co., обладающий широким динамическим диапазоном. Акселерометр состоит из трех слоев кремния,

внутренний слой включает в себя инерционную массу и упругую подвесную конструкцию.

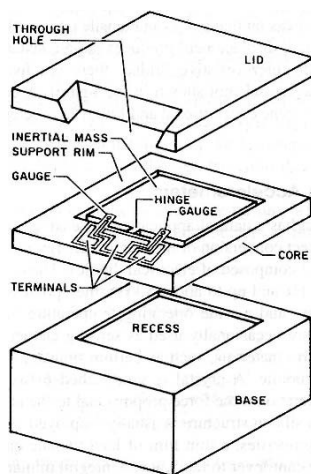


Рисунок 8 - Чувствительный элемент пьезорезистивного акселерометра [62]

Масса крепится внутри рамки и сформирована методом травления на подвесе, с двух сторон которого расположены тензодатчики, детектирующие движение массы. Внешние два слоя – крышка и основание, защищают подвижные части от внешних загрязнений. В обоих внешних слоях сделаны углубления, позволяющие инерционной массе свободно перемещаться [62]. В данной конструкции есть ряд особенностей. Одна из них заключается в том, что чувствительная ось датчика лежит в плоскости подложки, тогда как в большинстве конструкций аналогичных датчиков она перпендикулярна подложке. Изготовление всех компонентов датчика на одном кремниевом кристалле позволяет реализовать надежную и прочную механическую конструкцию.

Когда ускорение действует на чувствительную ось, инерционная масса поворачивается вокруг подвеса. При этом один из пьезорезисторов испытывает сжатие, а второй – растяжение. Поскольку пьезорезисторы имеют небольшую длину, даже небольшие перемещения вызывают большие изменения сопротивления. Для балансировки мостовой схемы в том же кремниевом кристалле сформированы подстроечные резисторы.

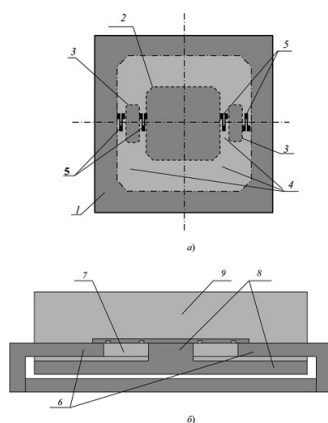
На основе технологий микромеханики изготовлены пьезорезистивные чувствительные элементы акселерометра [63]. Особенностью пьезорезистивного акселерометра является значительные (порядка $2 \cdot 10^{-4}$) рабочие деформации ЧЭ, необходимые для получения требуемого сигнала. Поскольку при измерениях относительно малых низкочастотных ускорений действующие на пьезорезистивный акселерометр ударные и высокочастотные ускорения могут многократно их превышать, успешная реализация ЧЭ акселерометра требует обеспечения высокой собственной частоты при заданной чувствительности, высокой вибро- и ударопрочности, эффективного демпфирования упругой системы.

При изготовлении кристалла ЧЭ использовались пластины кремния (100) и стандартные операции КМОП-технологии. Пьезорезисторы и терморезисторы с удельным сопротивлением $\rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, поверхностным сопротивлением $200 \text{ Ом}/\square$, температурным коэффициентом сопротивления ТКС около $0,6\%/^{\circ}\text{C}$, температурным коэффициентом чувствительности ТКЧ около $0,25\%/^{\circ}\text{C}$, дополнительные терморезисторы с ТКС около $0,15\%/^{\circ}\text{C}$, $\rho = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, поверхностным сопротивлением $20 \text{ Ом}/\square$ формировались диффузией бора, коммутационные дорожки – напылением алюминия. Крепление груза – с помощью эпоксидного клея холодного отверждения.

Конструкция, удовлетворяющая этим требованиям, представлена на рисунке 9.

Для формирования профиля использовалось глубинное анизотропное травление кремния с последующим изотропным дотравливанием на $10\text{-}30 \text{ мкм}$ для ликвидации концентраторов напряжений. Точность двустороннего совмещения элементов схемы и профилированных участков ЧЭ составляет около 5 мкм . Технология обеспечивает изготовление профилированных областей толщиной до 20 мкм .

Преимущества конструкции: обеспечение ударопрочности до 700 г , нелинейность сигнала 1% (определена на вибростенде), собственная частота – до 5 кГц .



а) вид сверху, б) вид сбоку.

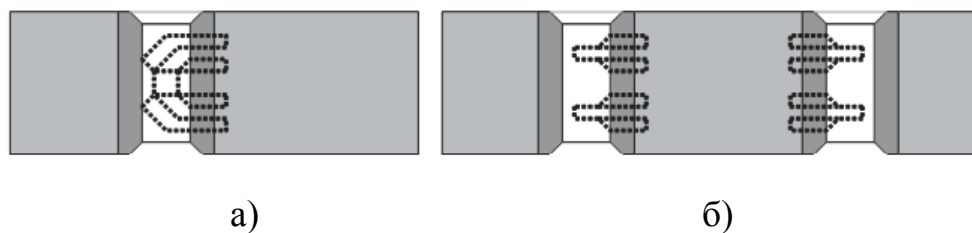
1 – жесткая периферия чувствительного элемента; 2 – центральная часть кристалла; 3 – дополнительное утолщение на профилированной области кристалла; 4 – профилированная область; 5 – тензорезисторы; 6 – П-образная перемычка, на которой закреплен ЧЭ; 7 – отверстие в перемычке; 8 – инерционный груз

Рисунок 9 - Чувствительный элемент пьезорезистивного акселерометра

Недостатки конструкции – использование диффузионной технологии и алюминиевой разводки ограничивает температурный диапазон до 100 °С. Использование эпоксидного клея дает следующий недостаток - детали приходится выдерживать в фиксированном состоянии в течение нескольких часов или даже суток, состав клея может варьироваться от партии к партии, что значительно ограничивает технологичность изготовления.

В НПК «Технологический центр» МИЭТ разработан кремниевый чувствительный элемент тензорезистивного типа, который может быть использован при создании датчика ускорения [64, 65]. Эскиз конструкции чувствительного элемента балочного типа представлен на рисунке 10.

Конструктивная часть интегрального преобразователя представлена мостовой схемой включения четырех тензорезисторов и схемой термокомпенсации изменения чувствительности, реализованные по диффузионной технологии.



а) балка с одним концентратором механических напряжений; б) балка с двумя концентраторами механических напряжений

Рисунок 10 - Эскиз конструкций чувствительных элементов интегральных тензопреобразователей (вид с обратной стороны, пунктиром обозначено положение тензорезисторов).

Недостатки данной конструкции: ограниченный температурный диапазон из-за изготовления измерительной схемы по диффузионной технологии; малый диапазон измерений ускорений.

Примеры других конструктивно-технологических решений кремниевых микромеханических чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа изложены в ряде источников [2, 66-72].

1.3 Конструктивно-технологические решения высокотемпературных пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

Рассмотренные выше примеры относятся к кремниевым микромеханическим чувствительным элементам, выполненным методами объемной микромеханики по классическим технологиям анизотропного и изотропного травления, плазмохимического и глубинного травления кремния. Отличительной особенностью рассмотренных примеров является тот факт, что измерительная схема сформирована методами ионного легирования либо

диффузией примеси в монокристаллическую кремниевую подложку. Существенным недостатком данного конструктивно-технологического решения является наличие в структуре кремниевого кристалла изолирующих *p-n*-переходов, что ограничивает температурный режим работы данных изделий до 85°C [73-75]. Кроме того, при повышенных температурах появляется значительный ток утечки, что ведет к некорректным измерениям и потере информационного сигнала.

Выходом из сложившейся ситуации является применение в конструкции микромеханического чувствительного элемента структур, изолирующих пьезорезисторы от исходной подложки. Примером может служить применение структур «кремний-на-изоляторе» (КНИ), либо переход на новые высокотемпературные материалы, например карбид кремния.

Структура КНИ представляет собой опорную пластину кремния, на которой поверх слоя диэлектрика (оксид кремния) нанесен приборный слой кремния толщиной до нескольких микрометров. Структура КНИ представлена на рисунке 11.

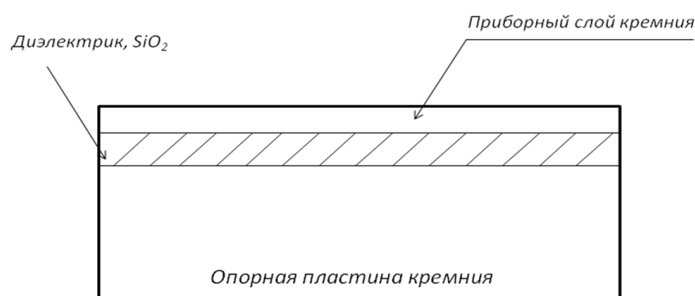


Рисунок 11 - Структура КНИ

Существует несколько методов получения структур КНИ, основные из которых подробно представлены в [76-79].

На структурах КНИ удаётся получать приборы с улучшенными характеристиками по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на

обычных кремниевых пластинах. Технологические процессы изготовления ИМС, адаптированные для структур МЭМС, могут стать наиболее подходящей основой для производства микромеханических приборов с улучшенными техническими характеристиками [80].

Замена изоляции *p-n*- переходом компонентов ИМС на полную диэлектрическую изоляцию позволяет улучшить такие характеристики микросхем, как быстродействие, повышенная радиационная и температурная устойчивость и т.д.

Основные преимущества структур КНИ перед структурами на основе объемного кремния заключены в уменьшении влияния паразитных эффектов по периметру границы прибора и надежной изоляции рабочего объема прибора от остальной схемы и подложки.

Приборы с изоляцией *p-n*- переходом имеют более значительные паразитные элементы. Диэлектрическая изоляция позволяет существенно уменьшить паразитные емкости, что повышает быстродействие приборов. Транзистор в ИМС с изоляцией *p-n*- переходом содержит паразитную тиристорную структуру, которая может привести к «защелкиванию» при воздействии переходных процессов и высоких уровнях напряжения. Полная диэлектрическая изоляция исключает подобные нежелательные эффекты, устраняет взаимовлияние между элементами схемы и обеспечивает повышенное пробивное напряжение [73]. Поскольку все проблемы, связанные с паразитными элементами и генерацией зарядов в объеме полупроводника, обостряются с ростом температуры или при действии ионизирующего излучения, ИМС и МЭМС с полной диэлектрической изоляцией компонентов в общем случае отличаются от обычных схем лучшими параметрами при высоких температурах или воздействии радиации. Диэлектрическая изоляция позволяет увеличить возможности снижения потребляемой мощности и повышения быстродействия при пониженном уровне напряжения питания ИМС. Диэлектрическая изоляция компонентов на кристалле более компактна (по сравнению с изоляцией *p-n*- переходом) и, соответственно, на всей площади

кремниевой пластины занимает меньше места, что приводит к увеличению интегральной плотности элементов. Надежность диэлектрической изоляции компонентов существенно выше надежности изоляции *p-n*- переходом. Таким образом, использование кремниевых структур, позволяющих изготавливать ИС с полной диэлектрической изоляцией, является не только перспективным, экономически целесообразным, но и, возможно, единственным способом получения приборов с необходимыми рекордными параметрами.

Структуры КНИ могут использоваться практически для любых типов микросхем. Наиболее широкое применение структуры КНИ нашли в процессах получения: высоковольтных ИМС, изготавливаемых по биполярной и смешанной технологиям; высокоскоростных КМОП схем; оптоэлектронных микросхем; низкоэнергопотребляющих схем, а также, в последнее время - сенсоров и микроэлектромеханических систем.

Примером такой МЭМС-системы может служить пьезорезисторный акселерометр высокого диапазона с расширенным температурным диапазоном, разработанным компанией «Microsystems Laboratory» (University of California, Irvine) [81]. Чувствительный элемент акселерометра формируется методами объемной микромеханики: используется «сухое» травление кремния пластины SOI, при этом одновременно формируется измерительная схема Уитстона, инерционная масса, упругие перемычки. Главное преимущество конструкции – отсутствие изолирующих *p-n*- переходов, присущих всем пьезорезистивным датчикам.

Чувствительный элемент высокотемпературного акселерометра представлен на рисунке 12.

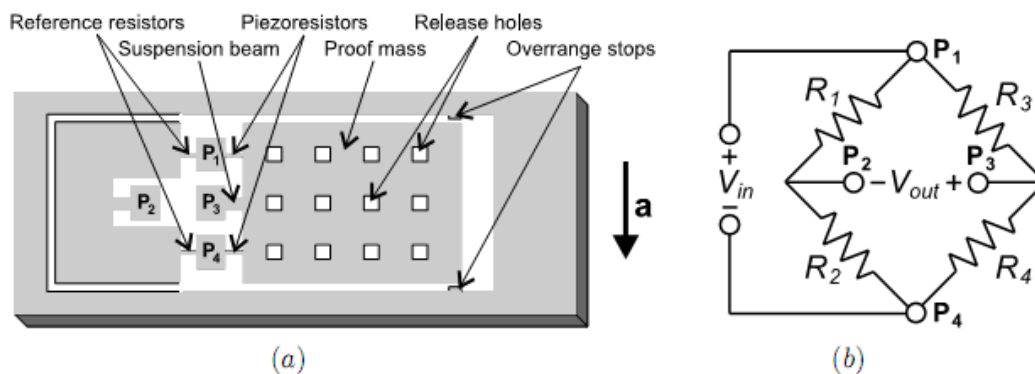


Рисунок 12 - Чувствительный элемент (a) и электрическая схема акселерометра пьезорезистивного типа [81]

Измерительная схема формируется глубоким реактивным травлением верхнего слоя кремния пластины КНИ, таким образом, толщина пьезорезистора – это толщина верхнего слоя кремния. На рисунке 13 представлена фотография фрагмента чувствительного элемента пьезорезистивного акселерометра.

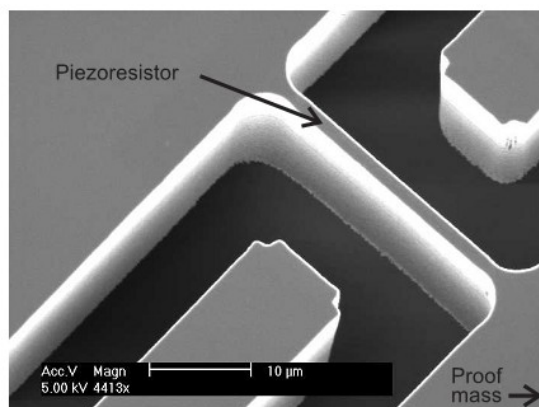
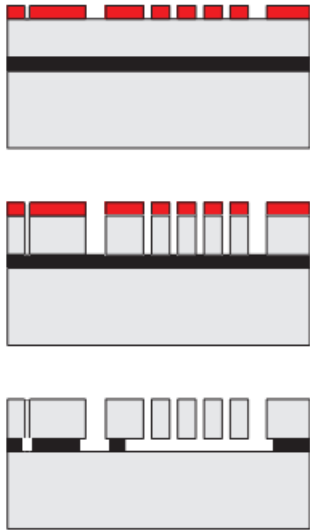


Рисунок 13 - Сформированный пьезорезистор «Microsystems Laboratory» (University of California, Irvine) [81]

Упрощенная схема изготовления чувствительного элемента представлена на рисунке 14.



Шаг 1 - Формирование топологии структуры на пластине SOI методом фотолитографии

Шаг 2 – Глубокое реактивное ионное травление приборного слоя

Шаг 3 – Травление фоторезиста, «жертвенного» оксида, высвобождение структур

Рисунок 14 Схема формирования чувствительного элемента пьезорезистивного акселерометра на пластинах КНИ

Очевидные преимущества данной конструкции – отсутствие *p-n*-переходов за счет использования монокристаллического слоя кремния пластины КНИ, высокая рабочая температура.

Недостатки – недостаточно высокий диапазон измерений; необходимость использования пластин КНИ, трудность в изготовлении и обработке пластин КНИ.

Примеры реализации чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа с использованием пластин КНИ можно найти ряде источников [82-90].

Карбид кремния получил в последнее время распространение в микромеханике прежде всего благодаря своим механическим и электрическим свойствам. Карбид кремния имеет твёрдость по Кнуппу 2480 кг/мм^2 , что больше чем у кремния (850 кг/мм^2), модуль Юнга – 700 ГПа (у кремния 190 ГПа). Карбид кремния имеет ширину запрещенной зоны $2,3\text{-}3,4 \text{ эВ}$, что значительно больше чем у кремния, высокую электрическую прочность ($30 \cdot 10^5 \text{ В/см}$), высокую теплопроводность ($3,2\text{-}4,9 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$). Благодаря этому карбид кремния становится незаменимым материалом при создании устройств,

работоспособных в экстремальных условиях: повышенная температура, радиация, сильные электрические поля, высокие механические напряжения. Теоретически карбидокремниевые приборы могут достигать рабочего температурного диапазона до 1000 °С [91]. Следует, однако, отметить меньший коэффициент тензочувствительности карбида кремния по сравнению с объемным монокристаллическим кремнием (30 и 90 соответственно).

Карбид кремния SiC может иметь различную кристаллическую структуру – кубическую (3C;SiC), гексагональную (2H;SiC, 4H;SiC, 6H;SiC и nH;SiC), ромбоэдрическую (15 R, 21 R и др.). Сегодня известно около 200 кристаллических модификаций SiC, которые имеют различие в упаковке атомов в кристаллической структуре [92].

В технологии микромеханических приборов наибольшее значение получил политип 6H-SiC в силу особенностей кристаллической структуры и технологии изготовления, позволяющей формировать химическим осаждением из газовой фазы (CVD – метод) пленки карбида кремния как на кремниевых, так и на карбидокремниевых подложках. Значительное число публикаций посвящено созданию микромеханических приборов на основе данного политипа и технологическим особенностям его обработки.

Пример реализации микромеханического пьезорезистивного акселерометра на основе карбида представлен в работе [93]. Чувствительный элемент акселерометра представляет собой кристалл размерами (4х6,25) мм², сформированной на его поверхности измерительной схемой Уитстона. Кристалл имеет инерционную массу, соединённую с рамкой кристалла упругими перемычками. Пьезорезисторы расположены в местах наибольших деформаций на упругих перемычках. Пьезорезисторы имеют мезаструктуру, выполненную «сухим» травлением эпитаксиального слоя карбида кремния ориентации (1000)

n-типа проводимости (уровень легирования $3 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Эпитаксиальный слой формируется химическим осаждением из газовой фазы на высокоомную (7 Ом•см) подложку карбида кремния *p*-типа проводимости 6H-SiC – политипа.

Фотография кристалла, полученная с помощью СЭМ ACLBOS400 и сечение кристалла в произвольном масштабе показаны на рисунке 15.

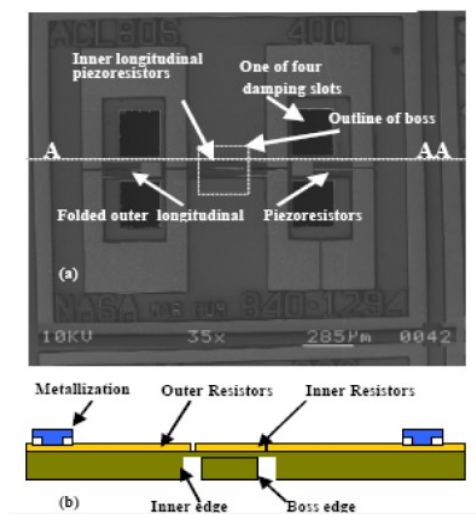


Рисунок 15 - СЭМ-фотография пьезорезистивного акселерометра на основе карбида кремния и его сечение, показывающее расположение пьезорезисторов [93]

Заявленные характеристики изготовленного экспериментального образца акселерометра:

- диапазон измерений - до 40000 м/с^2 ;
- чувствительность – $5 \dots 34 \text{ нВ/м/с}^2$;
- температурный диапазон $>600^\circ\text{C}$.

Достоинства конструкции – температурный диапазон измерений, связанный с применением карбида кремния в конструкции чувствительного элемента.

Недостатки конструкции – низкий выходной сигнал по сравнению с монокристаллическим кремнием (например, $0,8\text{-}0,2 \text{ мВ/г}$ у акселерометра 7264В компании Endevco), а также низкая степень отработки формирования чувствительного элемента из карбида кремния, связанная с трудностями получения равномерно легированных эпитаксиальных слоев.

Примеры выполнения микромеханических чувствительных элементов пьезорезистивных акселерометров также представлены в ряде работ [94-100].

В ходе проведенного анализа литературных источников выявлены следующие тенденции развития чувствительных элементов пьезорезистивных акселерометров:

1. Основным материалом для изготовления является монокристаллический кремний в силу своих уникальных особенностей:

- отличные упругие свойства - отсутствие усталостной деформации, отсутствие гистерезиса;

- легкая способность к формообразованию химическим анизотропным и изотропным травлением - геометрия формируемых структур может быть произвольной (при изотропном травлении), грани кристалла могут быть расположены по основным кристаллографическим направлениям $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ (при анизотропном травлении);

- способность к формированию защитных пленок диоксида кремния (маски при травлении, диффузии примеси и ионном легировании) термическим окислением поверхности пластин;

- совместимость большинства операций формирования кристаллов с технологиями ИМС;

- доступность материала.

2. Кремниевый кристалл пьезорезистивного акселерометра состоит из инерционной массы, рамки кристалла и тонкой упругой перемычки, соединяющей рамку кристалла с инерционной массой. На упругой перемычке в зоне наибольших деформаций расположены пьезорезисторы для детектирования воздействующего ускорения. Для увеличения чувствительности принимаются следующие меры: пьезорезисторы объединяют в полную мостовую схему Уитстона, упругую перемычку формируют как можно тоньше.

3. Основными методами при получении структуры кремниевого кристалла микромеханического акселерометра является жидкостное и плазмохимическое (реактивно-ионное) травление кремния, основные методы

формирования измерительной схемы Уитстона – диффузия либо легирование кремния примесью.

Рассмотренные примеры кремниевых микромеханических акселерометров на основе диффузионной технологии [21-28.] имеют существенный недостаток, а именно ограниченный температурный диапазон работы (до 85°C), связанный с наличием в структуре кристалла диффузионных либо ионнолегированных пьезорезисторов (наличие в объеме кристалла обратно смещённых *p-n* – переходов), что ведет к появлению больших токов утечки при повышенных температурах и потере информационного сигнала и, как следствие, к потере работоспособности акселерометра.

Ряд примеров [87-100] лишены указанных недостатков. Это связано с тем, что пьезорезисторы изолированы от основного объема кристалла слоем двуоксида кремния [87-92] и изготовлены из пленки монокристаллического кремния, расположенного на окисле. В данном варианте сохраняются все положительные свойства кремния, связанные с его упругими свойствами. Кроме того, в данном варианте отсутствуют обратно смещённые *p-n* – переходы в структуре кристалла и паразитные токи утечки. Однако изготовление чувствительных элементов на структурах КНИ сопряжено с рядом технологических трудностей и не является легко решаемой задачей, а именно:

- защита поверхности пластин при травлении подразумевает наличие на её поверхности защитного слоя оксида кремния. Приборный слой кремния имеет толщину до нескольких микрон, и каждый процесс окисления при таких размерах будет существенно уменьшать толщину приборного слоя [73], что может сказаться на электрических характеристиках формируемых элементов;

- кремниевые чувствительные элементы формируются двусторонним травлением пластин. При этом наличие в структуре пластин скрытого слоя диоксида кремния, несимметрично расположенного по отношению к планарной и непланарной стороне пластины, требует различного подхода к травлению с планарной и непланарной стороны, а именно: травление приборного слоя кремния – скрытого оксида – травление опорной пластины с планарной

стороны, травление опорной пластины с непланарной стороны. Необходимо введение промежуточной операции травления скрытого слоя оксида кремния в технологический маршрут изготовления, что снижает его технологичность;

- неотработанность технологии формирования чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа на пластинах КНИ;

- отсутствие пластин КНИ надлежащего качества на российском рынке, что является сдерживающим фактором развития высокотемпературной электроники в целом;

- при желании наладить собственное производство пластин КНИ разработчики и технологи столкнутся с необходимостью наличия сложного специализированного дорогостоящего оборудования, необходимостью длительной отработки технологий.

При использовании в качестве основного материала карбида кремния SiC в производстве микромеханических акселерометров можно добиться значительного повышения температурного диапазона (до 600°C), устранить паразитные токи утечки. В данном варианте также существует ряд особенностей:

- коэффициент тензочувствительности карбида кремния практически в три раза меньше, чем у объемного монокристаллического кремния. Как следствие, нижний диапазон измерений приборов на карбиде кремния будет в три раза выше, чем у образцов, изготовленных из монокристаллического кремния;

- сложность ионного легирования карбида кремния до значений, оптимальных для построения измерительных схем и последующего термического отжига;

- сложность термического окисления поверхности карбида кремния для создания защитных масок при травлении и легировании;

- способность карбида кремния к травлению только методом глубокого реактивно-ионного травления подразумевает наличие сложного дорогостоящего оборудования в технологической производственной линейке;

- отсутствие приемлемых по качеству пластин карбида кремния на российском рынке, с воспроизводимостью параметров от партии к партии, что является сдерживающим фактором развития высокотемпературной электроники в целом.

Таким образом, задачами исследования является разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C, соединяющих в себе, с одной стороны, отличные упругие свойства кремния как конструкционного материала, а с другой стороны, имеющие в своей структуре изолированную от подложки измерительную схему, состоящую из легированных до необходимого уровня пьезорезисторов для обеспечения измерения воздействующего ускорения.

2. Обоснование и выбор конструктивно-технологических решений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

2.1 Обоснование конструктивно-технологических решений кремниевого кристалла чувствительного элемента

Микромеханические пьезорезистивные акселерометры предназначены для измерения вибрационных, ударных и линейных ускорений a , величина которых определяется отношением инерционной силы P к массе m :

$$a = \frac{P}{m} \quad (2)$$

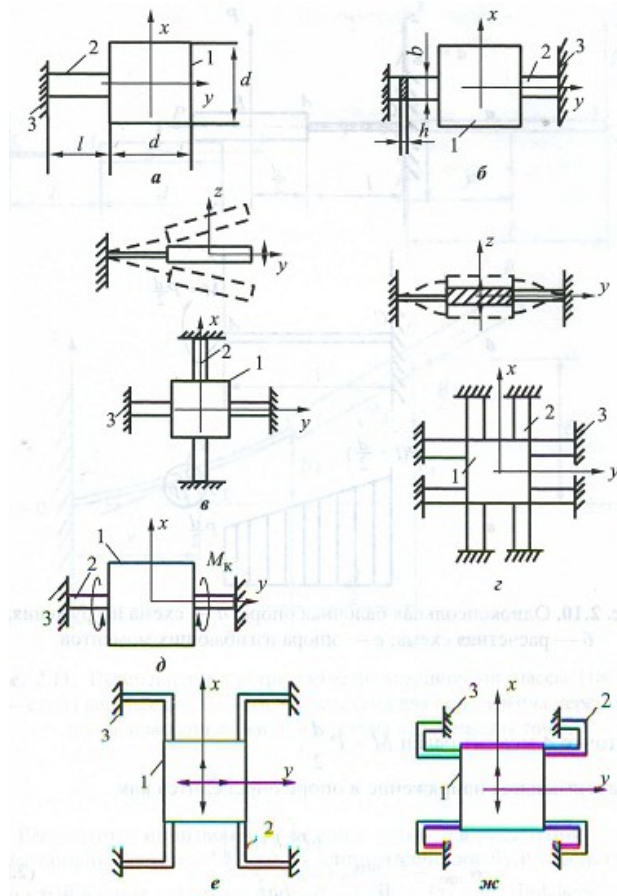
При моделировании свойств чувствительных элементов акселерометров используют подвижную массу, подвешенную на упругой опоре с жесткостью k . Ускорение для возможных вариантов подвеса подвижной массы, представленных на рисунке 16, равно [101]:

$$a = \frac{kx}{m} \quad (3)$$

где x – перемещение подвижной массы.

Измеряя перемещение подвижной массы при известных k и m можно определить действующее на чувствительный элемент ускорение. Такой метод измерения ускорения называется инерционным.

Графически на рисунке 17 схематически изображена модель микромеханического акселерометра в виде колебательной системы. Чувствительный элемент с подвижной массой m опирается на пружину с жесткостью k и на демпфер с коэффициентом демпфирования b .



а) одноконсольная балочная опора; б) двухконсольная мостовая балочная опора; в) четырехконсольная двухосная мостовая балочная опора; г) четырехконсольная двухосная спаренная мостовая балочная опора; д) торсионная опора; е) четырехконсольная ломаная одноветьевая балочная опора; ж) четырехконсольная ломаная двухветьевая балочная опора

1 – инерционная масса; 2 – упругая балка; 3 – корпус прибора

Рисунок 16–Схематическое изображение микромеханического акселерометра [101]

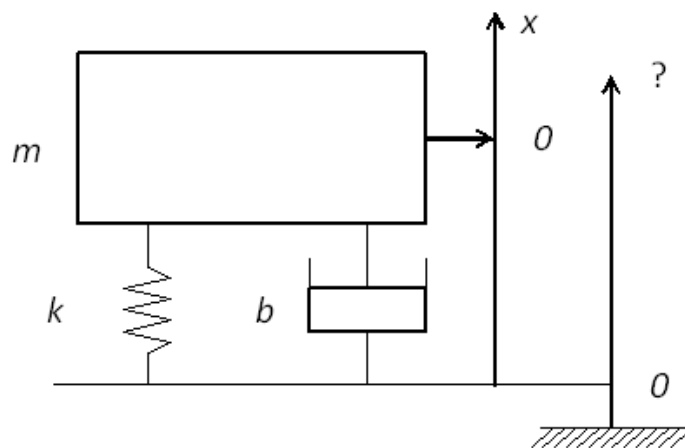


Рисунок 17 - Структурная модель микроакселерометра [101]

Обеспечение необходимого демпфирования – одна из основных задач проектирования чувствительных элементов микромеханических акселерометров. Собственные колебания чувствительного элемента с относительно большим временем затухания препятствуют быстрой обработке измеряемого сигнала. Поэтому главное назначение демпфера – уменьшение времени собственных колебаний и обеспечение защиты от перегрузок. Вязкий демпфер обычно формируют в зазоре между инерционной массой и крышкой корпуса. Наиболее распространены воздушный и жидкостные демпферы, позволяющие получить линейное сопротивление [102].

Подвес инерционной массы на одной упругой консольной балке (рисунок 16 ,а) обеспечивает повышенную чувствительность микромеханического акселерометра. Недостатком этой схемы является существенная поперечная чувствительность. Подвес инерционной массы на двух консольных балках позволяет увеличить поперечную жесткость и существенно уменьшить поперечную чувствительность. Общим недостатком консольной схемы подвеса является нарушение соосности рамки и инерционной массы при больших перемещениях.

Микромеханический акселерометр является системой с кинематическим возбуждением. Измеряемая величина действует на основание чувствительного элемента, которое при установке прибора на исследуемый вибрирующий объект совершает вынужденные колебания, аналогичные колебаниям объекта. При измерении меняющихся ускорений возникают частотные погрешности, зависящие от отношений круговой частоты собственных колебаний ω_0 инерционной массы к круговой частоте ω , действующих на объект.

Диапазон рабочих частот можно расширить, увеличив собственную частоту микромеханического акселерометра за счет уменьшения его инерционной массы, либо увеличением жесткостиподвеса. Однако при этом уменьшится чувствительность, поэтому высокочастотные акселерометры менее чувствительны.

Микромеханический пьезорезистивный акселерометр представляет собой комбинированный датчик двойного преобразования. Измеряемое ускорение обуславливает появление инерционной силы, которая деформирует упругие балки. На балках сформированы твердотельные кремниевые пьезорезисторы, образующие простейший вторичный преобразователь – мостовую электрическую схему Уитстона, где деформация балок приводит к изменению сопротивления пьезорезисторов и появлению электрического сигнала. Пьезорезистивные акселерометры являются параметрическими датчиками прямого преобразования ускорения в параметр электрической цепи – сопротивление [103, 104].

Свойства микромеханического акселерометра как средства измерения определяются в первую очередь тем, как он воспринимает и воспроизводит в электрической форме на выходе подлежащую измерению механическую величину.

Эти свойства выражаются рядом основных механических и метрологических характеристик, которые определяют по следующей методике.

Рабочая деформация упругого подвеса определяется по формуле:

$$\varepsilon_R = \delta_R / E = \frac{M}{(W_z E)} \quad (4)$$

где δ_R - напряжение при изгибе в месте расположения пьезорезисторов, M – изгибающий момент, $M = Pl$, P – инерционная нагрузка, $P=ma$, m – инерционная масса, l – расстояние от центра масс до пьезорезисторов.

Для расчета напряжений в балочном подвесе инерционной массы могут быть использованы методы механики [101]. При консольном подвесе

$$\delta_R = \frac{M}{W_x}, \quad (5)$$

где W_x – момент сопротивления изгибу поперечного сечения кремниевой балки в области упругого элемента (концентратора механических напряжений), для прямоугольного поперечного сечения балки определяемый выражением

$$W_x = \frac{bH^2}{6} \quad (6)$$

где b , H – ширина и высота сечения упругого элемента.

Изгибающий момент рассчитывают по формуле:

$$M = \frac{Pl_l}{2n} \quad (7)$$

где n – число упругих элементов для подвески инерционной массы, l_l – длина упругого элемента.

Важнейшей нормируемой характеристикой микромеханического акселерометра является чувствительность – отношение изменения сигнала на выходе к вызывающему его изменению измеряемого ускорения:

$$S = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta g} \quad (8)$$

При $a = 1g$ статическая чувствительность акселерометра определяется как

$$S_{st} = S_1 \cdot S_2 = \frac{\varepsilon_R}{g} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{\varepsilon_R} = \varepsilon_R U_m \quad (9)$$

где S_1, S_2 – чувствительность первичного (упругий элемент) и вторичного (мост Уитстона) преобразователей, $U_{\text{вых}}$ – нормированное выходное напряжение, U_m – напряжение на мосте, ε_R – деформация пьезорезисторов.

Специфическими особенностями, из которых вытекают требования к построению чувствительного элемента микромеханического акселерометра, отличными от чувствительного элемента датчика давления, являются необходимость выполнения перфорации поверхности или выполнения сквозных отверстий для обеспечения демпфирования, и необходимость формирования заданных динамических характеристик.

В этой связи в чувствительном элементе микромеханического акселерометра должны быть совмещены три измерительных преобразователя:

- преобразователь ускорения в силу;
- преобразователь силы в перемещение;
- преобразователь перемещения в деформацию.

Два первых преобразователя выполняются традиционными для акселерометра способом – в виде механической колебательной системы с заданными статическим прогибом $\Delta_{ст}$ и собственной частотой ω_0 .

Для реализации преобразователя деформации конструкцию чувствительного элемента целесообразно выполнять в виде несимметрично заземленной консоли, соединенной с опорным кремниевым элементом посредством трех упругих перемычек, две из которых имеют толщину h_2 , превышающую толщину третьей перемычки. При этом сочетание массы инерционного элемента с более жесткими перемычками с толщиной h_2 образует колебательную систему в виде маятника, отклонение линии заземления которого под воздействием измеряемого ускорения деформирует менее жесткую перемычку толщиной h_1 с расположенными на ней пьезорезисторами. Каждому сочетанию амплитудного и частотного диапазонов измерений будет соответствовать определенное сочетание геометрических размеров упругих подвесов.

При использовании монокристаллического кремния в качестве конструкционного материала методами объемной микромеханики можно сформировать конструкцию чувствительного элемента, удовлетворяющую данным требованиям: выполнить гибкие упругие подвесы различной толщины с разных сторон кремниевой пластины – планарной и непланарной, сформировать инерционную массу. Причем все геометрические размеры можно выполнить с большой точностью.

Для создания высокочувствительных интегральных преобразователей ускорения необходимо снижение толщины упругих элементов, что в свою очередь ведет к снижению прочности кремниевых балок и повышенному температурному дрейфу выходного сигнала. Оптимизируя технологические методы обработки интегральных преобразователей физических величин в процессе их производства, можно достичь устойчивых высоких эксплуатационных характеристик микромеханических акселерометров.

Например, снижение толщины оксида кремния в области мембраны позволяет избежать её коробления, вследствие различных коэффициентов температурного расширения материалов в структуре, и производить более чувствительные интегральные преобразователи ускорения.

Улучшение технических характеристик микромеханических акселерометров может быть достигнуто путем оптимизации конструктивно-технологических параметров на основе методов моделирования и экспериментального исследования. Создание необходимой системы концентраторов механических напряжений, расположения в них пьезорезисторов и выполнение унифицированных технологических операций является основой оптимизации микромеханических акселерометров.

В настоящее время при производстве микромеханических приборов в качестве конструкционного материала чаще всего используется монокристаллический кремний. Доминирующие позиции кремния связаны с несколькими причинами: он распространен, недорог, способен осаждаться тонкими пленками; кремниевая подложка может содержать много идентичных кристаллов. К тому же, монокристаллы кремния обладают более совершенными, по сравнению с поликристаллическими или аморфными материалами, свойствами [105, 106].

Характерной особенностью монокристалла кремния является анизотропия физических свойств, связанная с различными расстояниями и силами между атомами в кристаллической решетке. Вследствие этого изменение ориентации топологии микромеханических приборов на пластине монокристаллического кремния может привести к значительным вариациям характеристик прибора. Практически все микромеханические приборы в простейшем случае представляют собой комбинацию чувствительной массы (масс) и упругих элементов. Очевидно, что характеристики упругих элементов во многом определяют параметры приборов.

Упругие свойства изотропных твердых тел при трехосном напряженном состоянии определяются тремя параметрами: модулем Юнга E , коэффициентом Пуассона ν и модулем сдвига G [107,108]. Два из них независимы, а третий выражается через них однозначно. Для анизотропных материалов, к которым принадлежат полупроводники, упругие свойства определяются набором гораздо большего числа коэффициентов. В общем случае упругие свойства

анизотропных материалов описываются тензором четвертого ранга, содержащим 81 компоненту. Однако число независимых компонентов тензора для кристалла с определенной симметрией значительно уменьшается. Известно [107], что упругие свойства кристаллов с кубической симметрией (к которым относится и кремний) в системе координат, определяемой кристаллографическими осями, описываются всего лишь тремя независимыми модулями упругости или тремя коэффициентами податливости. Часто при расчетах пользуются теорией упругости изотропных тел, поэтому упругие свойства кремния выражают в привычных для изотропной среды определениях с помощью модулей Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона через упомянутые три коэффициента. Поскольку кремний является анизотропным материалом, то и значения этих модулей не будут постоянными, а будут зависеть от выбранного направления в кристалле.

Изменения модулей Юнга, сдвига, и коэффициента Пуассона в наиболее широко используемых при производстве МЭМС плоскостях (100), (110), (111) в зависимости от выбранного кристаллографического направления представлены на рисунке 18.

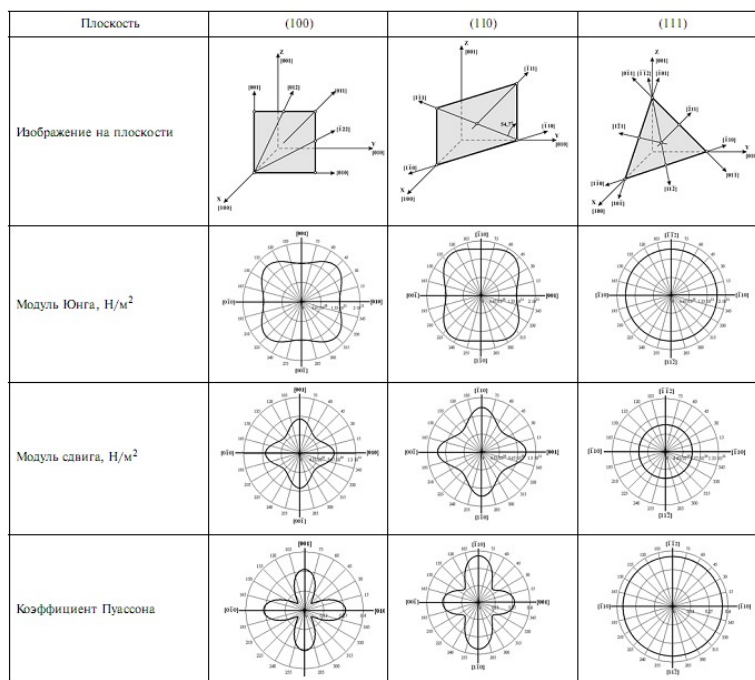


Рисунок 18 - Параметры монокристаллического кремния в зависимости от ориентации пластин [25].

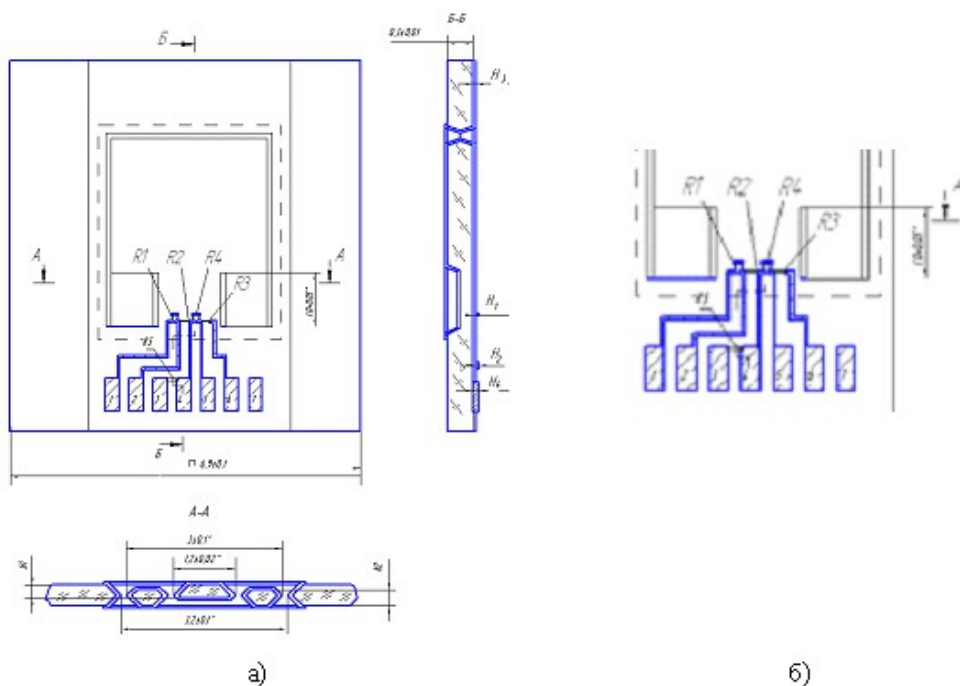
Целью диссертационной работы является расширение температурного диапазона измерений, снижение начального выходного сигнала при воздействии температуры и температурной погрешности измерений кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

В соответствии с проведенным анализом методов формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров выбран монокристаллический кремний как конструкционный материал кристалла чувствительного элемента. При этом измерительная схема на основе пьезорезисторов изолирована от монокремния пленкой двуокиси кремния и выполнена из поликристаллического кремния, легированного до необходимого уровня.

В микромеханике на кремнии известны примеры реализации подобных структур – микромеханические кремниевые датчики давления на основе поликремния [109, 110]. В таких датчиках пьезорезисторы, объединенные в мостовую схему Уитстона, выполнены из пленки поликремния, расположенного поверх термически выращенного слоя оксида кремния SiO_2 на планарной стороне опорной кремниевой пластине (обычно КЭФ-4,5, ориентации (100)). Методами объемной микромеханики с непланарной стороны выполнен профиль для увеличения чувствительности датчика давления.

Данные технические решения приняты во внимание при разработке пьезорезисторных чувствительных элементов акселерометров.

Изображение кремниевого кристалла пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра представлено на рисунке 19.



$h1$ – 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 19– Кристалл чувствительного элемента (а), увеличенная топология измерительной схемы (б)

Кристалл имеет три упругие балки-перемычки, смещенные по толщине кристалла. На балках-перемычках размещены пьезорезисторы $R1 - R4$, включенные по мостовой схеме, а также резистор $R5$, предназначенный для использования в схеме компенсации влияния изменения температуры на чувствительность акселерометра.

При воздействии ускорения балка кристалла испытывает механическую деформацию, что приводит к изменению сопротивлений плеч измерительного моста пропорционально измеряемому ускорению. Величина удельного поверхностного сопротивления пьезорезисторов $\rho_{ps} = 120...150$ Ом/□. Расчетная величина номиналов пьезорезисторов $R1 - R4 = (2000 \dots 2500)$ Ом.

Чувствительный элемент представляет собой модуль, состоящий из кремниевого кристалла и двух стеклянных крышек - ограничителей, соединенных электростатическим методом. Стеклянные крышки обеспечивают

конструктивный воздушный зазор, тем самым обеспечивая воздушное демпфирование колебаний инерционного груза.

Выбор данных конструктивно-технологических решений обусловлен следующим:

- подвес инерционной массы на профиле кристалла и двух консольных балках позволяет увеличить поперечную жесткость и существенно уменьшить поперечную чувствительность;

- преобразователь деформации выполняется в виде несимметрично заземленной консоли, соединенной с опорным кремниевым элементом посредством трех упругих перемычек (профиля кристалла и двух консольных балках);

- ориентация боковых граней кристалла и пьезорезисторов p -типа по кристаллографическим направлениям $[110]$ позволяет добиться максимальной чувствительности при воздействии измеряемой величины.

2.2 Аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханического акселерометра

Существующие модели кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов 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 изготовления чувствительных элементов и их выходные характеристики, такие как начальный выходной сигнал и чувствительность.

Существующие структурные схемы акселерометров пьезорезистивного типа не учитывают влияние воздействующей температуры на выходной сигнал акселерометров. Температурные эффекты в кремниевом кристалле представлены на рисунке 22.



Рисунок 20 – Температурные эффекты в кремниевом кристалле

При протекании электрического тока через 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 р-п-переходов, что также увеличивает токи утечки.

Мостовая схема включения ЧЭ изображена на рисунке 23:

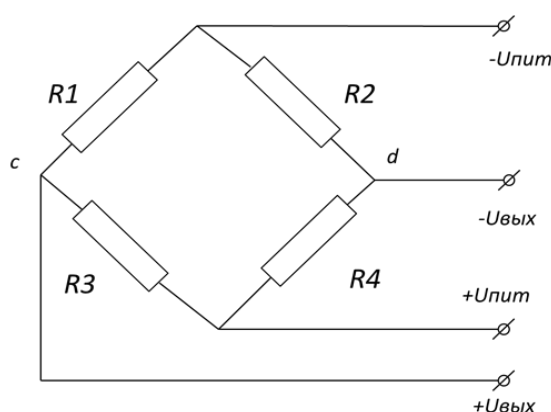
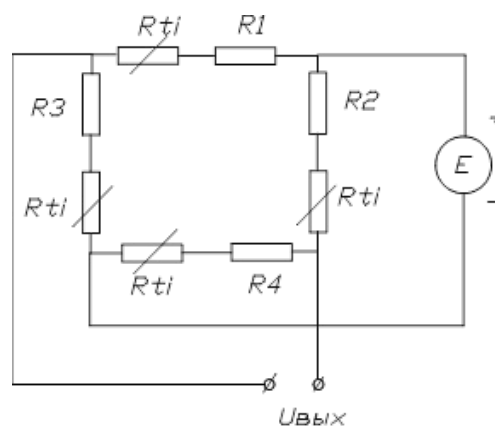


Рисунок 21 – Мостовая схема включения ЧЭ

Эквивалентную мостовую схему при воздействии температуры можно представить в следующем виде (рисунок 22).



$R1 \dots R4$ – сопротивления пьезорезисторов
 R_{ti} – термосопротивление, вызванное саморазогревом резисторов

Рисунок 22 – Эквивалентная мостовая схема при воздействии температур

Электрические свойства чувствительных элементов на основе пьезорезисторов, в основном, определяются температурами осаждения поликристаллической пленки и отжига кристалла, которые в процессе исследований задаются в следующих диапазонах: $T_{\text{осаж}}=580-650^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{отж}}=870-1060^{\circ}\text{C}$. В качестве примера в таблице приведены некоторые значения сопротивлений пьезорезисторов, полученных при различных технологических режимах.

Таблица 4 – Значение сопротивления пьезорезисторов

№, п\п	$T_{\text{отж}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{осаж}}=600^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{осаж}}=620^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{осаж}}=640^{\circ}\text{C}$
		$R_i, \text{Ом}$	$R_i, \text{Ом}$	$R_i, \text{Ом}$
1	890	2025	–	2449
2	900	2001	2300	2410
3	920	–	2229	–
4	950	1950	2180	2295
5	975	1934	–	–
6	1000	1920	2110	2230
7	1010	–	2093	–
8	1030	–	–	2207

Обработка результатов экспериментов методами статистической обработки экспериментальных данных позволила представить в аналитическом виде

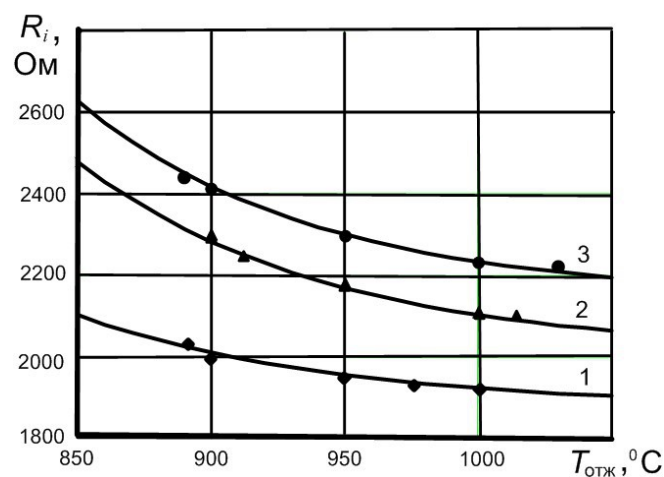
зависимость сопротивления пьезорезисторов от технологических параметров их получения:

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

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

Данная формула справедлива при следующих технологических параметрах: температура осаждения поликристаллического кремния - $T_{\text{осаж}}=580-650^\circ\text{C}$; температура отжига поликристаллического кремния - $T_{\text{отж}}=870-1060^\circ\text{C}$.

Зависимость сопротивления пьезорезисторов от технологических параметров получения, рассчитанная на основе уравнения (1), и экспериментальные данные приведены на рисунке 25. Видно, что наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и теоретических значений, что позволяет без проведения большого числа дорогостоящих и продолжительных во времени экспериментов прогнозировать свойства пьезорезисторов в зависимости от технологических режимов их получения. Данная зависимость положена в основу модели управления свойствами пьезорезисторов и выходными параметрами ЧЭ микромеханических акселерометров за счет технологических режимов получения.



■, ▲, ● – эксперимент, — – расчет по уравнению (1)

1 – $T_{осаж}=600^\circ\text{C}$; 2 – $T_{осаж}=620^\circ\text{C}$; 3 – $T_{осаж}=640^\circ\text{C}$

Рисунок 23 – Зависимость сопротивления пьезорезисторов от технологических режимов получения

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

При разработке технологии изготовления микромеханических акселерометров, работающих при температурах более 100°C , необходимо учитывать изменения сопротивления чувствительных элементов на основе пьезорезисторов ΔR_i и контактных площадок при нагревании $\Delta R_{ме}$. Тогда температурная зависимость мостовой схемы примет вид:

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

Увеличение сопротивления контактных площадок с ростом температуры связано с механизмами рассеяния носителей заряда на узлах кристаллической решетки. Толщина контактных площадок, изготовленных из алюминия, составляет более 1 мкм, следовательно, размерными эффектами можно пренебречь. Поэтому величина изменения сопротивления контактных площадок при нагревании рассчитывается с учетом значений удельного

сопротивления для алюминия $\rho=2,8 \cdot 10^{-8}$ (Ом·м) при $T_0=20^\circ\text{C}$ и геометрических размеров контактных площадок по следующему уравнению:

$$\Delta R_{\text{мс}}(T_{\text{изм}}) = \frac{\rho [1 + \text{TKR}(T - T_0)] l j}{bd}, \quad (3)$$

где $\text{TKR}=4,3 \cdot 10^{-3}$ Ом/ $^\circ\text{C}$; $l= 650 \cdot 10^{-6}$ м; $b= 300 \cdot 10^{-6}$ м; $d= 1,1 \cdot 10^{-6}$ м, j -число контактных площадок в схеме, равное пяти.

Рассчитанные значения изменения сопротивления контактных площадок в процессе нагревания приведены на рисунке 24. В диапазоне температур от 20 до 120 $^\circ\text{C}$ оно изменяется почти на 40 %, однако по абсолютной величине изменение сопротивления мало по сравнению с сопротивлением пьезорезисторов на основе поликристаллического кремния и его изменением в процессе нагревания.

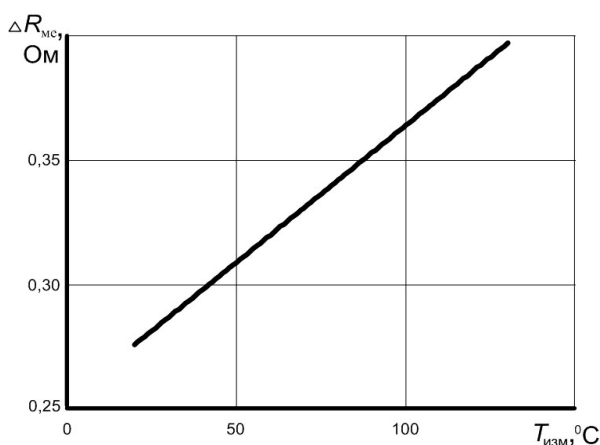


Рисунок 24 – Изменение сопротивления контактных площадок при нагревании

Существует несколько моделей физических процессов, протекающих в резистивных структурах на основе поликристаллических материалов, где электропроводность структур представляется зависимой величиной от размеров кристаллитов, высоты межкристаллитных барьеров, причем уменьшение подвижности носителей заряда связывается с возникновением на границах кристаллитов потенциальных барьеров [111-114]. При расчете температурной зависимости предполагается, что все кристаллиты представляют собой кубические структуры с одинаковой длиной ребра L [111] и концентрацией примесных атомов, равной $N_{\text{пр}}$.

Основной вклад в величину тока, протекающего через границы зерен, дает термоэлектронная эмиссия. Так как расстояние между зернами составляет не менее 50 \AA , то туннельной составляющей тока можно пренебречь [112].

Эффективная подвижность носителей заряда $\mu_{\text{эф}}$ в случае термоэлектронной эмиссии выражается следующим уравнением:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{qL}{\sqrt{2\pi m_{\text{эф}} kT}} \exp\left(\frac{-V_b}{kT}\right) \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура; $m_{\text{эф}}$ — эффективная масса носителей заряда; q — заряд электрона, V_b — высота потенциального барьера.

При малых размерах зерен ($< 100 \text{ нм}$) преобладающим механизмом рассеяния носителей заряда являются границы зерен, а при больших размерах — появляются механизмы рассеяния носителей заряда аналогичные монокристаллическим полупроводникам.

Температурная зависимость эффективной массы носителей заряда имеет вид [114]:

$$m_{\text{эф}} = m^0 + \text{ТКМ}(T - T_0) \quad (5)$$

m^0 — эффективная масса носителей заряда при температуре 300К, равная $1,09 \cdot m_0$; ТКМ — температурный коэффициент эффективной массы электронов, равный $1,6 \cdot 10^{-4} m_0$.

Величину изменения сопротивления пьезорезисторов с ростом температуры можно представить в следующем виде:

$$\Delta R_i(T_{\text{изм}}) = \frac{l_{\text{п}}}{qn(T_{\text{изм}})\mu_{\text{эф}}(T_{\text{изм}})b_{\text{п}}d_{\text{п}}} \quad (6)$$

где n — концентрация носителей заряда, обуславливающих электропроводность поликристаллического кремния; T соответствует $T_{\text{изм}}$; $b_{\text{п}} = l_{\text{п}} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d_{\text{п}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Концентрация носителей заряда рассчитывается на основе следующего уравнения:

$$n(T_{\text{изм}}) = (N_{\text{пр}})^{0,5} \left(\frac{2\pi m_{\text{эф}}(T_{\text{изм}})kT_{\text{изм}}}{h^2} \right)^{\frac{3}{4}} \exp\left(\frac{-E_{\text{пр}}}{2kT_{\text{изм}}}\right) \quad (7)$$

где $N_{\text{пр}}$ – концентрация примесных атомов; $E_{\text{пр}}$ – энергия активации примесных уровней; h – постоянная Планка.

На рисунке 25 приведена зависимость изменения сопротивления чувствительных элементов при нагревании, рассчитанные по уравнению (6) с учетом (4), (5) и (7). Видно, с увеличением температуры измерения от 20 до 120 °С сопротивление чувствительных элементов уменьшается почти на 100 Ом, что связано с тепловой генерацией свободных носителей заряда. Следовательно, с увеличением температуры измерения сопротивление контактных площадок растет, а чувствительных элементов падает, причем изменение сопротивления последних является доминирующим процессом, приводящим к изменению номинала пьезорезисторов почти на 5 %.

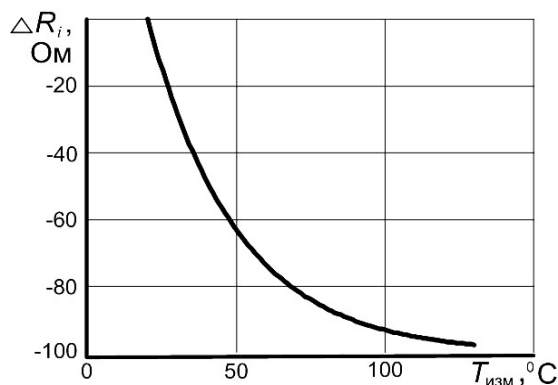
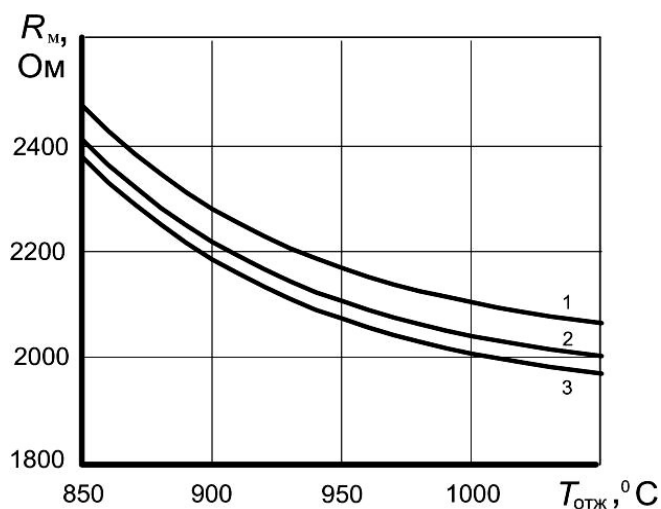


Рисунок 25 – Изменение сопротивления чувствительных элементов при нагревании

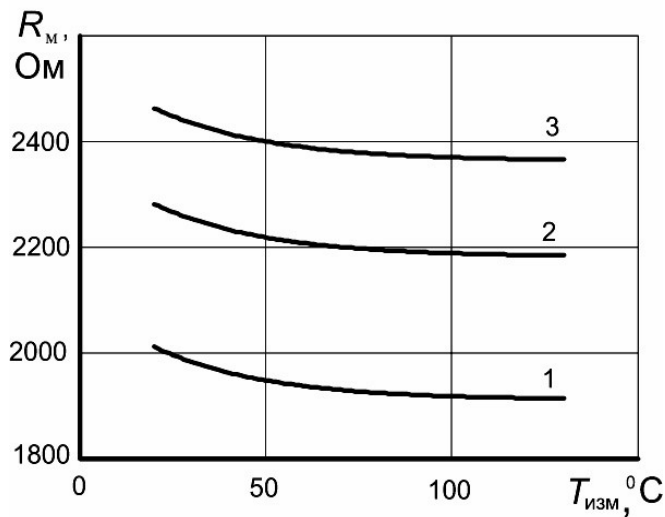
Таким образом, в модели взаимосвязи технологических режимов получения, электрических свойств пьезорезисторов и выходных параметров чувствительных элементов необходимо учитывать температурную девиацию сопротивлений пьезорезисторов и контактных площадок, приводящую к разбалансу мостовой схемы. В рамках разработанной модели установлена корреляция между свойствами пьезорезисторов, параметрами мостовой схемы, технологическими режимами их получения и температурой измерения, которую иллюстрируют рисунки 28-30. Видно, что взаимосвязь между этими параметрами многозначная, изменение одного из параметров приводит к

резкому изменению свойств пьезорезисторов. Свойства пьезорезисторов и параметры мостовой схемы определяются соотношением между технологическими режимами, а также температурой измерения. Анализ морфоструктуры поверхности пленок поликристаллического кремния и их свойств позволил выявить технологические параметры получения элементов измерительной схемы, обеспечивающие высокие электрические характеристики, адгезию к поверхности окисного слоя на кремнии в диапазоне температур от 20 до 120 °С.



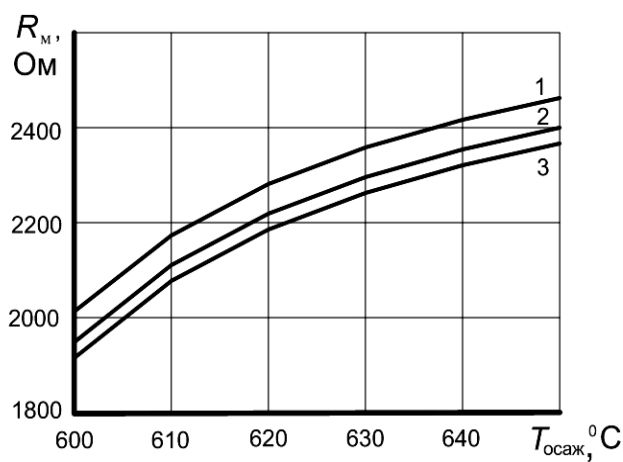
1 – $T_{изм} = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_{изм} = 50^\circ\text{C}$; 3 – $T_{изм} = 120^\circ\text{C}$

Рисунок 26 – Зависимости сопротивления мостовой схемы от температуры отжига пьезорезисторов, осажденных при $T_{осаж} = 620^\circ\text{C}$, для различных температур измерения



1 – $T_{\text{осаж}} = 600^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{\text{осаж}} = 620^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{\text{осаж}} = 650^{\circ}\text{C}$

Рисунок 27 – Зависимости сопротивления мостовой схемы от температуры измерения для пьезорезисторов, отожженных при $T_{\text{отж}} = 900^{\circ}\text{C}$, для различных температур осаждения



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

Рисунок 28 – Зависимости сопротивления мостовой схемы от температуры осаждения пьезорезисторов, отожженных при $T_{\text{отж}} = 900^{\circ}\text{C}$, для различных температур измерения

Определение статической чувствительности.

Усилие, действующее на инерционную массу кристалла при ускорении $1g$ определяется как:

$$P = M_i \cdot g \quad (8)$$

где M_i – подвижная масса, определяемая как:

$$M_i = L_i \cdot B_i \cdot H_i \cdot \rho \quad (9)$$

где L_i , B_i , H_i – длина, ширина, высота подвижной массы, ρ – плотность кремния.

Максимальный изгибающий момент в точке заделки упругой перемычки и рамки кристалла определяется как:

$$M = \frac{PL}{2} \quad (10)$$

где l – длина упругой перемычки (профилированного участка кремниевого кристалла).

Момент сопротивления определяется как:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} \quad (11)$$

где b , h – ширина и толщина упругой перемычки.

Максимальное напряжение в упругой перемычке определяется как :

$$\delta_R = \frac{6Pl}{2bh^2} \quad (12)$$

Рабочая деформация пьезорезисторов определяется как:

$$\varepsilon_R = \frac{\delta_R}{E} = \frac{6Pl}{2bh^2 E} \quad (13)$$

где E – модуль упругости кремния.

Чувствительность микромеханических акселерометров рассчитывается по следующему выражению:

$$S_0 = \frac{\varepsilon R}{g} \cdot U_{\text{ВЫХ}} \quad (14)$$

С учетом влияния параметров осаждения и выражая напряжение мостовой схемы через сопротивление выражение для определения статической чувствительности переписывается:

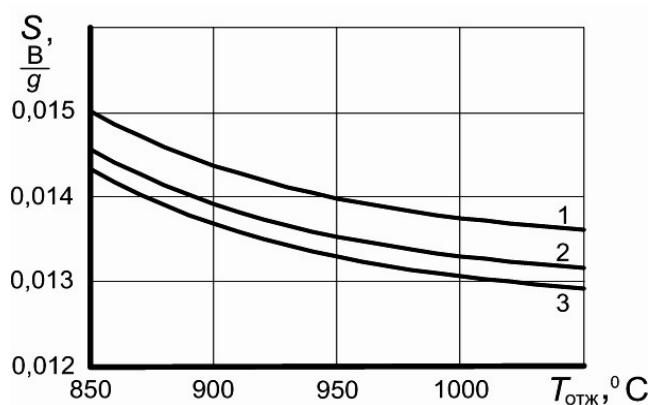
$$S(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}}, g) = \frac{\varepsilon R}{g} R_M(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}}) I(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}}) \quad (15)$$

С учетом (8,13) выражение (15) переписывается в следующем виде:

$$S(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}}, g) = \frac{6 \cdot L_i \cdot B_i \cdot H_i \cdot \rho \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot g} \frac{R_M(T_{\text{осаж}}, T_{\text{отж}}, T_{\text{изм}})}{E} \cdot I \quad (16)$$

где I – сила тока, протекающего через мостовую схему.

Установленные в рамках разработанной модели закономерности вида: чувствительность микромеханических акселерометров – технологические режимы их получения – внешние воздействия приведены на рисунках 29–33.



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

Рисунок 29 – Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от температуры отжига пьезорезисторов, осажденных при $T_{\text{осаж}} = 620^\circ\text{C}$, для различных температур измерения при ускорении $1g$

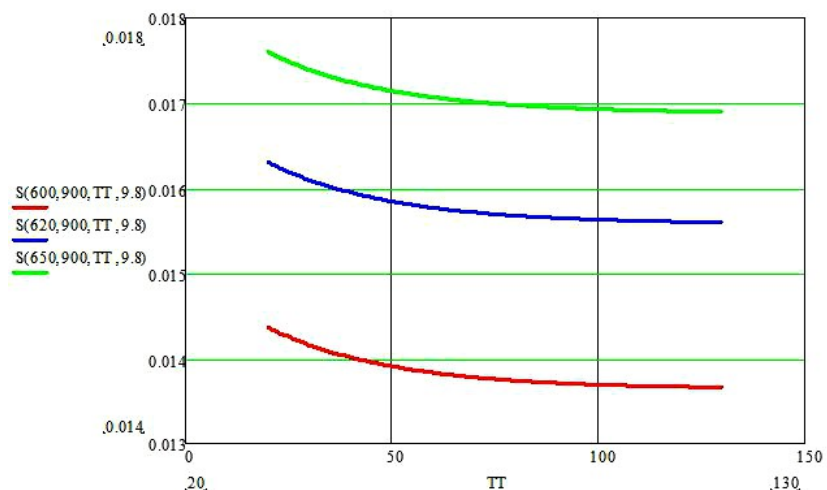


Рисунок 30 – Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от температуры измерения для пьезорезисторов, отожженных при $T_{отж}=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, для различных температур осаждения при ускорении $1g$

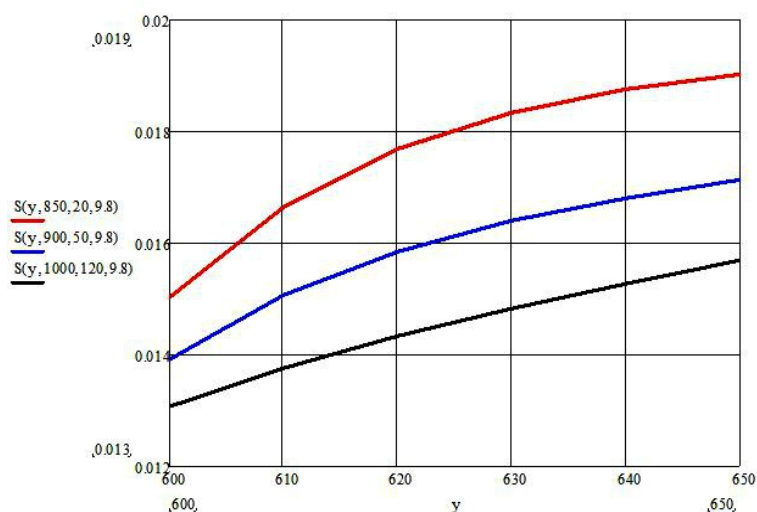
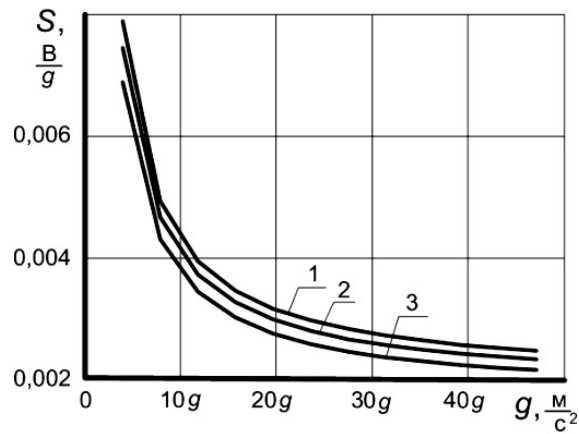


Рисунок 31 – Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от температуры осаждения пьезорезисторов, отожженных при различных температурах, для различных температур измерения при ускорении $1g$



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

Рисунок 32 – Зависимости чувствительности ЧЭ микромеханических акселерометров от ускорения для пьезорезисторов, полученных при различных технологических режимах и температурах измерения

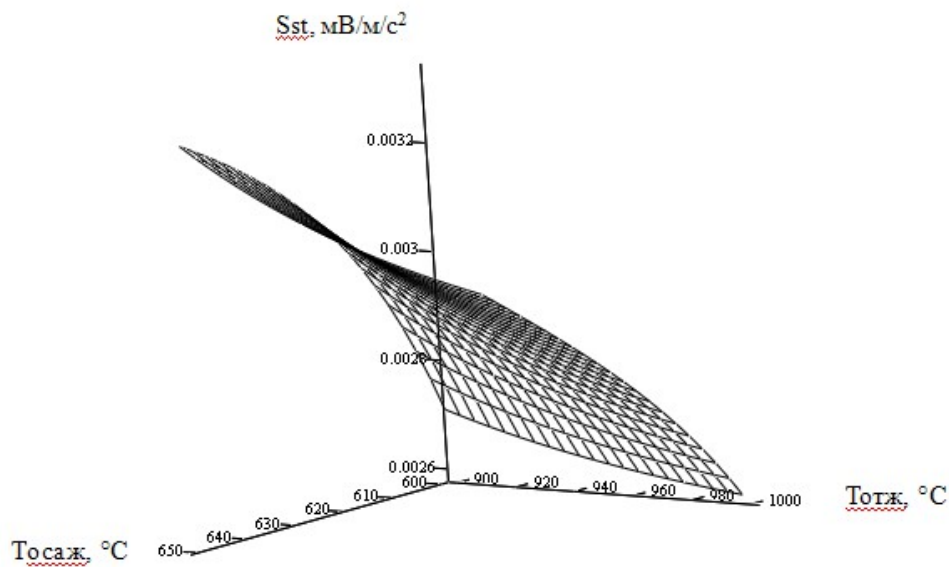


Рисунок 33 – Зависимость статической чувствительности от режимов осаждения и отжига пленки поликристаллического кремния

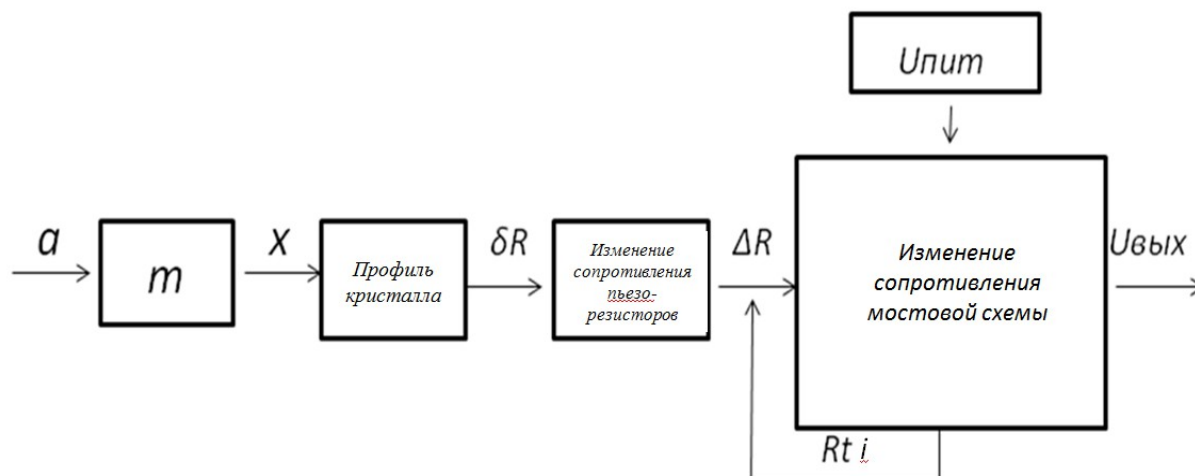
Статическая чувствительность позволяет задавать диапазон измерений, исходя из этого выбраны режимы $T_{\text{осаж}}$ и $T_{\text{отж}}$ пленки поликремния.

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 изготовления ЧЭ на основе пьезорезисторов.

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

2.3 Технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

Структурная схема микромеханического чувствительного элемента представлена на рисунке 36.



a - воздействующее ускорение, x - перемещение упругого элемента, δR - деформация пьезорезисторов, ΔR - разбаланс мостовой схемы, $U_{\text{пит}}$ - напряжение питания, $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение, R_{ti} - дополнительное сопротивление, вызванное саморазогревом резисторов от питающего напряжения

Рисунок 34 – Структурная схема чувствительного элемента акселерометра с учетом эффекта воздействия температуры.

В соответствии с данной схемой разработана технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с учетом предложенных эквивалентной схемы и модели управления электрическими параметрами ЧЭ, приведенная на рисунке 37, и оригинальная топология измерительной схемы микромеханических акселерометров.

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

Технологическая модель является описанием используемых технологий, необходимых для формирования чувствительного элемента. Она отражает влияние технологических операций и режимов на выходные параметры чувствительного элемента, такие как начальный и номинальный выходной сигнал, температурная погрешность измерений и тп. Технологическая модель микромеханического чувствительного элемента иерархична, т.е. каждая из технологий состоит из более простых технологий.

В предложенной модели кремниевого пьезорезистивного ЧЭ микромеханического акселерометра отсутствуют обратно 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.

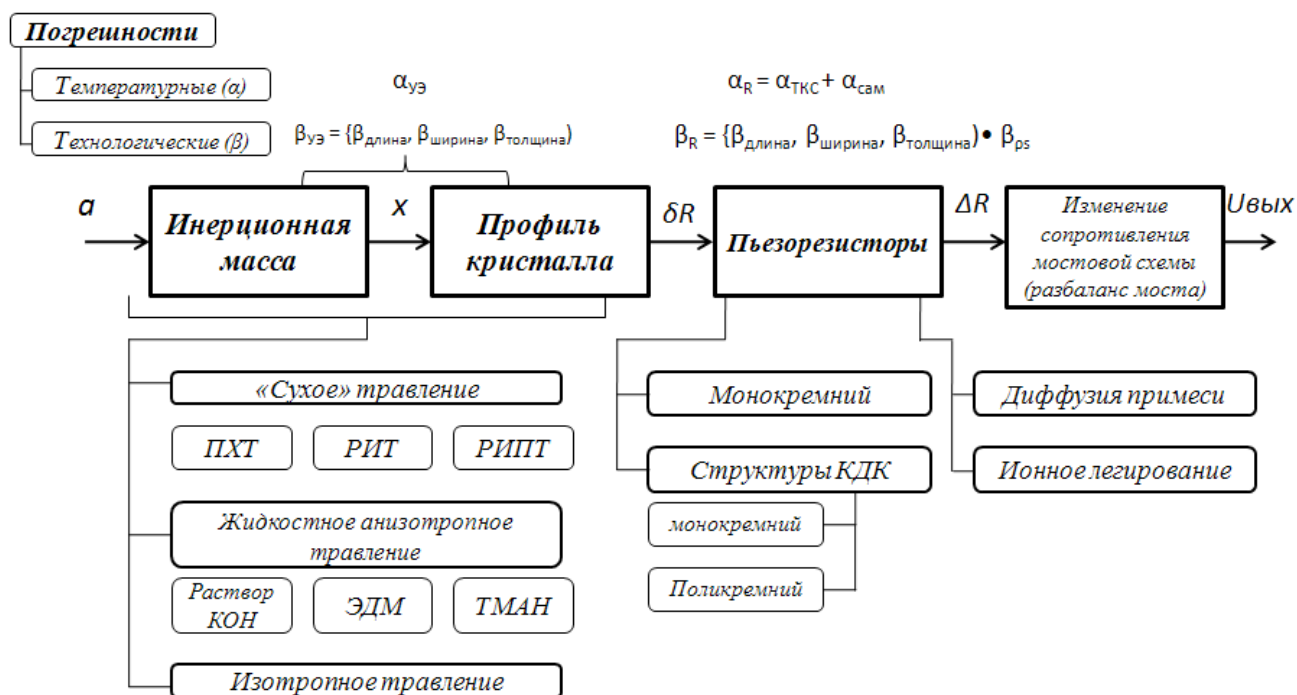


Рисунок 35 – Технологическая модель кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра

К основным характеристиками кремниевого ЧЭ микромеханического акселерометра, определяющим его характеристики, можно отнести следующие[2]:

1. нелинейность выходного сигнала;
2. гистерезис выходного сигнала;
3. температурный коэффициент выходного сигнала;
4. температурный коэффициент начального выходного сигнала.

Основная погрешность определяется нелинейностью и гистерезисом выходного сигнала, температурная погрешность определяется температурными коэффициентами выходного сигнала и начального выходного сигнала.

Нелинейность выходного сигнала кремниевого ЧЭ складывается из нелинейности эффекта пьезосопротивления и нелинейности преобразовательной характеристики упругого элемента (профиля кристалла).

Температурный коэффициент выходного сигнала кремниевого ЧЭ с поликремниевыми пьезорезисторами определяется алгебраической суммой температурных коэффициентов сопротивлений (ТКС) и пьезочувствительности (ТКЧ). При этом ТКС и ТКЧ равны по величине и противоположны по знаку [2].

Начальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ микромеханического акселерометра с поликремниевыми пьезорезисторами появляется вследствие ошибок фотолитографии, неоднородного легирования пьезорезисторов и механическими напряжениями, возникающими в слое поликристаллического кремния при его формировании из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения поликристаллического кремния и диэлектрика. Механические напряжения также могут возникать в кремниевом ЧЭ при его формировании методом анизотропного травления, связанные с неоднородностью травления и появлением заостренных граней кремния.

В технологической модели учтено влияние технологических режимов формирования на выходные параметры чувствительных элементов.

Таблица 5 – Влияние технологических режимов на параметры кремниевых чувствительных элементов

<i>Возможные погрешности в кремниевом ЧЭ</i>	<i>Влияющий фактор</i>	<i>Параметр ЧЭ</i>	<i>Технологические методы компенсации погрешности</i>
Технологическая погрешность изготовления упругого элемента ($\beta_{УЭ}$):			
Погрешность воспроизведения длины и ширины УЭ ($\beta_{длина}$, $\beta_{ширина}$)	Погрешность изготовления фотошаблонов (а), погрешность совмещения при операциях фотолитографии (б)	Начальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ, номинальный выходной сигнал	Совмещение топологических слоев в инфракрасном свете (а,б). Совмещение топологических слоев по сквозным отверстиям, сформированным в кремниевой пластине (а,б).
Погрешность воспроизведения толщины ($\beta_{толщина}$)	Неоднородность травления, связанная с изначальным разбросом по толщине исходных кремниевых пластин (а), неполное	Номинальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ.	Отбраковка пластин по толщине (а), контроль травливания защитных окисных пленок в областях под

<i>Возможные погрешности в кремниевом ЧЭ</i>	<i>Влияющий фактор</i>	<i>Параметр ЧЭ</i>	<i>Технологические методы компенсации погрешности</i>
	травление защитных окисных пленок в областях под профиль (б), неравномерность травления (в)		профиль (б), периодический контроль состава травителя (в), перемешивание травителя (в)
Погрешность из-за механических напряжений в УЭ $\beta_{\text{Мех}}$	Возникают в процессе анизотропного травления при формировании структуры ЧЭ при появлении заостренных граней кремния (а)	Гистерезис выходного сигнала (смещение «нуля») ЧЭ	Устранение заостренных граней ЧЭ полирующим травителем (а)
Технологическая погрешность β_{R} формирования пьезорезисторов			
Погрешность воспроизведения длины и ширины пьезорезисторов $\beta_{\text{длина}}, \beta_{\text{ширина}}$	Погрешность изготовления фотошаблонов (а), погрешность совмещения при операциях фотолитографии (б)	Начальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ, номинальный выходной сигнал	Совмещение топологических слоев в инфракрасном свете (а,б). Совмещение топологических слоев по сквозным отверстиям, сформированным в кремниевой пластине (а,б).
Погрешность расположения пьезорезисторов на упругом элементе $\beta_{\text{РУЭ}}$	Погрешность изготовления фотошаблонов (а), погрешность совмещения при операциях фотолитографии (б)	Номинальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ; чувствительность ЧЭ.	Совмещение топологических слоев в инфракрасном свете (а,б). Совмещение топологических слоев по сквозным отверстиям, сформированным в кремниевой пластине (а,б).
Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления β_{ps}	Неточность формирования слоя поликремния по толщине (а), разброс поверхностного сопротивления в слое поликремния после ионного легирования (б)	Начальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ, Чувствительность ЧЭ; Температурная погрешность измерений	Быстрый термический отжиг сформированных поликремниевых слоев (б)
Погрешность из-за механических напряжений в поликремниевых пьезорезисторах β_{RM}	Возникают в слое поликристаллического кремния при его формировании из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения поликристаллического кремния и диэлектрика (а)	Начальный выходной сигнал кремниевого ЧЭ; гистерезис выходного сигнала	Быстрый термический отжиг сформированных поликремниевых слоев (а)

<i>Возможные погрешности в кремниевом ЧЭ</i>	<i>Влияющий фактор</i>	<i>Параметр ЧЭ</i>	<i>Технологические методы компенсации погрешности</i>
Температурная погрешность чувствительного элемента α	Возникает из-за зависимости главных пьезорезистивных коэффициентов от температуры	Температурный коэффициент чувствительности и (ТКЧ) ЧЭ	
Температурная погрешность упругого элемента $\alpha_{УЭ}$ (монокристаллического кремния)	Определяется температурным коэффициентом линейного расширения кремния (ТКЛР)	Температурный коэффициент чувствительности и (ТКЧ)	
Температурная погрешность α_R пьезорезисторов:			
Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) пьезорезисторов $\alpha_{ТКС}$	Зависит от уровня легирования кремния, а также типа вводимой примеси	Температурная погрешность измерений; Чувствительность (ТКЧ) ЧЭ	Подбор уровня легирования, обеспечивающего необходимое значение ТКС и ТКЧ; Термический отжиг формируемых пленок поликристаллического кремния
Разброс температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) пьезорезисторов $\alpha_{\Delta ТКС}$	Разброс ТКС пьезорезисторов из-за разного уровня легирования (а), связанного с разбросом уровня легирования по пластине, недостаточным «вскрытием» окон в защитных окисных пленках под легирование (б)	Температурная погрешность измерений; Температурный «дрейф» «нулевого» сигнала	Отработка технологии легирования (а); Контроль вскрытия «окон» (б) в защитных пленках
Температурная зависимость тока утечки α_{Iy}	Токи термогенерации $I_g(a)$, ток утечки по поверхности кристалла $I_s(b)$, диффузионный ток I_d в объеме кристалла (в).	Температурная погрешность измерений	Отмывка кристаллов перед операциями сборки (б), Изоляция пьезорезисторов от объема кристалла (а,в)
Погрешность, вызванная эффектом саморазогрева пьезорезисторов при подаче питающего напряжения (тока): $\alpha_{САМ}$	Возникает из-за теплового сопротивления ЧЭ: пьезорезисторов, упругого элемента.	Температурная погрешность измерений; Температурный «дрейф» «нулевого» сигнала Температурный коэффициент чувствительности и (ТКЧ)	Обеспечение теплоотвода от УЭ; оптимизация топологических схем (желательное расположение пьезорезисторов – тангенциальное).

Погрешность чувствительного элемента можно представить в виде объединения погрешностей:

$$\gamma = \alpha \cdot \beta$$

где α – совокупность температурных погрешностей чувствительного элемента; β – совокупность технологических погрешностей изготовления чувствительных элементов.

Технологические погрешности.

Технологические погрешности складываются из нескольких составляющих:

$$\beta = \beta_{уэ} + \beta_R$$

где $\beta_{уэ}$ – технологическая погрешность изготовления упругого элемента:

$$\beta_{уэ} = \{\beta_{длина}, \beta_{ширина}, \beta_{толщина}\}$$

$\beta_{длина}$, $\beta_{ширина}$, $\beta_{толщина}$ – технологическая погрешность изготовления упругого элемента. Первые две погрешности связаны с неточностью воспроизведения геометрии чувствительного элемента, что в свою очередь связано с погрешностями изготовления фотошаблонов, погрешностями совмещения при операциях фотолитографии (погрешности фотолитографической установки).

Погрешность $\beta_{толщина}$ воспроизведения толщины упругого элемента связана с неточностью времени травления кремния (погрешность средства измерения, используемого для контроля времени травления). Также данная погрешность обусловлена изначальным разбросом по толщине исходных кремниевых пластин (разброс толщины по пластине может достигать значений 6 мкм).

Технологическую погрешность β_R формирования пьезорезисторов можно представить в виде объединения погрешностей формирования поликремниевых пьезорезисторов и погрешности воспроизведения удельного поверхностного сопротивления:

$$\beta_R = \beta_{геометр.размеров} \cdot \beta_{ps}$$

или:

$$\beta_R = \{\beta_{длина}, \beta_{ширина}, \beta_{толщина}\} \cdot \beta_{ps}$$

По аналогии с погрешностями изготовления упругого элемента $\beta_{длина}$, $\beta_{ширина}$ связаны с погрешностями изготовления фотошаблонов, погрешностями совмещения при операциях фотолитографии (погрешности фотолитографической установки). Погрешность β_{ps} воспроизведения удельного поверхностного сопротивления связана с неточностью

формирования слоя поликремния по толщине (погрешность средства измерения, используемого для контроля осаждения), а также с разбросом поверхностного сопротивления в слое поликремния после ионного легирования (разброс значений поверхностного сопротивления после легирования может достигать 10%), связанного с различной дозой вводимого вещества по пластине.

Температурные погрешности.

Температурные погрешности складываются из нескольких составляющих:

$$\alpha = \alpha_{уэ} + \alpha_R$$

где $\alpha_{уэ}$ – температурная погрешность упругого элемента (монокристаллического кремния). Очевидно, что $\alpha_{уэ}$ является температурным коэффициентом линейного расширения кремния (ТКЛР).

Температурную погрешность α_R пьезорезисторов можно представить в следующем виде:

$$\alpha_R = \alpha_{ТКС} + \alpha_{сам}$$

где $\alpha_{ТКС}$ – температурный коэффициент сопротивления пьезорезисторов (определяется на практике).

$\alpha_{сам}$ – погрешность, вызванная эффектом саморазогрева пьезорезисторов при подаче питающего напряжения (тока).

Погрешности $\beta_{уэ}$, β_R , - инструментальные погрешности, $\alpha_{уэ}$ – определяется физикой функционирования кремниевых чувствительных элементов.

Для создания функционирующего при температурах более 100°C пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра необходимо более тщательно проанализировать погрешность α_R , поскольку именно поведение поликремниевых пьезорезисторов будет определять функционирование прибора в области высоких температур.

Рассмотрим более подробно эффект саморазогрева.

Эффект саморазогрева резисторов необходимо учитывать для оценки его влияния на характеристики изготавливаемого прибора. При подаче питающего напряжения в пьезорезисторах происходит выделение Джоулева тепла, которое

увеличивает температуру резисторов, что в свою очередь ведет к изменению их чувствительности. Изменение сопротивления, вызванное нагревом, суммируется с изменением сопротивления, вызванное измерением ускорения, что приводит к недостоверности измерения ускорения. На рисунке 36 представлена электрическая и эквивалентная схема ЧЭ, которая может быть использована для оценки величины увеличения температуры и сопротивлений, вызванных Джоулевым нагревом.

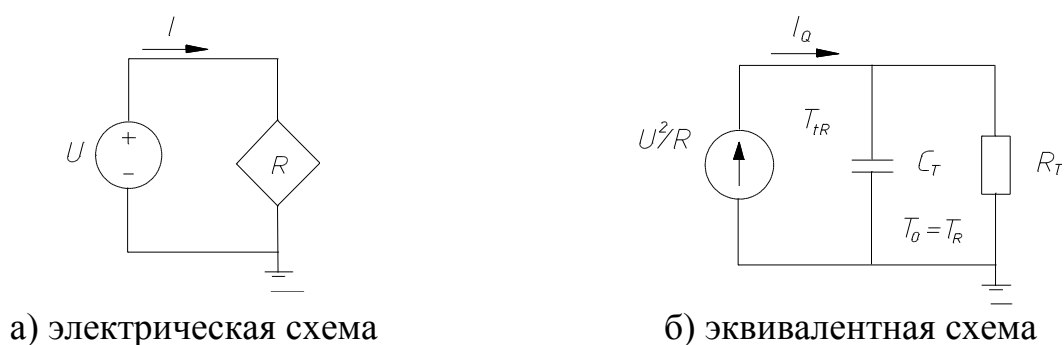


Рисунок 36 - Электрическая и эквивалентная схема с учетом саморазогрева резисторов.

На рисунке 38 электрическая цепь состоит из источника напряжения U и мостовой схемы (на основе поликремниевых пьезорезисторов), условно обозначенной R . Тепловая схема состоит из следующих элементов: источника тока, обеспечивающий Джоулево тепло (энергию) пропорционально U^2/R , емкость C_T , представляющей теплоемкость пьезорезисторов, резистор R_T , представляющий сопротивление теплопередачи от нагреваемых Джоулевым теплом поликремниевых пьезорезисторов к подложке (упругому элементу), на которой (котором) они располагаются. $T_0 = T_R$ - температура подложки, которая предполагается в качестве комнатной температуры (25°C или 293K). На тепловой схеме ток I_Q - представляет собой тепловой поток. Относительное изменение сопротивления в поликремнии из-за эффектов саморазогрева имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = \alpha_{poly} \cdot (T_{tR} - T_R) = \alpha_{poly} \cdot \Delta T \quad (17)$$

где α_{poly} - температурный коэффициент сопротивления (ТКС) поликремния, T_{tR} – конечная установившаяся температура чувствительного элемента.

Переходная характеристика температуры (T_{tr}) имеет следующий вид:

$$T_{tR} = T_R + \frac{R_T \cdot U^2}{R_R \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{poly} \cdot R_T \cdot U^2}{R_R}\right)} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{R_T \cdot C_T}\right) \cdot t}\right) \quad (18)$$

где R_R – сопротивление пьезорезистора при температуре T_R . В связи с большой разницей теплопроводностей тонких пленок, применяемых в конструкции чувствительного элемента, тепловой поток, генерируемый в поликремниевых пьезорезисторах, проходит следующий путь: поликремниевые резисторы → алюминиевая металлизация → слой оксида кремния → подложка. Соответствующее этому тепловое сопротивление R_T и теплоемкость системы C_T можно записать как:

$$R_T = R_{Tpoly} + R_{TsiO2} + R_{TAl} = \frac{H_{poly}}{k_{poly} \cdot S_{poly}} + \frac{H_{SiO2}}{k_{SiO2} \cdot S_{SiO2}} + \frac{L_{Al}}{k_{Al} \cdot W_{Al} \cdot H_{Al}} \quad (19)$$

и

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{Tpoly}} + \frac{1}{C_{TsiO2}} + \frac{1}{C_{TAl}} \quad (20)$$

H_{poly} – толщина поликремния;

H_{SiO2} – толщина изолирующего оксида;

L_{Al} – длина алюминиевой металлизации;

W_{Al} – ширина алюминиевой металлизации;

H_{Al} – толщина алюминиевой металлизации

k_{poly} – теплопроводимость поликремния (29 Вт/К·м);

k_{SiO2} – теплопроводимость слоя оксида кремния (1,1 Вт/К·м);

k_{Al} – теплопроводимость алюминия (273 Вт/К·м);

S_{poly} – площадь поликремниевых резисторов;

S_{SiO2} – площадь изолирующего оксида;

C_{Tpoly} – теплоемкость слоя поликремния ($3,88 \cdot 10^{-11}$ Дж/К);

C_{TSiO_2} – теплоемкость слоя оксида кремния ($3,8 \cdot 10^{-10}$ Дж/К);

C_{TAI} – теплоемкость алюминиевого слоя ($2,32 \cdot 10^{-10}$ Дж/К).

Входной ток, равный ЧЭ 5 мА подается на поликремниевые пьезорезисторы. Основываясь на свойствах применяемых материалов и применяя выражения (17-19), изменение температуры из-за эффекта саморазогрева может достигать значения 20 °С. При этом питающее напряжение равно 5 В. Относительное изменение сопротивления из-за эффекта саморазогрева может достигать 0,2%. Данное изменение сопротивления может быть выше, чем при воздействии на чувствительный элемент ускорения 1g (испытываемого чувствительным элементом при настройке). Эффект саморазогрева является неустранимым эффектом в силу физики функционирования пьезорезисторов и справедлив для всех типов пьезорезисторов. Однако он может быть значительно снижен, применяя оптимальные топологические схемы измерительных мостов Уитстона.

Технологические пути снижения погрешности от эффекта саморазогрева пьезорезисторов.

Для уменьшения эффекта саморазогрева пьезорезисторов необходимо уменьшать значение R_T . Следовательно, необходимо уменьшать термосопротивление слоев, входящих в конструкцию чувствительного элемента. Эти слои – поликристаллический кремний, алюминиевая металлизация, изолирующий оксид кремния. Уменьшение толщины слоя поликремния нежелательно, так как это приведет к перегреву резисторов во время работы. Уменьшать слой металлизации (толщиной около 1 мкм) также нежелательно, так как это отрицательно скажется на качестве разварки золотой проволокой. Отсюда следует, что только слой диэлектрика (оксида кремния) может быть уменьшен, однако это скажется на величине пробивного напряжения измерительной схемы от кремниевой подложки. Поэтому в данном

случае необходимо находить компромисс между толщиной изолирующего окисла и необходимым значением пробивного напряжения.

Выражение (19) учитывает параметры технологических слоев (поликристаллического кремния, оксида кремния, металлизации) пьезорезисторов и позволяет варьировать ими в технологическом процессе изготовления для снижения эффекта саморазогрева и снижения погрешности измерений от саморазогрева.

В рамках разработанной технологической модели чувствительные элементы имеют характеристики, представленные в таблице 6:

Таблица 6 – Основные параметры и свойства материалов, используемых в конструкции ЧЭ.

K_{Me}	Теплопроводимость слоя алюминиевой металлизации	237 Вт/(К*м)
k_{SiO_2}	Теплопроводимость слоя диэлектрической изоляции	1,1 Вт/(К*м)
k_R	Теплопроводимость кремния	170 Вт/(К*м)
k_{poly}	Теплопроводимость поликристаллического кремния	29 Вт/(К*м)
H_R	Толщина пьезорезисторов	2...3 мкм (диффузионная технология) 0,6 мкм (поликремниевая технология)
H_{SiO_2}	Толщина изолирующего окисла	1,1...1,2 мкм (диффузионная технология) 0,8 мкм (поликремниевая технология)
H_{Me}	Толщина слоя металлизации	1,0...1,2 мкм
S_R	Площадь пьезорезисторов	6000 мкм ²
S_{SiO_2}	Площадь изолирующего окисла	6000 мкм ²
W_{Me}	Длина металлизации	1000...4000 мкм
H_{Me}	Ширина металлизации	40...60 мкм
L_{Me}	Длина пьезорезистора	300 мкм
d_{poly}	Ширина пьезорезистора	20 мкм

При таких параметрах относительное изменение сопротивления мостовой схемы ЧЭ, рассчитанное по выражению (17) в те, имеет вид:

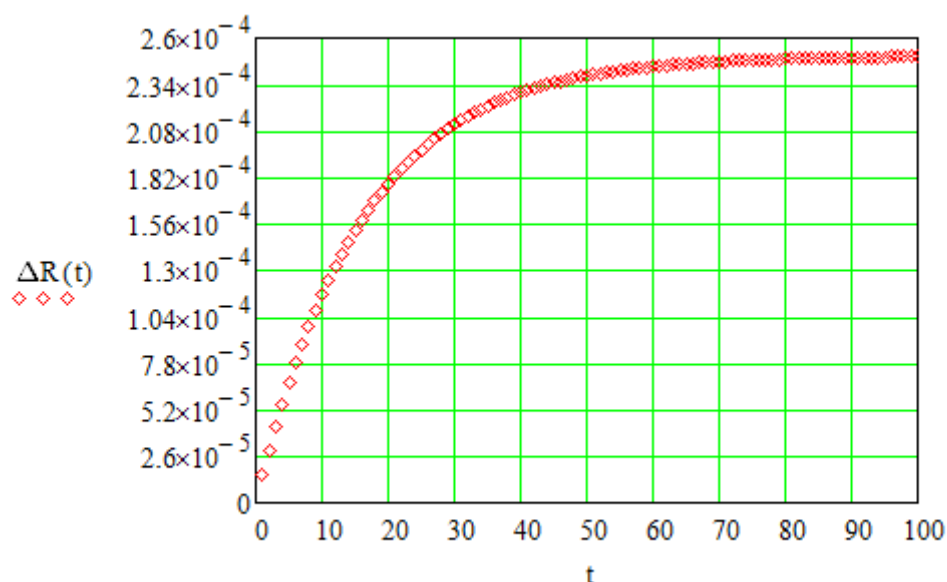


Рисунок 37 – Относительное изменение сопротивления мостовой схемы в течение времени 100 с.

Из выражения (16) для статической чувствительности микромеханического акселерометра и рисунка 31 следует, что при данных топологических размерах пьезорезисторов чувствительного элемента изменение сопротивления, вызванное саморазогревом пьезорезисторов ($2,6 \cdot 10^{-4}$) существенно не повлияет на параметры чувствительного элемента (чувствительность $0,0135 \cdot \text{мВ/г}$ для технологических режимов $T_{\text{отж}} = 1000^\circ\text{C}$, $T_{\text{осаж}} = 620^\circ\text{C}$).

Таким образом, разработанная модель позволяет не только прогнозировать основные выходные параметры микромеханических акселерометров при различных условиях получения, но и выбрать технологические режимы получения, соответствующие заданным электрическим свойствам пьезорезисторов и параметрам микромеханических акселерометров. Такими режимами могут являться режимы окисления кремния для создания изолирующего окисла, режимы напыления металлизации, режимы осаждения слоя поликристаллического кремния.

2.4 Моделирование кремниевого чувствительного элемента микромеханического акселерометра

В рамках разработанной модели проведено имитационное моделирование чувствительного элемента в программном модуле Simulation программы SolidWorks по методу конечных элементов. Определены 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 7) с использованием теории механики сплошных сред (Приложение Б), что позволило разработать технологию изготовления ЧЭ.

Таблица 7 – 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	$d_{0\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S^2}{m \cdot f_c \cdot \sqrt{2}}}$ <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.

Для проведения моделирования была построена твердотельная модель кремниевого кристалла микромеханического акселерометра, представленная на рисунке 40. Кремниевый кристалл состоит из внешней части, где происходит крепление кристалла к стеклянному основанию, и упругих перемычек, на которых подвешена инерционная масса. Процесс формирования кремниевого кристалла происходит путем анизотропного травления кремния. Далее происходит формирование пьезорезисторов на упругих перемычках кристалла. При воздействии ускорений на упругих перемычках возникают деформации, которые детектируются и преобразуются в выходной сигнал

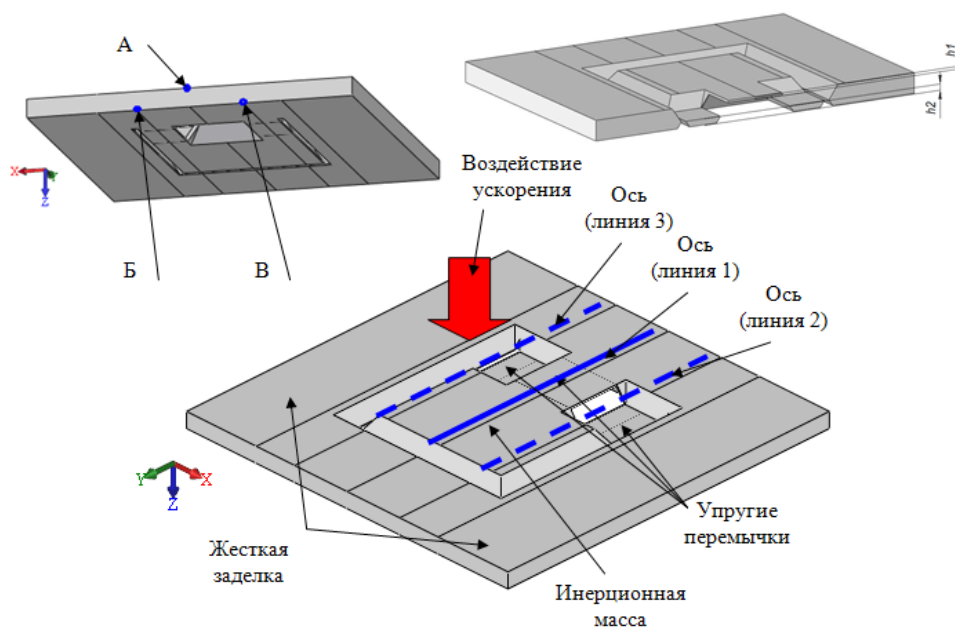


Рисунок 38 - Модель кремниевого кристалла микромеханического акселерометра и схема граничных условий

При моделировании ускорение задавалось в диапазоне от 500 м/с^2 до 5000 м/с^2 . Основной задачей при исследованиях является определение величины деформаций возникающих на упругих перемычках кристалла. Для этого на планарных плоскостях проведены оси, начало (точки А, Б, В) которых лежит на

боковой грани кристалла. Из данных точек проводится отсчет расстояния, для определения точного значения деформации на конкретном расстоянии. При этом возможно определить значение деформации в конкретной точке по осям (линия 1, 2, 3).

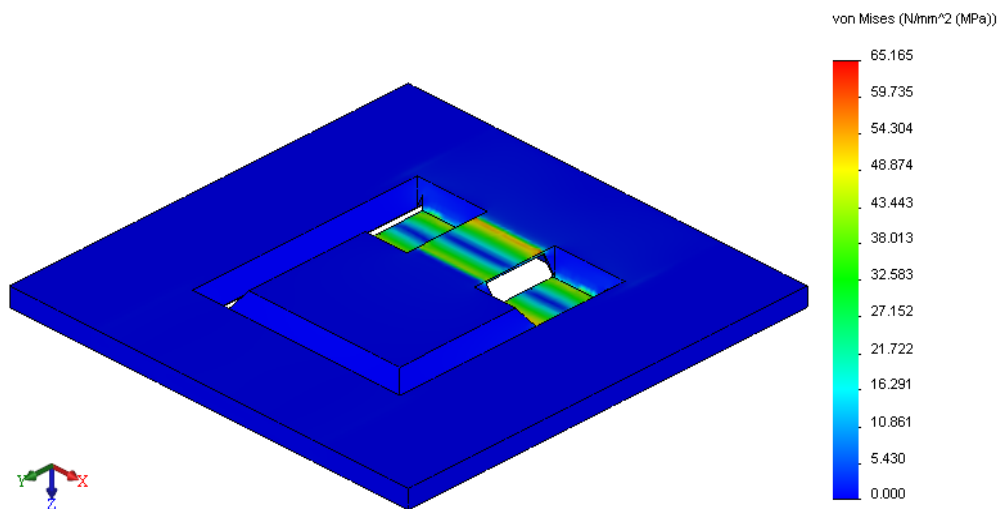
Воздействие ускорения на кремниевый кристалл приводит к появлению малого прогиба упругих перемычек за счет инерционной массы, в результате чего упругие перемычки деформируются. Распределение деформаций на поверхности упругих перемычек дает возможность определить оптимальные места формирования тензорезисторов.

В результате статического исследования были определены значения деформаций по осям и построены диаграммы распределения деформаций.

По диаграммам возможно определить значения деформации от начальных точек А, Б, В по осям до конца линии, при этом конец оси находится на инерционной массе. В ходе исследований было выявлено, что максимальные деформации возникают на упругих перемычках кристалла. В областях жесткой заделки и верхней части кристалла значение деформаций стремится к нулю и много меньше, чем на упругих перемычках.

Построены диаграммы зависимости воздействующего ускорения от деформации. Данные диаграммы позволяют определять характер изменения деформации при приложении заданных ускорений к кристаллу.

Результаты моделирования ЧЭ представлены на рисунках 39-43.



Воздействующее ускорение, м/с ²	Максимальные напряжения, МПа	Характер возникновения напряжений	Коэффициент запаса прочности
500	6,3	растяж.	601
1000	12,7	растяж.	298
5000	25,4	растяж.	149
10000	65,1	растяж.	58

Рисунок 39 – Результаты компьютерного моделирования

Из рисунка 39 следует, что все возникающие напряжения сосредоточены в области упругих перемычек. Максимальные напряжения составляют 65,1 МПа. Характер распределения напряжений в данном исполнении кристалла обусловлен малой толщиной упругих перемычек ($h_1=0,02$, $h_2=0,02$) в сравнении с толщиной кристалла.

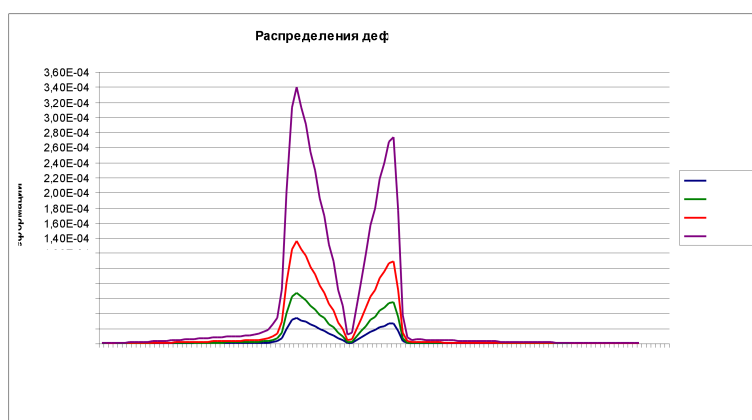


Рисунок 40–Распределение деформаций по линии 1 (рисунок 38).

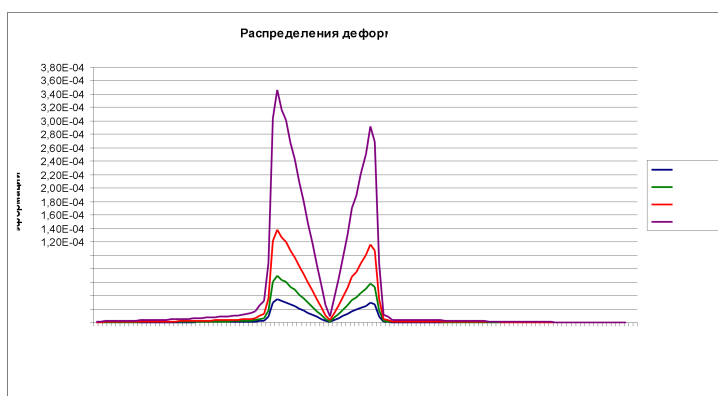


Рисунок 41 – Распределение деформаций по линии 2 (рисунок 38).

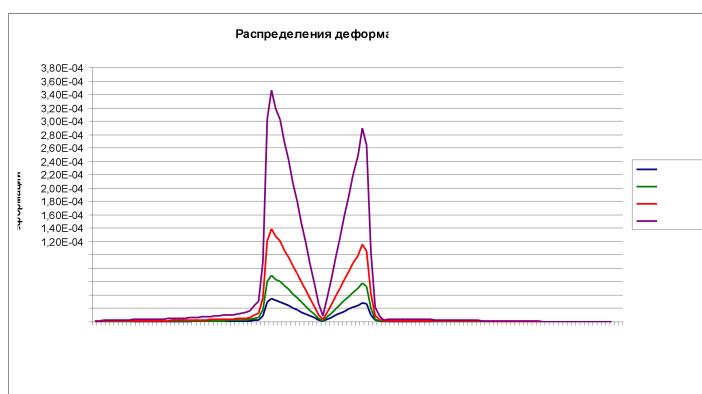


Рисунок 42 – Распределение деформаций по линии 3 (рисунок 38).



Рисунок 43 – Зависимость значений ускорений от деформации по линиям 1-3 (рисунок 38).

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

Получены диаграммы распределения деформаций по осям 1-3, позволяющие определить характер изменения при воздействии различной величины ускорения и области максимальных и минимальных деформаций.

Выявлены зависимости воздействующего ускорения от деформации, дающие возможность оценить характер изменения деформации при приложении заданных ускорений к кристаллу. Установлено, что исполнение кристалла устойчиво к воздействию ускорению и удовлетворяет критерию прочности. Минимальное значение коэффициента запаса прочности составило 2,3.

Выводы:

Выявленные закономерности, обеспечивающие управление свойствами пьезорезисторов измерительной схемы и параметрами ЧЭ микромеханических акселерометров, положены в основу разработки технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

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

Разработана технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров с учетом предложенных эквивалентной схемы и модели управления электрическими параметрами ЧЭ, приведенная на рисунке 34, и оригинальная топология измерительной схемы микромеханических акселерометров.

Технологическая модель ЧЭ, учитывающая воздействие температуры на выходные параметры ЧЭ, положена в основу разработки технологии изготовления 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.

Результаты расчета и моделирования позволили выявить места наибольших деформаций для размещения пьезорезисторов в зонах наибольших деформаций и таким образом повысить чувствительность ЧЭ.

3. Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

На основе разработанной аналитической модели управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на этапе технологического процесса и технологической модели кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, учитывающей влияние температуры на параметры чувствительных элементов разработана технология формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров.

Технология формирования кремниевых чувствительных элементов микромеханических акселерометров основана на базовых технологиях микроэлектроники и включает в себя ряд основных технологических процессов: химическая обработка пластин, фотолитография, термическое окисление, диффузия примеси, травление, металлизация, сборка в единую конструкцию и ряд других. Последовательность технологических процессов и их комбинация определяются конструктивными особенностями данного чувствительного элемента, что в свою очередь приводит к уникальности технологического маршрута изготовления [116-117].

Целью настоящей главы является разработка технологии формирования кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра с расширенным температурным диапазоном измерений, сниженным начальным выходным сигналом при воздействии температуры и температурной погрешностью измерений.

При этом технология основана на базовых технологиях микроэлектроники и микромеханики (химическая обработка, анизотропное травление кремния, формирование слоя поликристаллического кремния, окисление, металлизация, технология электростатического соединения) а также разработка конструктивно-технологических решений, позволяющих

оптимизировать маршрут изготовления с целью улучшения характеристик чувствительных элементов.

В общем виде технологический маршрут изготовления представляет собой чередование операций химической обработки кремниевых пластин, окисления пластин, фотолитографии, формирования объемных структур и измерительной схемы. Укрупненная схема технологического маршрута представлена на рисунке 44.

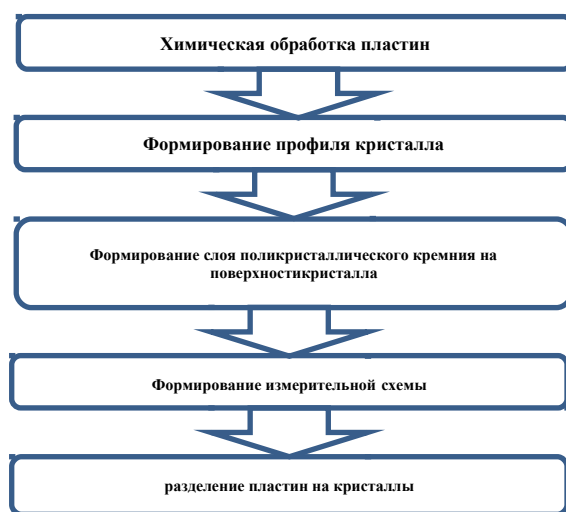


Рисунок 44 - Блок – схема технологического маршрута

3.1 Конструктивно-технологическое исполнение кремниевого кристалла чувствительного элемента

Внешний вид кремниевого кристалла пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра представлен на рисунке 19.

Кремниевый кристалл сформирован на основе монокристаллической кремниевой подложки ориентации (100) и имеет габаритные размеры (6,9×6,9×0,3) мм³. Боковые стороны кристалла ориентированы по кристаллографическому направлению [110]. Кристалл содержит рамку, инерционную массу и концентратор механических напряжений – профиль кристалла. С непланарной стороны кристалла сформированы консоли для повышения жесткости конструкции. Инерционная масса имеет размеры

(3,0×3,0×0,3) мм³ и соединена с рамкой кристалла с помощью профиля. На планарной стороне кристалла в области профиля выполнены пьезорезисторы из легированного примесью поликристаллического кремния, объединенные в мостовую схему Уитстона.

Стороны пьезорезисторов ориентированы по кристаллографическим направлениям [110] исходной кремниевой подложки. Контактные площадки выведены на рамку кристалла. В области формирования контактных площадок на «жесткой» рамке выполнен терморезистор из легированного примесью поликристаллического кремния. Пьезорезисторы, терморезистор покрыты слоем оксида кремния толщиной (0,05...0,1) от толщины слоя диэлектрика, расположенного на рабочей стороне кремниевого кристалла в области концентратора механических напряжений, инерционной массы и области формирования контактных площадок. Наличие слоя оксида кремния на поверхности пьезорезисторов и терморезистора позволяет защитить мостовую схему Уитстона от воздействия внешней среды.

Анализ структуры кремниевого кристалла чувствительного элемента микромеханического акселерометра позволяет разработать технологический маршрут изготовления, основанный на совмещении формирования трехмерных структур кристалла методами управляемого анизотропного травления кремния, формирования слоя поликристаллического кремния на поверхности кристалла и формирования измерительной схемы.

3.1.1 Разработка топологической схемы чувствительного элемента микромеханического акселерометра

Завершающим этапом процесса проектирования микромеханического акселерометра является разработка топологического чертежа микросистемы и её оптимизация. Следует учесть, что в микромеханике технология изготовления и конструктивное исполнение неотделимы друг от друга. Кроме того, именно технология определяет параметры микромеханических приборов [111], поэтому

разработка топологических слоев является важным и определяющим фактором построения работоспособных МЭМС-приборов.

При разработке топологической схемы кристалла микромеханического акселерометра выделим два блока фотошаблонов, определяющих параметры кристалла и соответственно чувствительного элемента. Первый блок включает в себя фотошаблоны для процессов формообразования кристалла, второй блок включает в себя фотошаблоны для формирования измерительной схемы.

Исходными данными при разработке фотошаблонов формирования измерительной схемы являются:

- перечень элементов (пьезо – и терморезистора) принципиальной электрической схемы и их взаимосвязи;
- допуска на номинальные значения параметров сопротивлений пьезо- и терморезистора;
- напряжение питания схемы.

Кроме того, в проектировании топологии микромеханических приборов, в отличие от проектирования топологии ИМС существует ряд особенностей, которым необходимо следовать при разработке изделий. Для пьезорезисторных микромеханических акселерометров это следующее:

- необходимость размещения пьезорезисторов в зонах максимальной деформации упругого элемента, на котором расположены пьезорезисторы для увеличения чувствительности;
- необходимость ориентирования сторон пьезорезисторов вдоль кристаллографических направлений с наибольшими величинами коэффициентов пьезосопротивлений в зависимости от типа используемого кремния;
- необходимость размещения пьезорезисторов на профилированных участках кремниевых пластин;
- формирование измерительной схемы, состоящей из пьезорезисторов (мост Уитстона) методами легирования либо диффузии примеси [117-119] .

С учетом изложенного разработаны фотошаблоны формирования измерительной схемы, представленные на рисунках 45-48.

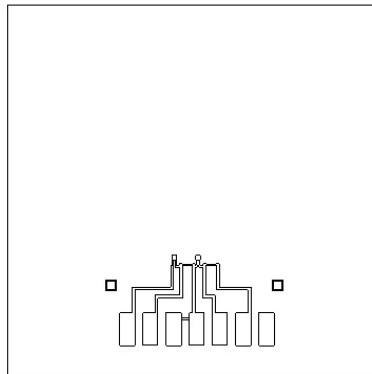


Рисунок 45 – Фотошаблон для формирования пьезорезисторов (R_{tz} , поликремний)

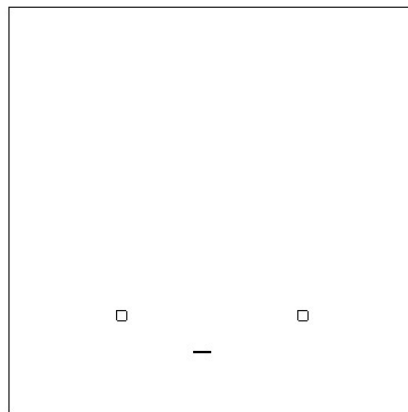


Рисунок 46 - Фотошаблон для формирования терморезистора (R_t , поликремний)

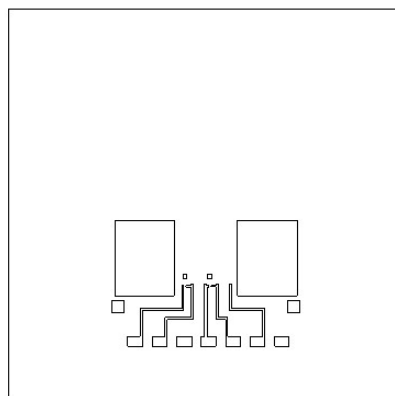


Рисунок 47 - Фотошаблон для формирования окон под контакт с металлизацией

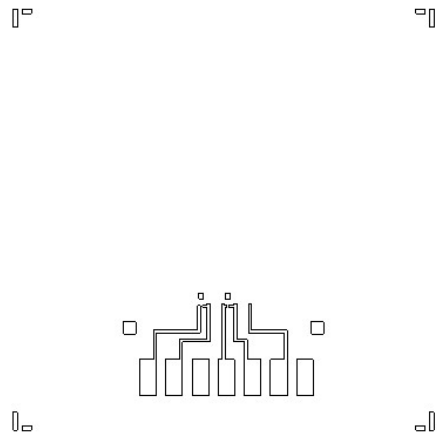


Рисунок 48 – Фотошаблон формирования металлизации

Исходными данными при разработке фотошаблонов формирования структуры кристалла являются:

- геометрические размеры профиля кристалла с планарной стороны;
- геометрические размеры консолей кристалла с непланарной стороны;
- необходимость защиты измерительной схемы при сквозном травлении пластин.

С учетом изложенного разработаны фотошаблоны формирования структуры кристалла, представленные на рисунках 49-51.

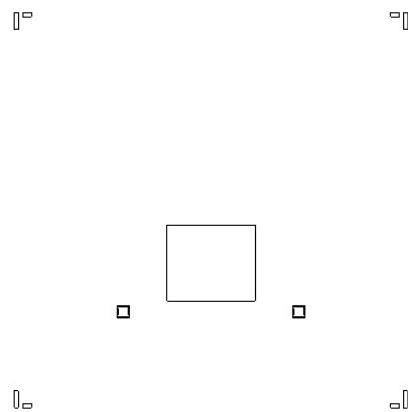


Рисунок 49 – Фотошаблон формирования профиля кристалла

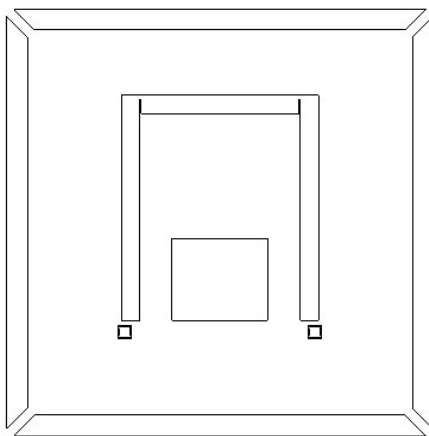


Рисунок 50- Фотошаблон формирования инерционной массы и консоли с
непланарной стороны

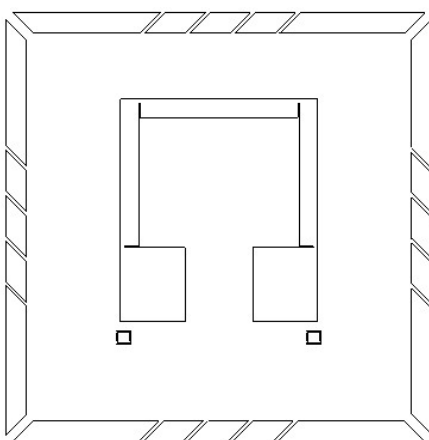


Рисунок 51 - Фотошаблон формирования профиля и инерционной массы
с планарной стороны

3.2 Формообразование структуры кремниевого пьезорезистивного чувствительного элемента микромеханического акселерометра методами управляемого травления

Формообразование структуры кристалла методами жидкостного анизотропного травления предусматривает следующую укрупненную последовательность операций :

- подготовка исходной пластины, химическая обработка;
- формирование измерительной схемы с планарной стороны кристалла;
- формирование на поверхности кремниевых пластин защитного слоя перед операциями травления;

- фотолитография по формированию топологического рисунка профиля с непланарной стороны пластины;
- анизотропное травление кремния с непланарной стороны до формирования профиля;
- формирование защитного слоя с непланарной стороны пластины;
- фотолитография по формированию топологического рисунка консолей с планарной стороны пластины;
- анизотропное травление кремния с планарной стороны до формирования консолей;
- контроль геометрических размеров кристалла, толщины профиля и консолей.

Рассмотрим процесс формообразования кристалла

Прямоугольная форма формируемых структур кристалла может быть получена в результате создания топологических схем компенсации на элементах выступающих структур фотошаблона [120]. Такими структурами могут быть элементы в виде квадрата, центр которого совмещен с вершиной элемента (рисунок 52), прямоугольника, компенсатор типа «елочка», полосковый компенсатор и ряд других. Следует отметить, что компенсатор типа «елочка» практически не поддается расчету.

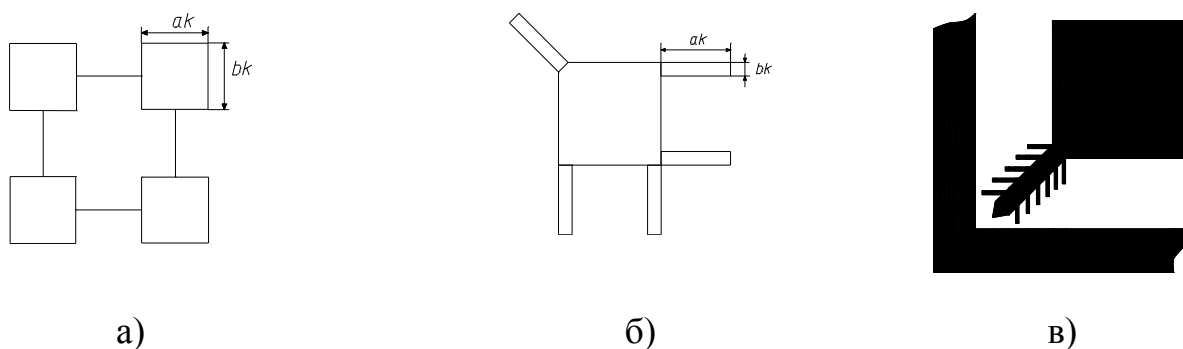


Рисунок 52- Компенсатор типа «квадрат» (а), полосковый компенсатор (б), компенсатор типа «елочка» (в)

Для микромеханических акселерометров очень важно сохранить прямоугольную форму формируемых структур, таких как маятник, или инерционная масса. Это связано с недопустимостью потери физической массы

кремния, так как уменьшение инерционной массы приводит к отклонению диапазона измерений от расчетных значений, т.е. невоспроизводимости характеристик чувствительного элемента. Таким образом, применение схем компенсации углового растравливания является важной задачей при разработке и расчете топологических слоев масок травления.

Рассчитаем параметры полоскового компенсатора для оценки прямоугольности формы углов инерционной массы, используя следующие параметры:

- скорость травления кремния в направлении [100] – 2,5 мкм/мин;
- скорость травления кремния в направлении [110] – 6,5 мкм/мин;
- толщина исходной пластины - 300 мкм.

Длина полоскового компенсатора в направлении [110] определим как:

$$L_k = V_{[110]} * h_{mp} \quad (21)$$

где $V_{[110]}$ – скорость травления кремния в направлении [110], h_{mp} – время травления.

$$h_{mp} = \frac{L_{mp}}{V_{[100]}} \quad (22)$$

где L_{mp} – глубина травления, $V_{[100]}$ – скорость травления кремния в направлении [100]. Так как структура кристалла формируется травлением с планарной и непланарной стороны, запишем:

$$h_{mp} = \frac{H_{пл}}{2 * V_{[100]}} \quad (23)$$

где $H_{пл}$ – толщина исходной пластины

Тогда формула (21) переписется как:

$$L_k = V_{[110]} * \frac{H_{пл}}{2 * V_{[100]}} \quad (24)$$

Подстановка числовых значений дает результат:

$$L_k = 2,5 * L_{mp} \quad (25)$$

Из формулы видно, что при травлении пластины на глубину 150 мкм длина полоскового компенсатора составит 375 мкм.

Данное значение длины полосковых компенсаторов использовано при разработке топологических масок травления кристалла.

Боковое подтравливание под край маски наиболее существенно при изотропном травлении, и достигает значения, равного глубине травления. Однако при анизотропном травлении данный эффект также может присутствовать, что изображено на рисунке 53.

Скорость травления кремния в направлении [111] хоть и весьма мала, но имеет конечное значение, равное 600 нм/мин [116], поэтому при расчете топологии кристалла также можно применить схему компенсации бокового подтравливания для устранения изменения размеров формируемых структур микромеханических приборов.

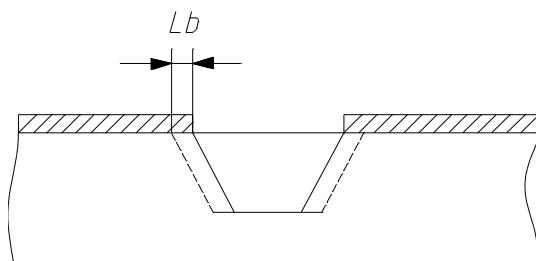


Рисунок 53 - Эффект бокового подтравливания под край маскирующего слоя

Схема компенсации будет заключаться в переносе края топологической маски к центру от формируемого отверстия на расстояние, определяемое величиной подтравла Lb .

Для расчета величины переноса края топологической маски зададимся числовыми значениями, представленными выше.

Величину бокового подтравливания определим как:

$$L_{\Pi} = V_{[111]} * h_{\text{тр}} \quad (26)$$

где L_{Π} – величина бокового подтравливания, $V_{[111]}$ - скорость травления кремния в направлении [111], $h_{\text{тр}}$ – время травления.

$$h_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}}{V_{[100]}} \quad (27)$$

где $L_{\text{тр}}$ – глубина травления, $V_{[100]}$ - скорость травления кремния в направлении [100]. Так как структура кристалла формируется травлением с планарной и непланарной стороны, запишем:

$$h_{mp} = \frac{H_{пл}}{2 * V_{[100]}} \quad (28)$$

где $H_{пл}$ – толщина исходной пластины

Тогда формула (26) переписывается как:

$$L_{\Pi} = V_{[111]} * \frac{H_{пл}}{2 * V_{[100]}} \quad (29)$$

Подстановка числовых значений дает результат:

$$L_{\Pi} = 0,024 * L_{mp} \quad (30)$$

Из формулы видно, что при травлении пластины на глубину 150 мкм величина бокового подтравки составит 3,6 мкм.

Данное значение использовано при разработке топологических масок травления кристалла. При этом использованы выражения (21-30).

Для подтверждения правильности выбора топологических схем формообразования методом анизотропного травления кремния кристалла чувствительного элемента микромеханического акселерометра пьезорезистивного типа проведено компьютерное моделирование процесса анизотропного травления кремния разработанных масок травления (фотошаблоны на рисунках №49-51) с использованием программы *ACES (Anisotropic Crystalline Etching Simulation (ACES) for Windows 95/98/NTBeta 2 (Build 200), University of Illinois)*.

Исходными данными для моделирования являются следующие данные:

1. Материал подложки: кремний монокристаллический КЭФ 4,5/7,5-60 ТУ 48-4-295-82;
2. Ориентация пластин (100);
3. Ориентация базового среза [110];
4. Толщина пластин $0,3 \pm 0,01$ мм;
5. Для анизотропного процесса: Травитель – 25% раствор гидроксида калия *KOH*, температура процесса $(96 \pm 2)^\circ\text{C}$.

На рисунках 54-56 представлены разработанные исходные маски для травления структур кристалла.

На рисунке 54 представлен фотошаблон для травления инерционной массы кристалла, упругой перемычки (профиля) кристалла. На внешних углах инерционной массы выполнены элементы компенсации углового растравливания – полосковые компенсаторы, рассчитанные по методике, изложенной выше. Внешний контур кристалла, контур упругой перемычки и инерционной массы, контуры сквозных отверстий выполнены с учетом эффекта бокового подтравливания и рассчитаны по методике, изложенной в выше.

Рисунок 54 - Исходная маска для травления инерционной массы, упругой перемычки (профиля) кристалла (планарная сторона кристалла)

На рисунке 55 представлен фотошаблон для травления профиля кристалла (непланарная сторона пластины).

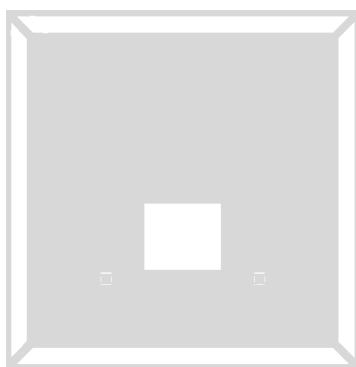


Рисунок 55 - Исходная маска для травления профиля кристалла (непланарная сторона кристалла)

Рисунок 56 представляет собой изображение фотошаблона для формирования инерционной массы и консолей кристалла. На внешних углах инерционной массы также выполнены элементы компенсации бокового растравливания.

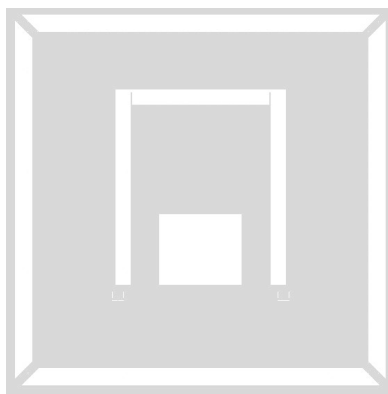


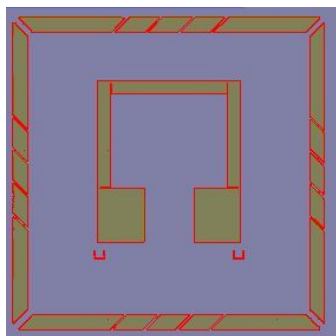
Рисунок 56 - Исходная маска для травления инерционной массы, консолей кристалла (непланарная сторона кристалла)

Все маски для травления имеют на внешних углах кристалла элементы поддержки при анизотропном травлении кремния, выполненные как элементы сопряжения кристалла с пластиной и расположенные в кристаллографическом направлении [100].

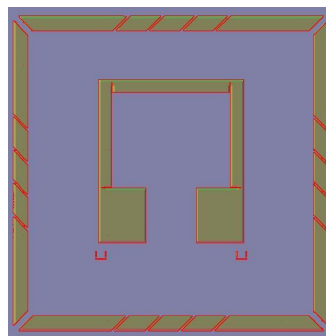
Технологический маршрут изготовления предусматривает травление профиля, инерционной массы и упругих перемычек с непланарной стороны кристалла, травление инерционной массы с планарной стороны кристалла.

Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 57-59.

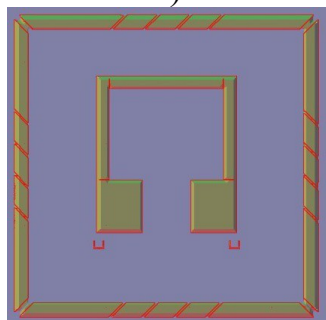
Планарная сторона кристалла:



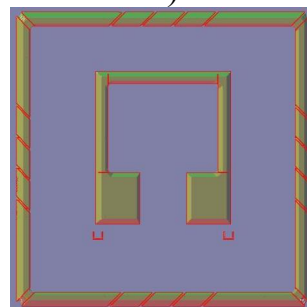
а)



б)



в)

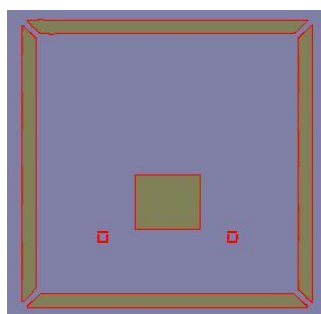


г)

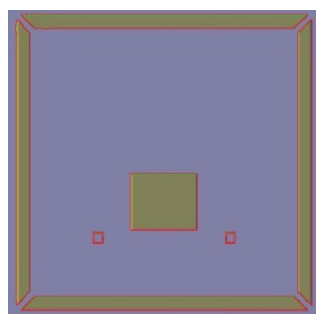
а- исходная маска, б – травление 20 мин, в - травление 40 мин, г – окончание процесса травления

Рисунок 57 – Вид на планарную сторону в процессе травления

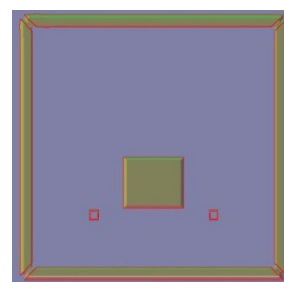
Непланарная сторона кристалла:



а)



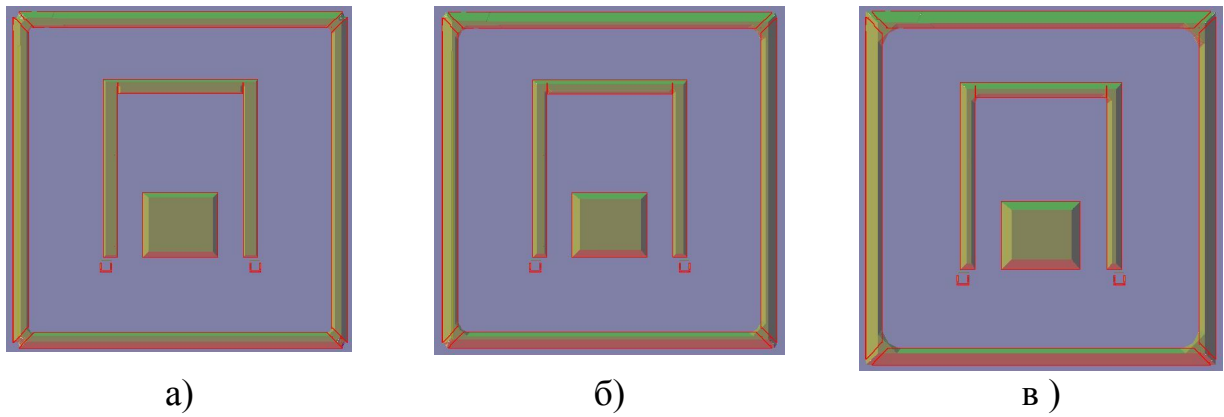
б)



в)

а- исходная маска, б – травление 10 мин, в – травление 20 мин.

Рисунок 58 – Травление профиля кристалла



а)

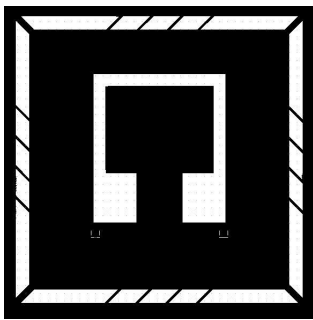
б)

в)

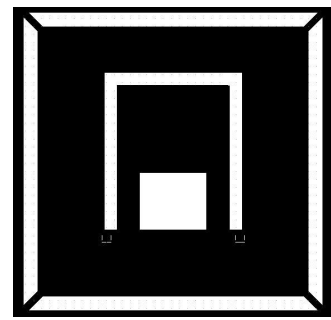
а- исходная маска, б – травление 20 мин. в – окончание процесса травления

Рисунок 59 – Вид на непланарную сторону в процессе травления

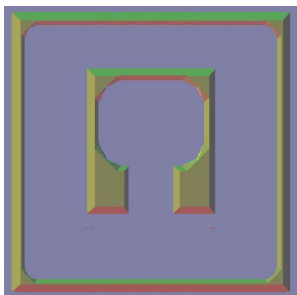
Проведено сравнение процесса формообразования кристалла при применении схем компенсации углового растравливания и без применения схем компенсации. Результаты сравнения представлены на рисунке 60.



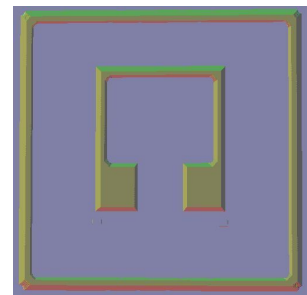
а)



б)



в)



г)

а – исходная маска травления планарной стороны без схем компенсации
 б - исходная маска травления непланарной стороны без схем компенсации
 в – вид на планарную сторону по окончании травления
 г - вид на планарную сторону по окончании травления

Рисунок 60 – Сравнение процесса травления без схем компенсации (а,в) и со схемами компенсации (б, г).

Как видно из рисунка 60, а-г, применение схем компенсации углового растравливания позволяет сохранить внешние углы структур кремниевого кристалла при глубинном анизотропном травлении кремния. Это позволяет:

- сохранить геометрические размеры инерционной массы, что означает сохранение расчетного диапазона измерений.
- не допустить растрав упругой перемычки в местах расположения пьезорезисторов и, таким образом, сохранить измерительную схему.

3.3 Формирование измерительной схемы

Измерительная схема кристалла чувствительного элемента содержит пьезорезисторы, объединенные в мостовую схему Уитстона, и терморезистор, причем уровень легирования пьезо- и терморезистора должен быть различным для возможности температурной компенсации выходного сигнала. Легирование пьезорезисторов и терморезистора осуществлено методом ионного легирования [121-123].

Слои поликремния толщиной $(0,6 \pm 0,05)$ микрон формируются осаждением из газовой фазы при пониженном давлении на окисленную поверхность кремниевых пластин методом разложения 5% смеси моносилана с аргоном [124-126]. Реактор пониженного давления выполнен из плавящего кварца с резистивными нагревателями для создания необходимой температуры процесса, в реакторе создается разрежение. Реакторы оснащены кварцевыми лодочками, имеющие близко расположенные, вертикально ориентированные пазы, которые держат кремниевые пластины. Температура процесса составляет $(580-620)^\circ\text{C}$ и влияет на структуру формируемых поликристаллических пленок.

Легирование пленок поликристаллического кремния проходит на установке ионного легирования «Везувий-3», обеспечивающей внедрение заданного количества примеси в пленки.

Сопротивление слоя поликремния при любой температуре может быть определено из выражения:

$$R(T) = R_{20} e^{\alpha_R(T-T_0)} \quad (38)$$

где:

$$\alpha_R = \frac{1}{R_{20}} \frac{dR(T_0)}{dT} \quad (39)$$

α_R – температурный коэффициент сопротивления, R_{20} – сопротивление при температуре 20°C.

Метод ионного легирования позволяет точнее всего создать в слое кремния управляемый профиль распределения примеси. Процесс проходит при комнатной температуре, что является его преимуществом перед методом диффузии примеси.

На рисунке 61 показано, как меняется сопротивление поликремния и кремния в зависимости от концентрации бора. Приведена аналогичная кривая для монокристаллического кремния [114]. Из рисунка видно, что удельное сопротивление поликремния всегда намного выше, чем у монокристаллического материала, даже при высоких концентрациях бора. В диапазоне низких концентраций бора наблюдается значительное изменение удельного сопротивления поликремния, поэтому именно этот диапазон и используется для изготовления датчиков. Зависимость сопротивления поликремния от температуры не является линейной. В зависимости от степени легирования температурный коэффициент сопротивления поликремния в широком диапазоне значений может быть выбран либо положительным, либо отрицательным (рисунок 61, а). Обычно температурный коэффициент сопротивления уменьшается при снижении концентрации легирующих примесей.

На рисунке 61, а показана температурная чувствительность поликремния и монокристаллического кремния при разных уровнях легирования. Видно, что температурная чувствительность поликремния выше, чем у монокремния и поддается управлению за счет изменения концентрации легирующих примесей. При определенной концентрации бора (точка Z) сопротивление перестает зависеть от температуры (рисунок 62).

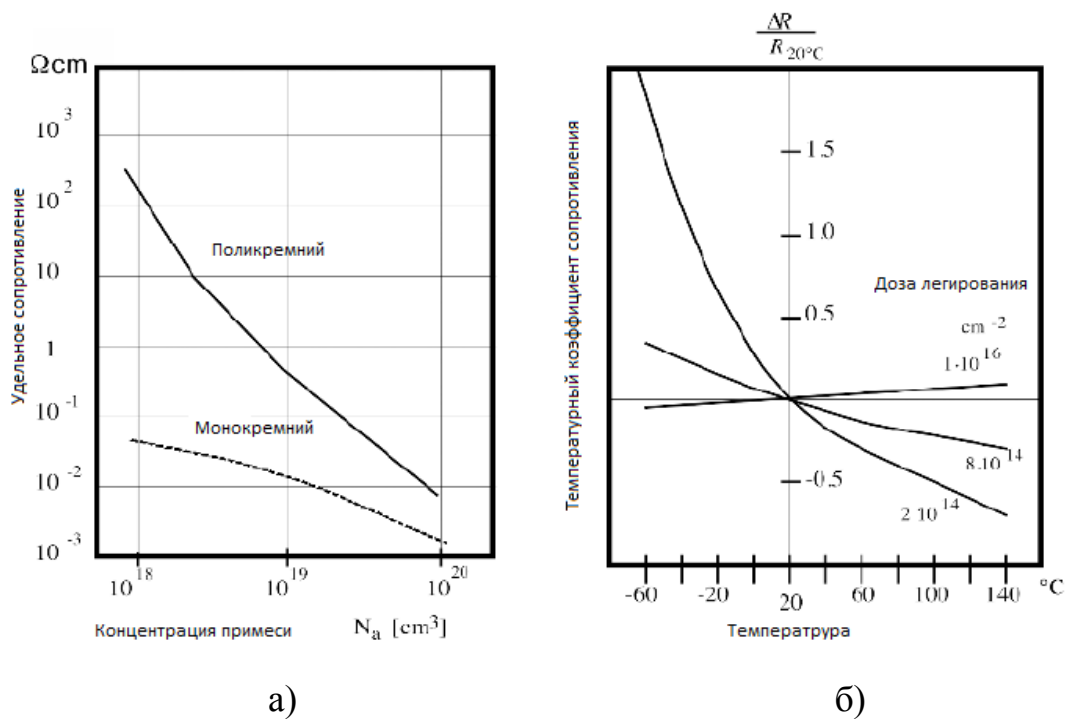


Рисунок 61- Удельное сопротивление кремния, легированного бором (а) и температурный коэффициент сопротивления кремния для разных концентраций легирующих примесей (б) [114].

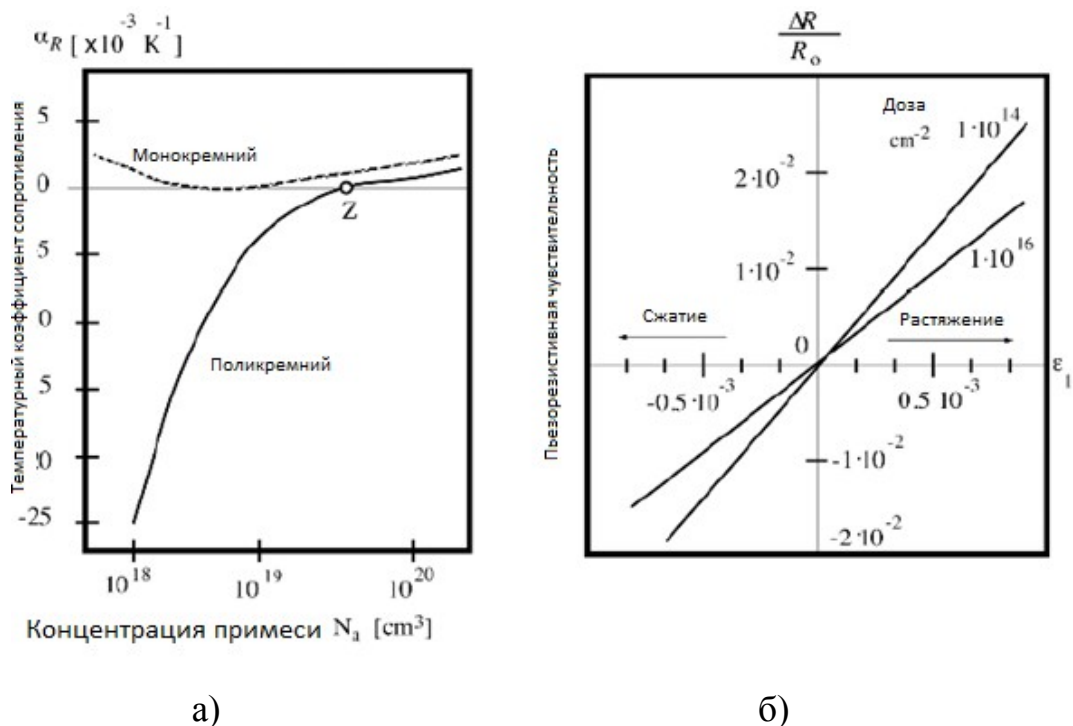


Рисунок 62 -Зависимость температурного коэффициента от концентрации легирующих примесей (а) и пьезорезистивная чувствительность кремния (б) [114].

Значения ΔR зависят от уровня легирования, а величина сопротивления уменьшается при сжатии и увеличивается при растяжении. Коэффициент тензочувствительности зависит от температуры.

Величина сопротивления уменьшается при сжатии и увеличивается при растяжении. Следует также отметить, что пьезочувствительность (рисунок 56,б) зависит от концентрации легирующей примеси.

Рассчитаем параметры пьезорезисторов:

1. Исходя из рисунка 56,а принимаем:

Концентрация бора слоя поликристаллического кремния:

$C=6 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ (пьезорезисторы); $C=1 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ (терморезистор)

2. Используя график, определяем удельное сопротивление слоя поликристаллического кремния:

$\rho=9 \cdot 10^{-3} \text{Ом} \cdot \text{см}$ (пьезорезисторы); $\rho=7 \cdot 10^{-2} \text{Ом} \cdot \text{см}$ (терморезистор).

3. Толщина слоя поликристаллического кремния: $x_j=0,6$ мкм (пьезорезисторы, терморезистор).

4. Проводимость слоя: $\delta=1/(\rho_s \cdot x_j)$,

5. Поверхностное сопротивление: $\rho_s=\rho/x_j$

6. Подставляя числовые значения, получаем величину поверхностного сопротивления поликристаллического кремния:

$\rho_s=150 \text{ Ом}/\square$ (пьезорезисторы); $\rho_s=1200 \text{ Ом}/\square$ (терморезистор)

Результаты численного моделирования показали необходимость использования разной степени легирования пьезорезисторов и терморезистора. Пьезорезисторы – $150 \text{ Ом}/\square$ для исключения влияния температуры на сопротивление резисторов. Терморезистор – $1200 \text{ Ом}/\square$ для создания термоэлемента с высоким температурным коэффициентом сопротивления.

При формировании измерительной схемы на слое поликристаллического кремния методом ионного легирования имеем следующие преимущества:

- ионное легирование – низкотемпературный процесс, что является щадящим режимом для формирования измерительной схемы;

- возможность применения в качестве защитных масок слоя фоторезиста, что является технологичным методом;

- возможность легкого управления процессом для формирования необходимых значений поверхностных сопротивлений термо- и пьезорезисторов;

- возможность получения низких значений температурных коэффициентов сопротивлений, что позволяет создавать микромеханические датчики.

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 63). Основные технологические режимы процесса быстрого термического отжига следующие: температура отжига – 1000 °С; градиент нарастания температуры – 80 °С/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.

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 $T_{\text{отж}} = (870-1060)^\circ\text{C}$.

Так, при использовании режима $T_{\text{осаж}} = 580^\circ\text{C}$ наблюдалась плохая адгезия пленки к слою оксида кремния, при $T_{\text{осаж}} = 650^\circ\text{C}$ существовал 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 невоспроизводимости их параметров. В результате выбраны оптимальные

технологические режимы формирования пьезорезисторов мостовой схемы - $T_{\text{осаж}}=(620\pm 5)^\circ\text{C}$, $T_{\text{отж}}=1000^\circ\text{C}$.

Использование пленки поликристаллического кремния в качестве материала пьезорезисторов измерительной мостовой схемы на слое термически выращенного оксида кремния позволило расширить рабочий температурный диапазон чувствительного элемента до 120°C .

3.4 Разработка технологического маршрута изготовления

На основании анализа технологических операций формирования кремниевых микромеханических приборов и с учетом разработанной конструкции определен технологический маршрут изготовления кремниевого кристалла пьезорезистивного ЧЭ [124-133] микромеханического акселерометра.

Впервые разработана оригинальная технология изготовления пьезорезистивных ЧЭ микромеханических акселерометров, обеспечивающая сокращение высокотемпературных операций, длительности технологического процесса. Например, исключена высокотемпературная диффузия и разгонка примеси, проводимые в течение 60...80 мин при температурах до 1050°C , исключены промежуточные 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.

Укрупненно схема технологического маршрута изготовления в сравнении с аналогом представлена в следующем виде:

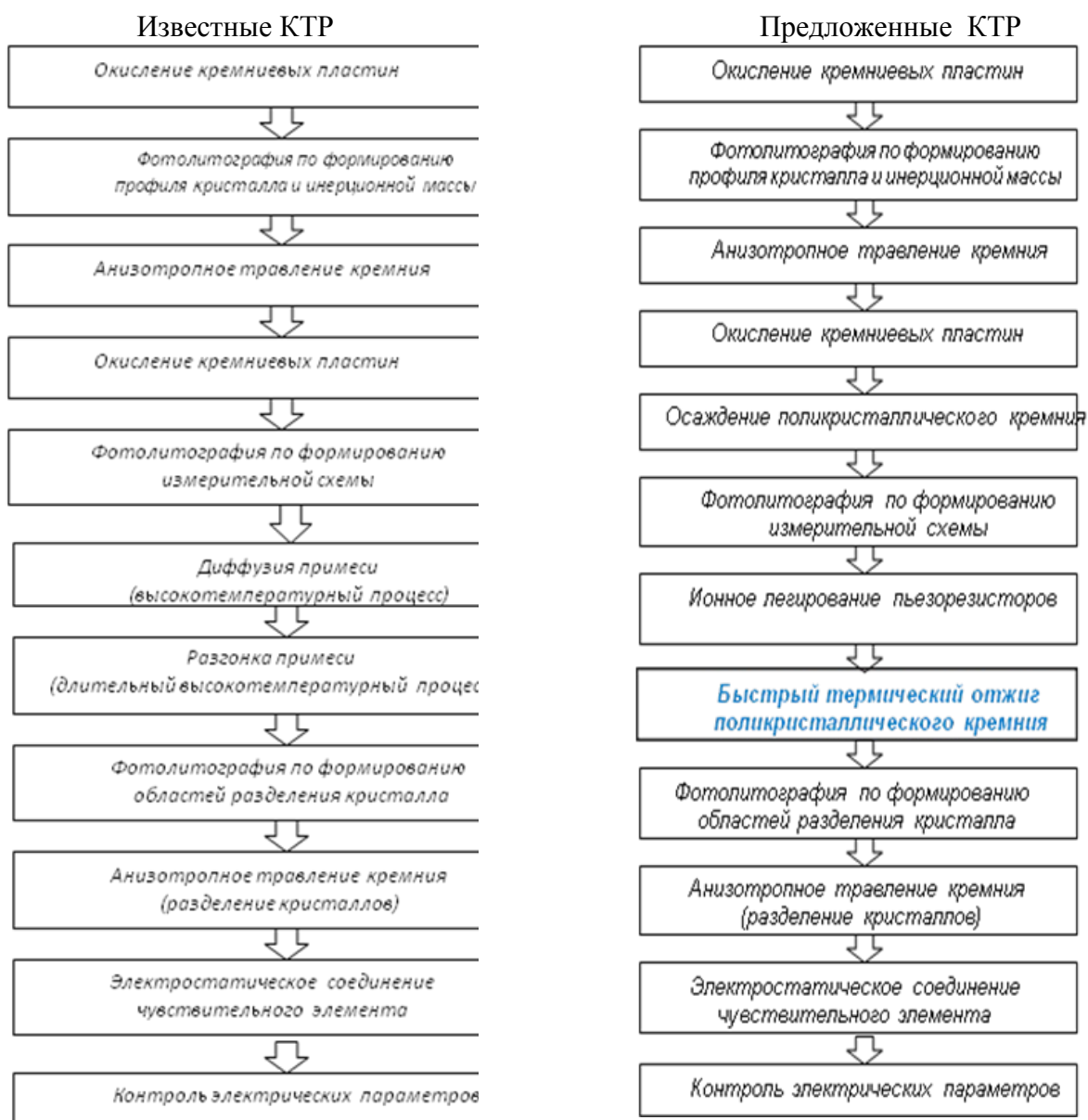
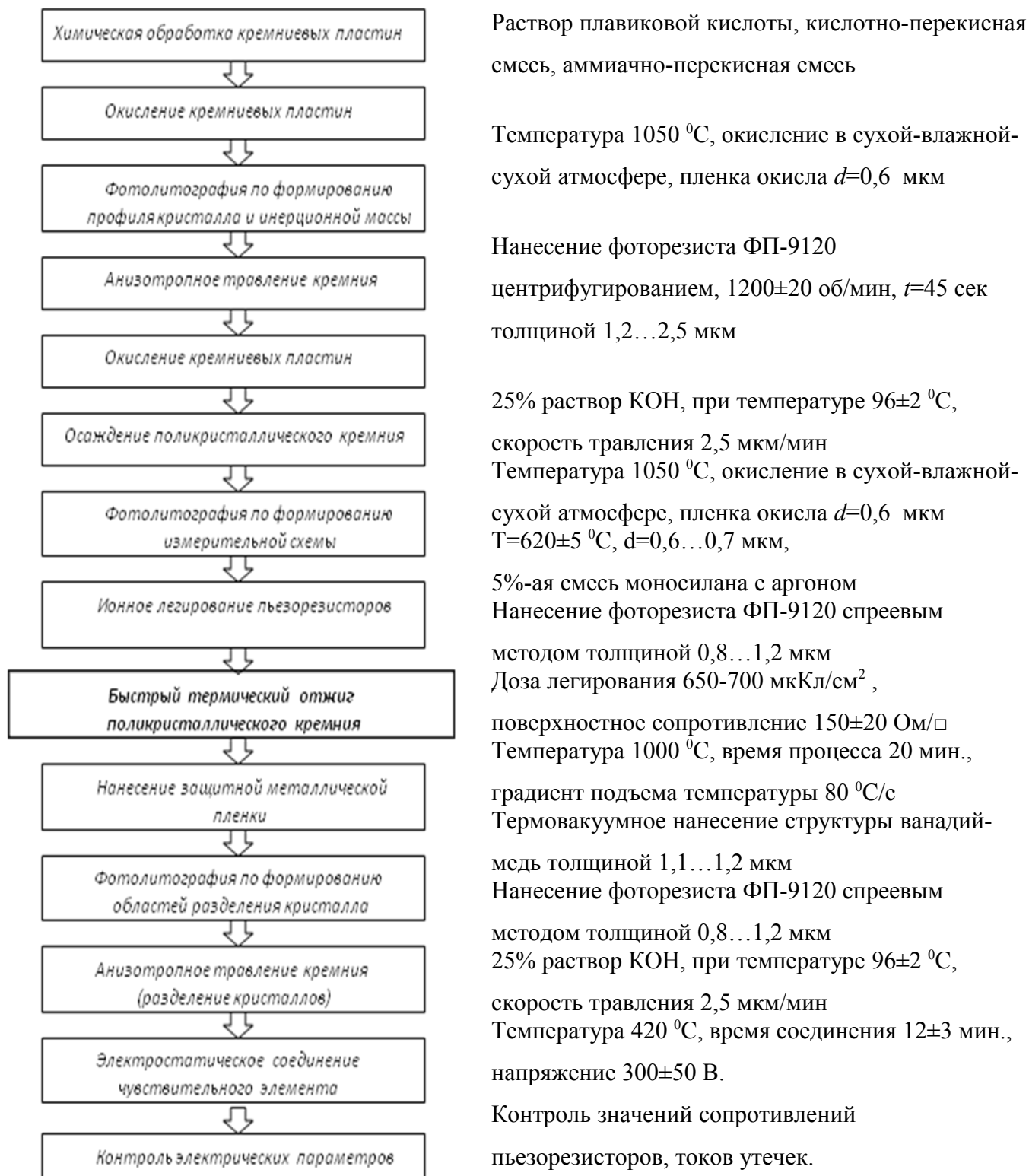


Рисунок 63 – Сравнение известной и предложенной технологии

Основные технологические операции и режимы:



Предложенные КТР позволили оптимизировать технологический процесс изготовления в части сокращения высокотемпературных операций, длительности технологического процесса, что подразумевает изменение

условий межоперационного хранения и выполнения промежуточных операций, таких как химическая обработка, снятие окисных пленок и т.п.

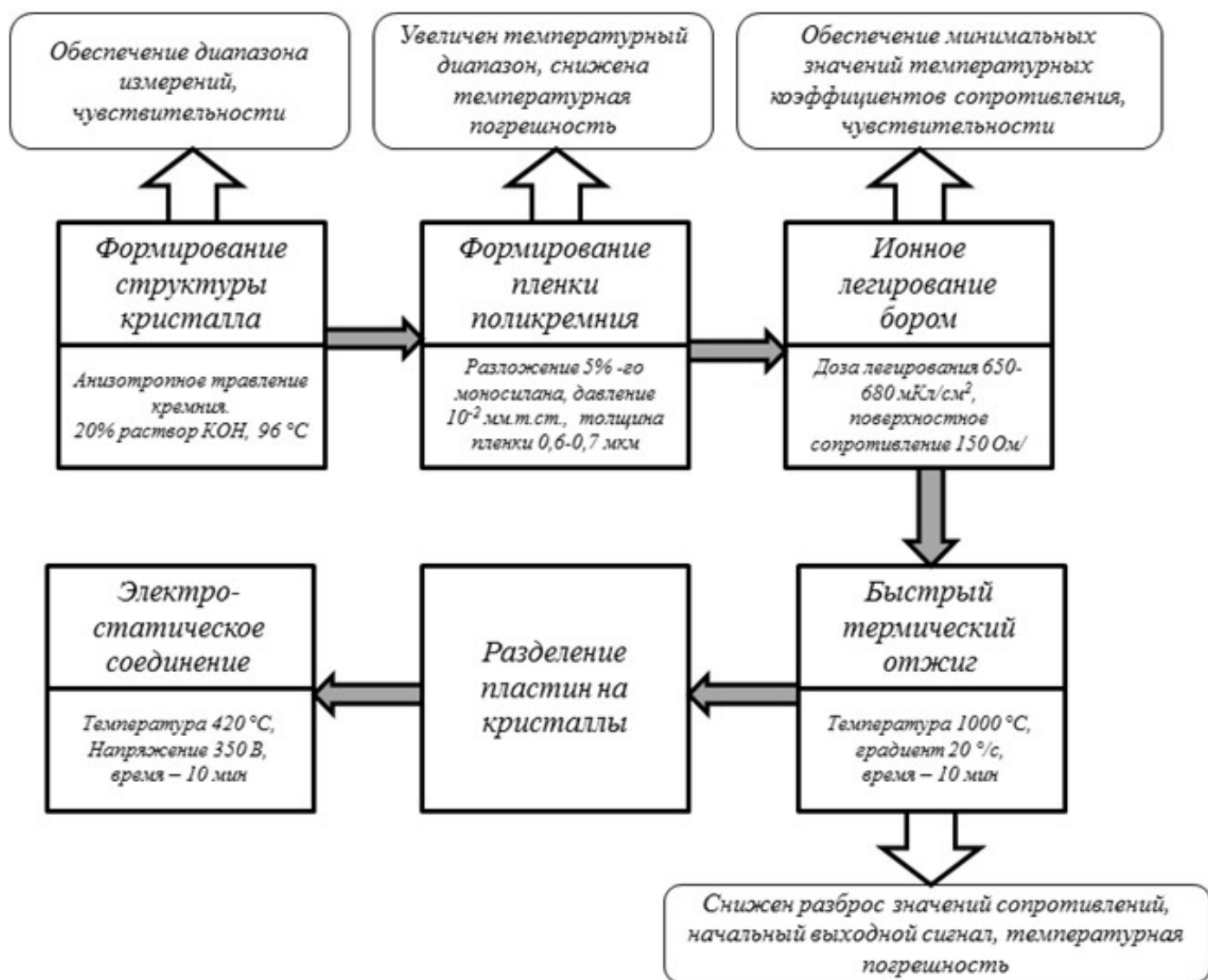


Рисунок 64 - Технологический маршрут формирования ЧЭ. Основные операции

Разработан оригинальный маршрут изготовления ЧЭ, включающий следующие **основные** операции:

Осаждение поликристаллического кремния на планарную сторону пластин

Химическое осаждение из газовой фазы при пониженном давлении 40 Па, температура процесса 620 °С, толщина осажденного слоя 0,6 мкм, рабочий газ – моносилан SiH₄.

Ионное легирование бора области поликристаллического кремния

Ионное легирование бором областей поликремния до получения поверхностного сопротивления $\rho_s = 1200 \text{ Ом}/\square$ (область терморезистора).

Быстрый термический отжиг пленки поликристаллического кремния в инертной среде при температуре от 20 °С до 1000 °С в течение 20 мин с градиентом подъема температуры 80 °С/мин

фотолитография по формированию оксида кремния с непланарной стороны пластины в области инерционной массы:

- нанесение позитивного фоторезиста ФП9120 на непланарную сторону пластин в течении 20 сек методом пульверизации;
- сушка фоторезиста при температуре 50°С в течение 20 мин;
- экспонирование фоторезиста в течение 40 сек;
- проявление фоторезиста;
- задубливание фоторезиста в течение 20 мин при температуре 110°С;
- травление оксида кремния в буферном травителе на открытых участках пластин;
- удаление слоя фоторезиста.

Напыление структуры ванадий медь на планарную и непланарную сторону пластин.

Создание защитного подслоя при формировании слоя гальванической меди на поверхности пластин.

фотолитография по формированию защиты при профилировании с планарной стороны пластин:

- - нанесение позитивного фоторезиста ФП9120 на непланарную сторону пластин в течении 20 сек методом центрифугирования;
- сушка фоторезиста при температуре 50⁰С в течение 20 мин;
- экспонирование фоторезиста в течение 40 сек;
- проявление фоторезиста;
- задубливание фоторезиста в течение 20 мин при температуре 110⁰С;
- гальваническое осаждение меди на поверхность пластин толщиной 8... 10 мкм.

Создание дополнительного защитного покрытия при анизотропном травлении;

- удаление слоя фоторезиста;
- последовательное травление структуры ванадий – медь;
- травление окисла кремния в буферном травителе на открытых участках пластин.

3^е анизотропное травление кремния

Анизотропное травление кремния при температуре (96±2) °С в 25%-ном растворе гидроксида калия на глубину $H1$, определяемую как:

$$H1 = H_{пл} - h1 - h4$$

где $h4 = H_{пл}/2$.

Технологический маршрут изготовления кремниевого кристалла представлен в Приложении В

Изготовление стеклянных деталей:

Материал – стекло оптическое бесцветное ЛК-105 ГОСТ 3514-94.

Основными требованиями, предъявляемыми к стеклянным деталям являются:

- шероховатость торцевых поверхностей – Rz 0,1 мм;
- допускаемые сколы по периметру рабочей поверхности не более 0,2 мм;
- глубина области травления стекла 20 ± 2 мкм.

Технологический процесс изготовления стеклянных деталей представляет совокупность последовательного выполнения шлифовальных, абразивно-доводочных, полировальных, отмывочных операций и операций размерного травления стекла на глубину 20 ± 2 мкм.

Шлифовка заготовок из стекла по наружному диаметру проводится на станке 3А10П алмазным кругом на бакелитовой связке зернистостью 125/100. Доводка пластин выполняется на станке ЖК14-09 последовательным сошлифовыванием припуска на стеклянном шлифовальнике абразивной суспензией из карбида кремния зеленого зернистостью М28; М14; М5 ГОСТ 3647-80 и воды в объемном соотношении 1:3. Полировка поверхностей осуществляется на станке СППД-3 суспензией из полирита оптического и воды на эластичном полировальнике – ткани «молескин С-27». Очистка полученных заготовок проводится в толуоле, перекисно-аммиачном растворе, изопропиловом спирте последовательно.

На данных заготовках методом фотолитографии групповым способом по 16 штук формируются детали.

Технологический процесс формирования деталей включает в себя следующие операции:

- очистка стеклянных заготовок;
- напыление защитной металлизированной структуры;
- фотолитография по формированию рисунка схемы;
- размерное травление стекла;

- удаление фоторезиста и защитных металлизированных слоев;
- разрезка заготовок на отдельные детали;
- контроль внешнего вида, геометрических размеров и глубины травления полученных деталей.

Химическая очистка заготовок перед напылением защитной металлизированной структуры хром-медь-хром осуществляется в растворе хромовой смеси и растворе фтористоводородной кислоты с водой в соотношении 1:8 с дальнейшей промывкой в горячей и холодной воде и сушкой в парах изопропилового спирта.

Напыление металлизированной структуры хром-медь-хром проводится на установке вакуумного напыления УВН 71ПЗ групповым методом с обеих сторон заготовок на вращающейся карусели с числом оборотов вращения 25-30 об/мин, подаваемом токе 75-90 А, давлении $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Разгерметизация камеры ведется при температуре $(90 \pm 10)^\circ\text{C}$. Толщина напыленной пленки с каждой стороны заготовок составляет 1,5-2,0 мкм.

Процесс фотолитографии проводится по существующей типовой технологии.

Скорость травления стекла ЛК-105 составляет 1,6-1,7 мкм/мин.

Удаление фоторезиста проводится в диметилформамиде; защитный металлизированный слой хрома стравливается в растворе калия железосинеродистого, металлизированный слой меди удаляется в растворе азотной кислоты с водой в соотношении 1:1.

Резка заготовок на пластины проводится на установке УРПУ-150М с применением бескорпусных алмазных кругов с зернистостью 63/50.

Очистка готовых пластин проводится в толуоле, перекисно-аммиачной растворе с последующей сушкой в парах изопропилового спирта.

Изготовление стеклянных пластин по вышеуказанной технологии позволяет обеспечить технические требования, предъявляемые к стеклянным деталям.

Изготовление элемента чувствительного

Соединение кремниевого кристалла и стеклянных деталей проводится методом электростатического соединения в едином цикле путем подачи напряжения на кристалл и соединяемые детали при температуре 300 °С в течение 4 мин [126-128].

Технологический процесс изготовления элемента чувствительного включает в себя следующие основные операции:

- комплектование сборки деталями и материалами;
- сборка деталей в приспособление для электростатического соединения;
- электростатическое соединение кремниевого кристалла со стеклянными деталями;
- контроль качества соединения кремния со стеклом по внешнему виду;
- разварка золотых выводов на контактные площадки кристалла.

Конструкция чувствительного элемента предполагает разварку золотой проволоки на контактные площадки, выполненные из алюминия. При этом критериями выбора алюминия в качестве контактных площадок являются следующие факторы: пленки алюминия позволяют создавать на кремнии низкоомный электрический контакт, алюминий технологичен, топология контактных площадок и проводников может быть выполнена простыми операциями фотолитографии, на поверхность алюминия могут быть разварены проволочные выводы из алюминия и золота [1].

Выбор золотой проволоки в качестве выводов обусловлен его высокой электропроводностью и пластичностью. Так, при изготовлении выводов из алюминиевой проволоки, которая не обладает высокой стойкостью к усталости металла при изгибе, наблюдаются частые обрывы проволоки при сборочных операциях чувствительного элемента и его настройке, что ведет к необходимости восстановления электрического контакта к чувствительному

элементу. Следует отметить, что такие операции восстановления не всегда могут быть проведены (например, после установки чувствительного элемента в корпус), что приводит к увеличению брака при изготовлении чувствительного элемента.

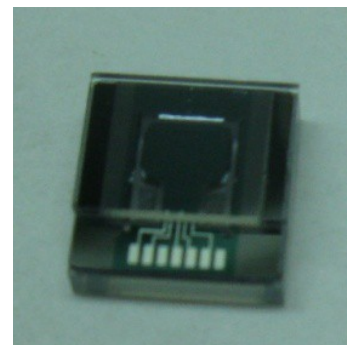
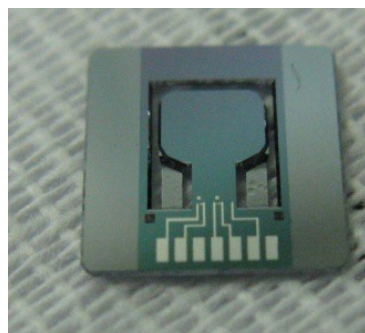
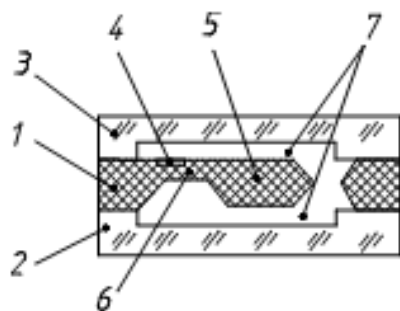
При эксплуатации чувствительных элементов в области контакта золото-алюминий возможно появление явления так называемого «пурпурной чумы» — красноватого соединения интерметаллической фазы $AuAl_2$ (также Au_2Al) с низкой механической прочностью и структурой типа флюорит из-за взаимодиффузии соединяемых материалов [57,85]. Помимо низкой механической прочности, интерметаллическая фаза имеет высокое удельное сопротивление, что приводит к обрыву электрической цепи чувствительного элемента. Ухудшение механических свойств контакта золото-алюминий связано также с эффектом Киркендалла - развитием пустот в зоне контакта в результате большой скорости диффузии алюминия по сравнению со скоростью диффузии золота, что также снижает механическую прочность контакта и увеличивает его сопротивление

Необходимо отметить, что указанные эффекты начинают проявляться при температуре, близкой к $200^{\circ}C$. В структуре чувствительного элемента отсутствуют р-р- переходы, в корпусе прибора устанавливаются настроечные элементы, также не имеющие р-р- переходов. Таким образом, разработанный чувствительный элемент теоретически имеет рабочую температуру до $200^{\circ}C$, что ограничивается физико-химическими процессами, протекающими в области контакта золото-алюминий.

Результаты исследования чувствительных элементов, полученных с использованием климатической камеры МС-811, аттестованной до температуры $120^{\circ}C$, экспериментально подтверждают работоспособность чувствительных элементов при температуре $120^{\circ}C$, при этом максимальные рабочие температуры чувствительных элементов ограничиваются значениями вплоть до $200^{\circ}C$, обусловленными деструктивными процессами в области контакта золото-алюминий.

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

Фотографии представленных образцов представлены на рисунке 65.



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

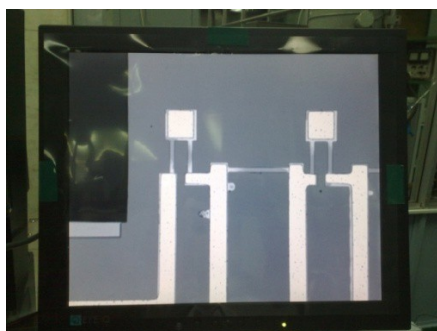
а)

б)

в)

Рисунок 65 - Схематичное изображение ЧЭ (а), кремниевый кристалл (б) и чувствительный элемент (в) пьезорезистивного типа микромеханического акселерометра

Важной операцией при изготовлении является контроль расположения пьезорезисторов в зонах наибольшей деформации упругой перемычки. Контроль проводился в инфракрасном свете на установке совмещения и экспонирования MJB4IR300. Результаты контроля представлены на рисунке 66.



а)



б)

Рисунок 66 - Контроль расположения пьезорезисторов в инфракрасном свете

На рисунке 66, а представлен вид на измерительную схему кристалла, на рисунке 66, б представлен вид в инфракрасном свете. Темная зона на рисунке соответствует «жесткой» части кристалла, светлая зона – упругая перемычка. Из рисунка видно, что пьезорезисторы расположены в зонах наибольшей деформации упругой перемычки, соответствующих месту сопряжения «жесткой» части кристалла и упругой перемычки, что подтверждает правильность выбора конструктивно-технологических решений топологических слоев и выбора метода формообразования кристалла методом анизотропного травления кремния.

Данная топология, реализуемая при изготовлении кристалла, зарегистрирована в ФИПС как объект интеллектуальной собственности, свидетельство № 2012630032 от 28.02.2012 [134].

Отличие предложенной технологии от известных технологий формирования поликремниевых чувствительных элементов – введение быстрого термического отжига после операций легирования пленки поликристаллического кремния, что вызвало изменение последовательно технологических операций и обоснование технологических режимов. При этом параметры процесса следующие: температура процесса – 1000 °С; градиент нарастания температуры – 80 °С/с; время процесса – 20 мин.

Полученная структура ЧЭ отличается следующим:

- снижен удельный разброс значений пьезосопротивлений по пластине на более чем на 40% по сравнению с аналогами;
- расширен температурный диапазон измерений до 120 °С;
- повышена чувствительность на 10% по сравнению с аналогами;
- снижен начальный выходной сигнал мостовой схемы с 3,12 до 2,7 мВ для поликремниевой технологии без отжига.

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.

Выбор режимов осаждения и отжига поликристаллического кремния обусловлен следующим:

- 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 невоспроизводимости 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.

4. Разработка методик и исследование выходных параметров кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров

Исследования осуществляются на образцах высокотемпературных чувствительных элементов микромеханических акселерометров (рисунок 65), изготовленных на основе разработанной технологии, а также чувствительных элементов, изготовленных по диффузионной технологии и технологии поликремния без быстрого термического отжига. При этом толщины упругих перемычек всех типов кристаллов имеют одинаковые геометрические размеры, соответствующие геометрии ЧЭ, изготовленных по разработанной технологии.

Кристалл чувствительного элемента выполнен из монокристаллического кремния КЭФ 4,5/7,5-60, ориентации (100). Пьезорезисторы сформированы на рабочей части кристалла методом осаждения поликристаллического кремния при пониженном давлении из газовой фазы с последующим легированием и имеют поверхностное сопротивление 120 – 150 Ом/ .

Контактные площадки и соединения пьезорезисторов в мостовой схеме выполнены на основе алюминия. Электрическая схема моста разомкнута и предполагает включение дополнительного резистора температурной компенсации начального разбаланса, а для компенсации температурной погрешности на кристалле сформирован терморезистор.

В работе приведены следующие результаты исследований выходных параметров чувствительных элементов микромеханических акселерометров:

- исследования электрических параметров ЧЭ при различных температурах;
- исследования электрических параметров ЧЭ, изготовленных по различным технологиям и технологическим режимам;
- исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры.
- исследования характеристик ЧЭ при воздействии ускорения.

Перед проведением исследований приняты меры защиты от воздействия статического электричества в соответствии с ОСТ 92-1615 - перед проведением измерений параметров ЧЭ заземлены технологические корпуса и приспособления путем соединения крепежных винтов приспособлений с нулевой шиной или нулевым контактом.

При проведении исследований выдерживалось время прогрева измерительной аппаратуры, заданное в эксплуатационной документации на измерительные приборы.

Все оборудование, измерительная и испытательная аппаратура заземлены. Монтаж схем, указанных в пп.4.1-4.6 велся проводом МГШВ ТУ 16-505.437-82, сечением не менее 0,12 мм². Длина соединительных проводов не более 1,5 м. Коммутации и подключения, связанные с монтажом схем исследований, проводилась при выключенном напряжении питания.

4.1 Методика измерения электрических параметров чувствительных элементов

Методика исследования электрических параметров кристалла заключается в контроле значений номинальных значений сопротивлений пьезорезисторов $R1 - R4$ и терморезистора $R5$, значений обратных токов утечек и пробивного напряжения. При этом исследуются три вида чувствительных элементов – ЧЭ, изготовленные по предложенным КТР, ЧЭ, изготовленные по поликремниевой технологии без быстрого термического отжига, ЧЭ, изготовленные по диффузионной технологии.

Контроль чувствительных элементов проводится на зондовой установке "Зонд-А4Ш" путем установки измерительных щупов поочередно между контактными площадками 1 и 2 ($R5$), 2 и 3 ($R2$), 2 и 6 ($R4$), 3 и 4 ($R1$), 5 и 6 ($R3$) чувствительного элемента.

Значения номинальных сопротивлений пьезорезисторов $R1, R2, R3, R4$ должны находиться в пределах (2000...2500) Ом, максимальное отклонение между значениями сопротивлений пьезорезисторов $R1, R2, R3, R4$ должно быть

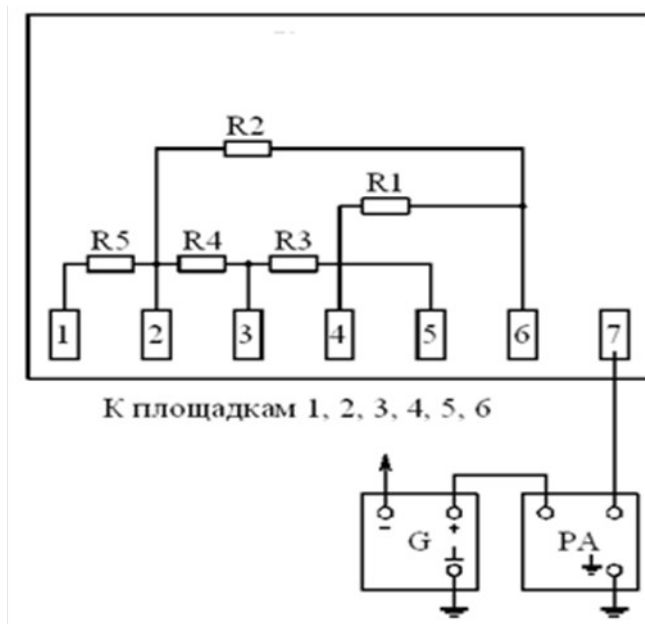
не более 200 Ом. Большой разброс пьезосопротивлений ведет к сложности настройки схемы при заданных значениях пьезосопротивлений и величины питающего напряжения, равного 5 В.

Величина сопротивления терморезистора $R5$ должна быть в пределах от 15000 до 45000 Ом.

Контроль обратного тока утечки проводится при включении ЧЭ в схему, представленную на рисунке 67, с помощью установки "Зонд-А4Ш", источника постоянного тока Б5-45, прибора комбинированного цифрового Щ-300 при испытательном напряжении (10 ± 1) В и (30 ± 1) В между контактной площадкой 7 ЧЭ и одной из площадок 1, 2, 3, 4, 5, 6 ЧЭ (отрицательный вывод источника G подключается к площадке пьезорезистора).

Обратный ток утечки не должен превышать значений 0,35 мкА. Большие значение тока утечки свидетельствует о нарушении технологического процесса изготовления чувствительного элемента.

Контроль пробивного напряжения ($U_{пр.}$) проводится при включении ЧЭ в схему, представленную на рисунке 67, с помощью установки "Зонд-А4Ш", источника постоянного тока Б5-45, прибора комбинированного цифрового Щ-300 при испытательном напряжении (100 ± 1) В путем подачи напряжения между контактной площадкой 7 и знаком совмещения кристалла (отрицательный вывод источника G подключается к знаку совмещения).



G – источник питания постоянного тока Б5-45;
 PA – прибор комбинированный цифровой Щ-301.
 Рисунок 67– Схема контроля обратного тока утечки ($I_{ут}$ и $U_{пр}$).

Величина пробивного напряжения должна быть не менее 100 В, а сопротивление изоляции должно быть больше 200 МОм.

4.2 Результаты исследования электрических параметров чувствительных элементов

Результаты исследования электрических параметров чувствительных элементов, согласно разработанной методики, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты исследований электрических параметров ЧЭ, изготовленных по различным технологиям

№пл.	№ЧЭ	№ кр.	$R, \text{ Ом}$				$\Delta R, \text{ Ом}$	$R5$	$R_{из.}, \text{ МОм}$	$U_{обр.}, \text{ В}$	$I_{ут}, \text{ мкА}$	$\delta, \%$
			1	2	4	3						
Чувствительные элементы, изготовленные по предложенной технологии (осаждение поликремния при температуре $620 \pm 5^\circ\text{C}$, толщина поликремния $0,6 \dots 0,7$ мкм, быстрый термический отжиг при $1000 \pm 5^\circ\text{C}$)												
74-01	1	1	2214	2210	2219	2230	16	25700	>200	>100	-	1,012
74-06	2	2	2013	2031	2029	2011	18	22100	--/--	>100	-	1,056
74-04	3	3	2184	2199	2206	2185	21	22410	--/--	>100	-	1,147

№пл.	№ЧЭ	№ кр	R, Ом				ΔR , Ом	R5	Rиз., МОм	U _{обр.} , В	I _{ут.} , мкА	δ , %
			1	2	4	3						
Чувствительные элементы без быстрого термического отжига (Температура осаждения поликремния 640±5°С , толщина поликремния 0,6...0,7 мкм)												
20-03	1	3	3030	2931	3101	2930	171	38980	>200	>100	-	2,703
20-05	2	5	3152	3017	3204	3030	187	45700	--/--	>100	-	3,030
20-07	3	1	3185	3117	3243	3103	140	14940	--/--	>100	-	1,427
Чувствительные элементы, изготовленные по диффузионной технологии (температура процесса 1000±5 °С , 20 мин- загонка примеси, 80 мин – разгонка примеси)												
46-01	1	7	3480	3177	3234	3533	356	9745	-	>45	0,54	4,021
46-03	2	2	3827	3497	3564	3837	340	11425	-	>65	0,74	4,024
46-04	3	15	3776	3353	3379	3633	423	3735	-	>50	0,31	2,250

Из таблицы 8 видно, что ЧЭ, изготовленные по диффузионной технологии, имеют более высокие токи утечки, меньшие значения пробивного обратного напряжения ($U_{обр}$) по сравнению с ЧЭ, изготовленными по разработанной технологии, что отвечает последние как ЧЭ с улучшенными характеристиками.

По данным таблицы 8 построена диаграмма (рисунок 68), отражающая разброс значений пьезорезисторов в зависимости от используемых технологий формирования ЧЭ, а также диаграмма (рисунок 61), иллюстрирующая разброс значений сопротивлений пьезорезисторов по пластине в зависимости от применяемых технологических решений. Анализ диаграмм показывает, что ЧЭ, изготовленные по предложенным КТР (быстрый термический отжиг пленки поликристаллического кремния) имеют средний разброс пьезосопротивления 18 Ом по пластине при значении пьезосопротивлений резисторов (2013...2184) Ом на партии пластин. Для поликремниевой технологии без отжига средний разброс пьезосопротивления 150 Ом по пластине при значении пьезосопротивлений резисторов (2930...3204) Ом на партии пластин.

Для диффузионной технологии эти значения составляют 340 Ом, 3177...3827 Ом соответственно.

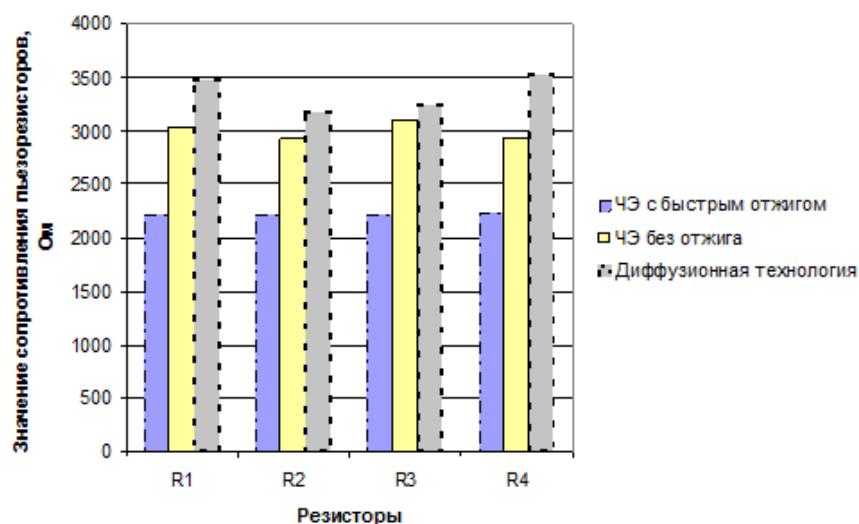


Рисунок 68 – Зависимость значений пьезорезисторов от используемых технологий формирования ЧЭ



Рисунок 69 – Разброс значений сопротивлений пьезорезисторов по пластине в зависимости от применяемых технологических решений

Разброс значений пьезосопротивлений мостовой схемы влияет на начальный выходной сигнал (разбаланс мостовой схемы). Таким образом, предложенные КТР позволяют снизить начальный разбаланс мостовой схемы и упростить настройку датчика.

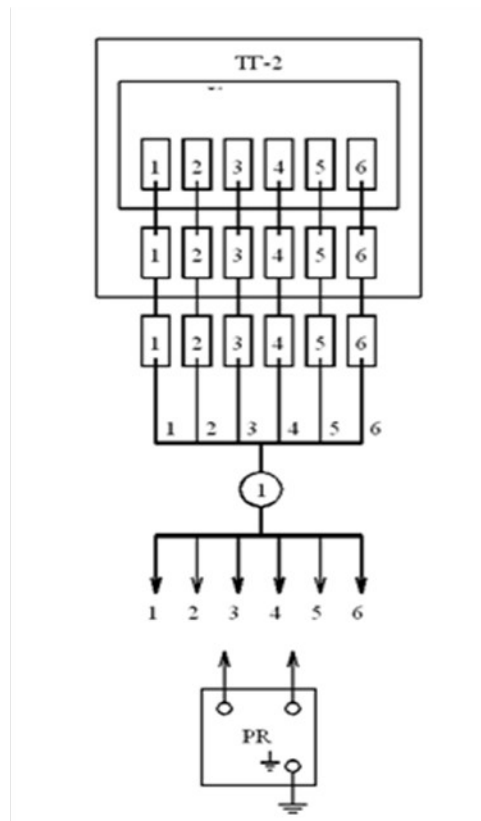
4.3 Методика определения температурных коэффициентов сопротивления пьезорезисторов и терморезистора чувствительного элемента

Для расчета параметров мостовой схемы необходимо определить температурный коэффициент сопротивления (ТКС) пьезорезисторов для чего измеряют их сопротивления при различных температурах. Значения ТКС пьезорезисторов служат исходными данными для расчета настроечных резисторов мостовой схемы, поэтому расчет ТКС необходимо осуществлять с высокой точностью.

Для определения ТКС ЧЭ фиксируют в специально разработанном приспособлении ТГ-2. Далее разваривают проволоку Кр.Зл. 99,99-0,04Т ГОСТ 7222-75 на контактные площадки 1, 2, 3, 4, 5, 6 ЧЭ и выводы приспособления. Затем приспособление ТГ-2 помещают в камеру тепла и холода МС-811. Схема подключения ЧЭ представлена на рисунке 70.

Методика определения ТКС заключается в следующем:

1. В камере тепла и холода устанавливают температуры, равную 120°C . Чувствительный элемент выдерживается при данной температуре в течение 20 минут, затем проводят измерение значений пьезосопротивлений $R_1 - R_4$ и терморезистора R_5 .
2. В камере тепла и холода устанавливают температуру минус 65°C . Чувствительный элемент выдерживают при данной температуре в течение 20 минут, затем проводят измерение значений пьезосопротивлений $R_1 - R_4$ и терморезистора R_5 .
3. Аналогично пп.1 и 2 проводят измерения пьезосопротивления при температуре, равной 0°C .



1 – кабель технологический; PR – прибор комбинированный цифровой Щ-300

Рисунок 70– Схема контроля ТКС резисторов

По данным измерений рассчитывают температурный коэффициент сопротивления для пьезорезисторов $R_1 - R_4$ и терморезистора R_5 по формуле:

$$\text{ТКС} = \frac{R_{+120} - R_{-65}}{R_0},$$

где R_{+120} – сопротивление пьезорезистора R_i при температуре 120°C , Ом; R_{-65} – сопротивление пьезорезистора R_i при температуре минус 65°C , Ом; R_0 – сопротивление пьезорезистора R_i при температуре 0°C , Ом.

Расчет значений величин ТКС следует осуществлять с точностью до четвертого десятичного знака, так как при расчете до трех десятичных знаков возникает высокая неточность определения номиналов подстроечных резисторов, а расчет до пяти десятичных знаков нецелесообразен из-за ограниченности номиналов рядов подстроечных резисторов.

4.4 Результаты исследования температурных коэффициентов сопротивления пьезорезисторов и терморезистора чувствительных элементов, изготовленных по различным технологическим режимам

Результаты исследований ТКС пьезорезисторов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты исследований электрических параметров кристаллов ЧЭ при различных температурах

№ пластины/ кристалла	Резистор	R, Ом			Поверхностное сопротивление, Ом/□	ТКС, %/°C	ΔТКС
		T= -65 °C	T= 0 °C	T= 120 °C			
1	2	3	4	5	6	7	8
Чувствительные элементы, изготовленные по предложенным технологическим решениям (осаждение поликремния при 620 ±5°C , толщина поликремния 0,6...0,7 мкм, быстрый термический отжиг при 1000±5 °C)							
74-01/04	R1	2214	2151	2048	135	-0,0515	0,0081
	R2	2013	1964	1885	135	-0,0434	
	R3	2184	2124	2023	135	-0,0504	
	R4	2161	2104	2012	135	-0,04733	
	R5*	27506	25730	21525	5168	-0,6422	
74-06/17	R1	2036	1994	1928	121	-0,0360	0,0100
	R2	1794	1766	1725	121	-0,0260	
	R3	1799	1769	1727	121	-0,0269	
	R4	1950	1916	1865	121	-0,0296	
	R5*	12649	9776	5005	3835	-0,5212	
74-04/11	R1	3046	2904	2815	125	-0,0531	0,0105
	R2	2141	2081	1983	125	-0,0505	
	R3	2158	2094	1989	125	-0,0537	
	R4	2387	2309	2176	125	-0,0611	
	R5*	57512	37213	28288	4355	-0,5235	
Чувствительные элементы, изготовленные по поликремниевой технологии без быстрого термического отжига (температура 640 ±5°C , толщина поликремния 0,7...0,8) мкм							
20-03	R1	3406	3309	3150	162	-0,0655	0,0095
	R2	3097	3021	2900	162	-0,0544	
	R3	3360	3267	3113	162	-0,0574	
	R4	3325	3237	3095	162	-0,04933	
	R5*	89240	73430	48500	7950	-0,7454	
20-05	R1	3132	3068	2966	148	-0,0465	0,0154

№ пластины/ кристалла	Резистор	R, Ом			Поверхностное сопротивление, Ом/□	TKC, %/°C	ΔTKC
		T= -65 °C	T= 0 °C	T= 120 °C			
	R2	2760	2717	2654	148	-0,0331	
	R3	2767	2722	2657	148	-0,0277	
	R4	3000	2947	2869	148	-0,0315	
	R5*	19460	15040	7700	5900	-0,5765	
20-07	R1	4686	4468	4330	152	-0,0643	0,0158
	R2	3294	3202	3051	152	-0,0702	
	R3	3320	3222	3060	152	-0,0613	
	R4	3673	3552	3347	152	-0,0676	
	R5*	88480	57250	43520	6700	-0,5334	
Чувствительные элементы, изготовленные по диффузионной технологии (температура 1000±5 °C, 20 мин- загонка примеси, 40 мин – разгонка примеси)							
46-01/01	R1	2574	3292	6200	110	0,8448	0,0927
	R2	2220	2865	5320	110	0,8020	
	R3	2252	2905	5330	110	0,7882	
	R4	2617	2332	5875	110	0,7520	
	R5*	6930	6037	10542	2450	0,9396	
46-03/13	R1	2552	3236	5687	108	0,7400	0,0436
	R2	2200	2833	5109	108	0,7589	
	R3	2246	2892	5123	108	0,7392	
	R4	2530	3198	5533	108	0,7153	
	R5*	3790	5780	10450	2430	0,9823	
46-04/08	R1	2713	3455	6025	105	0,2434	0,0298
	R2	2255	2919	5210	105	0,2540	
	R3	2274	2941	5128	105	0,2241	
	R4	2716	3457	5981	105	0,2325	
	R5*	3807	5947	10568	105	0,9732	

* - терморезистор

Из таблицы 9 видно, что ЧЭ, изготовленные по предложенным конструктивно-технологическим решениям, имеют меньший разброс значений температурных коэффициентов сопротивления пьезорезисторов в диапазоне температур минус 65-120 °C (например, 0,010 для пластины 74-06/17 по сравнению с 0,0298 для пластины 46-04/08, 0,0154 для пластины 20-05) по сравнению с кристаллами, выполненными по диффузионной технологии и пластинами, выполненными на поликремнии без быстрого термического

отжига. Разброс значений ТКС определяет температурную погрешность и влияет на номиналы подстроечных резисторов.

Условие сохранения баланса мостовой схемы с четырьмя пьезорезисторами при изменении температуры можно записать в виде:

$$R1 \cdot R4 = R2 \cdot R3$$

где $R1 \dots R4$ – сопротивления пьезорезисторов

Переходя к значениям ТКС, можно записать:

$$\gamma_1 + \gamma_4 = \gamma_2 + \gamma_3$$

$\gamma_1 \dots \gamma_4$ – температурные коэффициенты пьезорезисторов

Таким образом, минимизируя значения ТКС пьезорезисторов можно добиться упрощения настройки мостовой схемы.

На основании таблицы 9 построены диаграммы (рисунок 71,72), связывающие характеристики ЧЭ в зависимости от режимов формирования.

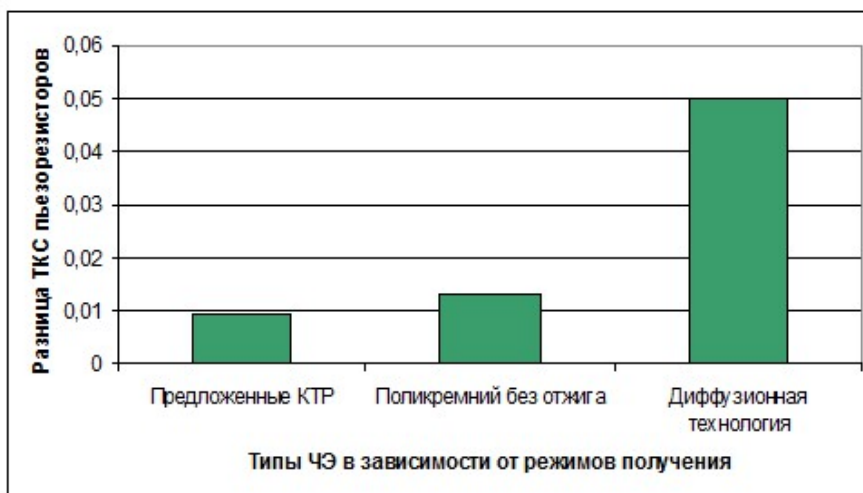


Рисунок 71 – Разница ТКС пьезорезисторов

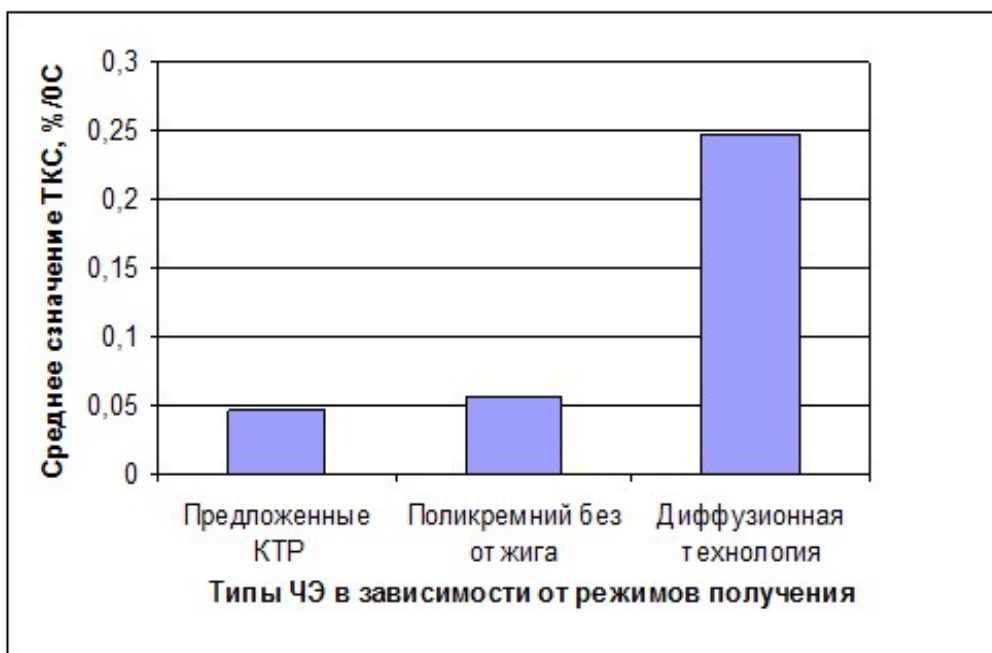


Рисунок 72 – Средние значения температурных коэффициентов сопротивления в зависимости от режимов формирования ЧЭ (для предложенных КТР и поликремниевой технологии без отжига значения отложены в абсолютных величинах)

Анализ диаграмм (рисунок 71,72) показывает, что ЧЭ, изготовленные по предложенным КТР, имеют меньший разброс значений ТКС пьезорезисторов, следовательно, изготовленные ЧЭ по предложенным КТР будут иметь пониженную температурную погрешность по сравнению с ЧЭ, изготовленными по поликремниевой технологии без отжига и ЧЭ, изготовленными по диффузионной технологии. Кроме того, упрощается процесс настройки мостовой схемы [2].

4.5 Методика исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры

Методика исследования заключается в установке изготовленных по предложенным и известным КТР ЧЭ в специально разработанные технологические приспособления по схеме, изображенной на рисунке 62, после чего ЧЭ перемещают в климатическую камеру измерительной осью горизонтально. Измерения начального выходного сигнала проводятся последовательно при температурах минус 65°С, 0°С, 120°С. Время выдержки ЧЭ при заданных температурах составляет не менее 20 мин. Необходимо проведение трех измерений при каждой температуре для повышения точности измерений. Измерения проводят с использованием источника постоянного тока Б5-45, прибора комбинированного цифрового Щ-300. Измерения проводятся при токе питания 10 мА.

Температурная погрешность рассчитывается по формуле:

$$Y = \frac{U_{120} - U_{-65}}{U_0 \cdot \Delta T} \cdot 100$$

U_{120} , U_{-65} , U_0 – выходной сигнал при температурах 120°С, минус 65°С, 0°С соответственно, ΔT – разница температур (равная 185 °С).

4.6 Результаты исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры

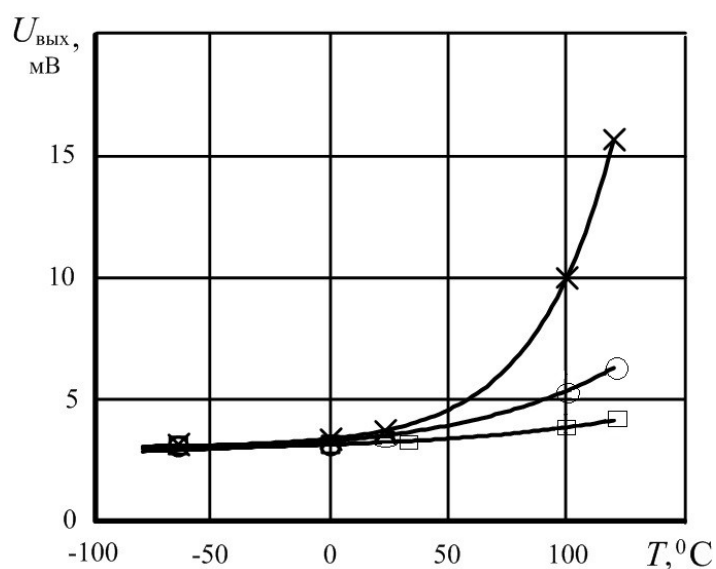
По результатам исследования построена таблица изменения начального выходного напряжения ЧЭ при различных температурах.

Таблица 10 – Результаты исследования начального выходного напряжения ЧЭ от температуры

Варианты исполнения ЧЭ	Номер опыта	Температура, °С		
		- 65	0	120
		Выходное напряжение, мВ		
ЧЭ №1 (диффузионная технология, температура процесса $1000 \pm 5^\circ\text{C}$, 20 мин - загонка примеси, 80 мин – разгонка примеси)	1	3,262	3,671	15,240
	2	3,254	3,667	15,260
	3	3,260	3,669	15,260
	Среднее значение	3,258	3,669	15,220
ЧЭ №2 (поликремниевая технология без быстрого термического отжига, температура осаждения $640 \pm 5^\circ\text{C}$, толщина поликремния 0,7...0,8 мкм)	1	3,250	3,220	6,85
	2	3,05	3,240	6,75
	3	3,105	3,290	6,65
	Среднее значение	3,150	3,250	6,75
ЧЭ №3 (предложенная технология, температура осаждения $620 \pm 5^\circ\text{C}$, толщина поликремния 0,6...0,7 мкм, быстрый термический отжиг при $1000 \pm 5^\circ\text{C}$)	1	2,430	1,735	4,155
	2	2,420	1,750	3,945
	3	2,470	1,745	4,050
	Среднее значение	2,440	1,740	4,05

Результаты исследований ЧЭ, выполненных по различным технологиям, показывают пониженное значение начального выходного напряжения ($U_{\text{вых}}$) для предлагаемой технологии в диапазоне температур минус 65 – 120°С.

По данным таблицы 10 построена диаграмма (рисунок 73), связывающая значение начального выходного напряжения для ЧЭ при различных температурах для различных КТР исполнения.



x – диффузионная технология; o – поликремниевая технология без отжига; □ – разработанная технология

Рисунок 73 – Температурная зависимость начального выходного напряжения ЧЭ для различных КТР

Результаты исследований подтверждают правильность выбора КТР при изготовлении ЧЭ, обеспечивая снижение начального выходного напряжения при воздействии повышенной температуры с ± 15 мВ до ± 4 мВ, температурной погрешности измерений с $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ %. Значение начального выходного напряжения и температурной погрешности позволяет расширить диапазон рабочих температур ЧЭ по разработанной технологии выше 100°C .

4.7 Методика исследования выходного напряжения ЧЭ от воздействия ускорения

Исследования проводятся с целью оценки величины выходного напряжения ЧЭ, полученного по разработанной технологии, от воздействующего ускорения.

Чувствительный элемент, скоммутированный согласно п.4.1, устанавливают на центрифугу ТЕМП-2. Подключают клеммы установки к выводам тары ТГ-2. Задают на центрифуге значения ускорений (g) в диапазоне

минус 500 – 500 м/с² с шагом 125 м/с². Измеряют значения выходного сигнала чувствительных элементов при различном действующем ускорении.

Исследования проводят при токе питания 10 мА в нормальных климатических условиях с использованием источника постоянного тока Б5-45, прибора комбинированного цифрового Щ-300. Нормальные климатические условия испытаний (нормальные условия) по ГОСТ Р В 20.39.301-98 характеризуются температурой окружающей среды от 15 до 35 °С, относительной влажностью воздуха от 45 до 75%, атмосферным давлением от 86 до 106 кПа (от 645 до 795 мм рт. ст.).

4.8 Результаты исследований выходного напряжения ЧЭ от воздействия ускорения

Результаты исследований электрических параметров ЧЭ при установке в технологический корпус (приспособление для испытаний) при воздействии ускорения представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты исследования при воздействии ускорения

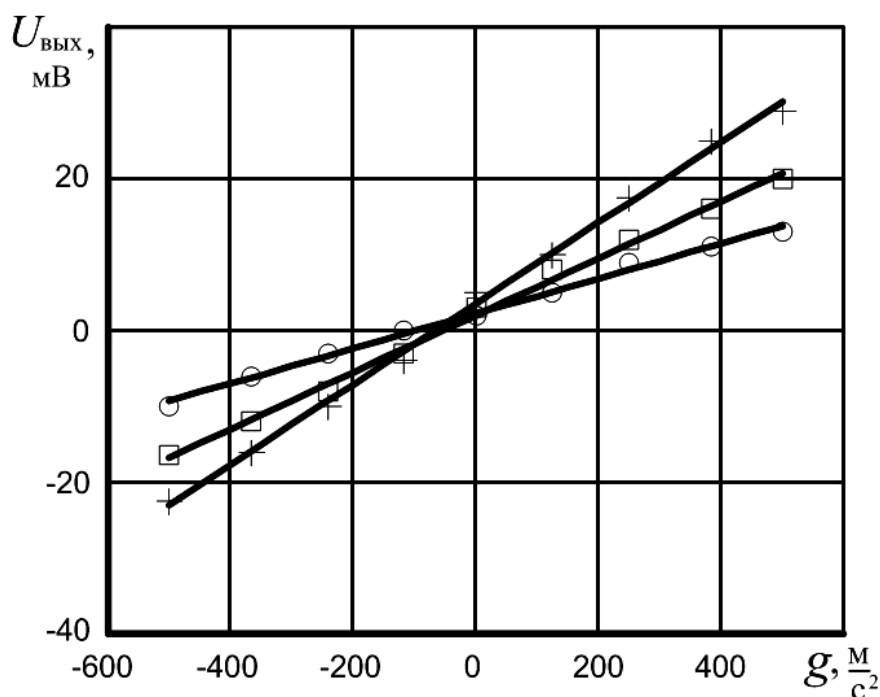
Варианты исполнения ЧЭ	№ цикла исследования	Воздействующее ускорение, м/с ²								
		-500	-375	-250	-125	0	125	250	375	500
		Выходной сигнал, мВ								
ЧЭ №1 (диффузионная технология, температура процесса 1000±5°С, 20 мин - загонка примеси, 80 мин – разгонка примеси)	1	-23,29	-18,72	-14,15	-7,57	3,82	7,59	14,17	18,76	25,36
	2	-23,28	-18,72	-14,15	-7,58	3,81	7,59	14,12	18,77	25,35
ЧЭ №2 (поликремниевая технология без быстрого термического отжига, температура	1	17,72	15,21	9,59	5,54	3,04	5,55	9,58	15,23	17,74
	2	17,74	15,24	9,61	5,57	3,03	5,56	9,59	15,25	17,75

Варианты исполнения ЧЭ	№ цикла исследования	Воздействующее ускорение, м/с ²								
		-500	-375	-250	-125	0	125	250	375	500
		Выходной сигнал, мВ								
осаждения ±5 ⁰ С, толщина поликремния 0,7...0,8 мкм)	640									
ЧЭ №3 (предложенная технология, температура осаждения 620±5 ⁰ С, толщина поликремния 0,6...0,7 мкм, быстрый термический отжиг при 1000±5 ⁰ С)	1	-18,67	-16,43	-10,23	-6,46	2,54	6,47	10,24	16,42	19,68
	2	-18,65	-16,41	-10,21	-6,42	2,55	6,48	10,25	16,43	19,69

В таблице 11 представлены результаты исследований ЧЭ, выполненных по различным технологиям – диффузионная технология, поликремниевая технология без отжига, поликремниевая технология с быстрым термическим отжигом.

Чувствительные элементы по предлагаемой технологии имеют пониженный выходной сигнал по сравнению с диффузионными (примерно на 27%), что не является препятствием для обработки данного сигнала. Данные результаты согласуются с теоретическими данными пьезочувствительности поликристаллического кремния (снижение чувствительности примерно на 30%) по сравнению с объемным монокремнием.

По данным таблицы 11 построена зависимость (рисунок 74) выходного сигнала ЧЭ при воздействии ускорения для различных вариантов исполнения ЧЭ.



x – диффузионная технология; o – поликремниевая технология без отжига; □ – разработанная технология

Рисунок 74 – Зависимость выходного сигнала ЧЭ при воздействии ускорения.

Зависимость выходного напряжения при положительных и отрицательных ускорениях носит линейный характер при повторяющихся циклах исследования. Это позволяет сделать вывод о том, что пьезорезисторы испытывают одинаковые величины деформации при различных знаках воздействующего ускорения. Следовательно, предложенная топология измерительной схемы одинаково воспринимает отрицательное и положительное ускорение, что свидетельствует о правильности выбора конструктивно-технологических решений размещения пьезорезисторов на профиле кристалла.

Результаты испытаний ЧЭ, изготовленных по предлагаемым КТР, показывают увеличенную чувствительность (на 10%) по сравнению с ЧЭ, изготовленными по поликремниевой технологии без быстрого термического отжига.

Результаты исследований подтверждают правильность выбора КТР при изготовлении ЧЭ. Результаты исследований электрических параметров кристаллов и ЧЭ показывают малый разброс сопротивлений пьезорезисторов и малый разброс температурных коэффициентов сопротивления, что упрощает дальнейшую сборку и настройку микромеханического акселерометра. Отсутствие токов утечек делает работоспособным ЧЭ при температурах выше 100 °С.

Малый выходной сигнал ЧЭ по разработанной технологии по сравнению с ЧЭ на основе диффузионных пьезорезисторов согласуется с теоретическими данными по пьезочувствительности пленок поликристаллического кремния и может быть преобразован стандартными преобразователями сигналов полупроводниковых пьезорезистивных датчиков (типа ВТ 5518 производства ОАО «НИИФИ»).

Выводы:

Результаты исследований электрических параметров ЧЭ, изготовленных по различным технологиям, показывают малый разброс сопротивлений пьезорезисторов и малый разброс температурных коэффициентов сопротивления ЧЭ, изготовленных по предложенным КТР в сравнении с известными технологиями. Таким образом, это упрощает дальнейшую сборку и настройку микромеханического акселерометра на основе ЧЭ, изготовленных по предложенной технологии. Отсутствие токов утечек делает работоспособными данные ЧЭ при температурах выше 100 °С.

Изготовленные по предложенной технологии ЧЭ демонстрируют увеличение чувствительности на 10% по сравнению с аналогами – поликремниевой технологии без быстрого термического отжига при воздействии ускорения.

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

ЧЭ в составе акселерометра. Сравнение характеристик акселерометров на основе разработанного ЧЭ и известных аналогов представлено в таблице 12.

Таблица 12 – Сравнение характеристик акселерометров на основе разработанного ЧЭ и известных аналогов

Характеристика	Тип акселерометров				
	1	2	3	4	5
	<i>PCB Group, Inc.</i> (США) Серия 3531	<i>Endevco</i> (США) 7231C-750	<i>Honeywell</i> (США) <i>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	-	-	±2 мВ

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

Метрологическое и материально-техническое обеспечение исследований

Метрологическое обеспечение исследований

Измеряемый параметр	Величина	Допуск	Средства измерений
1	2	3	4
Температура окружающей среды	минус 65 – плюс 125 °С	±3 °С	Климатическая камера МС-811
Линейное ускорение	от ±500 до ±500 м/с ²	±0,2 %	Центрифуга ТЕМП-2
Питающее напряжение	(6±0,05) В	±1 %	Источник напряжения постоянного тока Б5-45
Выходное напряжение	(0 ± 10) мВ	±0,11 %	Вольтметр универсальный цифровой В7-34А
	(0 ± 10) В	±0,11 %	Вольтметр универсальный цифровой В7-38
Сопротивление пьезорезисторов	до 3 кОм	±0,08 %	Вольтметр универсальный цифровой В7-38
Электрическое сопротивление изоляции	до 200 МОм	±2,5 %	Тераомметр Е6-13А

Материально-техническое обеспечение исследований

Наименование, тип, оборудование, средства измерения	ГОСТ, ТУ
1	2
Вольтметр универсальный цифровой В7-38	ХВ2.710.032 ТУ
Вольтметр универсальный цифровой В7-34А	ТГ2.710.010 ТУ
Источник питания постоянного тока Б5-45	ЕЭ3.233.219 ТУ
Тераомметр Е6-13А	ЯЫ2.722.014 ТУ
Градуировочный комплекс ТЕМП 2	–
Климатическая камера МС-811	–
Приспособление ТГ-2	СДАИ.442261.005
Кабели	СДАИ.685611.407

Наименование, тип, оборудование, средства измерения	ГОСТ, ТУ
1	2
	СДАИ.685611.069
Секундомер Со Спр-2б-2	ТУ 25-1819.0021-90

Заключение

Разработана и практически реализована технология формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100⁰С, 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. 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 +100⁰С.

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

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.

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.

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.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Mohamed Gad-el-Hak. The MEMS handbook (Mechanical engineering handbook series). - CRC Press. – 2001. – 720 p.*
- 2 Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи.-М.: Энергоатомиздат, 1983.- 136 с.
- 3 *Danny Banks. Microengineering, MEMS, and Interfacing A Practical Guide. - Taylor & Francis Group. - 2006. – 375 p.*
- 4 Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник.- М.: Радио и связь, 1991.-528 с.
- 5 *Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique. A Manual of Wet-Etched Silicon Structures. Joachim Fr Eühauf. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005. – 221 p.*
- 6 Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – М.: «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2010. — 392 с.
- 7 *Electrochemistry of Silicon. Instrumentation, Science, Materials and Applications. Volker Lehmann. Wiley-VCH Verlag GmbH.- 2002. – 277 p.*
- 8 *Fraden, Jacob. Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications / Jacob Fraden.–3rd ed.p. cm. Springer. – 2006. – 589 p.*
- 9 Сугано Т., Икома Т., Такэиси Ё. Введение в микроэлектронику: Пер. с яп. — М.: Мир, 1988.— 320 с.
- 10 *Dugan Um and Scott Lloyd. MEMS Research and Curriculum Development by Bulk Micromachining Technology / Journal of Education and Human Development, Volume 1, Issue 1. - 2007. – P.72-79.*
- 11 *A.C. Weber, J.H. Lang and A.H. Slocum, “{111} Silicon etched planar electrical contacts for power MEMS-relays,” in Proc. 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, Sep. 2007. –P.31-43.*
- 12 С. Тимошенко; А.Бойко, Б.Симонов. Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры / ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2008. – №1. – С. 80-82.
- 13 С.Сысоева. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач / Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2009. - №7. – С.80-89.
- 14 *Rijk Edwin Oosterbroek. Modeling, design and realization of microfluidic components. - University of Twente, Enschede, The Netherlands. – 2007. – P.21-28.*
- 15 *Arthur Beyder, Frederick Sachs. Microfabricated torsion levers optimized for low force*

- and high frequency operation in fluids* / www.elsevier.com/locate/ultramic., 2006.
- 16 Ушков А.В., Исакова Г.А., Рябов В.Т. Разработка методики компенсации выпуклых углов при формировании мембраны чувствительного элемента давления с жестким центром в водном растворе КОН / Нано- и микросистемная техника, 2007. – №6. – С. 55–58.
- 17 Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Старжинский В.Е., Шилько С.А. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Технологии поверхностной и объемной микромеханики / Микросистемная техника, 2004. - №7. – С.30-36.
- 18 Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Старжинский В.Е., Шилько С.А. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Технологии индивидуального формообразования микромеханики / Микросистемная техника, 2004. - №8. – С.24-28.
- 19 *M A Gosalvez, N Ferrando, Y Xing, Prem Pal, K Sato, J Cerda and R Gadea. Simulating anisotropic etching of silicon in any etchant: evolutionary algorithm for the calibration of the continuous cellular automaton / J.Micromech.Microeng, 2011. - №6. - P. 72-84.*
- 20 Тимошенко С.П., Зотов С.А., Калугин В.В., Балычев В.Н., Морозова Е.С. Разработка микропривода для управления микрозеркалом / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №5. – С.66-70.
- 21 Кречетень Ф. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры / Петербургский журнал электроники, 2011. - №1. – С.23-28.
- 22 А.Бойко; А. Заводян; Б.Симонов. Микромеханические акселерометры: моделирование элементов конструкции и изготовление / Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2009. - №8. – С.100-103.

- 23 Телец В.А. Микроэлектромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения / Микросистемная техника, 2004. - №2. – С.2-6.
- 24 Золотов Ю.Н., Тимошенко С.П., Шелепин Н.А. Применение комплексных методов проектирования в процессе разработки интегральных преобразователей механических величин / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.4-11.
- 25 Амеличев В.В., Павлов А.Ю., Погалов А.И., Чаплыгин Ю.А. Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.14-17.
- 26 Галушков А.И., Панкратов О.В., Погалов А.И., Сауров А.Н., Суханов В.С., Угольников С.В. Методы проектирования и калибровки микроэлектронных пьезорезистивных преобразователей ускорения / Нано- и микросистемная техника, 2006. - №7. – С.45-49.
- 27 Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 28 Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров / Компоненты и технологии, 2006. - №3. – С.57-68.
- 29 *Jan G. Korvink and Oliver Paul. MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications. – Springer. – 2005. – P.529.*
- 30 *C. Ashruf, P. French, P. Bressers, P. Sarro, J. Kelly. A new contactless electrochemical etch-stop based on gold/silicon/TMAH galvanic cell / Sensors and Actuators, 1998. - №1. – P. 284–291.*
- 31 Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических

- материалов. СПб.: Лань, 2002.- 424 с.
- 32 Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение./Пер. с англ./-М.: Мир, 1990.-492 с.
- 33 Ефремов А.М., Светцов В.И., Рыбкин В.В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. Иваново.: Изд. ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2006.-260 с.
- 34 Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники.-Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.- 103 с.
- 35 Г.А. Мустафаев, А.Г. Мустафаев. Разработка процесса формирования глубокой изоляции структур кремний-на изоляторе / Нано – и микросистемная техника, 2009. - №1. – С.30-31.
- 36 Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Физико – технологические основы применения наноразмерной ионно – лучевой технологии при создании изделий нано- и микросистемной техники / Нано – и микросистемная техника, 2009. - №8. – С.24-32.
- 37 Дягилев В.В., Михайлов Ю.А., Игнатъева Е.В., Шешукова С.Ю. Некоторые результаты освоения и совершенствования производства кристаллов кремниевых интегральных тензопреобразователей / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.17-22.
- 38 Ю.Р. Нурулин, Е.Н. Пятъшев. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы – перспективное научно – инновационное направление / Компетентность, 2006. - №5-6. – С.34-35.
- 39 Рамбиди Н.Г., Берёзкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. – М.: Физматлит, 2008. – 456 с.
- 40 *Badih El-Kareh. Silicon Devices and Process Integration. Deep Submicron and Nano-*

- Scale Technologies.- Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – P. 597
- 41 Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д. Технология СБИС: В 2-х кН. Кн.1. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
- 42 В.Шубарев. Микросистемотехника–инновационное направление развития электроники / Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2010. - №5. – С.2-13.
- 43 F. Laermer, A. Urban. Milestones in deep reactive ion etching / SENSOR, 2005. -№2. – P. 44-52.
- 44 М. М. Гольцова, В. А. Юдинцев. МЭМС: большие рынки малых устройств / Нано – и микросистемная техника, 2008. - №4. – С.9-13.
- 45 К.Д. Яшин, В. С. Осипович, Т.Г. Божко, В.М. Логин. Современные разработки МЭМС / Нано – и микросистемная техника, 2008. - №5. – С. 57-64.
- 46 Беляев В. МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации / Нано- и микросистемная техника, 2006. - №5. – С.36-45.
- 47 Джафер Меджахед. МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы / Электронные компоненты, 2009. - №12. – С.53-57.
- 48 P. French, C. Yang. Nano-Structure or Nano-Systems: Opportunities and Pitfalls / Sensors & Transducers Journal, Special Issue, 2007. -№10. – P. 1-9.
- 49 Вернер В. Д., Мальцев П. П., Резнев А. А., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Современные тенденции развития микросистемной техники. / Нано – и микросистемная техника, 2008. - №8. – С.2-7.
- 50 Liu Haobing , Franck Chollet. Layout Controlled One-Step Dry Etch and Release of MEMS Using Deep RIE on SOI Wafer / Journal of microelectromechanical systems, 2006. - Vol. 15.- № 3. – P. 32-41.
- 51 Luis Fernando Velásquez-García, Akintunde Ibitayo Akinwande, and Manuel Martínez-Sánchez. Precision Hand Assembly of MEMS Subsystems Using DRIE-Patterned Deflection Spring Structures: An Example of an Out-of-Plane Substrate Assembly / Journal of microelectromechanical systems, 2007. - Vol. 16, № 3. – P. 21-35.
- 52 Галперин В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: Учебное пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов; под ред. С.П. Тимошенко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.
- 53 Королев М.А, Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем / М.А. Королев, Т.Ю. Крупкина, М.А. Ревелева; под

- общей ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 397 С.
- 54 *Roylance, L. M., J. B. Angell. A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer / IEEE Trans. Electron Devices, 1979. № 26. - pp. 1911–1917.*
- 55 М.М. Гольцова, В.А. Юдинцев. МЭМС:большие рынки малых устройств, Нано- и микросистемная техника, 2008. - №4. – С. 9-12.
- 56 Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007.-384 с.
- 57 *F. Pourahmadi, L. Christel, and K. Petersen. Silicon accelerometer with new thermal self-test mechanism / Tech. Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator, 1992. - № 2. – P. 122.*
- 58 *Brand et al. Reliability of MEMS. WILEY-VCH, 2007. – P. 228.*
- 59 *Baltes and etc. Enabling Technologies for MEMS and Nanodevices. Wiley VCH Verlag, 2004. –P. 357.*
- 60 *Jon S. Wilson. Sensor Technology Handbook. Elsevier Inc. 2005. - P. 445.*
- 61 *Stephen Beeby, etc. MEMS mechanical sensors. - Artech House, Inc., 2004. – P. 387.*
- 62 *Suminto, J.T.Asimple. High performance piezoresistive accelerometer / In: Transducers'91. 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers. IEEE, New York, 1991. – P. 104–107.*
- 63 Б. И. Пивоненков, В. М. Школьников. Одно- и трехкомпонентные пьезорезистивные акселерометры с воздушным демпфированием / Нано – и микросистемная техника, 2010. - №1. – С.42-45.
- 64 В.В. Амеличев, А.Ю. Павлов, Ю.А. Чаплыгин. Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.14-17.
- 65 В.В. Амеличев, Н.Л. Данилова, В.В. Панков, В.А. Тарасов. Конструктивно-технологический базис многовариантного производства интегральных полупроводниковых тензопреобразователей. /Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.2-4.
- 66 *M.Park, Y. Gao. Error and Performance Analysis of MEMS-based Inertial Sensors with a Low-cost GPS Receiver / Sensors & Transducers, Volume 91, Issue 4, April 2008. – P. 279-291.*
- 67 Пат. 2010117593 WO , *Bridge sensor with collocated electronics and two-wire interface, PCB PIEZOTRONICS INC [US], 2010.*
- 68 Пат. 2009156593 JP, *Acceleration sensor. Panasonic Elec. Works Co Ltd, 2009.*
- 69 Пат. 101430340 CN. *Silicon micro - piezoresistive accelerometer capable of reducing temperature excursion. Univ. North China [CN], 2009.*

- 70 Пат. 2010156610 JP. *Acceleration Sensor Element And Acceleration Sensor*, Kyocera Corp., 2010.
- 71 Пат. 2010185781 JP. *Acceleration sensor*. Torex semiconductor ltd., 2010.
- 72 Пат. 2007272016 US. *Acceleration sensor*. Oki Electric Ind. Co Ltd [JP], 2007.
- 73 Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Кн.1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
- 74 Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие / В. А. Гуртов; ПетрГУ. – Петрозаводск, 2004. – 312 с.
- 75 Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Радио и связь, 1990. – 295 с.
- 76 А.Л.Суворов и др. Технологии структур кремний на изоляторе: Монография - М.: МИЭТ, 2004. - 407 с.
- 77 Тимошенко С.П., Прокопьев Е.П. Некоторые вопросы теории сращивания стандартных пластин кремния // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 1999. - № 3. - С. 35 – 44.
- 78 Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Калугин В.В. Технология КНИ структур // Петербургский журнал электроники, 2000. - № 1. - С. 8 – 25.
- 79 Tong Q.-Y., Goesele U. Wafer Bonding and Layer Splitting for Microsystem // Adv. Mater. 1999. V. 11. № 17. P. 1409 – 1425.
- 80 Суворов А.Л., Чаплыгин Ю.А., Тимошенко С.П., Прокопьев Е.П. и др. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ: Препринт ИТЭФ 27–00, 2000. 51 с.
- 81 E Jesper Eklund, Andrei M Shkel. *Single-mask fabrication of high-G piezoresistive accelerometers with extended temperature range* / J. Micromech. Microeng., 2007. - №17. – P. 730–736.
- 82 Пат. 2007084041 US. *Single-mask fabrication process for linear and angular piezoresistive accelerometers*, The regents of the university of California, 2007.
- 83 W.-T. Park, et al. *Encapsulated submillimeter piezoresistive accelerometers* / J. Microelectromech. Syst., 2006.- Vol. 15. – P. 507–514.
- 84 A. Partridge. *Lateral piezoresistive accelerometer with epiopoly encapsulation* / Ph.D., Electrical Engineering, Stanford University, 2003. – P.156.
- 85 Makoto Ishida. *SOI sensors and epitaxial MEMS* / J. Indian Inst. Sci., 2001. - №12. – P. 619-626.
- 86 A.A. Barlian, N. Harjee, B.L. Pruitt. *Sidewall epitaxial piezoresistor process and characterisation for in-plane force sensing applications* / Micro & Nano Letters, 2009,

- Vol. 4. – Iss. 4. – P. 204–209.
- 87 И.В. Годовицын, Д.А. Сайкин, Р.А. Федоров, В.В. Амеличев, П.П. Мальцев. Расчет параметров тестовой структуры МЭМС - акселерометра, изготовленного с использованием КНИ-пластин / Нано – и микросистемная техника, 2009. - №12. – С.39-45.
- 88 Kalyan Kumar et al. Design of an SOI-MEMS high resolution capacitive type single axis accelerometer / *Microsystem Technol.*, 2010. – №3. – P.14-22.
- 89 Chia-Pao Hsu, Ming-Chuen Yip and Weileun Fang. Implementation of a gap-closing differential capacitive sensing Z-axis accelerometer on an SOI wafer / *J. Micromech. Microeng.*, 2009.- Vol. 19. – P. 1-7.
- 90 O. Sidek, M. Afif and M.A. Miskam. Design and Simulation of SOI-MEMS Z-axis Capacitive Accelerometer / *International Journal of Engineering & Technology*, 2010.- Vol: 10.- №6. – P. 67-78.
- 91 B.J. Baliga. Silicon Carbide Power Devices / *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, 2005. – P.87.
- 92 А. Лебедев, С. Сбруев. SiC – электроника. Прошлое, настоящее, будущее / *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2006. - №5. - С. 28-41.
- 93 Cristiana Voican, Constantin D. Stanescu. Design considerations 6H-SiC piezoresistive accelerometers / *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 2007. – Vol. VI, №16. - P.792-796.
- 94 Ken Bradley. Testing and Analysis of Piezoresistive Signals from SiC MEMS Accelerometers with Application to Penetration Fuzing / *48th Annual NDIA Fuze Conference Charlotte*, 2004. – P.232-241.
- 95 Andrew R. et al. Simulation, fabrication and testing of bulk micromachined 6H-SiC high-g piezoresistive accelerometer / *Sensor and Actuators A*, 2003.- №12. – P. 22-18.
- 96 Andrew R. et al. Design Consideration for Bulk BulkMicromachined 6H-SiC high-g piezoresistive accelerometer / *Tech. Digest 15th IEEE Int.Conf. on MEMS. - Las Vegas, Nevada*, 2002. – P.618-622.
- 97 Patricia M. Nieva. New Trends on MEMS Sensor Technology for Harsh Environment Applications / *Sensors & Transducers Journal, Special Issue*, 2007. - №10– P. 10-20.
- 98 Akira Suzuki et al. A Silicon Carbide Accelerometer for Extreme Environment Applications / *Journal Materials Science Forum*, 2007 – P. 859-862.
- 99 Vijayekumar Rajaraman et al. PECVD silicon carbide surface micromachining technology and selected MEMS applications / *Springer, Published online: 20 January*

- 2011 / *Int. J Adv. Eng. Sci. Appl. Math* DOI 10.1007/s12572-010-0020-9.
- 100 Pakula, L.S., Yang, H., French, P.J.: 3-D silicon carbide surface micromachined accelerometer compatible with CMOS processing / In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (ASDAM 2008). Smolenice, Slovakia, 2008.* – P. 227–230.
- 101 Техническая механика микросистем: учебное пособие / В.Н. Тимофеев и др. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 176 с.
- 102 Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн.2. Пер с фр. -М.: Мир, 1992. – 424 С.
- 103 Гридчин В.А. Драгунов В.П. Физика микросистем. Новосибирск, 2004.-416 с.
- 104 В.В. Амеличев, А.Ю. Павлов, Ю.А. Чаплыгин. Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин / Нано- и микросистемная техника, 2007. - №3. – С.14-17.
- 105 Gerlach G, Werthschutzky R. К 50-летию открытия пьезорезистивного эффекта – история и состояние развития пьезорезистивных датчиков // Контрольно-измерительная техника, 2005. - № 23. – С.3-7.
- 106 Hoa Phan L, Suchanek G. Анализ погрешностей пьезорезистивных датчиков // Контрольно-измерительная техника, 2005. - № 24. – С.11-15.
- 107 Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. - 416 С.
- 108 Л.Е. Андреева. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. – 228 С.
- 109 Патент 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.
- 110 Пауткин В.Е. Интегральные датчики давления на основе кремниевой микротехнологии / Блинов А.В., Козин С.А., Пауткин В.Е., Федулов А.В.: Доклад//Программа VIII научно-технической конференции «Микротехнологии в космосе» с международным участием (6-7 октября 2010 г., Москва): Тезисы докладов – Москва, 2010. – С. 42–43.
- 111 Мокров Е.А., Папко А.А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники.- Пенза: ПАИИ, 2004.- 164 с.
- 112 Колосов С. А., Клевков Ю. В., Плотников А. Ф. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 4. – С. 473–478.

- 113 Дощанов К. М. Температурная зависимость электрических свойств поликристаллического кремния в темноте и при воздействии солнечного излучения // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31. – № 8. – С. 954–956.
- 114 Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения / Пер. с англ. под ред. Г. Харбеке. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
- 115 А. А. Глушко, В. А. Шахнов. Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии /Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. – №1. – С.67-75.
- 116 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 (специальный выпуск), 2013. – №9. – С.83–91.
- 117 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. 45-49.
- 118 Пауткин В. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий. /Козин С., Федулов А., Пауткин В., Баринов И. //Компоненты и технологии. – 2010. - № 1.- С. 24-25.
- 119 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. XXX межрегион. 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.
- 120 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.
- 121 Галперин В.А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях:

- Учебное пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов; под ред. С.П. Тимошенкова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.
- 122 Айнспрук Н. Браун Д. Плазменная технология в производстве СБИС. М.: МИР, 1987. — 471 с.
- 123 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: Сборник материалов Третьей Всероссийской научно – практической конференции. Т.2.-Таганрог: Изд – во ТТИ ЮФУ, 2008.- С.68-69.
- 124 Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 392 с.
- 125 Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Кн.1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
- 126 Патент 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.
- 127 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.
- 128 Пауткин В.Е., Шепталиня 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.
- 129 Пауткин В.Е. Результаты отработки конструктивно-технологических решений микромеханических вибрационных гироскопов / Макаров Е.А., Шепталинка С.В., Пауткин В.Е. // Датчики и системы: Сборник докл. XXX межрегион. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов (30-31 марта 2011 г., Пенза)/Под ред.акад. А.В.Блинова. – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 95-98.
- 130 Патент РФ№2485620 Российская Федерация, МПК H01L21/302, G01C19/22. Способ изготовления микромеханического вибрационного гироскопа / Пауткин В. Е, Мишанин А.Е., Шепталинка С.В., Николаев А.А. Заявка 2011154296/28 от 28.12.2011; опубл. 20.06.2013, бюл. №17.
- 131 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.
- 132 Пауткин В.Е. Разработка технологии и специального оборудования для соединения кремния со стеклом в поле высокого напряжения при создании микромеханических датчиков физических параметров. /Козин С.А., Федулов А.В., Пауткин В.Е. // Датчики и системы, 2005. - №9. – С.47-48.
- 133 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.19-22.
- 134 Пауткин В.Е. Термокомпенсационный измерительный преобразователь-39 / Пауткин В.Е., Шепталинка С.В., Николаев А.А. М Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2012630032. Заявка №2011630105 от 28.12.2011. Опубл. 20.01.2012
- 135 Пауткин В.Е. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов

- первичных преобразователей информации /Аверин И.А., Пауткин В.Е. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 24–32.
- 136 Пауткин В.Е. Разработка перспективных базовых конструктивно - технологических решений для создания унифицированных датчиков давления с интегральным чувствительным элементом на структурах «кремний-диэлектрик-кремний»: Отчет о НИР «Акация» / А.В. Федулов, И.Г. Акимов, В.Е. Пауткин, И.Н. Баринов, А.Г. Богачкин, А.А. Родионов, А.Е. Мишанин. // Итоговый отчёт № 300/171 по теме НИР «Акация» (Распоряжение Федерального Агентства по науке и инновациям от 28.07.05 № 07.168.01/016)
- 137 Пауткин В.Е. Анализ тенденций развития и выбор наиболее современных методов измерения. Исследование технического опыта и тенденций развития зарубежной техники. Теоретические исследования по сравнительному анализу характеристик зарубежной и отечественной ДПА. Технология микроэлектромеханических систем: Отчет о НИР "Миндаль" / Баринов И. Н., Федулов А. В., Пауткин В. Е., Мишанин А. Е. // Научно-технический отчет № 300/84 по теме ОКР "Миндаль". Госконтракт №783-5548/02, доп. соглашение №8/783-135/05 от 01.02.05 г., этап 3.1.4.
- 138 Пауткин В.Е. Разработка конструкции, изготовление и технологии производства интегральных многофункциональных микромодульных датчиков ускорения, вибрации: Научно-технический отчет / А.А. Папко, В.Е. Пауткин, А.П. Наумов // Научно-технический отчет №500/813 по теме СЧ ОКР «Разработка интегральных многофункциональных микромодульных датчиков ускорения, вибрации основанных на применении МСТ-технологии», шифр «МСТ-1.7-Ф», договор от №2460/1.7-Ф/442-10 с ОАО «Авангард»
- 139 Пауткин В.Е. Исследование проблем создания совокупности полупроводниковых модулей, сопряженных с компонентами формирования сигнала и обработки

данных и закрепленных на гибком коммутационном шлейфе (распределенных датчиков) для перспективной ракетно-космической техники: Отчет о НИР «Датчик-РКТ» / Пауткин В.Е., Стволова Н.Н., Мишанин А.Е. // Отчет о НИР №200/241 по теме «Датчик-РКТ», Государственный контракт от 26 апреля 2010 г. №783-0623/10, этап 2

Приложение А
(обязательное)

Акт о внедрении технологий

УТВЕРЖДАЮ



Главный технолог, к.т.н.

И.В. Волохов

АКТ

о внедрении технологий, разработанных в рамках
диссертационной работы на соискание
ученой степени кандидата технических наук
Пауткина Валерия Евгеньевича

Комиссия в составе: председателя – заместителя начальника комплекса д.т.н. Папко А.А., и членов комиссии: главного конструктора направления к.т.н. Москалева С.А., начальника научно-исследовательского технологического комплекса к.т.н. Баринова И.Н., начальника лаборатории Федулова А.В. составила настоящий акт о том, что технологии формирования кремниевого кристалла, технологии формирования измерительной схемы, а также топология чувствительного элемента, разработанные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Пауткина В.Е. «Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров» внедрены при изготовлении кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров типа АВЭ.

Внедренные технологии позволили:

- обеспечить диапазон рабочих температур более 100°C, понизить начальный выходной сигнал более чем в 3 раза (с ± 15 мВ до ± 4 мВ) при воздействии температуры и снизить температурную погрешность измерений в 3 раза (с $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ %) по сравнению с аналогами;
- обеспечить увеличение чувствительности на 10% по сравнению с существующими аналогами.

Результаты работ использовались при выполнении ОКР «Сэндвич-Т» (Государственный контракт от 04.05.2012 №783-Б045/12, Федеральная целевая программа «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники России» на 2008-2015 годы).

Председатель комиссии:

A. A. Papko

А.А. Папко

Члены комиссии:

S. A. Moskalov
I. N. Barinov
A. V. Fedulov

С.А. Москалев

И.Н. Баринов

А.В. Федулов

Приложение Б
(справочное)

Расчет конструкции кристалла

РАСЧЕТ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

В рамках разработанной модели рассчитаны параметры основных структурных элементов с использованием теории механики сплошных сред, что позволило разработать конструкцию чувствительного элемента на основе МЭМС с кремниевым ЧЭ.

Исходными данными для моделирования являются диапазон измерений, пределы изменения выходного напряжения, собственная частота

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

и масса инерционного элемента.

Расчет кристалла на заданные параметры

Условная схема кристалла, выбранная для расчета, представлена на рисунке Б1.

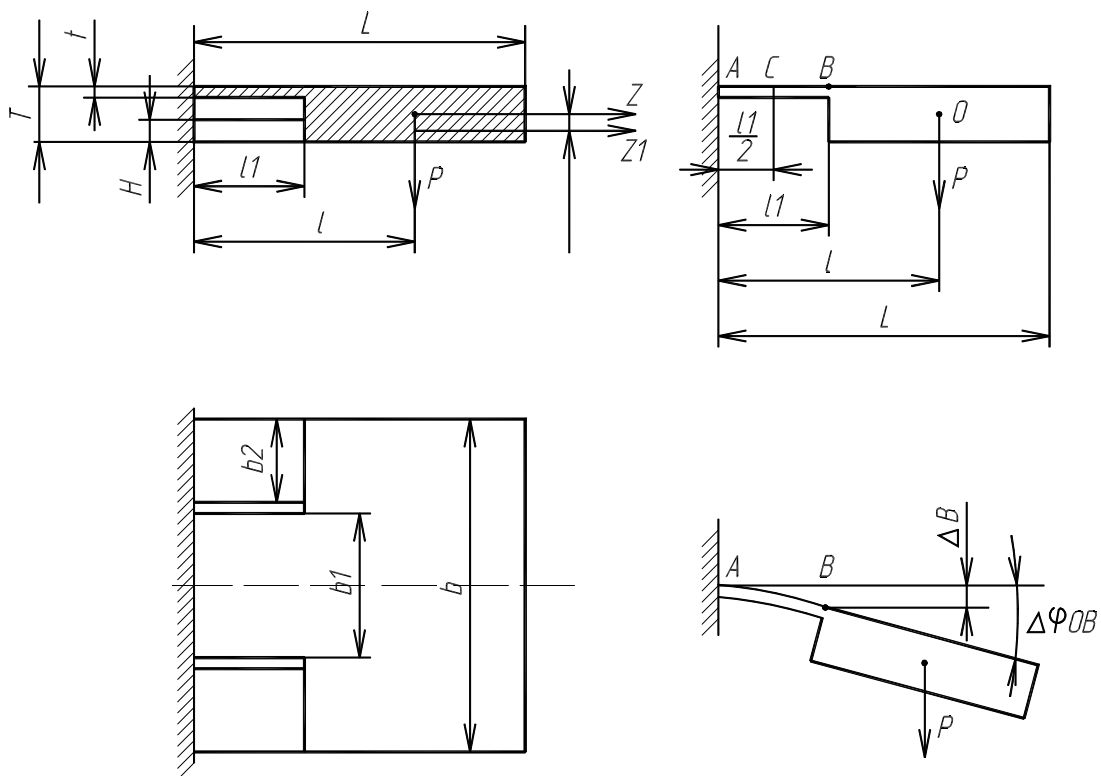


Рисунок Б1 - Конструкция кристалла

Исходные данные для расчета:

- материал кристалла – кремний 1А2МКЭФ ТУ 48-4-295-82;
- модуль упругости кремния $E = 1,41 \cdot 10^{11}$ Па;
- удельный вес кремния $\gamma = 2,328 \cdot 10^{-3}$ кг/м³;
- предельное напряжение при изгибе и напряжении $[\sigma_n] = 4,1 \cdot 10^8$ Па;

- толщина кристалла $T = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м;
- толщина измерительной перемычки $t = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м;
- толщина защитных перемычек $H_1 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, $H_2 = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м;
- ширина балки $b = 3 \cdot 10^{-3}$ м;
- ширина измерительной перемычки $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м;
- ширина защитных перемычек $b_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м;
- длина балки $L = 3 \cdot 10^{-3}$ м;
- длина тонкой части балки $l_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
- длина от места защемления до точки приложения силы P (центра масс инерционного груза) $l = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Нейтральная ось сечения рассчитывается по уравнению:

$$\alpha = \frac{1}{F} \int Y dF$$

где α - расстояние от оси симметрии сечения до нейтральной оси, м.

$$F = 2b_2H + b_1t$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{1}{F} \int_{-\frac{H}{2}}^{+\frac{H}{2}} 2b_2y dy + \int_{t'-\frac{t}{2}}^{t'+\frac{t}{2}} b_1y dy \quad t' = T - \frac{H+t}{2} \quad \alpha = \frac{b_1t \cdot (T - \frac{H+t}{2})}{2b_2H + b_1t}$$

При $H_1 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м

$$\alpha = 0,031 \cdot 10^{-3}$$
 м

При $H_2 = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м

$$\alpha = 0,061 \cdot 10^{-3}$$
 м

Момент инерции сечения относительно нейтральной оси

$$J = 2J_a + J_b$$

где J - момент инерции сечения балки, м⁴;

J_a - момент инерции сечения защитных перемычек, м⁴;

J_b - момент инерции сечения измерительной перемычки, м⁴.

$$J_a = \frac{b_2H^3}{12} + \alpha^2 b_2H$$

$$J_b =$$

$$\frac{b_1t^3}{12} + (T - \frac{H+t}{2} - \alpha) \cdot b_1t^2$$

$$J_{a1} = 0,144 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4,$$

$$J_{b1} = 0,101 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4;$$

$$J_{a2} = 0,047 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4,$$

$$J_{b2} = 0,099 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4;$$

$$J_1 = 0,389 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4,$$

$$J_2 = 0,193 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4.$$

Расчет прогиба в точке O

$$\Delta_o = \Delta_b + \Delta\varphi_{об} \frac{l - l_1}{2}$$

где Δ_o – прогиб в точке O , м;

Δ_b – перемещение в точке В под действием силы Р, м;
 $\Delta\varphi_{ob}$ – угол поворота сечения в точке В под действием силы Р.

$$\Delta_b = \frac{P l_1^3}{3EJ} + \frac{M_b l_1^2}{2EJ}$$

где $M_b = \frac{P(l-l_1)}{2}$ - крутящий момент в точке В.

$$\Delta\varphi_{ob} = \frac{P l_1}{EJ} \cdot (l - \frac{l_1}{2})$$

$$\Delta_o = \frac{P l_1^2}{EJ} \cdot (\frac{l_1}{3} + \frac{l-l_1}{2}) + \frac{P l_1}{EJ} \cdot (l - \frac{l_1}{2}) \cdot (l - \frac{l_1}{2})$$

$P = m \cdot a$;

$$m = (L - l_1) \cdot b \cdot T \cdot \gamma = (3 - 1) \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot 2,328 \cdot 10^{-6} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг};$$

$a = N$ – предел измерения акселерометра;

$$P = 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н};$$

$$\Delta_{o1} = \frac{P \cdot 1,58 \cdot 10^{-9}}{EJ} = \frac{8,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,58 \cdot 10^{-9}}{1,41 \cdot 10^{11} \cdot 0,389 \cdot 10^{-15}} = 0,242 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\Delta_{o2} = \frac{P \cdot 1,58 \cdot 10^{-9}}{EJ} = \frac{8,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,58 \cdot 10^{-9}}{1,41 \cdot 10^{11} \cdot 0,193 \cdot 10^{-15}} = 0,488 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Собственная частота измерительной балки кристалла определяется из формулы зависимости круговой частоты от статического ускорения и прогиба:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{N}{\Delta_o}}$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$ – круговая частота, Гц; f_c – собственная частота балки, Гц;
 N – действующее ускорение, м/с²; Δ_o – прогиб под действием ускорения

N .

Отсюда

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\Delta_o}}$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\Delta_{o1}}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{2000}{0,242 \cdot 10^{-6}}} = 14476 \text{ Гц};$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{\Delta_{o2}}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{2000}{0,488 \cdot 10^{-6}}} = 10194 \text{ Гц}.$$

Определение относительного удлинения балки в месте расположения пьезорезисторов

Выходной сигнал с датчика (кристалла) при заданном напряжении питания прямо пропорционален линейной деформации (относительному удлинению) в месте расположения пьезорезисторов (точка С) и пьезочувствительности материала пьезорезисторов. Пьезочувствительность для данного материала (кремния) и данной технологии изготовления постоянна, поэтому чувствительность датчика будет зависеть от относительного удлинения ϵ .

Относительное удлинение в точке С будет равно

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E},$$

где σ_c – напряжение от действия силы Р в точке С, Па;

$$\sigma_c = \frac{M_c}{J} \left(T - \frac{H}{2} - \alpha \right),$$

где $M_c = P \cdot \left(l - \frac{l_1}{2} \right)$ - крутящий момент в точке С;

$$\epsilon_c = \frac{P}{E \cdot J} \cdot \left(l - \frac{l_1}{2} \right) \cdot \left(T - \frac{H}{2} - \alpha \right) \quad \epsilon_{c1} = \frac{P}{E \cdot J_1} \cdot \left(l - \frac{l_1}{2} \right) \cdot \left(T - \frac{H_1}{2} - \alpha \right) \quad \epsilon_{c2} = \frac{P}{E \cdot J_2} \cdot \left(l - \frac{l_1}{2} \right) \cdot \left(T - \frac{H_2}{2} - \alpha \right)$$

$$\epsilon_{c1} = 0,0514 \cdot 10^{-3}; \quad \epsilon_{c2} = 0,0991 \cdot 10^{-3}.$$

Предельная величина относительного удлинения для кремния определится по закону Гука

$$\epsilon_{\text{пред}} = \frac{|\sigma_u|}{E} = 3 \cdot 10^{-3}.$$

$\epsilon_{\text{пред}}$ не превышает ϵ_{c1} и ϵ_{c2} .

По полученным значениям деформаций ϵ_{c1} и ϵ_{c2} и собственных частот f_{c1} и f_{c2} выбираем кристалл, обеспечивающий измерение заданного ускорения в заданном диапазоне частот (0 – 5000) Гц.

Наибольшая собственная частота датчика достигается, когда $\epsilon = 1 \cdot 10^{-3}$, а $f_c = 5 f_b$, где f_b - верхняя частота частотного диапазона измерений, равная 5000 Гц.

Учитывая, что амплитудный диапазон может быть обеспечен за счет усиления выходного сигнала с датчика усилительно-преобразующим блоком, выбираем менее чувствительный вариант кристалла с собственной частотой $f_{c1} = 14476$ Гц. При коэффициенте демпфирования инерционного груза от 0,7 до 1 частотный диапазон измерения может быть обеспечен с достаточной точностью.

Расчет прочности кристалла

Условие прочности:

Напряжение изгиба $\sigma < |\sigma_u|$.

При наихудшем случае возможно одновременное воздействие на кристалл статического ускорения, равного пределу измерения $N = 2000 \text{ м/с}^2$,

перегрузки величиной до 30 м/с^2 , вибрации амплитудой до 200 м/с^2 и ударной перегрузки величиной до 300 м/с^2 .

Суммарная нагрузка A при совпадении направления воздействия составит

$$A = 2000 + 30 + 200 + 300 = 2530 \text{ м/с}^2.$$

Наиболее напряженное сечение балки при действии прямой и поперечной перегрузки будет в точке A – месте заделки балки.

Напряжение в сечении A при действии ускорения, перпендикулярного плоскости балки, определится из формулы

$$\sigma_a = \frac{M_a \left(T - \frac{H}{2} - \alpha \right)}{J}$$

где $M_a = P_1 \cdot l$ – изгибающий момент в точке A ;

$P_1 = mA$ – усилие в точке O .

$$\sigma_{a1} = \frac{mA \left(T - \frac{H_1}{2} - \alpha_1 \right)}{J_1} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ Па} \quad \sigma_{a2} = \frac{mA \left(T - \frac{H_2}{2} - \alpha_2 \right)}{J_2} = 2,36 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

Коэффициент запаса прочности при действии всех перегрузок K_3 определится из формулы

$$K_3 = \frac{[\sigma_u]}{\sigma_a}; \quad K_{31} = \frac{4,1 \cdot 10^8}{1,2 \cdot 10^8} = 3,5; \quad K_{32} = \frac{4,1 \cdot 10^8}{2,36 \cdot 10^8} = 1,74$$

Условие прочности $\sigma_a < [\sigma_u]$ выполнено.

Напряжение изгиба в сечении A при действии поперечной перегрузки

$$\sigma_{an} = \frac{M_a \left(T - \frac{H}{2} - \alpha \right)}{J_n}$$

где $J_n = 2 \frac{H b_2^3}{12} + \frac{t b_1^3}{12}$ – момент инерции сечения при поперечной нагрузке, м^4 .

$$J_{n1} = 2 \frac{H_1 b_2^3}{12} + \frac{t_1 b_1^3}{12} = 11,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4 \quad J_{n2} = 2 \frac{H_2 b_2^3}{12} + \frac{t_2 b_1^3}{12} = 7,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^4$$

$$\sigma_{an1} = \frac{mA \left(T - \frac{H_1}{2} - \alpha_1 \right)}{J_{n1}} = 0,041 \cdot 10^8 \text{ Па} \quad \sigma_{an2} = \frac{mA \left(T - \frac{H_2}{2} - \alpha_2 \right)}{J_{n2}} = 0,064 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

Коэффициент запаса прочности K_n и поперечной нагрузки будет

$$K_{\text{п1}} = \frac{4,1 \cdot 10^8}{0,041 \cdot 10^8} = 100$$

$$K_{\text{п2}} = \frac{4,1 \cdot 10^8}{0,064 \cdot 10^8} = 64$$

Условие прочности $\sigma_{\text{ап}} < [\sigma_u]$ выполнено.

Расчет воздушного демпфирования собственных колебаний балки кристалла.

С целью расширения частотного диапазона измерения акселерометра и исключения резонансов, приводящих к разрушению измерительных элементов, используется вязкостное демпфирование. Номинальным коэффициентом затухания (демпфирования) является его значение, равное 0,7. При этом коэффициенте демпфирования частотная характеристика акселерометра становится «плоской» до 1/3 от собственной (резонансной) частоты.

Вязкостное демпфирование может быть обеспечено заливкой полости чувствительного элемента специальными демпфирующими жидкостями или за счет вязкости воздуха.

Жидкостное демпфирование предназначено для применения акселерометра в ограниченном температурном диапазоне из-за зависимости вязкости жидкости от температуры. Соответственно, частотные характеристики акселерометра с жидкостным демпфированием изменяются как функция температуры.

Более предпочтительным считается воздушное демпфирование, незначительно зависящее от температуры окружающей среды и обеспечиваемое за счет выбора величины зазора между подвижными и неподвижными частями чувствительного элемента акселерометра.

Качество демпфирования определяется параметром затухания ξ , оптимальное значение которого составляет $\xi_{\text{опт}} = \sqrt{2}$.

$$\xi = \frac{h}{m \omega_0},$$

где h – коэффициент вязкого трения;

m – масса инерционного груза;

ω_0 – круговая частота собственных колебаний.

$$h_{\text{опт}} = m \omega_0 \sqrt{2}$$

$$\omega_0 = 2 \pi f_c$$

Для плоской пластины

$$h = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \mu \cdot S^2}{d_0^3}$$

где $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамический коэффициент вязкости воздуха;

$S = b(L - l_1)$ – площадь подвижной пластины;

d_0 – зазор между подвижной пластиной и ограничивающей поверхностью.

$$d_{0\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S^2}{2 \cdot m \cdot f_c \cdot \sqrt{2}}}$$

Для выбранных конструкций кристалла

$$\begin{aligned} f_{c1} &= 14476 \text{ Гц}; & f_{c2} &= 10194 \text{ Гц}; \\ m &= 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг}; & S &= 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$$d_{0\text{опт1}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{1,82 \cdot 10^{-5} \cdot 36 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 14476 \cdot \sqrt{2}}} = 17,9 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$d_{0\text{опт2}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{1,82 \cdot 10^{-5} \cdot 36 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10194 \cdot \sqrt{2}}} = 20,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Проведенные расчеты показывают работоспособность кремниевого кристалла, что подтверждает правильность выбора конструктивно-технологических решений.

Рассчитаны параметры основных структурных элементов, что позволило разработать технологию изготовления чувствительного элемента на основе МЭМС с кремниевым ЧЭ.

Приложение В
(обязательное)

Маршрутная карта изготовления

СОПРОВОДИТЕЛЬНО - ПРЕДЪЯВИТЕЛЬСКАЯ КАРТА N												
Изделие: Микромеханический акселерометр												
		Кристалл	№ партии		№ комплекта фотошаблона Э.ММА-01							
Толщина пластины 300±10 мкм		Диапазон	№ пластины									
Марка Si 1A2 км КЭФ 4,5/7,5-60												
№№ осн ТП и ТТО	№ заимствованных ТП и операций	Наименование операций	Дата и время		в р е м я р а б о т н и я	Кол. крист.		Подпись			Примечание	
			запуска на операци ю	окончания операции		З	Г	И	М	К		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
005		Комплектование (раб. пл. +св.1 (оп.))										
010	783.60200.00180	Измерение толщины структур									смесь 2 раствор 2	
015	783.02201.00023 783.02201.00027 783.02201.00024 783.02201.00024 783.02201.00025	Химическая обработка										
045	783.60200.00169											
050	783.60200.00131 583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00157 583.60271.00077 583.60271.00079	Окисление 1 ^{ая} фотолитография по формированию ЗС с пл. и непл. ст.										Ф/ш пл. ст. Э.ММА-01-1 Ф/ш непл. ст. Э.ММА-01-2
080	583.60271.00080 783.02201.00027 783.02201.00024 783.02201.00025 783.60200.00169	Химическая обработка										
100	783.60200.00010 (783.60200.00078)	Окисление									Режим 3	
105	583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00147 583.60271.00077 583.60271.00079 583.60200.00037 583.60271.00069 583.60200.00039 583.60271.00080	2 ^{ая} фотолитография по формированию окон под профиль с непл. ст.									Ф/ш Э.ММА-01-2	
	783.02201.00024	Химическая									смесь 1	

	783.02201.00024 783.02201.00025 583.60200.00169	обработка							смесь 1
170	783.02271.00017	Напыление структуры <i>V-Cu</i> на обе стороны							
175	583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00147 583.60271.00077 583.60271.00079 783.60271.00140 583.60271.00080 783.60271.00136 783.60271.00135	3 ^я фотолитография по формированию защиты при профилировании с непл. ст.						Ф/ш Э.ММА-01-3	
220	783.02200.00050	1 ^{ое} анизотропное травление кремния Диапазон: $H1 = H_{пл} - h1 - h2 - h3$ $h1 =$ мкм						25% р-р <i>KOH</i>	
225	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур							
230	583.60271.00069	Травление <i>SiO₂</i> в областях под отверстия и разделительные дорожки							
235	783.02200.00050	2 ^{ое} анизотропное травление кремния $h2 = 155$ мкм						25% р-р <i>KOH</i>	
240	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур							
245	783.60271.00134	Травление структуры <i>V-Cu</i>							
250	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур							
255	583.602000.00037	Защита пленкой лака							планар. ст.
260	783.02200.00071	Изотропное травление в области профиля $h3 = 6$ мкм							
265	583.602000.00039	Удаление пленки лака							
270	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур							

275	583.60271.00069	Травление SiO_2							
280	783.02201.00023 783.02201.00027 783.02201.00024 783.02201.00024 783.02201.00025 783.60200.00169	Химическая обработка							смесь 2 р - р 2 смесь 4 смесь 4
310	783.60200.00010 783.60250.00002	Окисление св.№1							Режим 2 +св.2,3
315	783.60200.00193	Осаждение поликремния на планарную сторону							Раб. пл. + св.1,2,3
320	583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00147 583.60271.00077 583.60271.00079 783.60200.00191	4 ^{ая} фотолитография по формированию области поликремния							Ф/ш пл. ст. Э.ММА-01-4
		Травление поликремния							планар, непланар
	583.60271.00080								
355	783.60200.00130	Ионное легирование бора с пл. ст. (<i>Rt</i>)							Режим 9 +св.2,3
360	583.02671.00083 783.02201.00024 783.60200.00169	Химическая обработка							
375	783.02250.00002	Окисление							Раб. пл. + св
380	583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00157 583.60271.00077 583.60271.00079	5 ^{ая} фотолитография по формированию <i>VLK</i> и <i>Rtz</i> .							Ф/ш Э.ММА-01-5
405	783.60200.00130	Ионное легирование бора с пл. ст. (<i>Rtz</i>)							Режим 8 +св.3
410	583.60271.00080	Снятие позитивного фоторезиста							
415	583.02671.00083 783.02201.00024 783.60200.00169	Химическая обработка							
430	783.02250.00002	Окисление							
435	583.60271.00074 583.60271.00075 783.60200.00147 583.60271.00077 583.60271.00079 583.60200.00037 583.60271.00069 583.60200.00039 583.60271.00080	6 ^{ая} фотолитография по формированию окон под контакт с <i>Al</i> с пл. ст.							ф/ш Э.ММА-01-6

480	783.02201.00013	Химическая обработка								
485	583.60271.00074	7 ^{ая} фотолитография по формированию SiO_2 в обл. профиля с непл. ст.							ф/ш Э.ММА-01-7	
	583.60271.00075									
	783.60200.00147									
	583.60271.00077									
	583.60200.00037									
	583.60271.00069									
	583.60200.00039									
	583.60271.00080									
525	783.02201.00024	Химическая обработка							смесь 1 смесь 1	
	783.02201..00024									
	783.02201.00025									
	783.60200.00169									
545	783.02271.00002	Алюминирование термовакуумное с пл. ст.								
550	583.60271.00074	8 ^{ая} фотолитография по формированию металлизации							ф/ш Э.ММА-01-8	
	583.60271.00075									
	783.60200.00147									
	583.60271.00077									
	583.60271.00070									
	583.60271.00080									
580	583.60271.00083	Химическая обработка								
	583.60271.00091									
	783.60200.00169									
595	583.60200.00068	Вжигание Al в Si							Режим 2	
600	583.60388.00004	Монтаж круглых Au проводников на станке МС-41П2								
605	583.60203.00363	Контроль функционирования и разбраковки кристаллов							3-4 кристалла	
	583.60271.00083	Химическая обработка								
	583.60271.00091									
	783.60200.00169									
	583.60200.00068	Термообработка							В хол. зоне печи 15мин.	
630	783.02271.00017	Напыление структуры $V-Si$ на обе стороны								
635	583.60271.00074	9 ^{ая} фотолитография по формированию защиты при профилировании							Ф/ш Э.ММА-01-9	
	583.60271.00075									
	783.60200.00147									
	583.60271.00077									
	583.60271.00079									
	783.60271.00140									
	583.60271.00080									
	783.60271.00136									
	783.60271.00135									
680	783.02201.00013	Химическая очистка в								

		ДМФ								Ф/ш
	583.60271.00074	10 ^{ая} фотолитография								Э.ММА-01-10
	583.60271.00075	по формированию								
	783.60200.00147	защиты при								
	583.60271.00077	профилировании								
	583.60271.00079									
	783.60271.00140									
	583.60271.00080									
	783.60271.00136									
	783.60271.00135									
730	583.60271.00069	Травление SiO_2 в областях под отверстия								
735	783.02200.00050	3 ^о анизотропное травление кремния								
	Диапазон:									
		$H1 = Hпл-h1-h4$								
		$h4 = 150 мкм$								
740	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур								
745	583.60271.00069	Травление SiO_2 в областях под отверстия и разделительные дорожки								
750	783.02200.00050	4 ^о анизотропное травление кремния								
		$h5 = 150 мкм$								
755	783.60200.00180	Измерение геометрических размеров и толщины структур								
	783.60271.00136	Травление Si								
	783.60271.00135	Травление V								
	783.60271.00134	Травление структуры $V-Si$								
775	583.60203.00363	Контроль функционирования и разбраковка кристаллов								
780	583.60388.00004	Монтаж круглых Au проводников на станке МС-41П2								
785		Контроль исполнителем								
790		Технический контроль								