

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

БРИТКОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ
В ГЕРМЕТИЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Специальность 05.27.06 - Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский государственный институт электронной техники (технический университет)» на кафедре микроэлектроники

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор С.П. Тимошенков

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент Б.М. Симонов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.А. Шерченков

кандидат физ. мат. наук, Н.А. Дюжев

Ведущая организация:

институт точной технологии и проектирования (АООТ ИТТиП)

Защита диссертации состоится "___" _____ 2009 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.134.03 в Московском государственном институте электронной техники (техническом университете) по адресу: 124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д.5, МИЭТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭТ

Автореферат разослан "___" _____ 2009 года

Соискатель

О.М. Бритков

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

В.Б.Яковлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Микроэлектромеханические приборы и системы (МЭМС) относятся к наиболее перспективным изделиям современной микроэлектроники, их совершенствование в большой мере определяет развитие микросистемной техники. В настоящее время объём производства и ассортимент МЭМС достаточно велики и постоянно возрастают. Технологии изготовления, создаваемые на основе традиционных технологий микроэлектроники и специальных конструкторско-технологических решений, обеспечивают МЭМС - приборам широкие области применения. МЭМС используются в ракетно - космической технике, медицине, авиации, автомобильной промышленности и в других сферах человеческой деятельности.

В настоящее время успешно функционирует большое число как зарубежных, так и отечественных предприятий, разрабатывающих и изготавливающих микроэлектромеханические устройства, в их числе такие зарубежные фирмы, как Analog Devices, Draper Laboratory и многие другие. Наиболее известными производителями гироскопов на сегодняшний день являются фирмы Futaba, JR-Graupner, Ikarus, CSM, Robbe, Hobbico и др. Занимаются проектированием и изготовлением микромеханических датчиков и отечественные организации: ОАО НПП «Темп-Авиа» (г. Арзамас), АО РПКБ (г. Раменское), «Электроприбор» (г. С.-Петербург), НИИФИ (г. Пенза) и др. В России активно развиваются разработки собственных МЭМС, в которых стремятся использовать последние достижения технологии микроэлектроники. Начато интенсивное развитие производства МЭМС в России на основе прогрессивных конструкторско-технологических решений.

Отдельными творческими коллективами, работающими в направлении развития МЭМС, решается, как правило, только определенный круг задач. В частности, существуют специализации некоторых предприятий, основанные на тех наработках, которые длительное время развивались для выпуска интегральных схем и других изделий микроэлектроники. Например, специалисты завода «Микрон» (г. Зеленоград) занимаются разработкой и изготовлением микромеханических устройств на основе технологий поверхностной микрообработки. Большое количество областей применения, а также зависимость конструкторско-технологических особенностей работоспособных изделий МЭМС от специфики заводов-производителей приводит к многообразию продукции, производимой отечественной индустрией. Поэтому наработки, имеющиеся у предприятий, выпускающих изделия микроэлектроники, требуют

анализа возможности их применения для изготовления МЭМС. Кроме того, необходим поиск и разработка оригинальных конструкторских и технологических решений, которые могли бы обеспечить опережающее развитие отечественных МЭМС.

В соответствии с изложенным, направление исследований и разработок, в рамках которого выполнена диссертационная работа, представляется современным и актуальным.

Цель и задачи исследования

Основной целью диссертационной работы является разработка, изготовление, исследование параметров и характеристик микроэлектромеханических устройств в герметичном исполнении, в том числе сложных функциональных микроприводов (микрозеркал), микрогироскопов, микроакселерометров, микромеханических датчиков давления (ММД).

Основными задачами настоящей диссертационной работы являются следующие: проведение исследований и разработка новых конструкций и технологий изготовления, методов контроля и измерения параметров МЭМС в герметичном исполнении, а именно микрогироскопов, микроакселерометров, инклинометров, сложных функциональных микроприводов (микрозеркал), микромеханических датчиков давления, не представленных другими отечественными предприятиями в виде широко тиражируемой продукции.

Перечисленные приборы имеют как общие, так и специфические особенности, но все они имеют герметичное исполнение, что усложняет задачи их разработки и делает необходимым решение сложных технологических задач герметизации, контроля и стабилизации параметров внутрикорпусной парогазовой среды.

Поставленные в настоящей диссертации задачи планировались и решались в рамках имеющегося научного направления кафедры микроэлектроники с учётом и использованием научно - технических результатов, наработанных творческим коллективом сотрудников, работающих по проблемам разработки, изготовления и использования МЭМС, и являются их развитием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1. Проведение исследований и разработка новых конструкций и технологий изготовления, методов контроля и измерения параметров МЭМС различного назначения.

2. Проведение расчётов элементов конструкций МЭМС с целью обеспечения заданных значений параметров и характеристик.

3. Исследование и оптимизация режимов выполнения технологических операций травления, сборки и монтажа, сращивания и др., используемых в процессах изготовления МЭМС.

4. Разработка и реализация методов измерения параметров и характеристик МЭМС - приборов.

5. Изучение свойств изготовленных образцов МЭМС с целью оптимизации их конструкторско-технологических параметров и улучшения рабочих и эксплуатационных характеристик.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны исследовательские методики: измерения собственной частоты внутренней и внешней рамок микромеханической колебательной системы с электростатическим приводом, заполнения внутрикорпусного пространства азотом, проверки работоспособности микромеханического чувствительного элемента (ЧЭ) на основе измерения угла его поворота.

2. Исходя из заданной жёсткости, проведено моделирование и выполнены расчёты геометрических размеров кольцевого микромеханического гироскопа (КМГ). Получены функции зависимости ширины кольца из монокристаллического кремния от кристаллографического направления.

3. Выполнены расчёты размеров элементов подвижной части конструкции ЧЭ, требуемых для обеспечения заданных параметров микромеханической системы - угла поворота, полосы рабочих частот, величины управляющего напряжения и емкостей датчика угла поворота и датчика момента.

4. Разработано и экспериментально подтверждено новое техническое решение, состоящее в том, что для исправления погрешностей формы вытравливаемых фигур использована разработанная и запатентованная топология компенсатора специальной конфигурации.

С его помощью удалось получать подвижные части МЭМС с фигурами травления прямоугольной формы при большой глубине травления до ~400 мкм.

5. Исследован характер изменения ТКЛР стекла ЛК-105 в зависимости от температуры. Установлено что при достижении температуры ~540⁰С существенно меняется значение ТКЛР, что необходимо учитывать при выборе температуры сращивания деталей из этого стекла и кремния.

6. Исследованы гидрогенизированные приповерхностные слои кремния методами ИК - спектроскопии. Показано, что температура подложки играет одну из первостепенных ролей в формировании

водородосодержащего дефектного слоя в кремнии. Проанализировано поведение низкочастотной полосы в области валентных Si-H колебаний при отжиге.

7. Исследован характер зависимости собственной частоты колебаний подвижной части (ЧЭ) МЭМС торсионного типа от температуры. Установлено, что при изменении температуры от 25 до 80 °С собственная частота колебаний ЧЭ меняется не более чем на 1%.

8. Исследованы зависимости добротности и собственных частот колебаний подвижной части (ЧЭ) от внутрикорпусного давления на различных модах колебаний. Показано что эффективным средством увеличения добротности датчиков с такой системой и поддержания её при эксплуатации является использование геттера.

9. Исследовано влияние газового демпфирования на параметры колебательного контура. На основе экспериментальных данных найдены эмпирические зависимости добротности колебательной системы и собственной частоты колебаний от внутрикорпусного давления.

Практическая значимость работы:

1. Результаты расчётов использованы при разработке конструкций и изготовлении опытных образцов микромеханического акселерометра (ММА), кольцевого микрогироскопа (КМГ) и сложно-функционального микропривода (СФМ).

2. Разработаны и практически использованы алгоритмы технологических процессов изготовления ЧЭ ММА, КМГ и СФМ. Проведены анализ и разработка полных технологических циклов изготовления микроэлектромеханических устройств.

3. Исследованы варианты сборки и монтажа ММГ кольцевого типа, ММА, СФМ и ММД с применением анодного срачивания кремния со стеклом и эвтектической пайки Au-Si.

4. Разработаны и практически реализованы варианты технологии герметизации микроэлектромеханических устройств, отличающиеся остаточным внутрикорпусным давлением, а также наличием или отсутствием геттера в герметизируемом объёме. Эти технологии применены для изготовления - гироскопов, ММА и СФМ.

5. На основе проведённых исследований, согласно разработанным конструкциям и технологиям изготовлены и испытаны действующие образцы МЭМС. Проведены измерения их параметров на специально разработанных измерительных стендах.

Результаты работы использованы при выполнении 4-х НИР, 2-х ОКР.

На защиту выносятся:

1. Результаты расчётов: геометрических размеров резонатора КМГ, влияния формы и размеров торсионов ЧЭ ММА на собственную частоту, углов поворота ЧЭ при внешних воздействиях и полосы рабочих частот ММА и СФМ.
2. Результаты исследований изменения ТКЛР стекла ЛК-105 в зависимости от температуры, а также режимов формирования гидрогенизированных приповерхностных слоёв кремния методами ИК - спектроскопии.
3. Алгоритмы: технологических процессов (ТП) изготовления ЧЭ микроэлектромеханических устройств ММА, КМГ, СФМ, ТП сборки, монтажа и герметизации МЭМС.
4. Методики определения параметров и характеристик МЭМС.
5. Зависимости параметров ММА, КМГ, СФМ, ММВГ от внутрикорпусного давления и параметров ММА от температуры.
6. Результаты исследования влияния газового демпфирования на параметры ММВГ, эмпирические зависимости добротности колебательной системы и собственной частоты колебаний от внутрикорпусного давления.

Апробация работы

Основные положения и результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

Международная научно - техническая конференция «Электроника и информатика - 2003», Москва, МИЭТ, 2003;

Всероссийская межвузовская научно - техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2004», М.: МИЭТ, 2004;

Международная молодежная конференция «XXXI Гагаринские чтения в Москве», МАТИ-РГГУ им. Циолковского, 2005;

Международная научно - техническая конференция «Электроника и информатика - 2005», Москва, МИЭТ, ноябрь 2005;

Оборонный комплекс - научно - техническому прогрессу России, 2006, №2;

На III Международной научно - технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», 2008, г. Минск.

Публикации

По материалам, изложенным в диссертации, опубликовано 14 работ, включая статьи в периодических изданиях, тезисы докладов на конференциях и патент на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Материал диссертации изложен на 200 страницах машинописного текста, включая 129 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 112 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даются общие сведения о разновидностях МЭМС, основных областях их применения, направлениях развития и темпах роста их производства. Сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе, дано обоснование ее актуальности.

Первая глава посвящена обзору текущего состояния в области разработки и производства различных МЭМС. Рассмотрены конструкторско-технологические основы изготовления ЧЭ МЭМС, приведены сведения о конкретных типах МЭМС с указанием основных производителей и параметров выпускаемых ими приборов. Проанализированы актуальные проблемы разработки и изготовления, проблемы герметизации МЭМС, проведен обзор современных технологий герметизации микроустройств. Рассмотрено влияние конструкторско - технологических и эксплуатационных факторов на параметры МЭМС.

Наиболее распространенными являются микросистемы, имеющие в своем составе три основных структуры: диафрагмы, консоли и мостовые схемы. Для изготовления таких элементов, как мембраны, консольные балки, резонансные структуры и т.д., используются различные технологии. В состав микросистемы может входить от одной до нескольких основных структур. На основе этих структур можно реализовать практически любые микродатчики и микроприводы для работы в составе интеллектуальных устройств.

Параметры изготовленных микромеханических элементов зависят не только от их конструкции, но и от материалов и технологий, используемых для их изготовления. Традиционные технологии производства микросхем стали основными для изготовления электромеханических микроустройств, таких как микродатчики и микроприводы. Кремний является основным материалом при изготовлении ЧЭ МЭМС. Методы микрообработки кремния позволяют изготавливать микросистемы с размерами в доли миллиметра.

При изготовлении МЭМС широко применяется метод жидкостного анизотропного травления (АТ) кремния. Для формирования топологических структур с применением АТ используются в основном широко распространенные пластины кремния ориентации (100), так как

плоскость (100) является единственной из главных плоскостей, при пересечении которой плоскостями (110), (111), (100) и (211) образуются фигуры с прямоугольной симметрией. Метод АТ позволяет формировать рабочие зазоры вибрационной системы, создавать разнообразные объемные фигуры травления.

Герметизация - один из важнейших этапов, требующих больших финансовых и временных затрат при разработке МЭМС. Для применения известных методов герметизации микроэлектронных изделий к МЭМС необходимы корректировки и доработки, учитывающие особенности герметизируемых МЭМС.

В технологии герметизации МЭМС - устройств используют металlostеклянные, керамические, пластмассовые корпуса, а также процессы сращивания деталей из различных материалов. Технологии сращивания, используемые при герметизации, можно разделить на три категории: прямое, анодное и через промежуточный слой.

Рассмотрены вопросы контроля и измерения параметров и характеристик МЭМС. Для их реализации используются разнообразные схемы и методики. Поскольку на эти параметры и характеристики непосредственное влияние оказывают технологические режимы изготовления МЭМС, то важен их контроль.

При оценке работоспособности готовых изделий необходимо контролировать давление внутри герметизированных корпусов, так как оно может влиять на их параметры. Давление газа внутри герметичных микрообъемов может быть определено, например, по отклонению гибкой мембраны при изменении давления, а также косвенно - измерением параметров устройства. Для резонаторов зависящими от давления параметрами являются добротность и резонансная частота.

На функциональные параметры МЭМС оказывают влияние многие факторы. К важнейшим параметрам микромеханических датчиков осцилляторного типа относится добротность, сильно зависящая от остаточного внутрикорпусного давления. Уменьшения влияния газового демпфирования возможно добиться вакуумированием устройств.

Имплантация протонов широко используется для пассивации приповерхностных слоёв кремния, в технологии Smart-cut по созданию структур КНИ и др. К наиболее чувствительным методам обнаружения примесного водорода в полупроводниковых материалах, определения концентрации и структурных особенностей примесных водородных центров относятся методы инфракрасной спектроскопии (ИКС), спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР), электронной спектроскопии. В ряде случаев возможно использование ИК - спектров как индикатора изменений свойств материала при отжиге и др. видах

обработки. Важным этапом в исследованиях является идентификация ИК - спектров, отнесение их максимумов к определённым типам колебаний химически связанных атомов, примесным центрам или к решёточным колебаниям.

Проведённое рассмотрение МЭМС позволило определить основные направления их совершенствования, уточнить области применения и сформулировать задачи, стоящие перед разработчиками конструкций, технологий, измерительных стендов и приборов.

На основании проведенного литературного анализа сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследований, конструкторско-технологической реализации, а также разработки методов и средств контроля параметров и характеристик СФМ. Рассмотрены возможные варианты конструкций подвижной части СФМ, наиболее приемлемой из них признана облегчённая конструкция с «утопленными» торсионами с прямоугольной формой подвижной части. Разработана и практически реализована конструкция СФМ, состоящая из чипа СФМ и корпуса (рис.1). Чип имеет в своём составе три платы, изготовленные из стеклянной и кремниевых пластин. Роторный узел (1), размещен на статорной пластине (3) через прокладки (2). Чип установлен на основании корпуса (4), крышка корпуса (5) - с прозрачным окном (6).

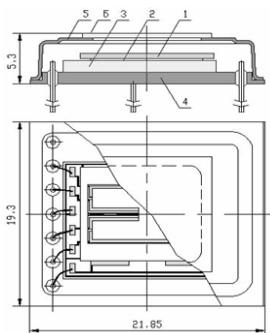


Рис.1. Эскиз конструкции СФМ; 1 - роторный узел, 2 - прокладки, 3 - статорная пластина, 4 - основание и 5 - крышка корпуса, 6 - стекло

Все детали чипа объединены в монолитный блок с электрическими соединениями между ними. Необходимые рабочие зазоры между платами образуются прокладками (2). Зазор определяется нижней частью прокладки (величиной H), в изготовленных образцах были использованы два его значения: $H=80$ мкм и $H=120$ мкм.

Критерии по точности процесса формирования трехмерных структур в технологии МЭМС значительно более высокие, чем в технологии изготовления обычных интегральных схем. Это связано с большой, как правило, глубиной травления (150 мкм и более) и со значительным влиянием величины погрешности размеров трехмерных структур на их механические параметры и характеристики.

Для оценки допустимых технологических погрешностей при изготовлении подвижной части СФМ были проведены исследования и необходимые расчёты с использованием параметров, характеризующих погрешности изготовления СФМ:

- погрешность толщины исходной кремниевой пластины, используемой для изготовления подвижной части СФМ;
- погрешность ухода линейных размеров элементов подвижной части (из-за растрыва и других причин).

Установлено влияние на параметры СФМ технологических погрешностей изготовления деталей его конструкции.

Были определены основные технические требования, предъявляемые к исходным кремниевым пластинам для изготовления деталей МЭМС. Определены также специальные технические требования на стеклянные пластины (к неплоскостности её поверхностей и др.). Точность изготовления элементов подвижной части конструкции контролировалась измерением собственной частоты колебаний рамки в образцах СФМ (допустимое отклонение не должно превышать $\pm 10\%$).

Разработано и практически реализовано новое техническое решение для уменьшения величины растрыва внешних углов формируемых фигур травления, в частности подвижной части МЭМС торсионного типа, с помощью специального компенсатора. Разработана топология компенсатора внешних углов при анизотропном химическом травлении кремниевых пластин ориентации (100), позволяющего обеспечить получение внешних прямых углов рамки ЧЭ без искажений при травлении (рис.2). На разработанную конструкцию компенсатора получен патент на изобретение.



Рис.2. Топология компенсатора внешних углов известной квадратной (а) и разработанной (б) конфигурации

При реализации изобретения удалось практически исключить растрав внешних углов рамки (рис.3). Представленные на рис.3 образцы представляют собой ЧЭ ММВГ.

Особое внимание было уделено разработке технологии сборки и монтажа микромеханических устройств, для которой отсутствуют аналоги в технологии микроэлектроники. Сложность состояла не только в разработке новых ТП сборки и монтажа деталей многослойных конструкций, но и в необходимости обеспечения совмещения деталей с высокой точностью (до ~ 5 мкм).

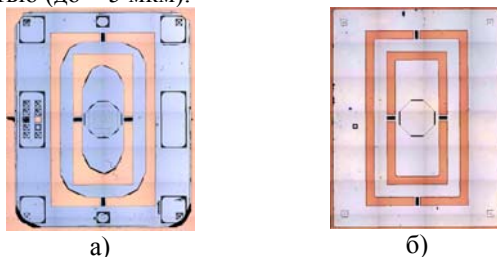


Рис.3. Растрав внешних углов рамки, полученной без компенсатора (а) и с использованием компенсатора разработанной конструкции (б)

Было создано специальное приспособление (кассета) из стали марки 12Х18Н10Т (рис.4), которое обеспечивало совмещение деталей, их фиксацию и последующую высокотемпературную обработку.

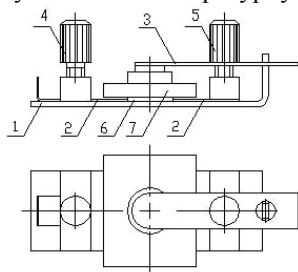


Рис.4. Эскиз приспособления для совмещения, фиксации и термообработки деталей чипа; 1 - основание, 2 - фиксаторы, 3 - прижим, 4 - винт закрепления, 5 - винт прижима, 6 - роторный узел, 7 - статорная пластина

На основание (1) укладывается роторный узел СФМ (6), который с помощью фиксаторов (2) и винта (4) фиксируется на основании. На роторный узел укладывается статорная пластина СФМ (7). После

визуального совмещения деталей с помощью микроскопа типа МБС сборка фиксируется прижимом (3).

На рис.5. представлена схема реализации анодного сращивания. Сращиваемые детали (1) и (2) в специальной кассете (3) устанавливаются на нагреватель (4). На детали подается потенциал от источника высокого напряжения (5). Контроль процесса осуществляется путем измерения проходящего через сращиваемые детали тока (6).

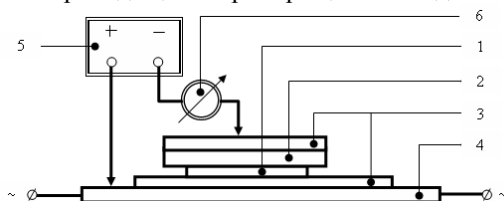


Рис.5. Схема реализации процесса анодного сращивания;

1 - кремниевая плата, 2 - стеклянная плата, 3 - кассета для сращивания, 4 - нагреватель, 5 - источник высокого напряжения, 6 - миллиамперметр

Было создано оборудование для анодного сращивания на базе вакуумной установки УВН-2М. В подколпачном устройстве установки устанавливался графитовый нагреватель с прямым нагревом. Высокое напряжение подавалось от блока питания БНВ2-95. Значение контролируемого тока находилось в диапазоне $0 \dots 150$ мкА.

Экспериментально были определены оптимальные режимы сращивания, как в условиях окружающей среды, так и в вакууме: температура $410 \pm 5^\circ\text{C}$ и высокое напряжение 420 В.

Процесс эвтектической пайки проводился на вакуумной установке УВН-2М в вакууме $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. по схеме, приведенной на рис.5 (без подачи высокого напряжения). Качество эвтектической пайки определялось по величине электрического сопротивления между роторным узлом и соответствующей внешней контактной площадкой статорной пластины, а также по результатам разрушения паяного соединения. Были определены оптимальные режимы эвтектической пайки: время выдержки паемых деталей - в течении 15 мин при температуре $610 \pm 10^\circ\text{C}$ и давлении $0,5$ кГс/мм². С использованием этого режима пайки были изготовлены действующие образцы СФМ.

Изготовление деталей образцов СФМ было проведено по специально разработанным алгоритмам (рис.6). Изготовление роторного узла включает формирование двухсторонних меток совмещения и последующее анизотропное травление кремния через маску из нитрида кремния одновременно с обеих сторон пластины. Для формирования

трёхмерных структур в подложке из монокристаллического кремния с ориентацией плоскости поверхности (100) выбран метод жидкостного анизотропного травления. Конструкция роторного узла СФМ разработана с учётом использования для её изготовления этого метода.

Изготовление прокладки и статорной пластины проводится по представленным алгоритмам, с использованием типовых ТП, доработанных с учетом специфики изготовления деталей МЭМС.

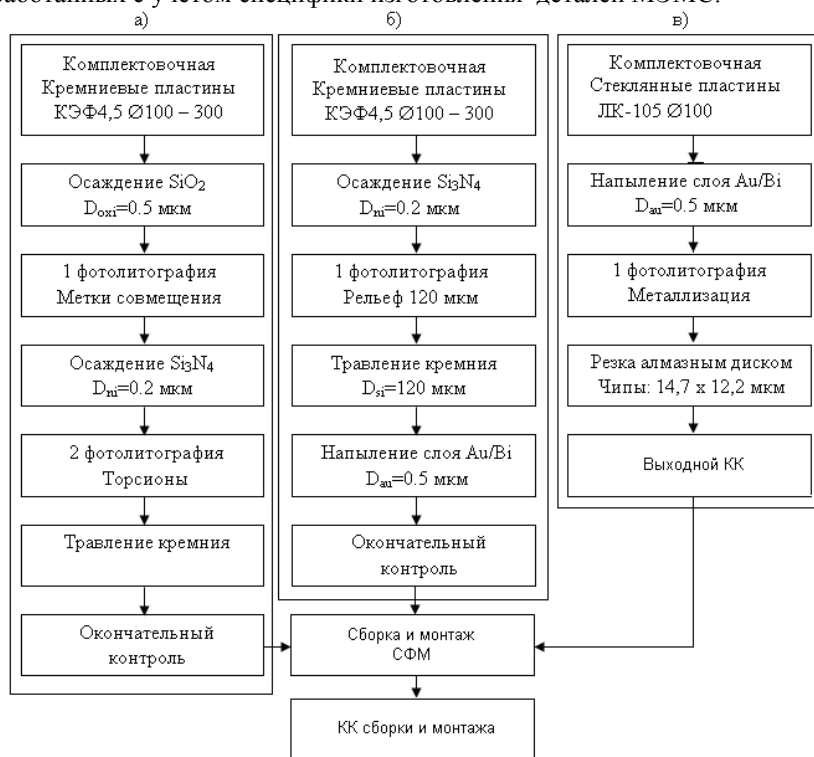


Рис.6. Алгоритмы ТП изготовления СФМ: роторного узла (а), прокладки (б), статорной пластины (в); КК - контроль качества

На основе результатов проведенных исследований создан новый технологический процесс сборки и монтажа образцов СФМ, алгоритм которого представлен на рис.7. Проведены исследования возможностей применения в процессах соединения деталей СФМ анодного срачивания, пайки эвтектическим припоем и стеклом (стеклофриттой), выбор был остановлен на эвтектической пайке.

Недостатком конструкции СФМ является сложность и трудоемкость операции «Сборка 1» из-за необходимости монтажа двух прокладок малых размеров, которые механически непрочны. Экспериментально исследованы варианты выполнения операции «Сборка 2. Совмещение», как показали эксперименты, процесс совмещения технологичен и качество совмещения достаточно объективно оценивается.

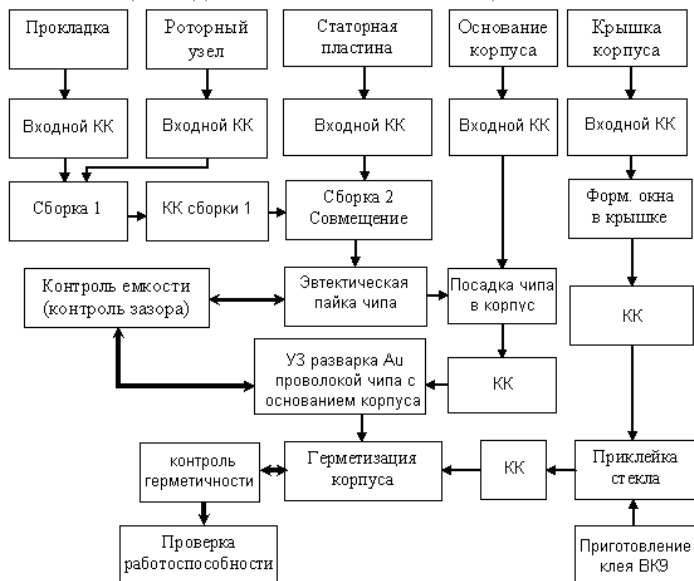


Рис.7 Алгоритм ТП сборки и монтажа образцов СФМ

Проведены исследования по выбору наиболее приемлемого метода соединения деталей СФМ и по оптимизации режимов присоединения с использованием эвтектической пайки. После сборки и монтажа устройства корпус герметизируется лазерной сваркой (лазером на алюмоиттриевом гранате) на установке «Квант-12» (рис.8).

Исследованы возможности вакуумирования корпусов для увеличения добротности СФМ и расширения частотного диапазона при работе СФМ в режиме автоколебаний на частоте резонанса, показавшие, что оно вполне оправдано. Вакуумирование выполнялось в следующем режиме: вакуум внутри камеры $\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.; обезгаживание проводилось в течении ~ 180 мин при $T = 100 \pm 5$ °С.

Совокупность требований, которым должны были удовлетворять образцы СФМ:

СФМ 1-ого типа: угол поворота СФМ $\alpha_{\max} \pm 20$ угл.мин; полоса частот СФМ $\Delta f_{\text{раб}} = 50$ Гц; управляющее напряжение СФМ $U_{\text{упр}} = 120$ В; ёмкости датчика угла поворота C_1 - 0,2 пФ и датчика момента C_2 - 0,2 пФ (не менее).

СФМ 2-ого типа: угол поворота СФМ $\alpha_{\max} \pm 30$ угл.мин; полоса рабочих частот СФМ $\Delta f_{\text{раб}} = 50$ Гц; управляющее напряжение СФМ $U = 220$ В; ёмкости датчика угла поворота C_1 - 0,2 пФ и датчика момента C_2 - 0,2 пФ (не менее).

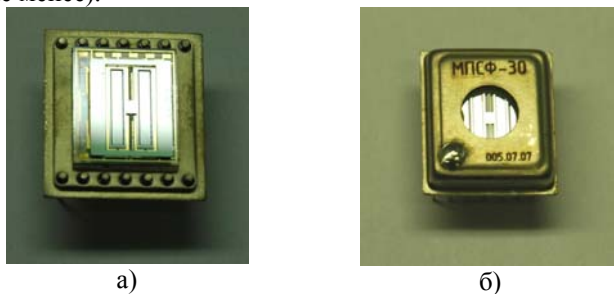


Рис.8. Фотографии образцов СФМ в корпусе до (а) и после герметизации (б)

Для заданных параметров СФМ выполнены расчёты размеров подвижной части конструкции, необходимые для их обеспечения. Рассчитаны габаритные размеры подвижной части, размеры торсиона, величина зазора между обкладками датчика для двух типов конструкций СФМ. Полученные расчётные значения использованы при изготовлении экспериментальных образцов. Для определения геометрических параметров подвижной части СФМ имеется необходимое количество уравнений, численное решение которых однозначно определяет геометрические размеры подвижной части СФМ обоих типов. Расчёты дали следующие результаты. Габариты подвижной части СФМ 1 и 2 типов: $L=2.6$ мм, $l=2.0$ мм, $b=7$ мм, $A=300$ мкм, $z=400$ мкм, $z_1=400$ мкм. Размеры торсиона: $h_T=12$ мкм, $l_T=4.75$ мм, $b_T=371$ мкм, $\gamma=54$ град. Зазор между обкладками датчика момента (угла) $h_0 = 80$ мкм (для СФМ 1 типа); $h_0 = 120$ мкм (для СФМ 2 типа).

Разработано специализированное оборудование для контроля основных технических параметров СФМ. Измерение номинального угла поворота СФМ проводилось с помощью оптической и оптико-электронной систем. Первый метод измерения углов реализуется на простом оборудовании. Абсолютная погрешность измерения угла отклонения (по результатам измерений) составила величину $\approx 1''$ для

углов $\alpha \approx 0$ и $\approx 4,5''$ для углов $\alpha = \pm 40'$. Второй метод измерения углов был реализован на гониометре ГС-5, он обеспечивает абсолютную ошибку измерения, не превышающую $2''$, не зависящую от величины измеряемого угла.

Создано контрольно-измерительное оборудование, позволяющее проводить измерения как основных технических параметров СФМ, так и его внутренних параметров. Для разработанных СФМ диапазон значений углов отклонения зеркала составляет $\pm 40'$ (угловых минут); относительная погрешность измерения угла отклонения зеркала - не более 1%; должна обеспечиваться возможность контроля амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в диапазоне частот от 0 до 1 кГц.

Разработанное устройство (пульт) контроля состоит из оптико-механического узла и электронных блоков. На рис.9 представлена функциональная схема устройства для снятия АЧХ микрозеркала.

Устройство (пульт) контроля внутренних параметров СФМ предназначено для измерения ёмкости и сопротивления датчика угла поворота и исполнительного микродвигателя. Оно может быть выполнено на базе стандартного LCR - измерителя.



Рис.9. Функциональная схема устройства для снятия АЧХ МЭМС с торсионным подвесом

Основное назначение пульта - цеховой межоперационный контроль. Разброс величины жесткости торсионного подвеса приводит к уходу и нестабильности основных технических параметров СФМ, поэтому целесообразно контролировать жесткость подвеса в процессе изготовления СФМ.

Созданное устройство способно функционировать в трёх режимах работы. Первый режим это измерение сопротивления датчика угла поворота и сопротивления микродвигателя. Второй режим - измерение ёмкости датчика угла поворота и ёмкости микродвигателя. В третьем

режиме измеряется зависимость ёмкости одного плеча микродвигателя от напряжения на обкладках второго плеча микродвигателя. Схема измерения в первом режиме приведена на рис.10. Фактически необходимо измерить сопротивление утечек R_{y2} , R_{y3} конденсаторов C_2 , C_3 датчика угла поворота и сопротивление утечек R_{y1} , R_{y4} конденсаторов C_1 , C_4 исполнительного микродвигателя.

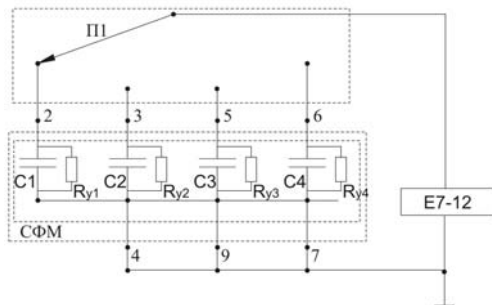


Рис.10. Схема измерения сопротивлений и ёмкостей СФМ

Использованы два метода проверки работоспособности образцов - оптический, позволяющий проверить работоспособность СФМ непосредственно по углу поворота его микрзеркала, и косвенный, когда об угле поворота можно судить по изменению ёмкости микродвигателя. Параметры изготовленных образцов СФМ: номинальный угол поворота 0,5;1 град.; полоса пропускания 0-50; 0-70 Гц; температурный диапазон $-40 \div +60$ °C; удар (длительностью 0,5 мс) 1500 g; масса ЧЭ - не более 1,5 г; напряжение питания 120; 220 В.

Проведённые испытания показали работоспособность изготовленных макетных образцов СФМ.

В третьей главе представлены результаты расчетов, исследований, разработок и оптимизации конструкций микроэлектромеханических приборов - акселерометра (ММА), кольцевого микрогироскопа (КМГ) и вибрационного гироскопа (ММВГ), технологических процессов их изготовления и средств контроля и измерения параметров.

Проведены исследования влияния различных факторов на функциональные параметры МЭМС - устройств, а также испытания изготовленных образцов ММВГ. Исследовано влияние давления на добротность ЧЭ ММВГ в диапазоне давлений $p=8 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. При повышении давления до $8 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. добротность колебательной системы становится равной нулю, и гироскоп полностью теряет свои измерительные свойства.

Для полученных образцов ММВГ определены зависимости добротности Q и собственных частот для 1-й и 2-й мод колебаний от давления p в диапазоне $2 \cdot 10^{-1}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (рис.11).

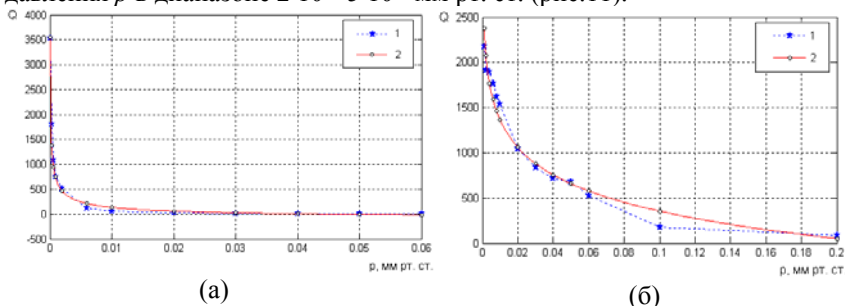


Рис.11. Зависимости $Q(p)$ для ММВГ на первой (а) и второй (б) модах колебаний; 1 - экспериментальная, 2 - расчётная кривые

На основе полученных экспериментальных данных найдены эмпирические зависимости добротности и собственной частоты колебаний ММВГ от давления.

Установлено, что при $p > 9 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. добротность перестает зависеть от величины давления, что можно связать с уменьшением роли газового демпфирования и преобладанием других механизмов рассеяния колебательной энергии. Выяснение природы этих механизмов требует дальнейших исследований. Исследовано изменение добротности с течением времени образцов ММВГ после герметизации, отличающихся наличием или отсутствием специально размещённого до герметизации во внутрикорпусной среде геттера. Результаты (рис.12) свидетельствуют о важности поддержания высокого вакуума при эксплуатации герметичных изделий - микрогироскопов, из-за значительного влияния остаточного давления на добротность ММВГ.

Проведено моделирование и расчет элементов конструкции ММА и КМГ, моделирование конструкции торсионов ЧЭ. Было использовано компьютерное моделирование в среде ANSYS, представляющей собой набор программных пакетов, предназначенных для решения широкого класса задач методом конечно-элементного моделирования. В ходе моделирования был проведен анализ статического напряженно - деформированного состояния подвесов различной конфигурации при развороте подвижной части на заданный угол без учета и с учётом механических возмущений.

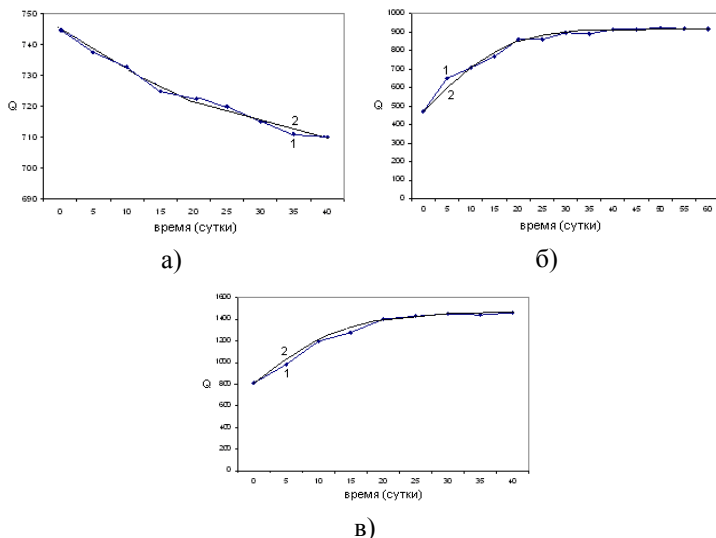


Рис.12. Изменение добротности ММВГ во времени после герметизации без геттера (а), с геттером без локального нагрева (б) и с локальным нагревом (в); 1 - экспериментальная и 2 - усреднённая кривые

Установлено, что погрешности, возникающие за счёт движения по паразитным степеням свободы, минимальны для торсиона с крестообразным сечением. Это связано с тем, что собственные частоты по паразитным степеням свободы много больше собственной частоты по «рабочей» степени. Максимальные механические напряжения при действии внешних статических возмущений принимают наименьшие значения в торсионе с крестообразным сечением. Для ММА с крестообразным сечением торсионов различной толщины (12,5-27,5 мкм) отклонения составили от 7'17" до 36'29" при воздействиях 1-10 g.

Форма и размеры ЧЭ определяются исходя из заданных параметров МЭМС, с учетом способа управления и съема информации, а также технологии изготовления микромеханического элемента. Конструкция акселерометра маятникового типа дает большие возможности по изменению формы ЧЭ, размеров ЧЭ, диапазона измерений. Для создания ЧЭ МЭМС выбран монокристаллический кремний марки КЭФ-4,5 (100). Проведен расчет угла отклонения ЧЭ акселерометра для торсионов различной толщины, при воздействии нагрузок. Варьируя толщину торсиона, можно менять диапазон измеряемых ускорений и чувствительность.

Для КМГ рассчитаны значения ширины кремниевого кольца для колебаний в различных кристаллографических направлениях, которые составили от 80 мкм до 87,86 мкм (рис.13). Необходимо выяснение влияния ориентации кристаллографических плоскостей на основные механические характеристики материала. Поскольку монокристаллический кремний обладает анизотропией свойств, важным для расчета параметров системы и изготовления упругих элементов является знание его механических характеристик. Конструкции ЧЭ и датчика КМГ разработаны с учетом полученных результатов расчета. На рис.14 представлен эскиз конструкции ЧЭ КМГ (вид сверху).

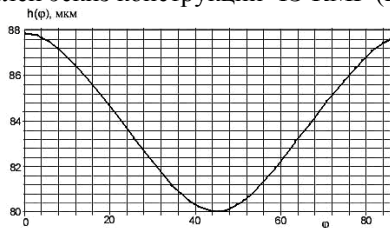


Рис.13. Функция ширины кольца $h(\varphi)$ для различных направлений относительно оси [100]. Минимальная ширина - 80 мкм (угол отклонения от кристаллографической оси (100) φ 0, 90, 180, 270 град). Максимальная ширина 87,86 мкм (угол $45+90 \cdot n$ град)

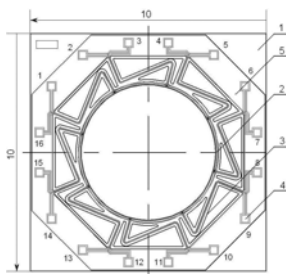
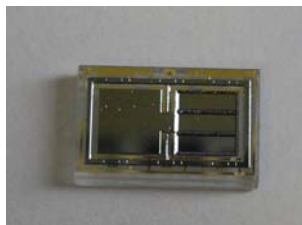
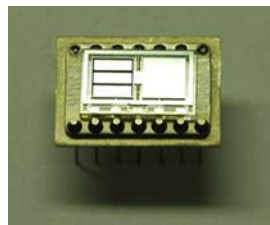


Рис.14. Эскиз конструкции ЧЭ КМГ. 1- основание, 2- резонатор (кольцо), 3 - подвесы, 4 - контактные площадки токопроводящих шин, 5 - экран

При разработке и совершенствовании конструкций МЭМС (в том числе ММА и КМГ) учитывались возможности технологий их изготовления. В известных конструкциях акселерометров маятник выполнен на асимметричном подвесе. Конструкция маятника ММА серии АРК симметрична по форме, а асимметричность ЧЭ достигается за счет различия массы по разным сторонам подвеса (рис.15).



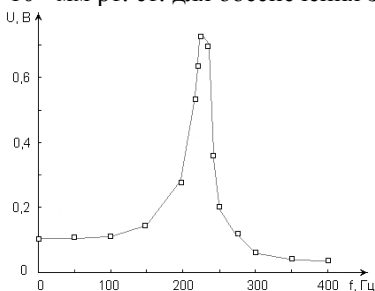
(а)



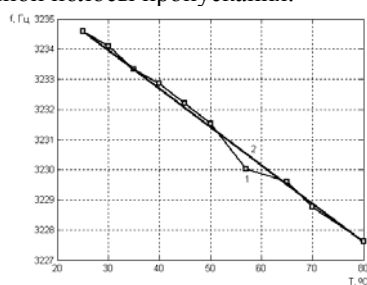
(б)

Рис.15. Фотографии маятника (а) и готового прибора ММА типа АРК перед герметизацией (б)

На параметры ММА маятникового типа оказывает влияние газовое демпфирование, влияющее на затухание колебаний подвижной части ЧЭ (из-за потери энергии при взаимодействии с газовой внутрикорпусной средой). Проведено исследование влияния газового демпфирования на ширину полосы пропускания ММА. Были исследованы два типа датчиков: первый - с газовой средой внутри объема корпуса при давлении 1 атм.; второй - с давлением внутри объема герметичного корпуса $p_{\text{раб}} \approx 1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. В объеме корпуса с вакуумом влияние газового демпфирования незначительно. Поэтому с увеличением частоты внешних колебаний амплитуда выходного сигнала увеличивается и становится максимальной при совпадении частоты внешнего воздействия и собственной частоты колебаний ЧЭ (рис.16). Таким образом, разработанные и изготовленные образцы микроакселерометров должны функционировать в вакууме не хуже $1 \cdot 5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. для обеспечения заданной полосы пропускания.



(а)



(б)

Рис.16. Экспериментальные кривые, полученные для ММА: АЧХ в вакууме $p \sim 1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. (а) и зависимость собственной частоты от температуры при $p \sim 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (б); 1-экспериментальная, 2-усреднённая кривые.

Исходным материалом для прокладки КМГ, расположенной между кремниевыми резонатором и подложкой, является пластина из стекла марки ЛК-105. Были исследованы свойства стекла, получен график зависимости относительного удлинения образца стекла ЛК-105 от температуры. Установлено, что температурный коэффициент расширения (ТКР) стекла при достижении температуры $\sim 540^\circ\text{C}$ достаточно резко изменяется, по-видимому, из-за изменения его структуры за счёт полиморфных модификаций. Это указывает на необходимость выбора температуры срачивания деталей из стекла ЛК-105 и кремния, не превышающей 540°C .

Перспективным методом утонения пластин кремния является гидрогенизация поверхностного слоя пластин (облучение протонами) и последующее скалывание. Однако этот метод не достаточно изучен. Результаты ИК-спектроскопии гидрогенизированных слоёв кремниевых пластин показали, что температура подложки играет одну из первостепенных ролей в формировании водородосодержащего дефектного слоя в кремнии (рис.17). Установлен характер поведения низкочастотной полосы в области валентных Si-H колебаний при отжиге. Водородные центры в имплантированных протонами поверхностных слоях кремния на разных установках и при несколько отличающихся условиях внедрения характеризуются практически одинаковыми спектрами в области валентных колебаний Si-H связей.

В спектрах образцов 1, 3 в которые были имплантированы протоны с относительно высокой дозой ($\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ H}^+/\text{см}^2$), интерференционные полосы имеют два достаточно чётких экстремума (рис.18). В спектрах образца 4 (облучённого протонами с дозой $6 \cdot 10^{16} \text{ H}^+/\text{см}^2$) наблюдается один экстремум с меньшей амплитудой.

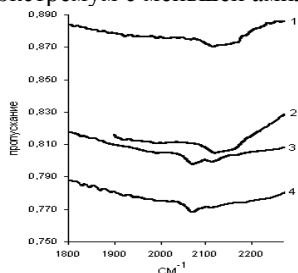


Рис.17. ИК спектры исследованных образцов. 1,2- до отжига; 3,4- после отжига при температуре 400°C в течение 30 мин

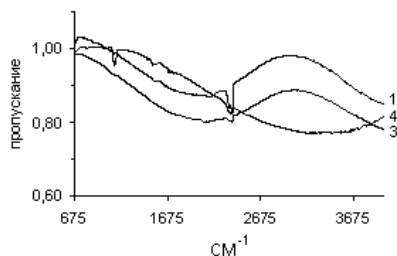


Рис.18. ИК спектры слоёв кремния (с интерференцией)

По расстоянию (на ординате волновых чисел) между экстремумами можно рассчитать толщину слоя, если известен его показатель преломления. Проведённые исследования необходимы для разработки технологии прецизионного утонения деталей МЭМС, в частности ЧЭ микромеханического гироскопа кольцевого типа. Вместо жидкостного (ЖТ) и плазмохимического травления (ПХТ) перспективным представляется использование высокоточного скалывания гидрогенизированных слоёв кремния.

Проведены исследования и эксперименты по совершенствованию технологии изготовления микромеханических датчиков. Разработаны технологические процессы (ТП) изготовления микромеханических датчиков, изготовлены действующие образцы. Разработана технология изготовления наиболее сложного и ответственного элемента КМГ и ММА - ЧЭ. Разработаны и экспериментально апробированы алгоритмы технологических процессов изготовления ЧЭ ММА и КМГ (рис.19).

Для изготовления ЧЭ КМГ использован метод анизотропного ПХТ кремния. Рамка кольцевого гироскопа присоединялась к стеклянному основанию методом анодного сращивания. Для изготовления ЧЭ ММА применено анизотропное ЖТ, а для соединения кремниевой рамки со стекленным основанием - метод эвтектической пайки Au-Si.

Формирование ЧЭ КМГ осуществлялось с применением нетрадиционных технических решений. К их числу относится операция 12 (см. рис.19), на которой производилось утонение пластины со сформированными функциональными слоями до толщины 150 мкм. После резки на чипы (операция 13) осуществлялось вскрытие внешних контактных площадок - КП (операция 14), для чего производилось удаление окисла кремния на внешних КП через маску из фоторезиста.

Изготовление чипа ЧЭ заканчивается утонением его с обратной стороны (операция 16) жидкостным химическим травлением кремния до вскрытия профиля травления лицевой стороны.

Сборка и монтаж ММА проводились в следующей последовательности:

- соединение маятника и статорной пластины. Соединение осуществлялось на лабораторной установке вакуумного напыления УРМ-2 методом эвтектической пайки;
- посадка чипа в корпус, методом клеевого соединения;
- разварка перемычек в соответствии со схемой соединений осуществлялась на установке ультразвуковой сварки УС ИИМ2.

Затем выполнялась герметизация корпуса методом лазерной сварки на установке «Квант-12». Далее производился контроль емкости датчиков ММА как в прямом ($+90^\circ$), так и в перевернутом (-90°)

положениях, для этого был создан измерительный стенд, состоящий из контактного устройства и измерителя импеданса Е7-12.

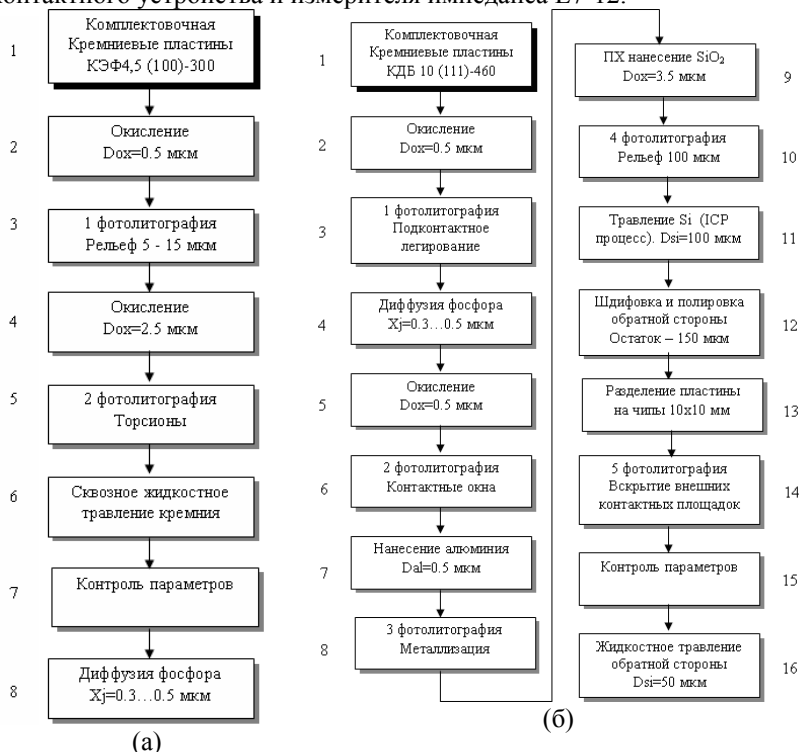


Рис.19 Алгоритмы выполнения основных технологических операций ТП изготовления ЧЭ ММА (а) и КМГ (б)

Сборка и монтаж КМГ осуществлялись в следующей последовательности:

- соединение кремниевого резонатора и прокладки на установке вакуумного напыления УРМ-2-методом анодного срачивания;
- приклейка нижнего магнитопровода к кремниевой заглушке;
- приклейка прокладки, сращенной с кремниевым резонатором, к кремниевой заглушке (с приклеенным к ней нижним магнитопроводом);
- приклейка магнита и верхнего магнитопровода к сборке;
- посадка чипа в корпус и разварка выводов;
- заварка корпуса лазером и вакуумирование.

На рис.20 показан КМГ в корпусе с разваренными выводами до герметизации. Контроль чипа КМГ производился путем измерения

электрического сопротивления токопроводящих шин на зондовом устройстве с использованием мультиметра UNI-T UT-60G. Были изготовлены работоспособные образцы ММА и КМГ.



Рис.20 Фотография изготовленного образца КМГ

Микромеханические акселерометры используются в трёхкомпонентных модулях (по три прибора в модуле). Подобная интеграция МЭМС в одном изделии позволяет получить значительный выигрыш в его качестве и расширить выполняемые им функций. Примерами подобных применений являются инклинометр, инерциальный модуль, системы навигации, гироскомпас на основе 3-х ММА и 3-х волоконно-оптических гироскопов - ВОГ и другие (рис.21).



Рис. 21. Фотография модуля с тремя осями чувствительности, изготовленного на основе 3-х ММА, полученных в настоящей работе

Разработаны алгоритмы выполнения сборочно-монтажных операций для изготовления ММА и КМГ в герметичных корпусах, ММА был герметизирован при пониженном и нормальном давлении в атмосфере инертного газа, а КМГ - с пониженным давлением внутри корпуса.

Разработан и изготовлен стенд для контроля параметров и характеристик датчиков ММА. Для обработки результатов измерений использована специально созданная компьютерная программа.

Для изготовления образцов КМГ и ММА было использовано специально созданное нестандартное оборудование и оснастка. Изготовленные образцы КМГ и ММА были работоспособны и имели параметры, соответствующие заданным.

Разработана конструкция инклинометра на базе ММА, созданы опытные образцы инклинометров, исследованы их характеристики с помощью разработанных и изготовленных для этих целей измерительных устройств (рис.22). Измерены параметры инклинометров с монокристаллическим маятником с электростатической обратной связью. Контур обратной связи в измерительную схему был введен для увеличения диапазона измерений и точности измерений.

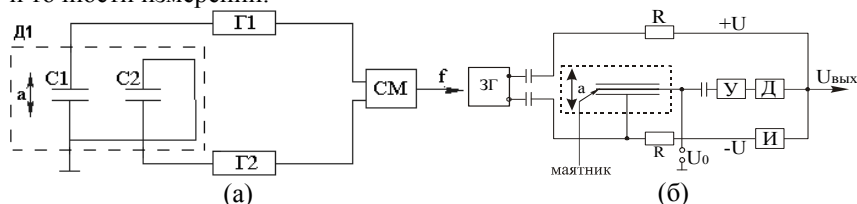


Рис. 22. Схемы измерительных устройств: без обратной связи (а) и с обратной связью (б)

Четвертая глава посвящена результатам разработки конструкции, технологии изготовления, устройства для контроля параметров микромеханических датчиков давления (ММД).

На основе большого числа экспериментов для изготовления чувствительного элемента ММД давления использована технология «скрытых масок», созданная на базе типовых процессов планарной технологии (рис.23).

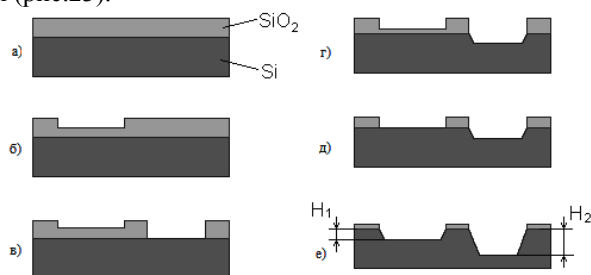


Рис.23. Технологическая схема формирования многопрофильной структуры на основе «скрытых масок»: а) оксидирование Si -пластины; б) фотолитография (ФЛ) и подтравливание SiO_2 в окнах маски на расчётную глубину; в) ФЛ и удаление оксида в окнах маски; г) анизотропное травление Si ; д) травление SiO_2 по всей поверхности пластины до момента его удаления в окнах первой ФЛ; е) анизотропное травление кремния в течение определённого интервала времени

Эксперименты показали, что с использованием технологии «скрытых масок», можно формировать по 3 и более рельефа различной глубины с каждой стороны пластины, например $H_1=20$ мкм и $H_2=100$ мкм (см. рис.23), а также формировать объёмные фигуры травления. В разработанном ТП изготовления ЧЭ ММД использована технология анизотропного травления кремния. Наилучшее качество травления в плоскостях (100), и (111) достигнуто в водном растворе КОН с концентрацией 33% при $T=92\pm 2^\circ\text{C}$.

На стеклянную пластину марки ЛК-105 наносили плёнку золота с подслоем ванадия методом термовакuumного распыления. После напыления выполнялся цикл операций фотолитографии. После этого проводилась резка и ломка стекла на чипы (рис.24).

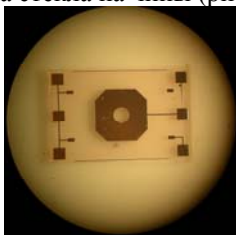


Рис.24. Стеклянная плата с металлической разводкой из золота с подслоем ванадия

На полученных стеклянных платах формировали сквозные отверстия.

Алгоритм ТП сборки и монтажа ММД показан на рис.25.



Рис.25. Алгоритм ТП сборки и монтажа ММД

Поскольку одна из совмещаемых деталей прозрачна (неподвижная часть изготовлена из стекла), сборка деталей ММД возможна с использованием меток совмещения. Проведены исследования, по результатам которых установлены наилучшие режимы выполнения отдельных технологических операций, входящих в ТП изготовления ЧЭ.

Для соединения деталей ЧЭ ММД было использовано электростимулированное термическое соединение - анодное сращивание с эвтектической пайкой (рис.26). Для изготовления экспериментальных образцов как ММД давления, так и СФМ применялось специально разработанное приспособление (кассета) из стали, позволяющее обеспечивать совмещение, фиксацию деталей, их последующую термообработку.

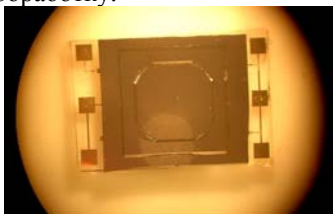


Рис.26 Фотография подвижного кремниевого элемента, соединенного со стеклянным основанием, методом сращивания

Конструкция ММД (рис.27), в силу отсутствия воздействий на неё сильных механических деформаций, не предполагает высоких требований к усталостным свойствам материалов.

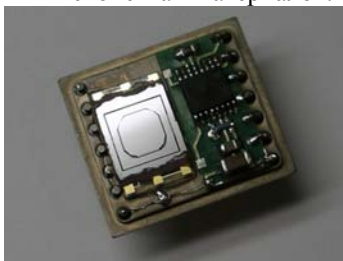


Рис.27 Фотография образца ММД давления

Выходным элементом датчика давления является конденсатор. Значение емкости конденсатора C_x изменяется при изменении давления газовой среды, воздействующей на датчик. На рис.28. приведена структурная схема разработанного электронного устройства для измерения давления, с помощью которого производилось снятие

выходного аналогового сигнала с датчика и его преобразование в цифровой сигнал.

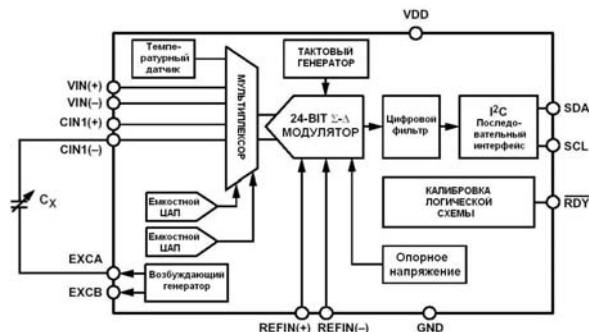


Рис.28. Структурная схема электронного устройства для измерения давления

Измеряемая емкость датчика давления C_x подключена между источником возбуждения и входом Σ - Δ -модулятора. Прямоугольный возбуждающий сигнал прикладывается к C_x в течение времени преобразования, и модулятор последовательно измеряет заряд, необходимый для полной перезарядки емкости C_x . Цифровой фильтр обрабатывает информацию с выхода модулятора, которая представляет собой поток из логических нулей и единиц. Для выдачи полученного результата измерения используется последовательный интерфейс типа I²C.

Экспериментальные образцы ММД, соответствовали заданным параметрам: измеряемое давление - до 25 кПа (с возможностью его изменения в пределах от 10^3 до $2 \cdot 10^7$); ресурс образцов - не менее 15000 часов непрерывной работы; масса датчика - менее 10 г. Проведенные испытания образцов подтвердили работоспособность образцов ММД давления

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассчитаны статические параметры ЧЭ ММА и резонатора КМГ, на основе полученных расчетных данных разработаны конструкции ЧЭ ММА и КМГ. Проведён расчет углов отклонения ЧЭ ММА при действии ускорения вдоль оси чувствительности, анализ максимальных напряжений в подвесе ЧЭ при отклонении на заданный угол и при действии внешних статических возмущений до 10g.

2. Исследованы свойства стекла ЛК-105. Установлено, что ТКЛР стекла при достижении температуры ~ 540 °С достаточно резко изменяется, по-видимому, из-за изменения его структуры за счёт полиморфных модификаций. Результаты ИК-спектроскопии гидрогенизированных слоёв кремниевых пластин показали, что температура подложки играет важную роль в формировании водородосодержащего дефектного слоя в кремнии.

3. Разработаны технологии изготовления наиболее сложного и ответственного элемента КМГ, ММА, СФМ и ММД - ЧЭ. Для изготовления ЧЭ КМГ использован метод анизотропного ПХТ кремния. Рамка КМГ присоединялась к стеклянному основанию методом анодного срачивания. Для изготовления ЧЭ ММА применено жидкостное анизотропное травление, а для формирования соединения кремниевой рамки со стеклянным основанием использована эвтектическая пайка Au-Si. Создание ЧЭ СФМ включало изготовление роторного узла, прокладки и статорной пластины, их сборку и монтаж. Для изготовления ЧЭ ММД использована технология «скрытых масок».

4. Разработаны алгоритмы ТП сборки и монтажа МЭМС. Образцы ММА герметизировались при нормальном и пониженном давлении, а КМГ - при пониженном давлении в корпусе. При сборке и монтаже СФМ и ММД исследованы возможности соединения деталей анодным срачиванием, пайкой эвтектическим припоем и стеклофриттой, выбор был сделан в пользу пайки эвтектическим припоем Si-Au для СФМ и анодного срачивания и эвтектической пайки для ММД.

5. Исследована возможность изготовления образцов ММВГ с геттером, размещаемым в корпусах до герметизации, что позволило повысить и стабилизировать добротность этих образцов (на $\sim 30\%$).

6. Разработаны конструкции и технологии изготовления МЭМС приборов - гироскопов, акселерометра, сложно-функционального микропривода, инклинометра и датчика давления. Снятие характеристик и измерение параметров этих приборов проводилось на специально созданных контрольно-измерительных устройствах. Изготовлены работоспособные образцы этих приборов, параметры и характеристики которых соответствовали заданным.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] О.М.Бритков, С.Б.Симонов Исследование тепловых свойств полимерных материалов, используемых в конструкциях герметичных блоков микроэлектронной аппаратуры. - Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2003», М.: МИЭТ, 2003, с.68
- [2] О.М.Бритков, Б.М.Симонов Разработка технологии герметизации микромеханических устройств в стеклянном корпусе. - Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2004», М.: МИЭТ, 2004, с.37
- [3] С.П.Тимошенков, Ю.Я.Лапицкий, Ю.Б.Стасевич, В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, В.В.Калугин, А.А.Захаров, О.М.Бритков Разработка макета имплантера для имплантации протонов в полупроводниковые пластины в целях создания многослойных структур. - Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 2005, №3, с.28-32
- [4] О.М.Бритков Разработка конструкции микромеханического акселерометра. - 12-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2005», М.: МИЭТ, 2005, с. 123
- [5] С. А.Зотов, А.Н.Бойко, О.М.Бритков Косвенный анализ жесткости подвеса чувствительного элемента микромеханического устройства. - «XXXI Гагаринские чтения», М.: 2005, с. 42-43
- [6] С.П.Тимошенков, О.М.Бритков, С.А.Зотов, В.Г.Рубчиц, В.В.Калугин, Е.П.Прокопьев Исследования и разработка технологических процессов изготовления элементов микромеханики. - Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 2006, №2, с.3-7
- [7] А.Л.Суворов, С.П.Тимошенков, Ю.Я.Лапицкий, Ю.Б.Стасевич, В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, В.В.Калугин, А.А.Захаров, О.М.Бритков Разработка макета имплантера для имплантации протонов в полупроводниковые пластины в целях создания многослойных структур. - Труды XVI Международного совещания «Радиационная физика твердого тела», М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2006, с.504-509
- [8] С.П.Тимошенков, С.А.Зотов, В.В.Калугин, В.Г.Рубчиц, О.М.Бритков, Е.П.Светлов-Прокопьев Влияние пор и поверхностных нанослоёв на изгибную жесткость подвеса чувствительных элементов МЭМС. - Микросистемная техника, 2006, №7, с.11-16
- [9] С.П.Тимошенков, О.М.Бритков, В.И.Графутин, С.А.Зотов, В.В.Калугин, Ю.Я.Лапицкий, Е.П.Прокопьев, Ан.С.Тимошенков Легирование слоев кремния, осаждаемых в гидридном и хлоридных

процессах роста эпитаксиальных слоев при скоростном нагреве подложек некогерентным излучением в производстве структур КНИ. - Материаловедение, 2006, №10, с.17-20

[10] В.Г.Рубчиц, С.П.Тимошенко, Ю.А.Чаплыгин, О.М.Бритков Способ компенсации растрова внешних углов фигур травления на кремниевых пластинах с ориентацией поверхности (100). - патент на изобретение RU 2331137 C1, H01L 21/308, Россия, заявка №2006145990/28, 26.12.2006

[11] С.П.Тимошенко, С.А.Зотов, В.В.Калугин, О.М.Бритков, В.Г.Рубчиц, А.А.Воротников, Е.П.Светлов-Прокопьев Залечивание пор на границе сращивания подложек в структурах КНИ. - Петербургский журнал электроники, 2007, №1, с.21-29

[12] С.П.Тимошенко, Е.П.Прокопьев, И.М.Бритков, Д.К.Григорьев, В.В.Калугин, Ан.С.Тимошенко, О.М.Бритков, Ал.С.Тимошенко, С.С.Евстафьев Производство полупроводниковых приборов, ультрабольших интегральных схем, сенсоров, микроэлектронных кремниевых датчиков, МЭМС и солнечных элементов в рамках модифицированной smart-cut технологии. - Тезисы доклада III Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», 2008, г.Минск, изд-во БНТУ, 2008, с.132

[13] С.П.Тимошенко, Е.П.Прокопьев, В.В.Калугин, И.М.Бритков, Ал.С.Тимошенко, О.М.Бритков, Ан.С.Тимошенко О свойствах мелких примесных центров на границе раздела полупроводник-металл. - Научная сессия МИФИ-2008, Сборник научных трудов, т.1. М.: МИФИ, 2008, с.114

[14] О.М.Бритков, В.И.Графутин, А.Г.Залужный, В.В.Калугин, О.В.Илюхина, Г.Г.Мясищева, Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенко, Ю.В.Фунтиков, Б.Ю.Шарков, Ю.А.Чаплыгин Размеры нанообъектов в пористых системах и некоторых дефектных материалах по данным метода позитронной аннигиляционной спектроскопии. - Труды международного симпозиума «Надёжность и качество - 2008», Пенза: изд-во ПГУ, 2008, с.38

Подписано в печать:

Формат 60х84 1/16. Уч.-изд.л. Тираж экз. Заказ

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, Москва, г.Зеленоград, проезд 4806, д.5, МИЭТ.