

На правах рукописи



Барбин Евгений Сергеевич

**ДИНАМИКА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ГИРОСКОПА-АКСЕЛЕРОМЕТРА С РАЗВЯЗЫВАЮЩИМИ РАМКАМИ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск –2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Нестеренко Тамара Георгиевна

Официальные оппоненты: Лысенко Игорь Евгеньевич
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», кафедра Конструирования электронных средств, заведующий кафедрой

Зиновьев Вадим Борисович
кандидат технических наук
Акционерное общество Научно-производственное предприятие «Восток», лаборатория физики, технологии микроэлектроники и микросистемной техники, начальник лаборатории

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

Защита состоится 14 декабря 2016 г. в 10.00 ч. в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д.212.173.03 Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного университета по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20 и на сайте НГТУ www.nstu.ru

Автореферат разослан « ____ » октября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.212.173.03
кандидат технических наук



Остертак Д. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Перспективы современного приборостроения связаны с разработкой инерциальных датчиков, обладающих малыми массой, габаритами, низкими себестоимостью, энергопотреблением и достаточно высокой надёжностью. Этим характеристикам соответствуют микроэлектромеханические системы (МЭМС). Основные преимущества МЭМС определили области применения, в которых они к настоящему времени получили наиболее широкое распространение: автомобильная электроника, мобильные телефоны и миниатюрные бытовые устройства, ноутбуки, телекоммуникационные устройства, а также военная, медицинская, научная и другая специализированная техника. Микроэлектромеханические устройства представляют собой системы, в которых на поверхности или в объёме твёрдого тела интегрированы электрические и микромеханические структуры. Возникающие погрешности МЭМС обусловлены рядом причин областей механики, электроники, технологии, материаловедения.

Микромеханические гироскопы обычно работают либо в резонансном режиме, то есть при равенстве частот первичных и вторичных колебаний, или близко к резонансу, поэтому реакция системы очень чувствительна к изменению параметров в условиях эксплуатации при действии различных дестабилизирующих факторов: температуры, ускорений, вибрации, ударов и пр. Колебания температуры изменяют электромеханические свойства микрогироскопов. Технологические возможности процессов изготовления МЭМС ещё недостаточны по сравнению с требованиями для производства высокоэффективных инерциальных датчиков. Это вызывает недостатки в механической конструкции и ограничивает стабильность и надёжность МЭМС. Несовершенства изготовления также вносят перекрёстную связь между осями первичных и сенсорных колебаний, которая может быть даже больше, чем сигнал от силы Кориолиса.

В современных условиях, когда решены основные вопросы принципов построения, конструирования и технологии изготовления микромеханических датчиков, инерциальных модулей и бесплатформенных инерциальных навигационных систем на их основе, на первый план выступает проблема повышения точности преобразователей и создание приборов навигационного класса точности.

Целью диссертационной работы является выработка научно-обоснованных решений по проектированию многокомпонентных микромеханических гироскопов, позволяющих снизить влияние дестабилизирующих факторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) Провести аналитический и сопоставительный обзор существующих многокомпонентных микрогироскопов и методов уменьшения влияния дестабилизирующих факторов.

2) Разработать упругие подвесы, позволяющие инерционному телу двигаться вне плоскости сенсора при планарной технологии изготовления и исследовать их температурную чувствительность, разработать способы уменьшения влияния температуры на частотные характеристики микросистем.

3) Провести экспериментальные исследования технологии изготовления упругих подвесов и многокомпонентного гироскопа-акселерометра.

4) Провести экспериментальные исследования температурной чувствительности упругих подвесов.

5) Разработать функциональную, конструктивно-кинематическую схему многокомпонентного гироскопа-акселерометра, позволяющего рассчитывать векторы угловой скорости и линейного ускорения.

6) Разработать математическую модель многокомпонентного гироскопа-акселерометра, устанавливающую связь конструктивно-технологических параметров гироскопа с его режимами работы и учитывающую влияние дестабилизирующих факторов.

7) Разработать конечно-элементные модели многокомпонентного гироскопа-акселерометра с развязывающими рамками. На основе этих моделей провести численные исследования характеристик первичного преобразователя гироскопа-акселерометра и оценить влияние температурных и технологических возмущающих воздействий на выходные характеристики гироскопа-акселерометра. Выработать рекомендации по выбору его конструктивных параметров.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы теоретической механики, теории колебаний, теории упругости и сопротивления материалов, компьютерного моделирования, методы конечно-элементного анализа и экспериментальные методы исследований.

Объект исследования – упругие подвесы микросистем и многокомпонентный гироскоп-акселерометр.

Предмет исследования – повышение устойчивости микроэлектромеханического гироскопа-акселерометра к возмущающим воздействиям.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработаны упругие подвесы, обеспечивающие перемещение массы вне плоскости сенсора при планарной технологии изготовления микросистемы и температурном изменении собственной частоты менее 0,3%.

2) Предложен принцип работы многокомпонентного гироскопа-акселерометра с применением развязывающих рамок между осями первичных и вторичных колебаний и размещаемого на одном кристалле, позволяющий измерять векторы угловой скорости и линейного ускорения.

3) Разработана математическая модель многокомпонентного гироскопа-акселерометра, учитывающая действия дестабилизирующих факторов и позволяющая рассчитывать векторы угловой скорости и линейного ускорения.

4) Разработаны конечно-элементные модели, позволяющие определять основные характеристики многокомпонентного гироскопа-акселерометра и оценивать погрешности, обусловленные температурными и технологическими возмущающими воздействиями.

Практическая значимость работы

1) Разработанные упругие подвесы, позволяют создавать многокомпонентные микросистемы с линейным перемещением масс вне плоскости сенсора.

2) Разработанный многокомпонентный гироскоп-акселерометр позволяет:

- Определять угловые скорости по трём осям;
- Линейные ускорения по трём осям;
- Исключить влияние линейного ускорения на измерение угловой скорости;
- Уменьшить влияние температурных и технологических воздействий;
- Уменьшить квадратурные погрешности.

3) Предложенные модели и проведённые исследования могут служить методической базой для проектирования многокомпонентных микросистем.

4) Разработанные модели и методы исследования МЭМС использованы в учебном процессе при обучении студентов по направлению 12.04.01 - Приборостроение, профиль магистратуры «Системы ориентации, стабилизации и навигации».

5) Результаты, полученные в диссертации, использованы в ходе выполнения проектов по федеральной целевой программе и грантов:

– «Разработка микромеханического инерциального датчика повышенной точности и информативности для систем ориентации и навигации транспортных средств" в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». ГК от 19 апреля 2011 г. №16.513.11.3056.

– «Разработка методов высокоуровневого проектирования многокомпонентных микросистем» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Шифр заявки «2012-1.5-14-000-2016-006» Соглашение о предоставлении субсидии от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1951.

– «Разработка методов проектирования многокомпонентных микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии от 11 августа 2014 г. № 14.575.21.0068.

– «Разработка мультисенсорной микромеханической системы измерения ускорений и угловых скоростей объекта» по программе «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере. Конкурс УМНИК 2-15-4, код договора 0015149.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Новые упругие подвесы, позволяющие перемещаться массе вне плоскости сенсора и температурном изменении собственной частоты менее 0,3 % в диапазоне температур от минус 50 °С до +110 °С.

2) Многокомпонентный гироскоп-акселерометр с развязывающими рамками между осями первичных и вторичных колебаний и размещаемый на одном кристалле, позволяющий измерять векторы угловой скорости и линейного ускорения.

3) Математическая модель многокомпонентного гироскопа-акселерометра, учитывающая действия дестабилизирующих факторов и позволяющая рассчитывать векторы угловой скорости и линейного ускорения.

4) Конечно-элементные модели многокомпонентного гироскопа-акселерометра, позволяющие определять основные характеристики и оценивать погрешности, обусловленные температурными и технологическими возмущающими воздействиями.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и отечественных научно-технических конференциях, выставках:

1) 14th IMECO TC10 Workshop on Technical Diagnostics 2016: New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Systems Reliability, Maintainability and Safety; Milan; Italy; 27 June 2016 through 28 June 2016.

2) III Форум молодых учёных U-NOVUS 2016, г. Томск, Россия, 2-13 мая 2016

3) XXI Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2015), г. Томск, Россия, 5-9 октября 2015 г.

4) V Всероссийский фестиваль науки НАУКА 0+, Красноярск, Россия, 2-4 октября 2015.

5) XXI IMEKO World Congress «Measurement in Research and Industry», Czech Republic, Prague, 30 August - 4 September 2015.

6) III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest», Россия, Горный Алтай, 27–31 июля 2015 г.

7) XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС-2015, Россия, Санкт-Петербург, 25-27 мая 2015 г.

8) Ежегодная открытая выставка научных достижений молодых учёных «РОСТ.УР» – 2015, Россия, Томск, 13-14 ноября 2014 г.

9) XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС-2013, Россия, Санкт-Петербург, 27-29 мая 2013 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ в том числе: 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 патент на изобретение; 8 из них - в материалах научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка используемой литературы из 150 наименований и шести приложений. Основное содержание диссертации изложено на 188 страницах и включает 179 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначена цель диссертационного исследования и сформулированы задачи. Изложены научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ отечественных и зарубежных источников, посвящённых конструктивным методам борьбы с дестабилизирующими факторами, влияющими на выходные характеристики многокомпонентных микромеханических гироскопов. На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы.

С каждым годом доля многокомпонентных сенсоров будет увеличиваться, вытесняя на рынке доли одно-двухкомпонентных сенсоров. Данная тенденция обусловлена двумя факторами: потребительский рынок сдвигается в сторону измерения множества параметров и сенсоры, объединённые в одном чипе, имеют меньшие массу и габариты, что соответственно удешевляет готовое изделие.

К тому же увеличение количества измеряемых параметров, в число которых входят параметры, характеризующие дестабилизирующие воздействия, позволяет компенсировать их влияние. Примером является использование акселерометров для компенсации вредных воздействий ускорений на выходной сигнал гироскопа. Другим способом уменьшения влияния ускорения является применение схем камертонного типа, где первичные рамки гироскопа совершают противофазные движения, соответственно внутренние рамки также будут двигаться в противоположные стороны под действием сил Кориолиса, вызванных угловой скоростью вращения объекта. Под действием ускорения чувствительные рамки будут совершать синфазное движение. Соответственно дифференциальная сумма сигналов с чувствительных рамок нивелирует действие ускорения на выходной сигнал.

Температурные погрешности компенсируются применением датчиков температуры или увеличением ширины полосы пропускания. Зная зависимость собственных частот от температуры, вводится компенсация изменения масштабного коэффициента тем или иным способом. Второй способ предполагает использование двух или более массовых систем по осям колебаний. В этом

случае колебания температуры не оказывают влияние на изменение масштабного коэффициента гироскопа.

Величина квадратурных погрешностей соизмерима или в несколько раз превышает величину полезного сигнала. Использование развязывающих рамок между осями первичных и вторичных колебаний позволяет уменьшить данную погрешность. Развязывающая рамка выполняет роль тела, на которое действуют силы Кориолиса, вызывающие движение вдоль информативной оси. С применением такой схемы внутренняя рамка вторичных колебаний в идеале движется только вдоль оси чувствительности и не совершает колебания вместе с первичной рамкой вдоль первичной оси.

Проведённый анализ показал, что гироскопы с антифазным движением масс и развязывающими рамками существуют только для однокомпонентных вариантов. Что обусловлено ограничением технологии изготовления сенсоров, где конструкция имеет планарную форму. Увеличение количества измеряемых параметров в одной конструкции позволит уменьшить площадь, занимаемую сенсором при одновременном использовании конструктивных методов борьбы с дестабилизирующими факторами. Применительно к гироскопам LL-типа, разработка упругого подвеса, с применением которого обеспечивается перемещение чувствительной массы вне плоскости сенсора, позволит решить эту задачу. В диссертации рассмотрены вопросы влияния температурных воздействий и технологических дефектов. Воздействие ударных нагрузок, вопросы влияния электростатических и радиационных взаимодействий требует самостоятельных исследований и в данной работе не рассматриваются.

Вторая глава посвящена изучению характеристик упругих элементов (УЭ) и упругих подвесов (УП), а также конструкционным способам уменьшения влияния температуры на собственные частоты микромеханических сенсоров.

Методом конечных элементов (МКЭ) проведены исследования жёсткостей и температурной чувствительности упругих элементов, представленных на рисунке 1. Полученные данные представлены в таблице 1 и рисунке 2. Осью чувствительности, вдоль которой происходит основное движение инерционного тела, принята ось с наименьшей жёсткостью, а именно ось X .

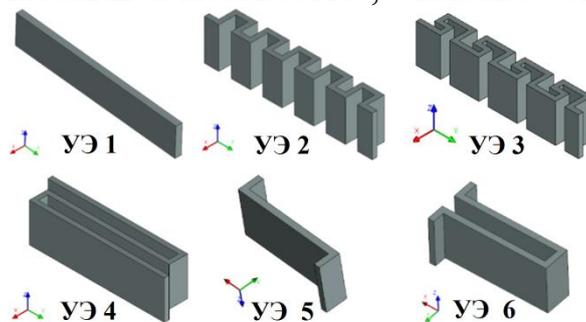


Рисунок 1 – Виды исследуемых упругих элементов

Для проектирования упругих подвесов, обеспечивающих перемещение инерционной массы вдоль оси Z , наилучшим образом подойдут упругие элементы с меньшей жёсткостью по оси Z , которыми являются УЭ 3 и УЭ 2. Для уменьшения влияния перекрёстных связей следует применять упругие элемен-

ты с наибольшими значениями жёсткостей вдоль осей, не совпадающих с осью чувствительности, к которым относится применение УЭ 1.

Таблица 1 – Нормированные коэффициенты жёсткости упругих элементов

	1	2	3	4	5	6
K_x , Н/м	10	10	10	10	10	10
K_y , кН/м	81	3,77	1,05	0,318	24,4	0,1
K_z , Н/м	1491	168,2	93,1	215,5	219	355

При деформации упругого элемента вдоль оси Y , вследствие действия температуры будут возникать внутренние напряжения, которые изменяют собственную частоту упругого элемента. Сравнение результатов температурной чувствительности УЭ (рисунок 2) с результатами полученных жёсткостей УЭ (таблица 1) показывает, что меньшим изменениям собственной частоты от температуры соответствуют УЭ с меньшей жёсткостью по оси Y . В этом случае влияние перекрёстных связей увеличится и необходимо искать компромисс между этими двумя параметрами.

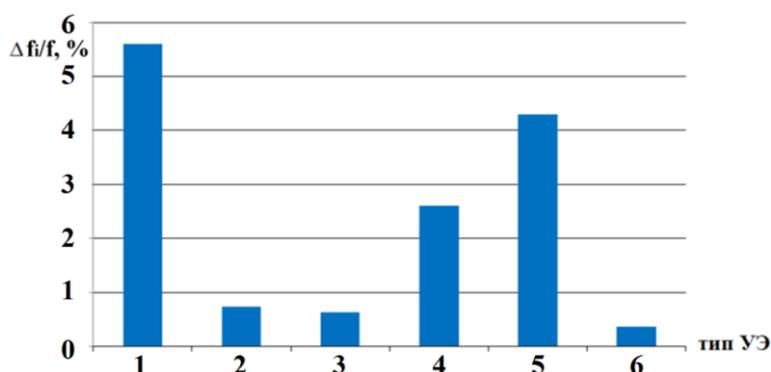


Рисунок 2 – Относительные изменения собственных частот УЭ

К конструкционным способам уменьшения температурной чувствительности упругих подвесов можно отнести применение соединяемых материалов с одинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). Использование кремния в качестве подложки вызывает большие паразитные ёмкостные связи между различными частями сенсора и может привести к невозможности измерения полезного сигнала. Для исследования температурной чувствительности используется наиболее распространённый тип применяемого в МЭМС изоляционного материала – боросиликатное стекло Borofloat 33 фирмы SCHOTT. В момент соединения кремниевый сенсор и стеклянное основание имеют одинаковые размеры. После соединения, охлаждаясь до рабочей температуры, детали меняют свои размеры неравномерно из-за разностей ТКЛР (рисунок 3), в результате чего взаимно деформируются. Вследствие деформации образуются начальные напряжения, которые могут привести к неработоспособности сенсора.

Для исследования использовался конечно-элементный анализ (КЭА) и программный продукт ANSYS. Стеклоподложка ограничивалась по перемещению вдоль оси Z , что позволяло ей свободно расширяться по осям X и Y . Для расчёта связанной задачи использовался 20-узловой элемент SOLID 226. Характеристики материалов (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, ТКЛР) бы-

ли заданы с учётом зависимостей от температуры. Исследования производятся с учётом промежуточного слоя золота, используемого для соединения кремниевого сенсора со стеклянным основанием, начальные напряжения рассчитываются, исходя из максимальной температуры соединения 320 °С, определённой экспериментально в разделе 2.3.3 полного текста диссертации. Слой оксида кремния после соединения полностью удалён. Считается, что натуральный слой оксида кремния, покрывающий сенсор со всех сторон, не оказывает влияния на собственную частоту при температурных нагрузках.

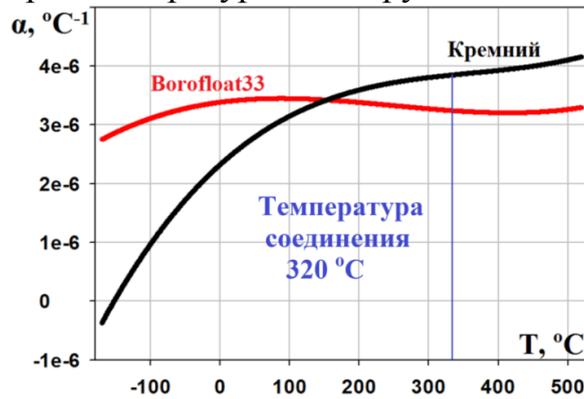


Рисунок 3 – Температурные зависимости ТКЛР кремния и стекла

Погрешности, вызванные температурой, можно минимизировать изменением конструкции упругого подвеса (рисунок 4).

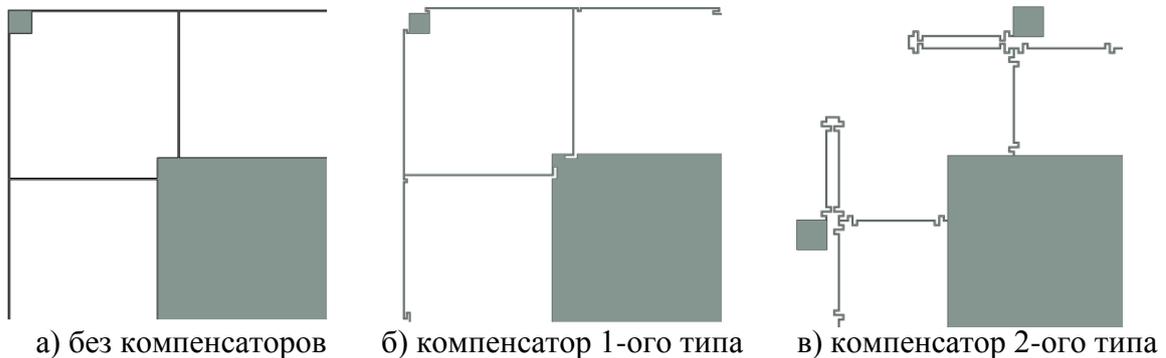


Рисунок 4 – Конструкции ХУ-подвеса

Проведённый анализ показал, что в случае, когда УЭ располагаются между двумя анкерами и закрепление УЭ происходит изнутри анкеров, упругие подвесы при деформации материала вследствие изменения температуры испытывают наибольшие внутренние напряжения. Последние вызывают изменения собственных частот. С уменьшением внутренних напряжений в конструкции, относительные изменения собственной частоты падают (рисунок 5).

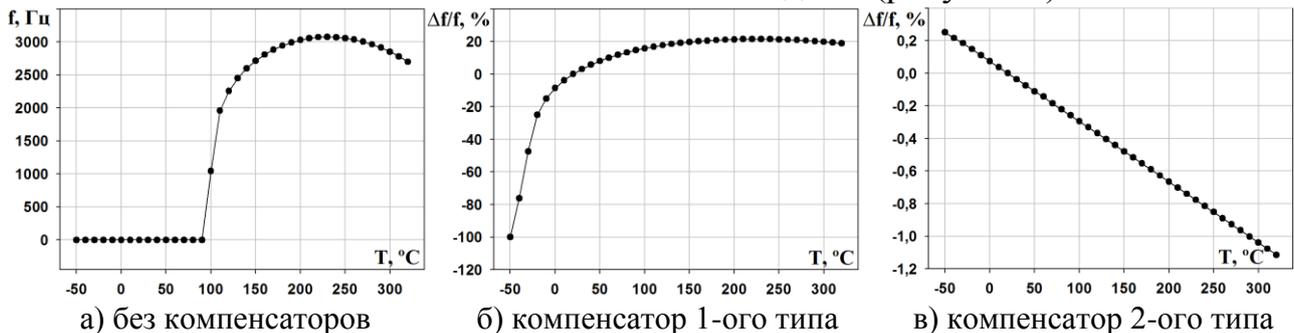


Рисунок 5 - Зависимости собственной частоты ХУ-подвесов

Для уменьшения чувствительности собственной частоты к температуре, целесообразно применять системы упругих компенсаторов (рисунок 4б) и/или конструктивно избегать расположения анкеров друг напротив друга и крепления УЭ изнутри (рисунок 4в). Изменение собственной частоты в последнем варианте конструкции составило не более 1,1% в диапазоне температур от минус 50 °С до 320 °С (рисунок 5в), что соответствует изменению характеристик материала от температуры.

При использовании технологии «кремний на стекле», где зависимости ТКЛР кремния и стекла от температуры пересекаются в точке 150 °С и температура соединения лежит выше указанной точки, упругий подвес необходимо строить таким образом, чтобы при охлаждении до комнатной температуры возникали напряжения растяжения. Далее при нагреве выше 150 °С будут возникать напряжения сжатия, для минимизации которых необходимо применять упругие компенсаторы или упругие элементы с наименьшей чувствительностью к изменениям температуры (рисунок 2). Таким образом, использование упругих компенсаторов позволяет расширить температурный диапазон применения сенсора.

На основании предложенных упругих элементов сложной формы, выполненных в виде меандра (УЭ 2 и УЭ 3), разработаны упругие подвесы, обеспечивающие перемещение вне плоскости сенсора при единой высоте чувствительной массы и упругих элементов (рисунок 6, 7). Исследуемые подвесы имеют одинаковые размеры инерционных масс и упругих элементов.

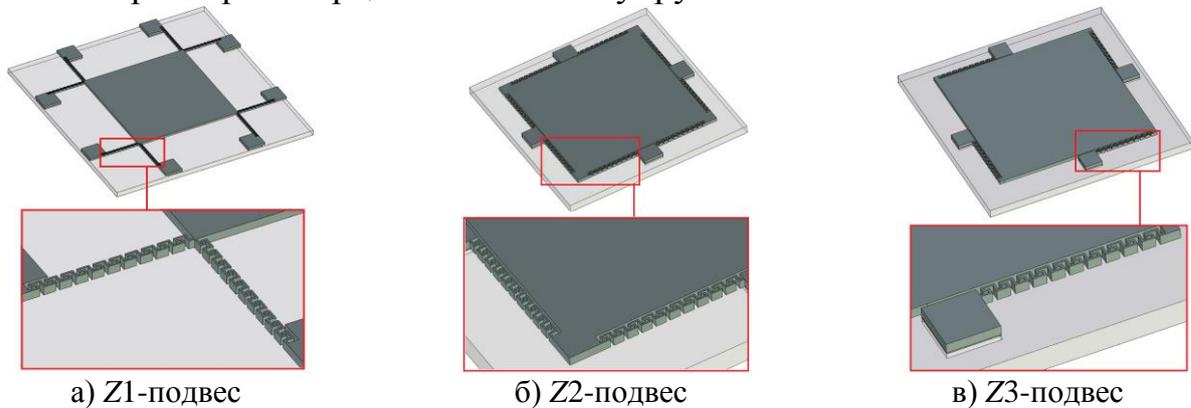


Рисунок 6 – Упругие подвесы, чувствительные по оси Z

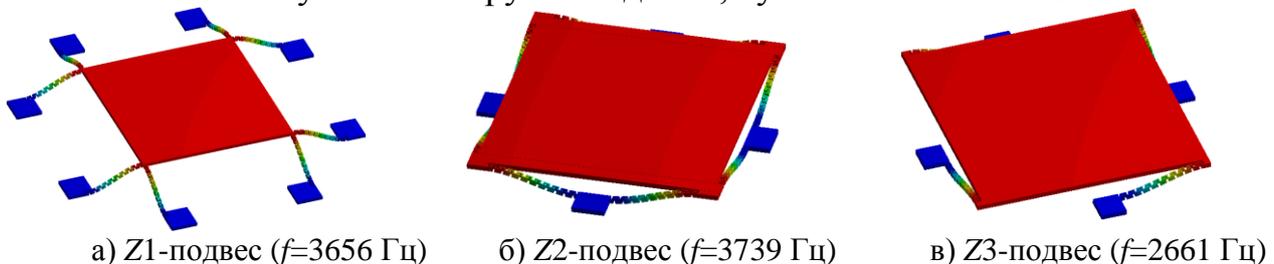


Рисунок 7 – Собственные формы колебаний упругих подвесов

Места закреплений упругих элементов Z1-подвеса располагаются внутри анкеров напротив друг друга (рисунок 6а). При деформации материала вследствие воздействия температуры УЭ испытывают внутренние напряжения. В отличие от прямых, данные УЭ, выполненные в форме меандра, деформируются гораздо легче, что значительно уменьшает внутренние напряжения, а следова-

тельно, и изменения собственных частот. Относительные изменения собственных частот не превышают 1,7 % при отрицательных температурах и 1 % при положительных температурах (рисунок 8).

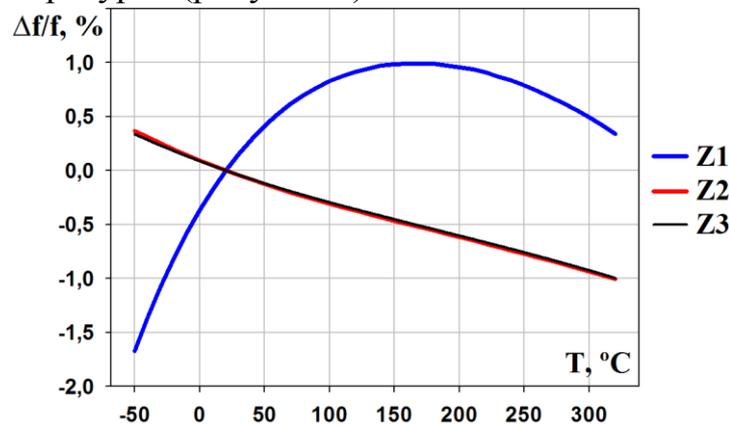


Рисунок 8- Зависимости изменения собственных частот Z-подвесов от температуры

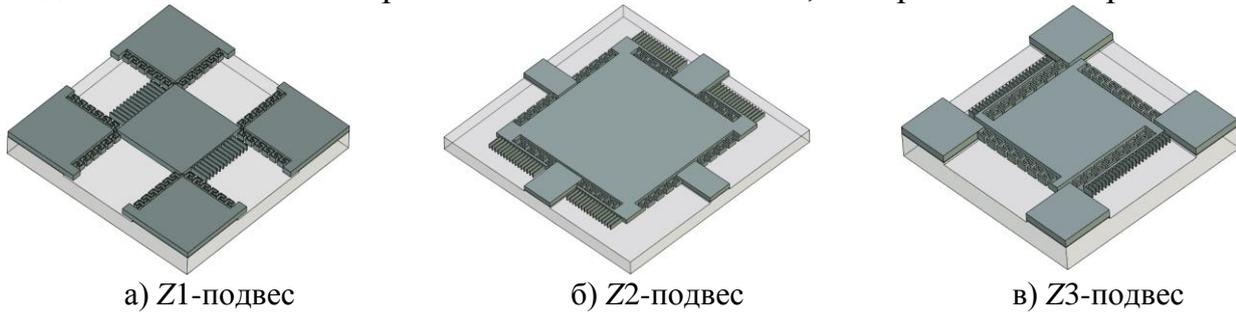
При переносе места закрепления упругих элементов в Z2-подвесе (рисунок 6б) относительные изменения собственной частоты составили не более 1,1 %, зависимость имеет линейный характер (рисунок 8). При таком расположении УЭ и температурах ниже 150 $^\circ\text{C}$ в УЭ возникают напряжения растяжения. Упругие элементы в Z3-подвесе располагаются друг за другом по замкнутому кругу (рисунок 6в). Вследствие чего, при деформации чувствительной массы подвес деформируется, поворачивая массу на некоторый угол. Сравнивая значения относительных изменений собственных частот от температуры можно сделать вывод, что значения Z2- и Z3-подвеса аналогичны. В диапазоне относительных изменений собственной частоты от температуры до 1,1 % основной вклад вносят изменения модуля Юнга и линейные изменения размеров упругих элементов.

Анализируя проведённые исследования температурной чувствительности упругих подвесов, можно сделать вывод, что с применением УЭ 3, выполненного в виде меандра, внутренние напряжения во всех типах упругих подвесов достаточно низки, что вызывает небольшие относительные изменения собственных частот. При проектировании внутренних рамок, в которых требуется перемещение чувствительной массы вне плоскости сенсора, Z3-подвес является наиболее оптимальным по габаритным параметрам.

На основании проведённых экспериментальных исследований по разработке технологии изготовления с использованием глубокого реактивного ионного травления кремния и диффузионного соединения кремния со стеклянным основанием через промежуточный слой золота, были изготовлены тестовые структуры упругих подвесов, массы которых способны перемещаться вне плоскости сенсора (рисунок 9, 10).

Анализ температурно-частотной характеристики осуществляется лазерным доплеровским методом измерения с использованием микросистемного анализатора и зондовой станции с температурной камерой. Изменение температуры задавалось в диапазоне от минус 50 $^\circ\text{C}$ до +110 $^\circ\text{C}$. Давление поддерживалось по-

стоянным на уровне 10^{-2} мбар. Возбуждение тестовой структуры осуществлялась с помощью генератора сигналов прямоугольной формы. Измерения производились только для первой собственной частоты, которая является рабочей.

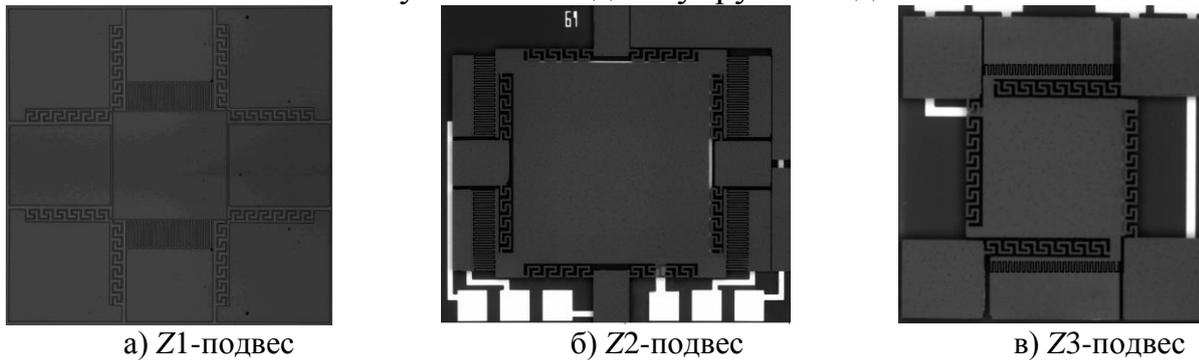


а) Z1-подвес

б) Z2-подвес

в) Z3-подвес

Рисунок 9 – Модели упругих подвесов



а) Z1-подвес

б) Z2-подвес

в) Z3-подвес

Рисунок 10 – Тестовые структуры упругих подвесов

На рисунках 11- 13 показаны зависимости собственной частоты Z1, Z2 и Z3-подвесов от температурных воздействий. Собственные частоты всех трёх Z-подвесов близки друг к другу, однако размеры инерционных масс и упругих элементов отличаются друг от друга.

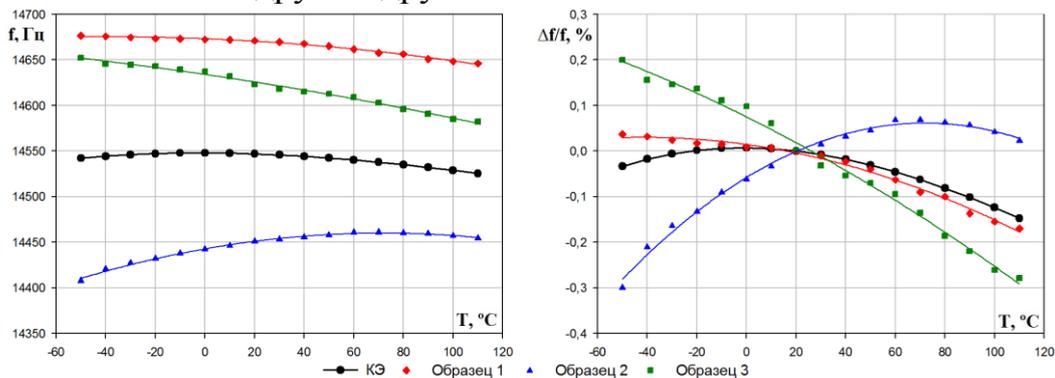


Рисунок 11 - Зависимость изменения собственной частоты Z1-подвеса от температуры

Изменение собственной частоты для зависимости, рассчитанной КЭ методом составило не более 0,15 % в диапазоне выше 80 °С. При отрицательных температурах изменение частоты составляет не более 0,04 %, где напряжения, возникающие в УЭ подвеса, частично компенсируют изменение собственной частоты от изменения модуля Юнга и кривая зависимости собственной частоты не выходит в зону положительных относительных изменений. Однако экспериментальные данные трёх образцов показали разброс параметров, наиболее близким к расчётной модели оказался образец №1. Разброс объясняется технологическими несовершенствами геометрии с расчётной моделью. В тех случа-

ях, когда напряжения, возникающие в УЭ, оказались больше расчётных, собственные частоты при отрицательных температурах уменьшаются, как в случае с образцом №2. При меньших напряжениях в УЭ подвеса компенсации недостаточно и характеристика становится более линейной и близкой к изменениям собственной частоты от модуля Юнга.

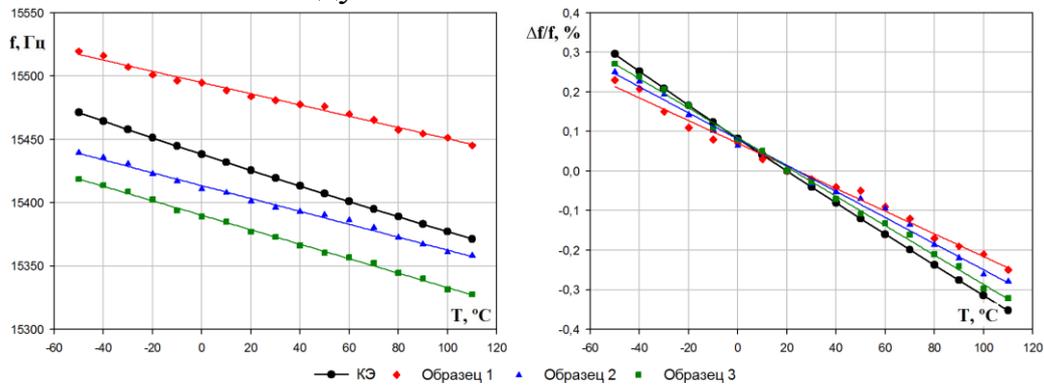


Рисунок 12 - Зависимость изменения собственной частоты Z2-подвеса от температуры

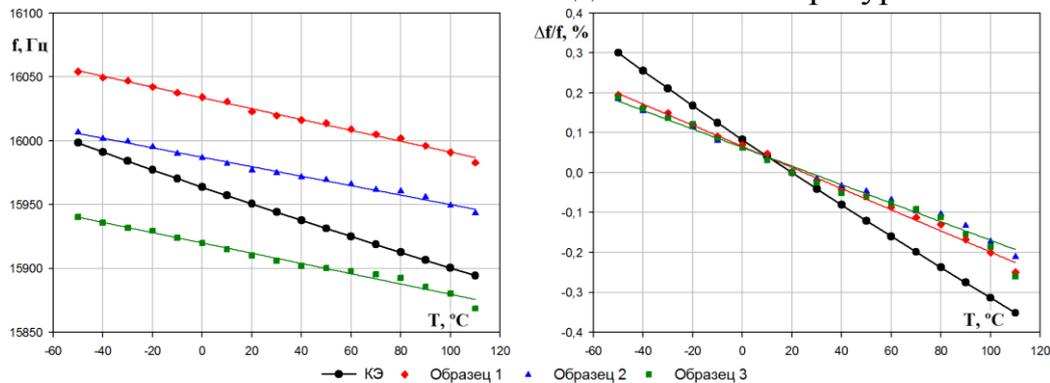


Рисунок 13 - Зависимость изменения собственной частоты Z3-подвеса от температуры

Для Z2 и Z3-подвесов экспериментальные зависимости изменения собственной частоты имеют немногим меньшее значение по сравнению с расчётными (рисунок 12, 13). Что можно объяснить как технологическими несовершенствами, так и различными свойствами материалов расчётной модели и реальной конструкции. Ошибка собственной частоты, измеренной при комнатной температуре, составила не более 0,32 % для Z2-подвеса и 0,29 % для Z3-подвеса.

Из полученных данных можно сделать вывод, что теоретический расчёт КЭ методом соответствует экспериментальным данным, полученным в ходе экспериментов. В первом приближении экспериментальные характеристики имеют линейный характер для Z2 и Z3 подвесов и нелинейный для Z1-подвеса. Отличие собственных частот, определённых опытным путём и полученных в результате КЭА составило не более 1 % для всех типов подвесов. Зависимости температурного изменения собственных частот, определённых опытным путём, отличаются до 30 % от полученных в КЭА.

Экспериментальные данные зависимости собственной частоты от температуры показали, что лучшую повторяемость результатов имеют Z2 и Z3-подвесы.

Относительные изменения собственной частоты в диапазоне от минус 50 °С до +110 °С составляют не более 0,3 %. Исследования Z1-подвеса показали, что изменения собственной частоты от изменения характеристик материала, частично компенсируются возникающими внутренними напряжениями. Рассчитанные МКЭ изменения собственной частоты от температуры составили не более 0,15 %, однако на практике разброс полученных характеристик для разных образцов показал изменение до 0,3 %.

В третьей главе приводится разработанная схема многокомпонентного гироскопа-акселерометра (МГА). Принцип работы которого поясняет схема на рисунке 14.

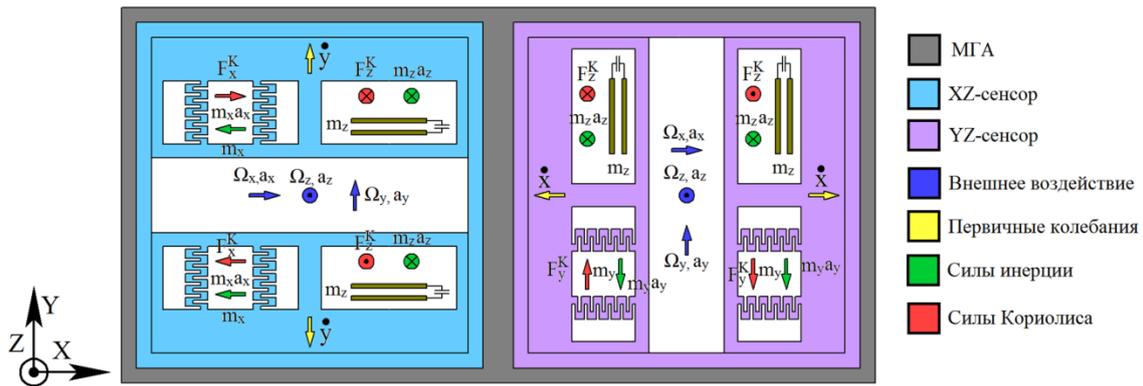


Рисунок 14 – Принципиальная схема МГА

МГА измеряет угловую скорость и поступательные ускорения основания вокруг (вдоль) осей XYZ . В состав МГА входит два одинаковых двухкомпонентных гироскопа-акселерометра (ДГА), повернутые относительно друг друга на 90° (XZ -сенсор и YZ -сенсор). XZ -сенсор измеряет угловые скорости Ω_x , Ω_z , YZ -сенсор измеряет угловые скорости Ω_y , Ω_z . Каждый сенсор состоит из двух модулей, имеющих одинаковую структуру, но совершающих первичные колебания в противоположных направлениях. Модули соединены между собой упругим элементом, что позволяет выровнять их собственные частоты.

Принцип функционирования ДГА приводится для XZ -сensors. Наружные рамки XZ -сensors совершают первичные колебания в противоположных направлениях со скоростью \dot{y} . Под действием угловой скорости Ω_z , возникают силы Кориолиса F_x^K , которые вынуждают колебаться чувствительные массы m_x сенсора также в противоположных направлениях. При воздействии угловой скорости Ω_x , чувствительные массы m_z совершают колебания вдоль оси z в противоположных направлениях. При наличии ускорений a_x по оси x , силы инерции $m_x a_x$ заставляют двигаться обе чувствительные массы m_x модулей в одном направлении. Ускорение a_z по оси z также заставляет двигаться массы m_z в одном направлении вследствие сил инерции $m_z a_z$. Аналогичным образом работает YZ -сенсор.

Таким образом, МГА способен измерять три составляющие угловой скорости и поступательного ускорения. Конструктивная схема ДГА (XZ -сенсор) с развязывающими рамками поясняется рисунком 15. Гребенчатый привод 15

возбуждает вдоль оси Y противофазные гармонические первичные колебания рамок 1, которые установлены в корпусе на упругих подвесах 6.

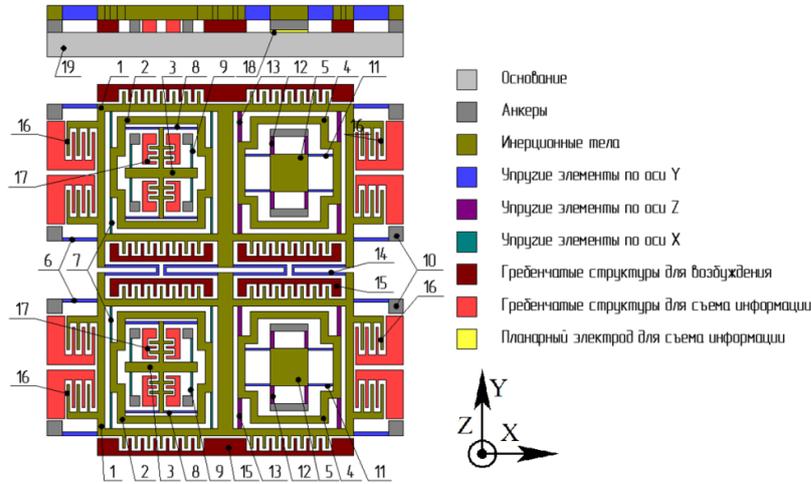


Рисунок 15 – Схема ДГА с развязывающими рамками

Рамки связаны между собой пружиной 14, что обеспечивает их первичные колебания в противоположные стороны с одной частотой. Промежуточные тела 2 и 4 совершают первичные колебания вместе с рамками 1 вдоль оси Y , так как жёсткость упругих подвесов 7 вдоль осей Y, Z намного больше их жёсткости вдоль оси X и жёсткость упругих подвесов 13 вдоль осей X, Y намного больше их жёсткости вдоль оси Z . Инерционные тела 3 соединены с развязывающими рамками 2 упругими подвесами 8, жёсткость которых вдоль оси X намного больше жёсткости вдоль оси Y , а с основанием – через упругие подвесы 9, имеющие жёсткость вдоль оси X намного меньше, чем вдоль оси Y . В результате этого инерционные тела 3 не участвуют в первичном движении вдоль оси Y .

При наличии угловой скорости Ω_z возникают силы Кориолиса, которые через развязывающие рамки 2 и упругие элементы 8, 9 возбуждают информативные колебания инерционных тел 3 вдоль оси X . Перемещения этих тел, пропорциональные скорости Ω_z , вызывают изменения ёмкостей электродных структур 17, которые входят в преобразователи ёмкость-напряжение (ПЕН). Аналогичным образом инерционные тела 5 не участвуют в первичном движении вдоль оси Y . При угловой скорости Ω_x возникают силы Кориолиса, направленные вдоль оси Z , которые через развязывающие рамки 4 и упругие элементы 11 возбуждают информативные колебания инерционных тел 5 на упругих подвесах 12 вдоль оси Z . Перемещения инерционных тел, пропорциональные скорости Ω_x , вызывают изменения ёмкостей планарных электродов 18, которые входят в преобразователи ёмкость-напряжение.

Таким образом, применение промежуточных тел позволяет изолировать информативное движение от первичного движения. Устраняется движение сенсорных электродов в направлении привода и изменение ёмкостей сенсорных электродов зависит только от их перемещения вдоль информативных осей.

На основании уравнений Лагранжа второго рода составлена математическая модель ДГА с учётом перекрёстных жёсткостей упругих подвесов. Методом конечно-элементного анализа были исследованы жёсткости упругих подве-

сов ДГА по трём осям и упрощена математическая модель. АЧХ исследуемого гироскопа-акселерометра для упрощённой математической модели приведены на рисунках 16, 17.

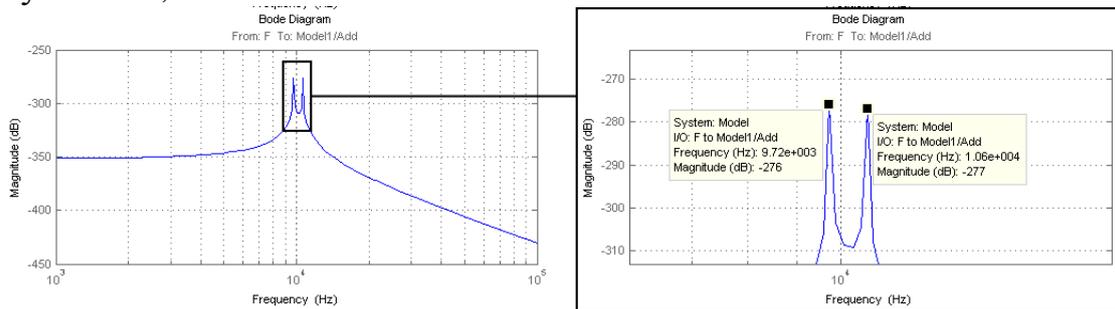
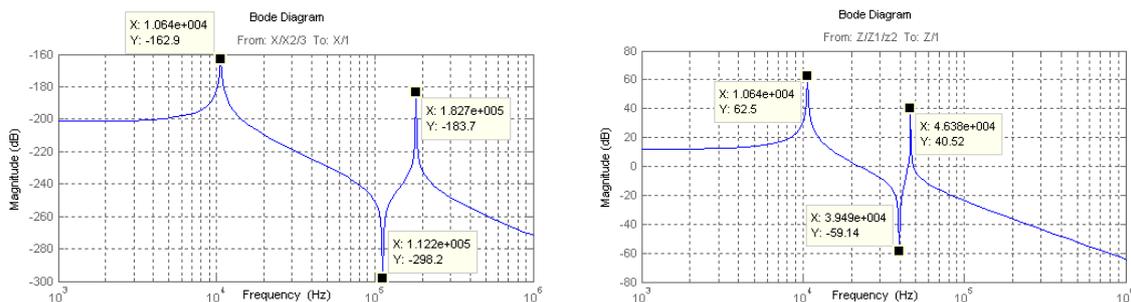


Рисунок 16 – АЧХ а первичного канала гироскопа-акселерометра

Первичный канал имеет две резонансные частоты (рисунок 16). $f_1 = 9720$ Гц – частота синфазных колебаний тел, $f_2 = 10060$ Гц – частота антифазных колебаний, которые используются в схеме возбуждения первичных колебаний микрогироскопа. По информативным осям первые пики частот определяют синфазное движение развязывающих и инерционных рамок, соответствующее рабочей частоте. Вторые пики соответствуют антирезонансному режиму, третьи – антифазному движению развязывающих и инерционных рамок.

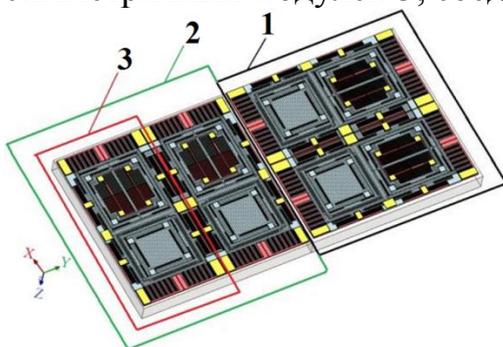


а) канал по оси X

б) канал по оси Z

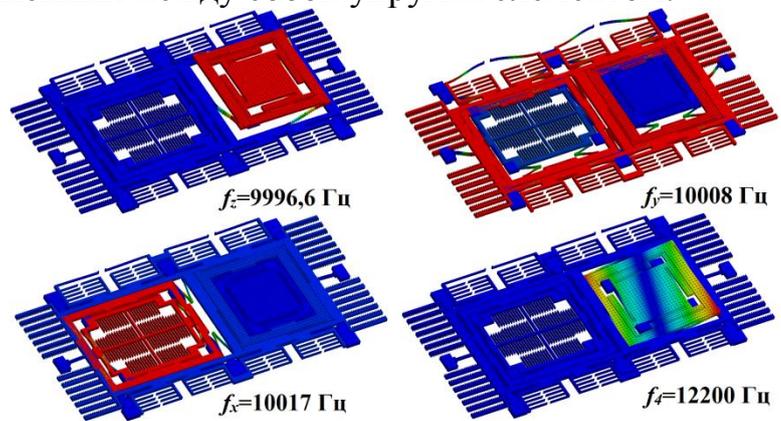
Рисунок 17 – АЧХ гироскопа-акселерометра по информативным осям

Конструкция многокомпонентного гироскопа-акселерометра приведена на рисунке 18а. Так как XZ- и YZ-сенсоры одинаковы, то исследование частотных характеристик достаточно провести для одного сенсора, который состоит двух симметричных модулей 3, соединённых между собой упругим элементом.



1 – XZ-сенсор; 2 – YZ-сенсор; 3 – модуль сенсора

а) конструкция МГА



б) Собственные частоты МДГА

Рисунок 18 – Многокомпонентный гироскоп-акселерометр

Возбуждение колебаний модулей производится вдоль одной оси Y , но в противоположных направлениях. Поскольку ДГА состоит из двух одинаковых модулей, движение которых происходит в противоположных направлениях, частотный анализ проводился для одного модуля. Результаты частотного анализа модуля ДГА (МДГА) приведены на рисунке 18б. Как показали результаты конечно-элементного анализа, собственные частоты ДГА практически полностью совпадают с результатами, полученными аналитическим методом. Ближайшая паразитная собственная частота соответствует крутильным колебаниям рамок вокруг оси Z и лежит выше рабочей на 2200 Гц, что является достаточным.

Исследования статических характеристик показало, что максимальные напряжения, возникающие в упругих подвесах, не превышают допустимых, коэффициент запаса составил 25. Квадратурные погрешности при сравнении двух типов упругих элементов для рамки, чувствительной по оси X показали, что применение упругих элементов с большей жёсткостью по перекрёстной оси вызывает меньшие погрешности. Разработаны электродные структуры ДГА и методом КЭ определены зависимости изменения ёмкостей от перемещения масс сенсора с учётом краевых эффектов.

В четвертой главе рассматривается чувствительность многокомпонентного гироскопа-акселерометра к температурным воздействиям и технологическим погрешностям.

Сравнение изменения собственных частот от температуры производилось для двух вариантов конструкций, отличающихся типами упругих элементов по оси первичных колебаний и оси X вторичных колебаний (рисунок 19). Результаты температурного анализа всей конструкции ДГА приведены на рисунке 20.

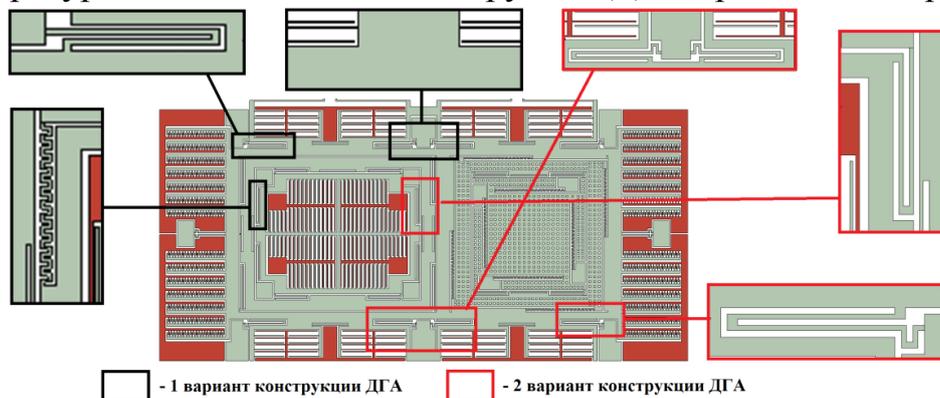


Рисунок 19 – Конструкции МДГА

Во втором варианте конструкции ДГА, зависимости собственных частот имеют близкую крутизну, поэтому данные типы УП приняты за базовые. Относительные изменения механических масштабных коэффициентов (ММК) составили не более 57 % в диапазоне температур от минус 50 °С до +110 °С. Под действием температуры также изменяются перемещения инерционных тел, соответствующие квадратурным погрешностям и ёмкости электродных структур. В большей степени изменениям подвержены начальные ёмкости электродных структур. Однако, при перемещении инерционных масс к границе диапазона перемещений при разных температурах кривизна характеристики на концах отличается, что обусловлено краевыми эффектами.

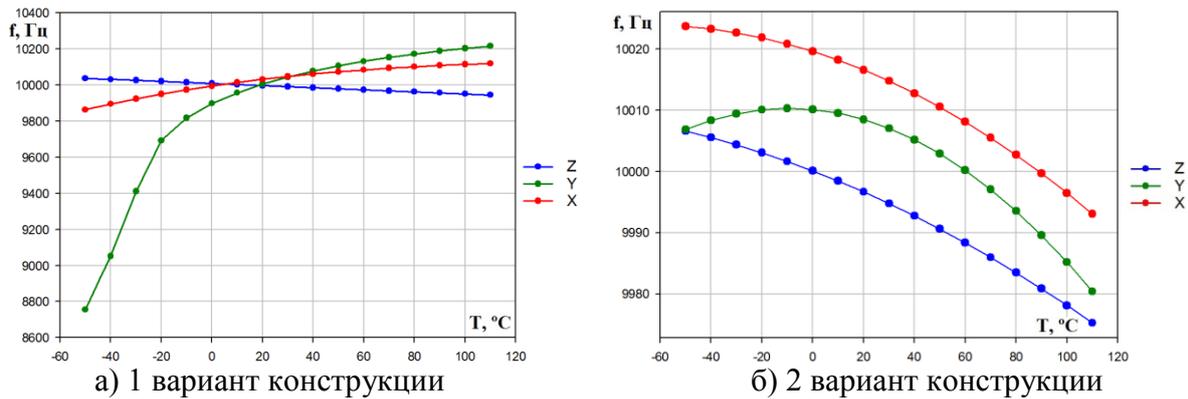


Рисунок 20 – Изменение собственных частот ДГА

Полученные аппроксимирующие функции изменения ёмкостей гребенчатых структур, собственных частот и квадратурных погрешностей от температуры и являются основой для компенсации влияния температуры и введены в математическую модель МГА. Аналитически рассчитан температурный шум МГА, равный $1,5 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Разработана методика и проведён анализ технологических дефектов на выходные характеристики МГА с учётом изменений собственных частот и ёмкостей гребенчатых структур. Наибольшему влиянию технологических погрешностей подвержена собственная частота по оси Y при изменении вертикальности профиля на 1° . Для уменьшения влияния технологических погрешностей подтравливания, изменения вертикальности профиля, ошибок фотолитографии, необходимо производить корректировку масок, которая определяется практическим путём и индивидуальна для используемого оборудования и масок. Для того чтобы ММК менялся не более 30 %, необходимо добиться ошибок подтравливания не более 50 нм в положительную сторону, при размерах меньше заданных на 10 нм ММК канала по оси Z уменьшается более 30 %. Изменение высоты сенсора должно находиться в пределах 300 нм, т.к. канал по оси Z более чувствителен к данному изменению, в сравнении с другими осями. Невертикальность стенок зависит от процесса травления (давление газов, мощность источника, времени пассивации и травления) и носит постоянный характер. Следовательно, данная погрешность должна быть заложена при проектировании конструкции микросистемы и подборе соотношения частот разных каналов.

В большей степени от технологических погрешностей изменяются начальные ёмкости электродных структур. Полученные аппроксимирующие функции являются основой для компенсации влияния технологических дефектов на собственные частоты и входят в математическую модель МГА.

Для работы микромеханических гироскопов более важным является соотношение резонансных частот первичных и информативных колебаний, а не их абсолютные значения. Температурные эффекты микрогироскопа могут быть минимизированы путём использования соответствующих компенсирующих сигналов в зависимости от температуры. В разработанной конструкции микрогироскопа частоту информативных колебаний по оси Z корректировать трудно т.к. электрод располагается только с одной стороны. Поэтому при изменении температуры корректируются частоты колебаний по осям X и Y таким образом,

чтобы они совпадали с резонансной частотой гироскопа по оси Z либо отличались от неё на определённую величину Δf .

$$f_x = f_z + \Delta f; \quad f_x = f_y + \Delta f = f_z + 2\Delta f \quad (1)$$

Способ основан на линейной зависимости частоты f_z от температуры (рисунок 20б). Для определения температуры используется зависимость резонансной частоты f_z от температуры в качестве встроенного термометра. Настройка частот осуществляется изменением жёсткости подвеса в направлении колебаний за счёт использования электростатических сил, создаваемых гребенчатыми электродами, т.е. введением дополнительной «электрической жёсткости».

В пятой главе проведено математическое моделирование многокомпонентного гироскопа-акселерометра. Моделирование режима температурной настройки с помощью создания дополнительной «электрической жёсткости» показало свою работоспособность. Во всем диапазоне температур от минус 50 °С до +110 °С амплитуда первичных колебаний сохраняется постоянной при точности источника питания в 0,1 мВ.

Моделирование показало, что ускорения не влияют на выходной сигнал, определяющий угловые скорости. При действии ускорения по соответствующим осям происходит смещение выходного сигнала относительно нуля в сторону действия ускорения. После обработки сигналов, действие ускорения на выходной сигнал по угловой скорости нивелируется. Квадратурная погрешность механической части сенсора составляет 12 °/с для всех каналов. Она является систематической погрешностью, которая может быть компенсирована алгоритмически при обработке выходного сигнала. Графики изменения ёмкостей в зависимости от угловых скоростей и ускорения представлены на рисунке 21.

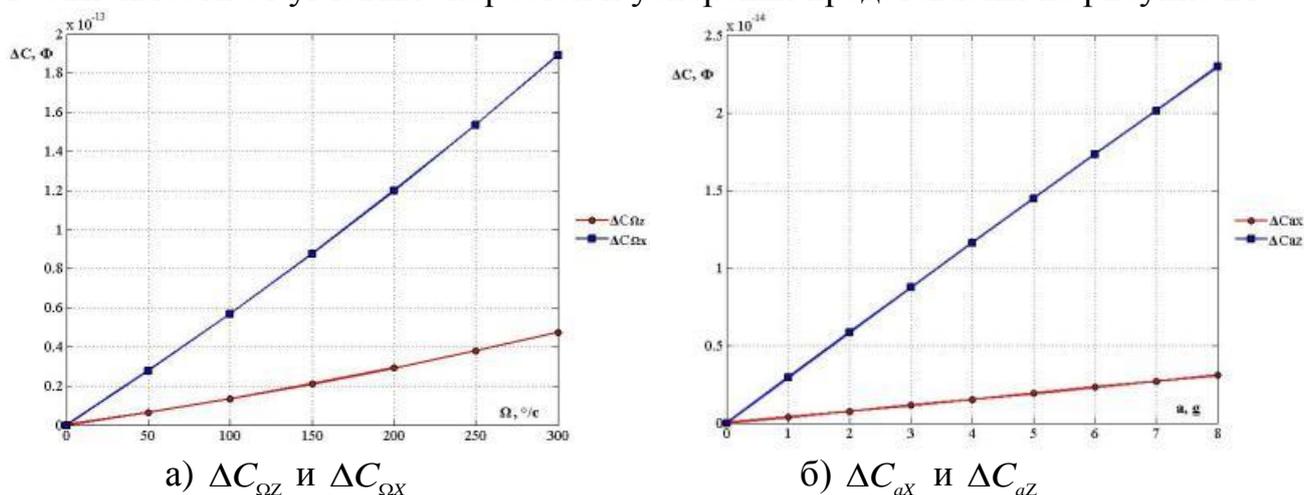


Рисунок 21 – Зависимости ёмкостей ДГА от угловых скоростей (а) и ускорений (б)

Математическое моделирование показало работоспособность системы частотной настройки сенсора микрогироскопа, при которой обеспечиваются максимальные амплитуды первичных и сенсорных колебаний. В трёхкомпонентном модуле с развязывающими рамками осуществляется развязка первичных и сенсорных колебаний. Получен алгоритм определения вектора угловой скорости и ускорения основания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным результатом диссертационной работы является решение задачи разработки научно обоснованных решений по проектированию многокомпонентных микромеханических гироскопов, позволяющих снизить влияние дестабилизирующих факторов.

Разработаны и определены температурно-частотные характеристики упругих элементов и упругих подвесов микросистем с линейно перемещающимися массами. Показано, что основной вклад в изменение собственных частот упругих подвесов при действии температурных возмущений вносят внутренние напряжения, возникающие вследствие деформации соединяемых материалов с разными ТКЛР. Исследованы конструкционные способы уменьшения температурной чувствительности собственных частот упругих подвесов. Путём применения менее чувствительных к температуре упругих элементов, расположением упругих элементов в подвесе или введением упругих компенсаторов возможно уменьшение изменения собственных частот от температуры. На основе проведённого температурного анализа предложены упругие подвесы с температурной чувствительностью менее 0,3 % в диапазоне температур от минус 50°C до +110°C.

Проведены экспериментальные исследования по разработке технологии изготовления тестовых структур на основе технологии «кремний-на-стекле» и глубокого реактивного ионного травления кремния.

Разработаны и изготовлены упругие подвесы, при использовании которых масса может перемещаться вне плоскости сенсора при планарной технологии изготовления микросистемы. Температурные изменения собственных частот упругих подвесов составляют менее 0,3 %, что подтверждено экспериментальными данными и конечно-элементным анализом.

На основе предложенного упругого подвеса разработаны функциональная и конструктивно-кинематическая схемы многокомпонентного гироскопа-акселерометра с развязывающими рамками.

Разработана математическая модель многокомпонентного гироскопа-акселерометра, позволяющая определять его основные характеристики, оценивать погрешности, обусловленные воздействием температуры и технологическими дефектами.

Проведены исследования температурной чувствительности и технологических погрешностей собственных частот гироскопа-акселерометра. Предложен принцип компенсации технологических и температурных воздействий на выходные характеристики гироскопа-акселерометра.

Показано, что применение антифазных первичных и вторичных колебаний устраняет воздействие ускорения на выходной сигнал. Квадратурные погрешности снижаются путём применения развязывающих рамок.

Дальнейшие перспективы связаны с разработкой многокомпонентных микромеханических акселерометров и гироскопов на основе предложенных конструктивных решений упругих подвесов. Что позволит изготавливать чув-

ствительный элемент за один цикл глубокого реактивного ионного травления кремния.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук:

1) **Barbin E.** Three-axis MEMS Accelerometer for Structural Inspection/ E. Barbin, A. Koleda, T. Nesterenko, S. Vtorishin // All-Russian Conference on Innovations in Non-Destructive Testing SibTest with international participation. Journal of Physics: Conference Series.-27-31 July 2015.-Volume 668.

2) **Barbin E.S.** Temperature error compensation in two-component Micro-mechanical Gyroscope / T.G. Nesterenko, E.S. Barbin, A.N. Koleda, S.V. Uchaikin // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.- 2014.- Volume 4, Issue 10.- p. 1598-1605.

3) **Барбин Е.С.** Моделирование влияния технологических дефектов на характеристики упругих подвесов микроэлектромеханических систем / Т.Г. Нестеренко, Е.С. Барбин, А.Н. Коледа // Промышленные АСУ и контроллеры.- 2013.- №7. – С. 60-66.

4) **Барбин Е.С.** Диагностика перекрёстных связей в двухкомпонентном микромеханическом датчике угловой скорости / Т.Г. Нестеренко, Е.С. Барбин, А.Н. Коледа, М.В. Пересветов, В.А. Колчужин, С.Я. Бурганова // Контроль. Диагностика. - 2012 - №11(173) - С. 46-50.

Свидетельства интеллектуальной собственности

5) **Барбин Е.С.** Интегральный микромеханический гироскоп / Т.Г. Нестеренко, Е.С. Барбин, О.В. Лысова, А.Н. Коледа, В.А. Колчужин // Патент на изобретение № 2503924 от 10.01.14, приоритет от 30.05.2012, Российская Федерация, 2014.

Иные публикации и материалы конференций

6) **Barbin E. S.** Metrological performance of integrated multiple axis MEMS accelerometers under thermal effect / T. G. Nesterenko, E.S. Barbin, A.N. Koleda, A.A. Arshinova // Proceedings of XXI IMEKO World Congress: Measurement in Research and Industry.- August 30 - September 4 2015, Prague, Czech Republic.- pp. 2148-2152.

7) **Barbin E. S.** Three-component microelectromechanical accelerometer / E.S. Barbin, A.N. Koleda, T.G. Nesterenko // Proceedings of 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015.- 25-27 May 2015.-pp.338–342.

8) **Barbin E.S.** Simulation of a micromechanical gyroscope at a system level / E.S. Barbin, A.N. Koleda, T.G. Nesterenko, V.A. Kolchuzhin // Proceedings of 20th Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems, 27-29 May 2013, Saint-Petersburg, Russia, p. 169-172.

9) **Барбин Е.С.** Микроэлектромеханический гироскоп с промежуточными телами / Е. С. Барбин, А. Н. Коледа, С. Е. Вторушин, Т.Г. Нестеренко // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 5-9 октября 2015 г. в 2 т. – Т. 1. – С. 258-260.

10) **Barbin E.S** Effect of the anisotropy of monocrystalline silicon mechanical properties on the dynamic characteristics of a micromechanical gyroscope / T. G. Nesterenko, S.E. Vtorushin, E.S. Barbin, A.N. Koleda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81: Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – 8 P.

11) **Барбин Е.С.** Влияние температуры на микромеханический резонатор/ Е. С. Барбин, А. Н. Коледа, Т. Г. Нестеренко // Современные техника и технологии : сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 апреля 2013 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . – 2013. – Т. 1. С. 123-124.

12) **Барбин Е.С.** Электрические схемы емкостных датчиков микромеханического гироскопа [Электронный ресурс] / С. Я. Бурганова, Е. С. Барбин, А. Н. Коледа, Т. Г. Нестеренко // Современные техника и технологии : сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 апреля 2013 г. в 3 т. – 2013. – Т.1. – С. 135-136.

13) **Барбин Е.С.** Методика автоматизированного проектирования микромеханического гироскопа с использованием программ конечно-элементного анализа / А. Н. Коледа, Е. С. Барбин, Т. Г. Нестеренко // Современные техника и технологии : сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 15-19 апреля 2013 г. в 3 т. – 2013. – Т.1. – С. 168-169.

Барбин Евгений Сергеевич

Динамика многокомпонентного микромеханического гироскопа-акселерометра с развязывающими рамками. Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук. Подписано в печать 12.10.2016. Заказ № 3203 Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Типография ООО «Копи-М», г. Томск, Мокрушина, 1а, Тел.56-42-48