МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

На правах рукописи

Волкова Екатерина Ивановна

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЭМС-ВАКУУММЕТРА С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Специальность 2.2.2 – Электронная компонентная база микрои наноэлектроники, квантовых устройств

> Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> > Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук Попков Сергей Алексеевич

Нижний Новгород – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР МИКРОВАКУУММЕТРОВ	11
1.1. Существующие решения современных микродатчиков вакуума	11
1.2. МЭМС-вакуумметры резонансного принципа действия	19
1.2.1. Преимущества использования кремниевых МЭМС-резонаторов	19
1.2.2. Концепция измерения давления по величине добротности в МЭМС-вакуумметрах	21
1.3. Теоретическое обоснование функционирования ЧЭ МЭМС-вакуумметра	24
1.3.1. Электростатический способ преобразования	24
1.3.2. Подходы к созданию математической модели МЭМС-резонатора	27
1.3.2.1. Модель деформируемого твердого тела	28
1.3.2.2. Модель динамической системы	30
1.3.2.3. Модель эквивалентной электрической схемы	33
1.3.3. Основные механизмы демпфирования в ЧЭ МЭМС-вакуумметра	34
1.3.3.1. Эффект демпфирования сдавленной газовой пленки	36
1.3.3.2. Эффект демпфирования скользящей газовой пленки	40
1.3.3.3. Термоупругое демпфирование	42
1.3.4. Эффект втягивания	44
1.4. Выводы по главе 1	49
ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА	50
2.1. Кремний – конструкционный материал для МЭМС	50
2.2. Технологические процессы создания МЭМС	51
2.3. Разработка технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра	57
2.4. Выводы по главе 2	66
ГЛАВА З. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИ	ПОВ
СОЗДАНИЯ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА	67
3.1. Численное моделирование ЧЭ МЭМС-вакуумметра	67
3.1.1. Модель резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра	70
3.1.1.1. Расчет параметров резонатора в зависимости от формы и конфигурации встр	ечно-
штыревой структуры	71
3.1.1.2. Выбор и оптимизация формы подвеса резонатора	79
3.1.2. Расчет добротности резонатора с учетом механизмов демпфирования	86
3.1.2.1 Расчет добротности резонатора методом конечных элементов	86

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
4.4. Выводы по главе 4	128
4.3. Результаты схемотехнического моделирования	123
4.2. Разработка электрической схемы генератора	117
4.1. Расчет эквивалентной электрической схемы ЧЭ МЭМС-вакуумметра	115
СИГНАЛА МЭМС-ВАКУУММЕТРА	115
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТ	КИ
3.3. Выводы по главе 3	113
3.2. Анализ результатов исследования экспериментального образца ЧЭ МЭМС-вакуумметра	109
3.1.4. Моделирование внешних воздействующих факторов	100
3.1.3. Моделирование эффектов, связанных с электростатическим воздействием	. 98
3.1.2.3. Оптимизация конструкции резонатора для увеличения чувствительности	. 96
3.1.2.2. Сравнение результатов моделирования с аналитическим расчетом	. 90

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день разработка отечественных устройств микросистемной техники – микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков является важнейшей задачей по созданию конкурентоспособной, экономически эффективной продукции нового поколения. Развитие микросистемной техники может стать важным этапом в технологическом развитии отечественной электронно-компонентной базы, тем самым обеспечив превосходство страны в промышленном, научном и военном секторах.

Миниатюризация является основной движущей силой развития полупроводниковой электроники, и МЭМС как ее неотъемлемая часть обладает важными преимуществами по сравнению с традиционными системами такими как: высокие показатели надежности и стойкости, долговечность, повышенная применимость, низкие затраты на этапе производства. Наиболее значительные результаты по изготовлению МЭМС достигнуты благодаря микроэлектронным технологиям, а также успешно развиваемым технологиям капсулирования, трехмерной сборки, высокоплотной интеграции с использованием различных новых материалов и новых технологических процессов [1]. Это в значительной степени касается МЭМС, которые за счет эффективной интеграции друг с другом могут вырасти до более функциональных интеллектуальных систем на одном чипе [2]. Одним из таких примеров является МЭМС-вакуумметр.

МЭМС-вакуумметры стали одними из наиболее востребованных технических продуктов, их широкое внедрение в различных областях и спектр применений стимулируют рост рынка. Прогнозируется, что глобальный рынок МЭМС-датчиков давления, включающих, в том числе, и МЭМС-вакуумметры, к 2026–2027 годам достигнет 2,214–3,87 миллиардов долларов при совокупном годовом темпе роста 5,1–7,12 % (по данным компаний Yole Group и Maximize Market Research). Большой спрос в МЭМС-вакуумметрах наблюдается в вакуумной микроэлектронике.

Известно, что развитие вакуумной микроэлектроники как целого направления в микросистемах является концептуальным продолжением полупроводниковой технологии. Вакуумная микроэлектроника совместима с отработанными технологическими процессами, может обеспечить присущие полупроводниковой технологии низкую стоимость, масштабируемость и простоту изготовления. Вакуумные автоэмиссионные микроприборы имеют ряд преимуществ перед полупроводниковыми приборами. Это, прежде всего, стойкость к воздействию космического излучения, стабильная работа в широком диапазоне температур от - 100°C до +300°C, безынерционность, относительно низкое энергопотребление, высокая вибро- и ударостойкость.

Базовый принцип функционирования вакуумной микроэлектроники – это создание высокого вакуума в микрополости, где возникает холодная эмиссия носителей заряда. Для корректной работы устройств вакуумной микроэлектроники измерение уровня вакуума является необходимым процессом. Следовательно, МЭМС-вакуумметр является одним из неотъемлемых элементов для приборов вакуумной микроэлектроники нового поколения.

Помимо устройств вакуумной микроэлектроники существует ряд МЭМС-датчиков, требующих вакуумной герметизации, для которых отсутствие вакуума или его низкий уровень значительно сказывается на их работоспособности. Герметизация чувствительных элементов (ЧЭ) таких устройств влияет на надежность и долговечность их работы [3]. К таким устройствам относятся МЭМС-акселерометры, МЭМС-гироскопы, радиочастотные МЭМС-переключатели, ультразвуковые МЭМС-датчики, которым необходим вакуум для уменьшения газового демпфирования, что позволяет обеспечить стабильность выходных характеристик и увеличить чувствительность. МЭМС-детекторам инфракрасного излучения (МЭМС-болометрам) требуется вакуум высокого уровня для изоляции теплопередачи. Широко используемым МЭМС-датчикам абсолютного давления необходима вакуумная полость в качестве эталона нулевого давления [4]. Поэтому отслеживание уровня вакуума в полостях, где располагается ЧЭ, в процессе всего срока службы очень важно для оценки надежности данных устройств. При этом стандартные методы обнаружения утечек [3] не могут быть использованы ввиду чрезвычайно малых размеров вакуумных полостей, полученных при корпусировании на уровне пластины.

На отечественном рынке наблюдается нехватка высокоточных средств измерений низких давлений. Разработка МЭМС-вакуумметра, позволяющего получить сигнал высокого разрешения, представляет собой важную, сложную и актуальную задачу. МЭМС-вакуумметр может быть интегрирован на единой платформе с устройством вакуумной микроэлектроники и ЧЭ прибора, уровень вакуума которого необходимо контролировать, или может оставаться отдельным полнофункциональным устройством. На сегодняшний момент, когда решены основные вопросы построения, конструирования и технологии изготовления МЭМС-датчиков, на первый план выступает проблема повышения их чувствительности и точности.

Передовые дизайн-центры идут по пути использования компьютерных технологий в процессе разработки. Численное моделирование является неотъемлемой частью современного производства микроэлектроники и изделий микросистемной техники. Процесс проектирования и производства МЭМС должен быть контролируемым и воспроизводимым. Особенность разработки МЭМС состоит в учете разнообразных физических процессов и их связей, свойств применяемых материалов, действия сил, характерных для микромасштаба, вызванных эффектов, в том числе нелинейных. Ввиду последнего, на первый план выходят проблемы, связанные с

5

построением и использованием точных математических моделей, в частности электронных моделей, используемых в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Моделирование МЭМС позволяет разрешить ряд проблем, возникающих при разработке, таких как: выбор параметров отдельных технологических операций, расчет характеристик чувствительного элемента, определение параметров электрической схемы обработки сигнала.

Следовательно, научная работа, определяющая возможности создания прецизионных моделей МЭМС с контролируемыми параметрами и проведения комплексного моделирования с использованием программных инструментов, является актуальным направлением научнотехнических исследований.

Цели и задачи работы

<u>Целью работы</u> является разработка и исследование физических основ создания МЭМСвакуумметра, позволяющего измерять уровень вакуума в заданном диапазоне значений.

Для достижения заданной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести обзор существующих научно-технических решений и определить решение, способное измерять уровень вакуума в микрополостях или ограниченных объемах и отвечающее ряду критериев (совместимость с КМОП технологией, повышенная применимость, высокая чувствительность).

2. Разработать расчетную модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра, на основе которой провести расчет основных характеристик с учетом механики деформируемого твердого тела, газодинамического и термоупругого демпфирования, электростатического взаимодействия.

3. Разработать маршрут изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра с рассчитанными параметрами модели.

4. Провести экспериментальные измерения и исследования выходных характеристик изготовленных образцов ЧЭ МЭМС-вакуумметра;

5. Произвести расчет эквивалентной электрической схемы ЧЭ МЭМС-вакуумметра и разработать принципиальную электрическую схему управления и обработки сигнала.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Предложен МЭМС-вакуумметр с маятниковым резонатором из монокристаллического кремния для прецизионного отслеживания давления остаточных газов по величине добротности, изменяющейся под действием эффектов термоупругого и вязкого газодинамического демпфирования.

2. Разработана расчетная модель чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра, учитывающая действие электростатических, упругих сил, нормальных и тангенциальных сил вязкого трения в газовой среде, возникновение температурного градиента при деформациях.

3. Предложен способ повышения чувствительности резонансного МЭМС-вакуумметра за счет увеличения коэффициента вязкого демпфирования при увеличении эффективной площади взаимодействия с молекулами газа остаточной среды в системе дополнительных конструктивных элементов – демпферов.

4. Предложен способ стабилизации рабочей частоты чувствительного элемента МЭМСвакуумметра, обеспечивающей малое число сжимаемости газа в микрообъеме для максимального проявления эффектов вязкого газодинамического демпфирования, стабильность работы при электростатическом способе управления и стойкость к внешним механическим факторам, за счет использования подвеса с изменяющейся жесткостью.

5. Разработан технологический маршрут создания чувствительного элемента МЭМСвакуумметра с монокристаллическим кремниевым резонатором, позволяющий изготовить чувствительный элемент с заданным аспектным соотношением, необходимым для достижения параметров, обеспечивающих его корректное функционирование, и совместимый с КМОП технологией.

6. Предложена компактная электрическая схема, позволяющая управлять работой ЧЭ МЭМС-вакуумметра и снимать его выходную характеристику. Разработанная схема может быть интегрирована на едином кристалле с чувствительным элементом для создания МЭМС-вакуумметра с малым энергопотреблением.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Конструктивное решение в виде системы демпферов в разработанном ЧЭ МЭМСвакуумметра позволяет повысить чувствительность прибора.

2. Разработанный МЭМС-вакуумметр позволяет измерять давление (10⁻³–10³ Па) и реализуем как в интегральном исполнении (с устройствами вакуумной микроэлектроники или ЧЭ прибора, уровень вакуума которого необходимо контролировать), так и в качестве отдельного полнофункционального устройства.

3. Выработанные решения, модели и проведённые исследования применимы в качестве методической базы для проектирования широкого класса резонансных МЭМС-датчиков.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы теоретической механики, сопротивления материалов, электростатики, теории упругости анизотропных сред, нелинейной

7

динамики, газодинамики, термодинамики твердых тел, методы конечно-элементного анализа, схемотехнического моделирования, экспериментальные методы исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Нелинейные эффекты, связанные с уменьшением эффективной жесткости под воздействием приложенного напряжения, изменение добротности в зависимости от величины давления остаточных газов, возникающее вследствие механизмов термоупругого и вязкого газодинамического демпфирования, могут быть корректно описаны в рамках созданной расчетной модели чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра с монокристаллическим кремниевым резонатором.

2. Течение газа в рабочем зазоре разработанного чувствительного элемента МЭМСвакуумметра может быть описано модифицированным уравнением Рейнольдса в приближении математической модели вязкого несжимаемого газа Старра в области торцевых поверхностей пальцев электродов и системы демпферов и в приближении математической модели скольжения вязкого газа Стокса в области между боковыми поверхностями пальцев электродов.

3. Чувствительность разработанного МЭМС-вакуумметра в диапазоне 10⁻³–10⁻¹ Па возрастает в 18–20 раз за счет увеличения коэффициента вязкого демпфирования, связанного с эффектом демпфирования сдавленной газовой пленки в системе дополнительных демпферов.

4. Стабильность работы и стойкость МЭМС-вакуумметра к внешним механическим воздействиям достигается за счет обеспечения эффективной жесткости подвеса с нелинейными характеристиками.

Степень достоверности результатов исследования

Обеспечивается использованием корректных математических приемов, используемого современного программного обеспечения, многократно апробированного исследовательскими группами в России и за рубежом, и измерительного оборудования, согласованием результатов, полученных в ходе численного моделирования, с экспериментальными данными, изготовлением образцов чувствительных элементов на базе высокотехнологического участка изготовления изделий микросистемной техники.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях, сессиях, форумах:

 XVII всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и наноэлектроника», г. Суздаль, Россия, 14–18 мая 2018 г.;

- XIII научно-техническая конференция «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе», г. Нижний Новгород, Россия, 20–22 сентября 2018 г.;
- всероссийская конференция «Спецстойкая микроэлектроника 2019», г. Дзержинск, Россия, 10–11 апреля 2019 г.;
- XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), г. Нижний Новгород, Россия, 21–24 мая 2019 г.;
- XIV научно-техническая конференция молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе», г. Нижний Новгород, Россия, 26–28 сентября 2019 года.;
- международный форум «Микроэлектроника-2020», г. Ялта, Россия, 28 сентября–3 октября 2020 г.;
- IX всероссийская научно-техническая конференция МЭС-2020 «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2020», г. Москва, г. Зеленоград, 5–9 октября 2020 г.

По результатам исследований и докладов по теме работы был получен диплом за 1 место на конференции «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе», диплом 1 степени в конкурсе работ молодых специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ по направлению «Научно-исследовательские теоретические и экспериментальные работы в области точных, инженерных и естественных наук», стипендии им. академика Г.А. Разуваева за 2019–2020 и 2020–2021 годы.

Личный вклад автора

получение определяющий Автором внесен вклад в основных результатов диссертационной работы: поиск, анализ и обобщение литературных данных; разработка конечноэлементных и расчетных моделей чувствительных элементов, моделирование и топологическая оптимизация; обоснование и аналитические расчеты применяемых моделей; расчет параметров эквивалентной электрической схемы чувствительного элемента; разработка топологии чувствительного элемента. Проработка конструктивных решений чувствительных элементов, экспериментальные исследования, расчет конструктивно-технологических параметров, анализ полученных результатов, подготовка публикации проводились совместно с научным руководителем С.А. Попковым. Разработка технологического маршрута изготовления чувствительного элемента, разработка и моделирование схемы управления и обработки сигнала проводились совместно с рабочей группой (филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»).

Публикации

По материалам работы опубликовано 8 научных работ: 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 3 публикации в материалах международных и всероссийских конференций, получен 1 патент на изобретение «Микроэлектромеханический вакуумметр».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 121 наименования. Диссертация изложена на 139 страницах и включает 124 рисунка, 118 формул и 4 таблицы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МИКРОВАКУУММЕТРОВ

1.1. Существующие решения современных микродатчиков вакуума

Требование к миниатюризации датчиков измерения низких давлений неуклонно ужесточается, вследствие расширения областей их применения. Дизайн современных МЭМСдатчиков и приборов вакуумной микроэлектроники требует совершенно нового подхода для контроля уровня вакуума в микрополостях, образованных при герметизации на уровне пластины, или в корпусах при герметизации на уровне кристалла. Проверка давления остаточных газов во время всего срока службы важна для того, чтобы сделать вывод о надежности прибора. Поэтому необходимо оценивать уровень вакуума не только в вакуумной камере, где происходит герметизация, но и использовать специализированные миниатюрные вакуумметры, помещенные в рабочий объем, где находится чувствительный элемент или микротриод, позволяющие отслеживать изменение уровня вакуума в режиме реального времени.

Тепловые микродатчики – одно из популярных решений для измерения давления разреженного газа. Принцип работы таких устройств основан на измерении зависимости теплопроводности разреженного газа от давления [6-8].

Представленный в работе [6] микродатчик Пирани содержит полость для перемещения воздуха за счет свободной конвекции, изолирующий слой над полостью с нанесенным на него пленочным платиновым резистором (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Трехмерная модель ЧЭ микродатчика Пирани и его фотография [6]

Микродатчик изготовлен с помощью поверхностной микрообработки (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Процесс изготовления микродатчика Пирани [6]

Датчик действует как нагреватель во время работы. Теплопотеря нагретой пленки в окружающую среду за счет газопроводности пропорциональна молекулярной плотности газа в вакуумной системе. Когда на датчик подается ток, его температура повышается, воздух вокруг него нагревается, в полости устанавливается свободная конвекция. Выходной ток изменяется при изменении температуры. Измеряя разность токов, можно получить давление в микрополости. На рис. 1.3 показан профиль зависимости давления от температуры.



Рисунок 1.3 – Профиль зависимости давления от температуры микродатчика Пирани [6]

Из рис. 1.3 видно, что температура пленочного платинового резистора изменяется одновременно при изменении давления вакуума. Таким образом, при изменении температуры изменяется сопротивление резистора, давление вакуума может быть получено путем измерения выходного напряжения с помощью мостовой схемы.

12

Представленный в работе [6] микродатчик Пирани позволяет измерять давление от 1 до 1000 Па (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Зависимость напряжения от давления для разных кристаллов микродатчика Пирани [6]

Решения микродатчика Пирани представлены в работе [7]. Описанные в работе микродатчики изготовлены с помощью объемной микрообработки. Один из микродатчиков представляет из себя мембрану из Si₃N₄ с нанесенным на нее резистором из Cr/Au с помощью процесса «отрыва» (рис. 1.5 а). Другой – «Н»-образный резистор из Ni на Si₃N₄ изготовлен с помощью жидкостного травления, что позволяет повысить тепловое сопротивление по сравнению с микродатчиком мембранного типа (рис. 1.5 б).



Рисунок 1.5 – Фотографии ЧЭ микродатчика Пирани мембранного типа – а и «Н»-образного типа – б [7]

В работе [7] показано, что при нагревании резистора лазером, а не при джоулевом нагреве, как в классическом случае, зависимость сопротивления от давления смещается в сторону более низких давлений. Предполагается, что использование такого способа позволит измерять давление в диапазоне до 10⁻⁵ торр (~ 10⁻³ Па) (рис. 1.6 а), при этом измерение возможно осуществить в вакуумной камере, в микрополостях технически это не представляется возможным (рис. 1.6 б).



Рисунок 1.6 – Изменение относительного сопротивления (%) в зависимости от давления «Н»образного микродатчика Пирани при нагреве лазером и при джоулевом нагреве – а, схематическое изображение измерительного устройства – б [7]

В работе [8] представлен интегральный термопарный вакумметр, который состоит из поликремниевого нагревателя и 38 термопар поликремний/алюминий, изготовленный с использованием изотропного травления (рис. 1.7, 1.8 а). Подача постоянной мощности на вакуумметр позволяет достичь большей чувствительности по сравнению с подачей постоянного напряжения (рис. 1.8 б).



Рисунок 1.7 – Фотография термопарного вакуумметра [8]



Рисунок 1.8 – Процесс изготовления термопарного вакуумметра – а, изменение выходного напряжения для режима постоянного напряжения и режима постоянной мощности в зависимости от давления – б [8]

Интегральный термопарный вакуумметр позволяет измерять давление в диапазоне 10⁻²– 10⁵ Па. Использование тепловых вакумметров различных конфигураций с p-n диодами [9, 10] позволяет достичь диапазона измеряемых давлений 2.10⁻³–10⁵ Па.

Другой тип зарубежных микродатчиков давления разрежения – ионизационные вакуумметры, которые в последнее время имеют тенденцию к миниатюризации. Принцип действия ионизационных вакуумметров основан на измерении тока ионов, образованного в результате ионизации газа, или электропроводности в зависимости от давления [11-19].

Измерение давления с помощью ионизационных датчиков невозможно без наличия эмитированных электронов. За исключением датчиков с холодным катодом, термоэмиссионные катоды чаще всего используются для генерации электронов в датчиках с горячей нитью накаливания или масс-спектрометрах. При относительно небольших электронных усилиях можно генерировать почти произвольный ток излучения от нескольких микроампер до нескольких миллиампер и поддерживать его путем регулирования мощности нагрева катода. При этом такие датчики обладают рядом недостатков, таких как нарушение термодинамического равновесия, необходимого для достоверного отношения плотности частиц и давления, высокое энергопотребление, тепловое и световое излучение в окружающую среду, термическое выделение газов из катода и измерительных материалов окружения, эффект химической накачки за счет испарения материалов катода, эффекты механической усталости, влияние газовой атмосферы на эмиссию электронов, разрушение катода под влиянием вибраций, химические реакции остаточных газов на поверхности катода, изменение чувствительности датчика путем изменения положения катода вследствие теплового расширения горячей нити [11].

15

Поскольку датчики с термоэмиссионными катодами использовались в качестве вторичных эталонов для измерения давления в диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума, чтобы преодолеть проблемы с катодом, описанные выше, исследователи стремились образования использовать альтернативные механизмы эмитированных электронов: фотоэмиссию, вторичную электронную эмиссию, полевую эмиссию [11]. Для фотоэмиссии требуются источники ультрафиолетового света с высокой интенсивностью, кроме того, она обеспечивает низкую плотность тока излучения электронов и сильно подвержена влиянию адсорбции. Вторичная электронная эмиссия требует первичных электронов или ионов и так же зависит от адсорбции газа. Следовательно, в качестве альтернативного механизма электронной эмиссии можно использовать только эффект полевой эмиссии. Такие катоды на основе эффекта полевой эмиссии обычно работают при температуре, близкой к комнатной, поэтому называются холодными катодами [11].

В работах [12-18] представлены вакуумметры, использующие различные типы источников электронов с холодным катодом (кремниевые матрицы, матрицы типа Спиндта, полевые эмиттеры на основе углерода, катоды с МИМ-структурой (металл-изолятор-металл), с p-n переходом).

В основе полевой эмиссии лежит квантово-механический эффект туннелирования электронов. Классические катоды из металлических наконечников обладают низкой стабильностью излучения, зависящей от состава остаточного газа. Поэтому применяются, так называемые, двойные барьерные системы W–WOx–Au и W–Al₂O₃–Au, использующие резонансный туннельный эффект [12]. Это позволяет увеличить и стабилизировать электронный ток в течение длительного периода времени.

Другим типом катода является катод с МИМ-структурой, он состоит из двух металлических электродов, разделенных тонкой пленкой изолятора (оксидная, нитридная, фторидная или полимерная пленка) толщиной несколько нанометров [13]. Между металлическими электродами подается напряжение, генерирующее в изолирующей пленке достаточно сильное поле, чтобы высвободить электроны из металла первого электрода. Они могут проникать сквозь пленку под действием поля и достигать второго электрода, рассеиваясь на атомах металла. Небольшая часть электронов, минуя изолирующую пленку, может испускаться в вакуум. Типичные структуры МИМ-катодов представлены на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Структуры МИМ-катодов [13]

16

Еще один тип – катоды с p-n переходом, образованные p-подложкой, покрытой тонкой nпленкой [10]. При обратном смещении, электроны могут ускоряться в обедненной зоне, они теряют энергию при столкновениях с фононами и ударной ионизации. В равновесном состоянии энергия электронов гораздо выше тепловой. Электроны с энергией больше, чем работа выхода, могут туннелировать в вакуум, но выход таких электронов очень мал.

В настоящее время источниками холодных электронов являются массивы микроизлучателей Si или Mo [14, 15]. Первый из разработанных катодов – массив Спиндта из заостренных молибденовых наконечников [15]. На рис. 1.10 представлена матрица катода типа Спиндта.



Рисунок 1.10 – Структура одного элемента матрицы – а, РЭМ-снимок матрицы катодов типа Спиндта – б [15]

Исследования показывают, что алмазные и алмазоподобные углеродные покрытия на кремнии позволяют уменьшить работу выхода, по сравнению с катодами из чистого кремния и молибдена [16].

Среди холодных катодов используются структуры со слоями из углеродных нанотрубок, которые обладают повышенной стабильностью и увеличенным временем эксплуатации. Для контроля и улучшения эмиссионных свойств разработаны массивы углеродных нанотрубок с дополнительными электродами затвора аналогично катодам Спиндта [11].

Ионизационные датчики с эмиссионными катодами измеряют давление косвенно, поскольку они реагируют на плотность частиц газа, а не на давление. Газ, давление которого необходимо измерить, подвергается бомбардировке и ионизации электронным током, создается ток положительных ионов, который пропорционален плотности частиц газа в широком диапазоне давлений. Существует два метода измерения давления. В первом случае датчик работает с постоянным электронным током, при этом измеряется ток ионов. Во втором – отношение токов может быть проанализировано как сигнал, зависящий от давления. В любом

случае, для получения надлежащих выходных характеристик требуется либо высокий электронный ток, либо высокая чувствительность датчика.

Ионизационный микровакуумметр, основанный на полевой эмиссии изготовлен с использованием процесса производства МЭМС [17]. Он содержит плоские электроды, состоящие из катода из выровненных углеродных нанотрубок, экстракционной сетки и ионного коллектора (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Ионизационный микровакуумметр с массивом из углеродных нанотрубок в качестве катода [17]

Данный вакуумметр способен измерять давление в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-1} мбар (~ 10^{-2} – 10 Па).

В работе [18] описан МЭМС-вакуумметр, основанный на полевой эмиссии, имеющий массив кремниевых наконечников в качестве катода и алюминиевый анод (рис. 1.12 а). При уменьшении давления от 0,037 Па до 0,0077 Па ток эмиссии увеличился от 80,3 мкА до 96,3 мкА (рис. 1.12 б).



Рисунок 1.12 – Схематичный вид МЭМС-вакуумметра на полевой эмиссии [18]

В работе [19] представлена концепция микровакуумметра, основанного на измерении электропроводности газа в зависимости от давления. В данном случае используется идея в оптимизации рабочего объема микрополости для увеличения электропроводности газа. Микровакуумметр состоит из двух электродов: кремниевой подложки и парящей сетки (рис. 1.13 а). Структура в виде сот из TiN поддерживается опорами из SiO₂. Отверстия сетки обеспечивают

быстрый газообмен и, следовательно, быстрое время отклика. Процесс изготовления микровакуумметра представлен на рис. 1.13 б.



Рисунок 1.13 – Кристаллы микровакуумметра для измерения электропроводности газа – а, процесс изготовления микровакуумметра – б [19]

Предполагается, что с помощью данной концепции микровакуумметра возможно измерить давление от 5×10^{-6} до 10^3 мбар (~ $5 \times 10^{-4} - 10^5$ Па).

Такой способ измерения давления обладает рядом недостатков, таких как: очень малые токи, низкая чувствительность, ограничение рабочего объема микрополости.

Концепция измерения добротности микрорезонаторов чувствительных элементов для определения необходимого уровня вакуума используется при производстве инерциальных МЭМС-датчиков. Например, по необходимому значению добротности гироскопа судят о том, достаточно ли герметичен корпус гироскопа, поддерживается ли в нем необходимый уровень вакуума [3]. При этом нет возможности с достаточной степенью точности оценить уровень вакуума. Кроме того, необходима прецизионная калибровка для всех чувствительных элементов, каждый из которых имеет индивидуальную реализацию конструкции. Описанный выше принцип контроля уровня вакуума по изменению добротности согласно [20] заложен в основу прибора для измерения пониженного давления.

1.2. МЭМС-вакуумметры резонансного принципа действия 1.2.1. Преимущества использования кремниевых МЭМС-резонаторов

Резонансные сенсоры – это механические устройства, в которых используется собственная частота. Принцип работы резонансного сенсора устроен таким образом, что измеряемый параметр изменяет резонансную частоту, или частотный спектр, или то и другое вместе [2].

В последнее время кремниевые МЭМС-резонаторы привлекают большое внимание в качестве альтернативы кварцевым из-за их чрезвычайно малых размеров, высокой чувствительности и возможности интеграции с микроэлектронными схемами на общей подложке [21]. Технология, базирующаяся на кварце, была в центре интенсивных исследований и разработок с тех пор, как в 1922 году был продемонстрирован первый кварцевый кристалл [22]. Однако современные требования по миниатюризации устройств требуют уменьшение их составных компонентов. С этой позиции существуют практические ограничения на минимальный размер кристалла кварца, который можно использовать в цифровых микросхемах, при серийном производстве.

МЭМС-резонаторы на основе кремния могут не только заменить кристаллы кварца, но и создать новые устройства с более высокими частотными характеристиками, улучшенными размерами, стоимостью и энергопотреблением [23]. В устройствах на кремнии могут быть применены новые технологии, которые невозможны из-за ограничений при использовании кварца [24]. Прогресс современных микроэлектронных технологий неразрывно связан с прогрессом технологии КМОП интегральных схем. ЧЭ МЭМС, изготовленные с использованием кремниевой технологии, привлекательны с точки зрения недорогого исполнения с помощью применения существующих мощностей серийного производства кремния, а цифровые схемы могут быть интегрированы с ними напрямую, повышая их производительность и функциональность. Например, системы динамической устойчивости невозможно было развернуть в коммерческих масштабах до тех пор, пока не были разработаны кремниевые инерциальные МЭМС-датчики [25].

Потенциальная возможность интеграции кремниевых микромеханических резонаторов с интегральными микросхемами появилась после того, как интегральные микросхемы стали широко использоваться [26]. С тех пор разработка МЭМС-резонаторов стала активной областью исследований, поскольку они имеют множество потенциальных применений, в том числе: датчики контроля массы [27-29] (пара, химических веществ, белков и т. д.) [30, 31], давления [32-34], деформации, силы и/или ускорения [35-38], температуры [39]; радиочастотные фильтры и смесители [40, 41].

Резонансные МЭМС довольно просты с точки зрения механики конструкции. Резонаторы ЧЭ обычно состоят из нескольких общих элементов, таких как балки, торсионы, пружины, инерционные массы и т.д. В резонаторах ЧЭ МЭМС сначала электрический сигнал преобразуется в механические колебания, и снова эти механические колебания преобразуются на выходе в электрический сигнал.

На резонаторы в ЧЭ МЭМС действуют такие же силы, как на макроуровне, например, силы от упругих, магнитных, электромагнитных и аэродинамических источников. Однако из-за

20

малых масштабов, задействуются дополнительные силы, которые могут играть более значительную роль, например, силы Ван-дер-Ваальса, адгезии и электростатические силы [42]. Сочетание этих эффектов и необходимость интеграции механических компонентов с электроникой создает не только возможности для проектирования широкого класса МЭМСприборов, но и приводит к проблемам, которые необходимо решать при разработке.

По мере развития технологии микрообработки поверхности [43] в конце 1980-х и начале 90-х годов были внедрены более сложные конструкции резонаторов [44-50]. Различные варианты резонаторов и их составные элементы, такие как складчатые и серпантинные подвесы, гребенчатые приводы и многие другие, используются в настоящее время в современных МЭМС. На рис. 1.14 представлены различные варианты конструкций МЭМС-резонаторов.



Рисунок 1.14 – Примеры МЭМС-резонаторов: а – резонатор типа «wine-glass» [47], б – поликремниевый резонатор камертонного типа с встречно-штыревыми гребенками [48], в – резонатор в виде перфорированной пластины [49], г – объемный резонатор [50]

1.2.2. Концепция измерения давления по величине добротности в МЭМС-вакуумметрах

Газодинамическое демпфирование МЭМС-резонатора представляет собой интересную задачу, которая привлекает большое внимание в последнее десятилетие [51, 52]. Моделирование подобных систем является нетривиальной задачей, поскольку демпфирование резонатора сопровождается изменением его добротности и характерным сдвигом резонансной частоты,

которая в свою очередь зависит от сложной геометрической структуры МЭМС-резонатора [20]. Развитие данного направления подтолкнуло к созданию целого класса приборов вакуумной техники [53, 54] на основе МЭМС.

В работе [55] ЧЭ представляет собой поликремниевый резонатор, в котором подвижная инерционная масса с наименьшим габаритом по высоте закреплена на боковых гранях на четырех подвесах с двух сторон над основанием, попарно с каждой стороны (рис. 1.15 а). На свободных гранях инерционной массы располагается встречно-штыревая структура электродов для задания управляющего и считывающего сигнала. Колебания осуществляются вдоль плоскости основания, где наибольшее демпфирующее воздействие от остаточного газа осуществляется в зазорах встречно-штыревой структуры при максимальном отклонении от положения равновесия в момент резонанса. Уровень вакуума измеряется посредством измерения величины добротности системы – Q (рис. 1.15 б). Данный вакуумметр позволяет измерять давление ~ от 1 Па.



Рисунок 1.15– Микровакуумметр с поликремниевым ЧЭ – а, выходные характеристики микровакуумметра – б [55]

Недостатком такой конструкции [55] является низкая чувствительность к уровню вакуума, нижняя граница диапазона измеряемых значений ограничена значением в единицы паскаль, вследствие малого демпфирования между взаимодействующими поверхностями, их недостаточного количества, излишней жесткости в местах заделки резонатора.

В патентах [53, 54] и работах [20, 56–58] микромеханическая часть вакуумметра представляет из себя конструкцию, состоящую из неподвижного основания – опорной кремниевой пластины, как правило, покрытой слоем тонкого металла, и подвижной мембраны, закрепленной на упругих подвесах, перекрывающей плоскость основания и отстоящей на некотором расстоянии над ним. В приведенных источниках такая конструкция упоминается как резонатор в планарном исполнении. Недостатком такого технического решения, с одной стороны, является использование в процессе изготовления гетерогенных материалов: верхняя часть резонатора – подвижная мембрана изготовлена из тонкого металла, как в [54, 56], а

основание из монокристаллического кремния, что при температурных изменениях негативно может сказываться на получаемых выходных характеристиках, в частности приводить к дрейфу, гистерезису, срыву колебаний.

В других случаях [20, 53, 57] применение поликристаллического кремния, как основного конструкционного материала для тонкой мембраны, может отрицательно сказываться на прочностных характеристиках резонатора: возможно проявление начальных деформаций, трещин, разбалансировка и смешивание мод колебаний.

В работе [59] описано устройство, в котором микроэлектромеханический резонатор представлен в вертикальном исполнении, т.е. колебания резонатора осуществляются вдоль плоскости его основания. Излишняя жесткость такой конструкции снижает чувствительность датчика, тем самым уменьшая диапазон измерения вакуума. Нижняя граница измеряемых значений давлений составляет 10 Па.

В патенте [60] представлен монокристаллический кремниевый резонатор (рис. 1.16 а), его выходная характеристика представлена на рис. рис. 1.16 б. Измеренная величина давления составила десятые доли единицы паскаля, что является значительным увеличением влево диапазона измеряемых давлений.



Рисунок 1.16 – ЧЭ из монокристаллического кремния – а, зависимость добротности от давления – б [60]

В ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева проводились исследования возможности создания МЭМС-вакуумметра, принцип работы которого основан на измерении количества работы, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления со стороны газа при колебаниях пластины, то есть величины энергопотерь [61]. В результате исследований установлено, что рабочий диапазон данного устройства 10–10⁴ Па.

1.3. Теоретическое обоснование функционирования ЧЭ МЭМС-вакуумметра1.3.1. Электростатический способ преобразования

Существуют различные механизмы передачи энергии между механическими и электрическими компонентами МЭМС: электростатический, пьезоэлектрический, пьезорезистивный, электромагнитный, тепловой, оптический.

Электростатический способ преобразования энергии является одним из универсальных и наиболее распространенных методов для возбуждения колебаний микрорезонатора и измерения его выходного сигнала в МЭМС ввиду его простоты и высокой эффективности. Существует множество примеров МЭМС, где используется этот метод: акселерометры подушек безопасности автомобилей, микрофоны, датчики давления, датчики температуры, радиочастотные переключатели. МЭМС-устройства, использующие электростатическое преобразование энергии называются электростатическими МЭМС.

Принцип электростатического преобразования энергии в таких устройствах основан на использовании конденсатора с плоскопараллельными электродами как основного элемента конструкции. В кремниевой технологии его легко можно изготовить с помощью технологии микрообработки поверхности. Использование принципа электростатического преобразования не требует каких-либо специальных материалов, таких как пьезоэлектрические материалы, или каких-либо внешних источников поля, как в электромагнитных МЭМС. Необходим только источник напряжения, который доступен для большинства микросхем. Кроме того, этот метод характеризуется очень низким энергопотреблением.

Однако основным недостатком электростатических МЭМС, в частности при возбуждении основных мод колебания МЭМС-резонатора, это возникновение ряда нелинейных эффектов. Это ограничивает диапазон управляемого перемещения исполнительных элементов, узлов и может привести к неожиданному разрушению, короткому замыканию, «прилипанию» и функциональному отказу МЭМС-устройств.

МЭМС-резонатор представляет собой упругую балку, приводимую в движение электростатическим взаимодействием. Следовательно, резонатор выступает преобразователем, который преобразует энергию между электрической и механической системами. В системе преобразования используется взаимодействие между электрическими зарядами для создания механической силы. Таким образом, МЭМС-резонатор приводится в действие электростатическими силами.

Если электрический заряды – *Q* ограничены в отдельных элементах механических конструкций, то электроды будут испытывать силу, притягивающую их – *F*_E, которая

пропорциональна приложенному электрическому потенциалу – *V* [23]. Это проиллюстрировано на рис. 1.17.



Рисунок 1.17 – Возникновение силы притяжения при приложения напряжения на электроды [23]

Притяжение зарядов разных знаков, заключенных на отдельных элементах конструкции как на обкладках конденсатора, создает силу притяжения. При этом сила, создаваемая через емкостный зазор, всегда сводит пластины конденсатора вместе, независимо от полярности приложенного напряжения.

Проанализировать рассматриваемую систему можно в приближении конденсатора с плоскопараллельными обкладками. Конденсатор состоит из двух больших параллельных пластин площадью – *A*, разделенных однородным материалом с диэлектрической проницаемостью – *є*. Емкость *C* структуры равна:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} = \frac{Q}{V}.$$
 (1.1)

Величина электростатического поля пропорциональна количеству заряда в конденсаторе, которое пропорционально приложенному напряжению. Энергия, запасенная в системе - *U*, рассчитывается путем интегрирования (1.1), чтобы найти общий накопленный заряд в зависимости от напряжения:

$$U = \int_0^V Q(V) dV = \frac{1}{2} C V^2.$$
 (1.2)

Тогда сила, притягивающая пластины, представляет собой градиент функции энергии относительно направления движения:

(a 1)

$$F_E = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{dU}{dd} = \frac{1}{2}V^2 \frac{d\left(\frac{\mathcal{E}A}{d}\right)}{dd} = -\frac{1}{2}\frac{\mathcal{C}}{d}V^2,$$
$$|F_E| = \frac{1}{2}\frac{\mathcal{C}}{d}V^2.$$
(1.3)

Отрицательное значение F_E указывает на то, что сила притягивает две пластины в соответствии с законом Кулона. F_E не зависит от полярности приложенного напряжения V, и поэтому электростатическая сила в конденсаторе всегда действует таким образом, чтобы соединить две пластины вместе. Поскольку направление силы всегда известно, то обычно используется только модуль величины F_E .

Модель МЭМС-резонатора с подключенными электрическими цепями можно представить в виде балки и двух электродов, как показано на рис. 1.18.



Рисунок 1.18 – Модель МЭМС-резонатора с электродами [23]

Конструкция состоит из двух одинаковых конденсаторов: один между входным – управляющим электродом и балкой, другой между балкой и выходным – сигнальным электродом. К балке прикладывается фиксированное напряжение смещения V_{DC} , к управляющему электроду прикладывается переменное напряжение V_{AC} . На балку действуют силы F_1 и F_2 , притягивающие ее к электродам [23]:

$$F_{1} = \frac{1}{2} \frac{C}{d} (V_{DC} + V_{AC})^{2},$$

$$F_{1} \approx \frac{1}{2} \frac{C}{d} (V_{DC}^{2} + 2V_{DC}V_{AC}) (V_{DC} \gg V_{AC})$$

$$F_{1} = \frac{1}{2} \frac{C}{d} (V_{DC}^{2}).$$
(1.4)
(1.5)

Сила F_2 воздействует на балку в направлении, противоположном направлению силы F_1 . Суммарная сила, приводящая в движение, которую испытывает балка, равна разности F_1 и F_2 [23]:

$$F_{\Sigma} = F_1 - F_2 \approx \frac{C}{d} (V_{DC} V_{AC}). \tag{1.6}$$

Выходной сигнал резонатора представляет собой ток, генерируемый изменяющимся во времени значением выходного напряжения конденсатора. По мере того, как балка перемещается под действием силы F_{Σ} , ширина электростатического зазора *d* выходного конденсатора изменяется, в то время как напряжение смещения остается фиксированным. Заряд, запасенный в конденсаторе:

$$Q = CV. \tag{1.7}$$

Выходной ток является производной по времени от заряда:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{out} = C \frac{dV_{DC}}{dt} + V_{DC} \frac{dC}{dt},$$
(1.8)

так как:

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = 0, \tag{1.9}$$

$$I_{out} = V_{DC} \frac{dC}{dt}.$$
 (1.10)

Выходной сигнал резонатора обычно измеряется как напряжение на резисторе (или транзисторном усилителе):

$$V_{out} = I_{out}R. (1.11)$$

Важными следствиями работы резонатора являются:

1) Уровень выходного сигнала резонатора может быть увеличен путем увеличения V_{DC} в соответствии с (1.10).

2) Результирующая сила, действующая на балку резонатора, является функцией *V*_{DC} и *V*_{AC}, согласно (1.6).

 Работа механического резонатора основана на двух электрических конденсаторах, а сила, возникающая на конденсаторе, является нелинейной функцией смещения центральной балки (1.3).

1.3.2. Подходы к созданию математической модели МЭМС-резонатора

Дальнейшее описание электромеханической системы возможно с помощью нескольких известных вариантов создания математической модели резонатора. К ним относятся:

1) Модель деформируемого твердого тела – описывает поведение балки резонатора, как упруго деформируемого твердого тела. Эта модель позволяет объяснить чисто механические эффекты, определяющие резонансную частоту балки.

2) Модель динамической системы – описывает балку резонатора как систему пружина-массадемпфер 2-го порядка. Это позволит рассмотреть немеханические воздействия на движение балки.

3) Модель эквивалентной электрической схемы – описывает балку резонатора с помощью эквивалентной электрической схемы. Эта модель используется для описания электрических эффектов, влияющих на отклик резонатора.

1.3.2.1. Модель деформируемого твердого тела

К механическому описанию упруго деформируемой балки можно подойти посредством рассмотрения энергии системы и методов решения, описанных в [62], либо путем решения уравнений движения для выделенного элемента балки. Последний подход наиболее употребим, краткое изложение основных выводов приведено в [63] и [64].

Рассмотрим бесконечно малый элемент колеблющейся балки, как показано на рис. 1.19. Однородная балка длинной - L, с модулем Юнга - E, моментом инерции сечения - I, плотностью - ρ и площадь поперечного сечения - A. На него действует сила сдвига - V, момент – M, при осевой нагрузке - P. Найдем закон перемещения балки v(x,t).



Рисунок 1.19 – Бесконечно малый элемент колеблющейся балки [23]

На первом шаге не будем учитывать осевую нагрузку - *P*. Уравновешивая силы, действующие на бесконечно малый элемент балки, получим дифференциальное уравнение вида [63]:

$$\frac{-\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = \frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4}.$$
(1.12)

Данное выражение называется дифференциальным уравнением Эйлера-Бернулли для балки. Уравнение можно решить, разделив переменные, как [63]:

$$v(x,t) = r(x)p(t).$$
 (1.13)

Выражение для смещения в зависимости от положения может быть записано в виде [63]:

$$\frac{\partial^4 r(\xi)}{\partial \xi^2} - \beta^4 r(\xi) = 0, \qquad (1.14)$$

где

$$\xi = \frac{x}{L},\tag{1.15}$$

$$\beta^4 = \frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI},\tag{1.16}$$

Преобразуя выражение (1.16) с учетом $\omega = 2\pi f$, получим, что собственная частота балки определяется по формуле:

$$f_0 = \frac{\beta^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}.$$
(1.17)

Значение β определяется путем решения уравнения (1.14) с соответствующими граничными условиями.

Теперь рассмотрим влияние осевой нагрузки *P*, где отрицательное значение *P* соответствует сжимающей нагрузке. Уравнение (1.12) теперь включает дополнительный член [63]:

$$\frac{-\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = \frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \frac{P}{\rho A} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}.$$
(1.18)

Эквивалентное выражение для уравнения (1.14) теперь также имеет дополнительный член [63]:

$$\frac{\partial^4 r(\xi)}{\partial \xi^2} + \pi^2 \alpha \frac{\partial^2 r(\xi)}{\partial \xi^2} - \beta_P^4 r(\xi) = 0, \qquad (1.19)$$

где:

$$\alpha = \frac{PL^2}{\pi^2 EI}.\tag{1.20}$$

Эффект от действия нагрузки заключается в изменении формы моды, что отражается в измененной постоянной моды β_P . Для решения следуем по тому же пути, что и раньше, где значение β_P определяется граничными условиями балки. Результирующее выражение для частоты в этом случае, это модифицированное уравнение (1.17) [63]:

$$f_0 = \frac{\beta_P^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}},\tag{1.21}$$

где $\beta_P > \beta$ для положительного значения *P* в случае растяжения, $\beta_P < \beta$ для отрицательного значения *P* в случае сжатия.

Графики β_P для закрепленных балок с обоих концов приведены в [63]. Приближенное выражение для резонансной частоты закрепленных балок для абсолютных значений осевых нагрузок, меньших, чем нагрузка на изгиб, приведено в [65]:

$$f_P = f_0 \sqrt{1 + \frac{P\beta_1}{P_b\beta_i}}, \qquad i = 1, 2, 3 \dots$$
 (1.22)

где i – номер моды, P_b – нагрузка Эйлера на изгиб балки, а частота f_0 задается уравнением (1.21).

Следует отметить, что анализ дается с точки зрения осевой нагрузки, но на самом деле именно деформация, которую испытывает балка, изменяет ее эффективную жесткость и, следовательно, резонансную частоту. Изменение частоты закрепленной с двух сторон балки может быть аппроксимировано как [63]:

$$\Delta f = 0.15 \frac{L^2}{w^2} \Delta S, \tag{1.23}$$

где *S* – деформация балки резонатора. В результате резонансная частота балки зависит от геометрии, модуля Юнга материала и осевой нагрузки (деформации) на балку.

1.3.2.2. Модель динамической системы

Другой подход к пониманию поведения резонатора заключается в использовании модели, как системы с элементами, которые могут накапливать, рассеивать энергию, и обладают инерцией. В профильной литературе такую модель часто называют моделью масса-пружинадемпфер (*m-k-b*) (рис. 1.20), которую можно описать уравнением вида [64]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F, \tag{1.24}$$

где $F = F_0 sin(\omega t)$ - периодическая сила с частотой ω , приложенная к системе. Резонатор представляет собой балку, обладающую массой – m (масса – m), механической силой, отвечающей за восстановление исходного положения, т. е. обладает жесткостью – k (пружина – k) и характеризуется рассеянием энергии в окружающую среду через взаимодействие с воздухом (демпфер – b).



Рисунок 1.20 – Модель масса-пружина-демпфер [23]

Подходы к решению неоднородного дифференциального уравнения второго порядка (1.24) хорошо известны и могут быть получены с использованием стандартных методов [62]. Важными характерными величинами этой системы являются: резонансная частота – f_0 , добротность – Q и амплитуда движения при резонансе X_0 . Следовательно, решения (1.24) могут быть представлены в виде [62]:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\frac{1}{m}}{-\omega^2 + j\omega \frac{b}{m} + \frac{k}{m}},$$
(1.25)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},\tag{1.26}$$

$$Q = 2\pi \frac{f_0 m}{b},\tag{1.27}$$

$$X_0 = \frac{FQ}{k},\tag{1.28}$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такой системы может быть представлена графически, как показано на рис. 1.21. Амплитуда смещения резко возрастает на резонансной частоте. Как видно на графике, изменению добротности соответствует увеличение амплитуды пика и сужении его ширины.



Рисунок 1.21 – АЧХ динамической системы [23]

Согласно рис. 1.21 представлены три резонансные системы с различными значениями добротности. Увеличение добротности способствует росту амплитуды при резонансе (1.28) и пик более резкой формы вблизи резонансной частоты. Ширина и высота пика в этом случае используются для параметризации свойств резонатора.

Видно, что выражение для резонансной частоты (1.26) аналогично выражению, полученному из описания модели деформируемого твердого тела (1.21). На самом деле, это

разные представления одной и той же физической величины, поэтому их можно приравнять друг к другу. При этом остается открытый вопрос, какие значения использовать для *k* и *m*.

Хотя k определяется как "жесткость", невозможно однозначно сопоставить значение k непосредственно с механическим свойством балки. Рассматриваемая динамическая система отвечает уравнениям второго порядка, но механическое поведение балки описывается компонентами четвертого порядка, как показано в уравнении для балки Эйлера-Бернулли (1.12). Поэтому при выборе k в представлении механической жесткости балки необходимо сделать некоторое приближение. Простое выражение для k можно получить для случая максимального отклонения балки, закрепленной с двух сторон и отклоненной под точечной нагрузкой [66]:

$$y = \frac{FL^3}{192EI},$$
 (1.29)

$$k = \frac{192EI}{L^3},$$
 (1.30)

Для параметра *m* кажется очевидным, что необходимо просто использовать массу балки, $m = L \cdot w \cdot h \cdot \rho$. Это не совсем правильно, поскольку аргумент об неоднозначности представления аналогичен аргументу для *k*, приведенному выше.

Вывод для динамической модели предполагает, что вся масса *m* участвует в равной степени в колебательном движении (и, следовательно, в накоплении энергии в виде кинетической энергии движущейся массы), но в балке резонатора смещение распределяется по длине балки. Следовательно, соответствующее значение *m* для уравнения (1.26), должно быть уменьшено на поправочный коэффициент для учета распределенного смещения. Поскольку модель механики твердого тела была разработана с использованием действительной формы моды колебания и с распределенной массой смещенной балки, то можно доопределить значение поправочного коэффициента для массы, сопоставив два выражения (1.21) и (1.26) [66]:

$$\frac{\beta^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EI}{m_{eff} L^3}},$$
(1.31)

где $m_{eff} = \mu_{cc} \cdot m$.

Поправочный коэффициент массы μ_{cc} для случая балки (элемент резонатора), закрепленной с двух сторон, составляет 0,384. Аналогичная процедура может быть использована для других типов балок и других форм мод колебания. Можно также использовать более сложные приближения для *k* и *m*. Соответственно, другие вариации этих величин приведут к различным значениям поправочного коэффициента μ_{cc} [67].

Выражение для частоты резонатора представлено в терминах жесткости пружины *k* и массы *m*. В описании модели механики твердого тела жесткость пружины обусловлена механическими свойствами балки (упругостью, геометрией, граничными условиями). Однако,

как электростатическое возбуждение, так и механическая деформация имеют сильные зависимости от величины смещения балки. Поэтому k в модели динамической системы необходимо модифицировать, чтобы учесть эти эффекты, записав жесткость как сумму электрических и механических компонентов [66]:

$$k = k_0 (1 + k_1 x + k_2 x^2 \dots), \tag{1.32}$$

где $k_0 = k_{m0} + k_{e0}, k_1 = k_{m1} + k_{e1}, k_2 = k_{m2} + k_{e2}.$

В таком представлении k_{m0} – это первоначальный коэффициент упругости или механическая жесткость. Поскольку *k* является коэффициентом перед *x* в (1.24), то k_1 и k_2 являются членами второго и третьего порядка, соответственно. Следовательно, существует два важных эффекта, которые произрастают из обобщенного представления для жесткости: электростатическая жесткость пружины и жесткость при нелинейном смещении.

Когда балка смещается из положения равновесия, возникает восстанавливающая сила, которая приводит балку обратно к равновесию. Величина этой восстанавливающей силы линейная функция смещения балки с коэффициентом жесткости. Однако, когда балка управляется электростатически, составляющая электростатической силы действует противоположно упругой восстанавливающей силе. В результате восстанавливающая сила уменьшается, и поэтому балка ведет себя таким образом, как если бы она обладала меньшей жесткостью. Поскольку электростатическая сила уменьшает эффективную жесткость, этот эффект называется «смягчением пружины» (*spring softening*).

1.3.2.3. Модель эквивалентной электрической схемы

Для описания механического резонатора с электростатическим возбуждением необходимо решить систему уравнений механики и электродинамики. Для упрощения был разработан метод электромеханических аналогий, основы которого следуют из сравнения аналогичных по форме уравнений механических и электрических систем. Этот метод позволяет заменить уравнения движения данной механической системы соответствующими уравнениями для эквивалентной электрической цепи, что существенно упрощает задачу исследования [68].

Механический резонатор необходимо рассматривать как элемент устройства со схемой обработки, поэтому его можно представить в виде RLC эквивалентной схемы с параметрами резонатора в виде сопротивления, емкости и индуктивности [69]. На рис. 1.22 представлена эквивалентная электрическая схема модели масса-пружина-демпфер.



Рисунок 1.22 – Эквивалентная схема модели масса-пружина-демпфер [69]

В таблице 1.1 приведены механические и соответствующие им электрические величины.

Таблица 1.1. Сопоставление механических и электрических величин при методе аналогий.

Механические величины	Электрические величины
Сила (F)	Напряжение (V)
Скорость (v)	Ток (I)
Перемещение (x)	Заряд (q)
Вязкое трение (<i>P</i>)	Сопротивление (<i>R</i>)
Macca (m)	Индуктивность (L)
Жесткость (k)	Емкость (С)

В данной модели резонатор представляет из себя классическую систему масса-пружинадемпфер под воздействием периодической внешней силы F. Для согласования механических и электрических параметров используется коэффициент электромеханической связи, который является показателем эффективности преобразования между электрической и механической энергиями [69, 70]. Используя эквивалентную электрическую схему, можно промоделировать работу резонатора с помощью инструментов SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделирования.

1.3.3. Основные механизмы демпфирования в ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Известно, что внешние и внутренние механизмы рассеяния энергии влияют на добротность колебательной системы. Поэтому в приборах на основе МЭМС различные механизмы демпфирования привносить существенный вклад в его функционирование и работу в целом. Суммарные потери энергии колебательной системы можно количественно выразить в виде суммы слагаемых в пересчете на единицу добротности соответствующего источника потерь как:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \dots = \sum_j \frac{1}{Q_j}.$$
(1.33)

Для наглядного отображения всех механизмов демпфирования присущих МЭМС приведена блок схема на рис. 1.23.



Рисунок 1.23 – Механизмы демпфирования в МЭМС

Полная добротность МЭМС описывается такими источниками потери энергии как: термоупругое демпфирование, поверхностное рассеяние и внутреннее трение, анкерные потери и потери, вызванные акустическими колебаниями, вязкое демпфирование (газодинамическое демпфирование) и электронное демпфирование (обычно рассматривается отдельно от механической системы) [71, 72]. Выделить отдельные источники потери энергии в реальной конструкции МЭМС очень трудно [71]. В связи с этим при проектировании МЭМС, в частности основной ее части – резонатора, необходимо предусматривать минимизацию всех возможных механизмов рассеяния энергии.

Согласно [73], внутренние потери энергии в монокристаллических материалах, как например, в кремнии очень малы и их вклад в общее демпфирование незначителен по сравнению с внешними потерями. Поверхностное рассеяние вызвано наличием примесей и поверхностными дефектами, возникающими в процессе изготовления. Потери вследствие внутреннего трения в материале можно снизить путем использования материалов высокой чистоты. Доминирующий механизм внутренних потерь энергии – это термоупругое демпфирование, оно становится значительным при уменьшении размеров устройства. С точки зрения физического процесса, термоупругое демпфирование является следствием необратимого потока тепла, вызванного сжатием и расширением частей колеблющейся структуры [74].

Основные внешние механизмы диссипации – это потери, обусловленные закреплением конструкции ЧЭ, потери в окружающей среде разреженного газа (вязкое газодинамическое

демпфирование) и потери, вызванные акустическими колебаниями. Потери, связанные с закреплением отдельных элементов конструкции, называют также анкерными потерями. Их можно минимизировать при проектировании путем создания симметричного резонатора, чтобы его колебания были сбалансированы без перемещения центра масс. Также возможно уменьшить их влияние выбором подходящей конструкции резонатора и способа закрепления, например, при закреплении с одной стороны или использовать конструкцию, гасящую колебания в области заделки.

В свою очередь, акустические потери возникают вследствие распространения звуковых волн, генерируемых движением механического элемента. Данный механизм может иметь значительное влияние, если длина акустических волн сравнима или меньше, чем характерный размер механического элемента, что редко встречается в МЭМС.

Электроника возбуждения и съема данных также приводит к потере некоторой части энергии МЭМС-резонатора, называемой электронным демпфированием. Минимизировать эту потерю можно правильным выбором электрических параметров.

Вязкое газодинамическое демпфирование связано с движением микроструктур в близости друг от друга или к подложке и с взаимодействием со слоями тонких газовых пленок. Среди всех механизмов вязкое газодинамическое демпфирование самый значительный источник энергетических потерь в МЭМС.

1.3.3.1. Эффект демпфирования сдавленной газовой пленки

В большинстве устройств на основе МЭМС аспектное соотношение площади к общему объему ЧЭ имеет важное значение, особенно тогда, когда реализованная микроструктура совершают движение на малом расстоянии от подложки. Показательным в этом случае будет пример, представленный на рис. 1.24. На нем изображен микроконденсатор с плоскими параллельными пластинами, одна из которых закреплена, а другая подвижна. Когда подвижная пластина движется вверх, появляется область разрежения, и давление газа в зазоре между ними уменьшается, газ снаружи зазора втягивается внутрь. Когда пластина движется вниз, газ вытесняется из зазора. Вследствие малого расстояния между электродами, сравнимого с толщиной обкладки, и их большой площади поверхности, движению газа оказывает сопротивление его вязкость, то есть газ испытывает трение о поверхность электродов. Этот эффект называется демпфированием сдавленной газовой пленки «squeeze-film damping» (SQFD).


Рисунок 1.24 – Иллюстрация эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки в плоском параллельном конденсаторе [73]

Современная разработка МЭМС не может обойтись без построения точных моделей. Корректная модель должна правильно отражать воздействия как внешнего, так и внутреннего характера. Следовательно, первоочередная задача после нахождения решения связанного с функционированием МЭМС и взаимодействием с внешней средой – это учет различных нелинейных эффектов и преобладающих факторов [73], пренебрежение которыми может свести на нет принципиальную модель разрабатываемого МЭМС-устройства.

Однако, как было отмечено ранее, моделирование демпфирования в сдавленных газовых пленках как доминирующего механизма диссипации энергии, и, как следствие, нахождение добротности с высокой степенью точности, можно использовать при создании МЭМСвакуумметра.

Принцип работы МЭМС-вакуумметра базируется на контроле изменения добротности системы при изменении давления окружающей его среды.

Проследить эту зависимость аналитически возможно, если обратиться к уравнению Навье-Стокса [75]. Оно описывает движение объема жидкости (газа) при наличии сил тяжести, инерции, вязких сил, давления, действующего на объем. Уравнение Навье-Стокса представляет собой нелинейное уравнение третьей степени в частных производных. Решение этого уравнения даже численными методами является сложной задачей. Поэтому его пытаются свести к более простым уравнениям с помощью некоторых упрощений и допущений. Одним из таких упрощений является нормализация переменных, чтобы можно было оценить вклад различных сил. Это приводит к ряду безразмерных величин. Особое значение имеет число Рейнольдса, являющееся мерой инерционных сил по сравнению с вязкими, оно определяется как [75]:

$$Re = \frac{\nu \rho H}{\mu},\tag{1.34}$$

где *v*, ρ , μ – скорость, плотность, вязкость жидкости (газа), соответственно, *H* – характерный размер системы (например, диаметр трубы с жидкостью).

В МЭМС число Рейнольдса обычно много меньше единицы, поэтому поток всегда ламинарный. Это означает, что силы вязкости превалируют над силами инерции, поэтому последними можно пренебречь.

Длина свободного пробега молекул газа в МЭМС при пониженном давлении сравнима с типичными размерами микрообъемов, поэтому основной вопрос, возникающий при решении уравнения Навье-Стокса для микромасштаба, рассматривать ли газ как непрерывную сплошную среду или в виде отдельных молекул. Ключевым параметром, помогающим решить эту проблему, является число Кнудсена, которое зависит от длины свободного пробега молекул газа и характерного размера системы, связанного с физической проблемой [73]:

$$K_n = \frac{\lambda}{H},\tag{1.35}$$

где *λ* – длина свободного пробега, *H* – характерный размер системы, в данном случае расстояние между электродами конденсатора. Длина свободного пробега зависит от давления, как [73]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 P_0}{P}.\tag{1.36}$$

В (1.36) λ₀ – длина свободного пробега при нормальных условиях, *P*₀ – атмосферное давление, *P* – давление среды.

В зависимости от значения *K_n* течение газа можно разделить на режимы: непрерывный поток, когда течение газа описывается уравнением Навье-Стокса; скользящий поток – уравнением Навье-Стокса с изменением граничных условий для учета скольжения, переходный поток – особый случай, требующий особого решения, свободномолекулярный поток – столкновениями молекул можно пренебречь, газ описывается уравнением Больцмана [76].

Моделирование эффекта сдавленной газовой пленки основано на решении уравнения Рейнольдса, которое выводится из уравнения Навье-Стокса с некоторыми допущениями и упрощениями [73]. Из уравнения Навье-Стокса исключаются члены сил инерции и гравитации высокого порядка, затем уравнения интегрируются по диапазону ширины зазора, чтобы получить выражения для скорости газа. Результаты подставляются в уравнение непрерывности, чтобы получить уравнение в терминах давления и плотности. Предполагая, что система изотермическая, а газ идеальный, плотность выражается через давление. На примере системы в виде плоского конденсатора (рис. 1.25) с одной подвижной обкладкой, расположенной на некотором расстоянии относительно основания, к которому приложено напряжение, уравнение Рейнольдса выглядит, как [73]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 12 \mu P \left(H \frac{\partial P}{\partial t} + P \frac{\partial H}{\partial t} \right).$$
(1.37)

В (1.37) х и у – пространственные координаты вдоль направления длины (*l*) и ширины (*b*) электрода (обкладки конденсатора), *t* – время, *H* – переменное расстояние между электродами, *P* – полное давление, μ – коэффициент вязкости газа. Уравнение Рейнольдса представляет из себя нелинейное уравнение в частных производных с двумя параметрами *H* и *P*.



Рисунок 1.25 – Плоский параллельный конденсатор [76]

В МЭМС допущения, принятые к решению уравнения Навье-Стокса и выводу уравнения Рейнольдса, могут быть неприменимы. Так как работа МЭМС-резонатора осуществляется при очень низком давлении с малыми зазорами между электродами, подложкой или другими частями ЧЭ, газ в этом случае невозможно рассматривать как непрерывную сплошную среду, поэтому вводят понятие эффективной вязкости, который напрямую зависит от числа Кнудсена [76]:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.638 K_n^{1.159}}.$$
(1.38)

Уравнение Рейнольдса (1.37), в котором коэффициент вызкости газа заменен на коэффициент эффективной вязкости, называется модифицированным уранением Рейнольдса.

Добротность колебательной системы можно определить, как [73]:

$$Q = \frac{1}{2\zeta},\tag{1.39}$$

где ζ – коэффициент демпфирования:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega},\tag{1.40}$$

где *с* – коэффициент вязкого демпфирования, *m* – эффективная масса, *ω* – собственная частота колебаний.

Существуют два основных подхода к решению уравнения Рейнольдса для твердых тел: модель Блеха для сжимаемой жидкости [77] и модель Старра для несжимаемой жидкости [78].

В модели сжимаемого газа коэффициент вязкого демпфирования [73]:

$$c = \frac{64\sigma PA}{\pi^6 \omega H} \sum_{n,m=1,3,5\dots} \frac{m^2 + \beta^2 n^2}{(nm)^2 \left((m^2 + \beta^2 n^2)^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right)},$$
(1.41)

где A = lb – площадь пластины, $\beta = b/l$, σ – «число сжимаемости» (squeeze number):

$$\sigma = \frac{12A\omega\mu_{eff}}{PH^2}.$$
(1.42)

Число сжимаемости является мерой сжатия жидкости (газа). Большое число сжимаемости означает, что газ задерживается в зазоре и не может выйти наружу, то есть, колебание происходит слишком быстро. В этом случае, вклад сил упругости становится значительным. Малое число сжимаемости означает, что сжатие газа отсутствует, и он может легко вытесниться из зазора. При этом изменение давления со временем становится равным нулю. То есть, колебание пластины настолько медленное, что газ успевает втянуться и высвободиться из зазора между пластинами. При стремлении числа сжимаемости к нулю, коэффициент упругости стремится к нулю, то есть, отсутствует вклад сил упругости. В этом случае коэффициент вязкого демпфирования выражается как [73]:

$$c = \frac{0.8\mu_{eff}A^2}{H^3(1+\beta^2)}.$$
(1.43)

Между двумя крайними значениями *σ* газ оказывает как упругое, так и демпфирующее действие. Какой из этих механизмов оказывается доминирующим, зависит от частоты отсечки [73], при котором сила упругости и демпфирующая сила равны. Аналитическое приближение числа сжимаемости отсечки в таком случае [73]:

$$\sigma_c = \pi^2 (1 + \beta). \tag{1.44}$$

Принимая во внимание уравнения (1.35)–(1.44), можно найти выражение для расчета добротности колебательной системы в зависимости от давления газа.

1.3.3.2. Эффект демпфирования скользящей газовой пленки

Помимо представленного случая на рис. 1.25, где перемещения одной из обкладок МЭМСструктуры относительно основания происходят вне его плоскости, существуют конструкции, где движение микроструктуры и элементов осуществляется параллельно основанию. Примером таких микроструктур могут служить встречно-штыревые элементы (например, управляющие электроды МЭМС-резонатора) и термоэлектрические актюаторы. В обоих случаях, при параллельном движении относительно основания, в условиях малых зазоров между различными частями конструкции происходит взаимодействие с остаточными газами в МЭМС, что также приводит к рассеянию энергии. Такой вид демпфирования, вызванный скольжением элементов друг относительно друга, называется демпфированием скользящей газовой пленки «slide-film damping». Схематично его можно изобразить следующим образом (рис. 1.26):



Рисунок 1.26 – Эффект демпфирования скользящей газовой пленки между двумя плоскостями при движении одной параллельно другой [79]

Эффективная вязкость в случае эффекта демпфирования скользящей газовой пленки определяется следующим образом [79]:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 2K_n + 0.2K_n^{0.788} e^{\frac{-K_n}{10}}}.$$
(1.45)

Существуют две модели, описывающие движение жидкости или газа при таком взаимодействии с движущейся структурой: модель течения Куэтта и модель Стокса [73]. В модели Куэтта предполагается линейное изменение скорости газа под движущейся плоскостью, над ней скорость газа такая же как и у плоскости, следовательно, газ над структурой всегда движется вместе с ней и не способствует демпфированию. Модель Стокса предполагает нелинейное изменение скоростью, так и над ней. Выбор модели для расчета зависит от числа δ , которое характеризует расстояние, на котором амплитуда движения уменьшается в *е* раз [73]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu_{eff}}{\rho\omega}},\tag{1.46}$$

где *р* – плотность газа, *ω* – собственная частота колебаний структуры.

Модель Куэтта применима, когда $\delta >> H$, H – расстояние между подвижной и неподвижной поверхностями микроструктуры. При большой частоте колебаний структуры δ становится сравнимо с H. Тогда c_{sdown} – коэффициент вязкого демпфирования, обусловленный трением газа под структурой, в соответствии с моделью Стокса можно выразить как [73]:

$$c_{sdown} = \mu_{eff} \frac{A}{H} \times F, \qquad (1.47)$$

где *А* – площадь перекрытия между поверхностями подвижной и неподвижной частями микроструктуры, *F* – добавочный коэффициент, определяемый по формуле:

$$F = \beta^* H \times \frac{\sin(2\beta^* H) + \sinh(2\beta^* H)}{\cosh(2\beta^* H) - \cos(2\beta^* H)},$$
(1.48)

где $\beta^* = 1/\delta$. При $\delta >> H$ добавочный коэффициент приближается к 1. Таким образом, коэффициент вязкого демпфирования, обусловленный трением газа под плоскостью движущейся части структуры, сходится к коэффициенту – c_c , предполагающему модель Куэтта [73]:

$$c_c = \mu_{eff} \frac{A}{H}.$$
 (1.49)

При малых значениях H добавочный коэффициент – F равен единице для всего диапазона частот, он увеличивается при больших значениях H. Коэффициент вязкого демпфирования c_{sabove} , обусловленный трением газа над поверхностью движущейся структуры, в соответствии с моделью Стокса выражается как [73]:

$$c_{sabove} = \frac{\mu_{eff}A}{\delta}.$$
 (1.50)

В результате, если МЭМС-резонатор осуществляет сложное движение, то имеет место учет потерь энергии как от доминирующего механизма рассеяния – эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки, так и от эффекта демпфирования скользящей газовой пленки.

1.3.3.3. Термоупругое демпфирование

При работе МЭМС-резонатора наблюдается градиент деформации на разных участках, поскольку одна часть структуры испытывает растяжение, а другая – сжатие при колебаниях [71]. Градиент деформации приводит к периодическому температурному градиенту, а так как температурная деформация не совпадает по фазе с упругой, происходит рассеяние энергии при необратимой теплоотдаче вследствие температурного градиента. Этот процесс потери энергии называется термоупругим демпфированием. Если постоянная времени теплопереноса близка к периоду смещения упругой деформации, *Q*_{TED} сильно снижается и резонатор испытывает значительную потерю энергии [71].

Уравнение движения с дополнительной тепловой деформацией вследствие термоупругого взаимодействия представлено в [71, 80]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 u + (\mu + \lambda) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) \frac{E\alpha}{3(1 - 2\vartheta)} \nabla \mathsf{T}, \tag{1.51}$$

где ρ – плотность, u – общее смещение, μ и λ – параметры Ламе, ∇^2 – оператор Лапласа, ∇ – оператор градиента, E – модуль Юнга, α – коэффициент теплового расширения, ϑ – коэффициент Пуассона.

Уравнение теплопроводности для тепловыделения вследствие термоупругого взаимодействия представлено ниже [80]:

$$k\nabla^2 T = \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{E\alpha T_0}{3(1-2\vartheta)} \nabla \cdot \frac{\partial u}{\partial t},$$
(1.52)

где k – коэффициент теплопроводности, T – рабочая температура, C_P – удельная теплоемкость, T_0 – абсолютная равновесная температура. Уравнения (1.51) и (1.52) описывают термоупругие свойства изотропного твердого материала. Эти связанные уравнения решаются относительно комплексных собственных значений, мнимая часть которых представляет рассеяние вследствие термоупругих явлений [71]. Далее дается подробное аналитическое решение для балки при действии поперечной вибрации на частоте первой моды колебаний с использованием стандартной модели неупругого твердого тела [81]:

$$\sigma + \tau_{\varepsilon} \dot{\sigma} = E_R(\varepsilon + \tau_{\sigma} \dot{\varepsilon}), \tag{1.53}$$

где σ – напряжение; τ_{ε} – время релаксации напряжения, которое изменяется экспоненциально при постоянной деформации; $\dot{\sigma}$ – скорость изменения напряжения; E_R – изотермический модуль Юнга при релаксации; ε – деформация; τ_{σ} – время релаксации деформации, которая изменяется экспоненциально при постоянном напряжении; $\dot{\varepsilon}$ – скорость изменения деформации. Параметр E_U – адиабатический модуль Юнга без учета релаксации:

$$E_U = E_R \left(\frac{\tau_\sigma}{\tau_\varepsilon}\right),\tag{1.54}$$

Величина релаксации Δ_E [81] определяется по формуле:

$$\Delta_E = \frac{E_U - E_R}{\sqrt{E_U E_R}},\tag{1.55}$$

При гармоническом колебании напряжения и деформации выражаются через частотнозависимый комплексный модуль Юнга *E*_(*w*) [81]:

$$E_{(\omega)} = E_R \left[\frac{1 + \omega^2 \tau_{\varepsilon} \tau_{\sigma} + i\omega(\tau_{\sigma} - \tau_{\varepsilon})}{1 + \omega^2 \tau_{\varepsilon}^2} \right], \qquad (1.56)$$

где *ω* – собственная частота. Модуль *E*_(*ω*) можно записать в виде функции усилия релаксации и резонансной угловой собственной частоты [81]:

$$E_{(\omega)} = E_R \left[1 + \Delta_E \left(1 + f(\omega) \right) \right], \tag{1.57}$$

Если значения ω велики, то $f(\omega) \to 0$, и модуль Юнга стремится к адиабатическому значению без учета релаксации. Если значения ω малы, то $f(\omega) \to -1$, и модуль Юнга возвращается к изотермическому значению E_R без учета релаксации.

Для промежуточных частот $E_{(\omega)}$ имеет комплексное значение. Соответственно, собственная частота также имеет комплексное значение [81]:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \Delta_E (1 + f(\omega))}, \qquad (1.58)$$

где ω_0 – изотермическая собственная частота с учетом релаксации. Действительная часть $Re(\omega)$ определяет новые значения собственных частот резонатора с учетом термоупругого взаимодействия, а мнимая часть $Im(\omega)$ определяет релаксацию колебаний. Величина

термоупругого демпфирования, выражаемая как параметр, обратный добротности – Q_T^{-1} , определяется как соотношение мнимой и действительной частей собственной частоты [81]:

$$Q_T^{-1} = 2 \left| \frac{Im(\omega)}{Re(\omega)} \right|. \tag{1.59}$$

Следующее соотношение получено в работе [81] при поперечных колебаниях:

$$Q_T^{-1} = \Delta_E \frac{\omega_{mech} \tau_{th}}{1 + (\omega_{mech} \tau_{th})^2} = \frac{E\alpha^2 T_0}{\rho C_P} \frac{\omega_{mech} \tau_{th}}{(1 + (\omega_{mech} \tau_{th})^2)},$$
(1.60)

где:

$$\tau_{th} = \frac{\rho C_P h^2}{\pi^2 k},\tag{1.61}$$

$$Q_{mat} = \frac{\rho C_P}{\mathrm{E}\alpha^2 T_0},\tag{1.62}$$

$$Q_{freq} = \frac{1 + (\omega_{mech}\tau_{th})^2}{\omega_{mech}\tau_{th}},$$
(1.63)

$$Q_T = Q_{mat} Q_{freq}, \tag{1.64}$$

где ω_{mech} — механическая резонансная угловая собственная частота; τ_{th} — время тепловой релаксации; h — толщина стержня, в котором происходит тепловая релаксация; Q_{mat} — добротность, ограниченная свойствами материала; Q_{freq} — добротность, ограниченная рабочей частотой. Добротность Q_{mat} зависит только от температуры и свойств материала. Добротность Q_{freq} является функцией частоты ω_{mech} и времени τ_{th} , которые зависят от геометрии и размеров резонатора.

1.3.4. Эффект втягивания

Рассмотрим одномерный случай движения одной из обкладок плоского конденсатора (рис. 1.27). Подобная задача встречается довольно часто при моделировании МЭМС-резонатора, поскольку управление резонатором – его раскачка и считывание полезного сигнала осуществляется при помощи электростатики. Для того, чтобы конденсатор находился в стабильно рабочем положении, сила растянутой пружины, связывающей подвижную обкладку, должна равняться силе, вырабатываемой конденсатором. Это возможно при значениях напряжения меньше критического и при перемещении обкладки меньше, чем на треть от расстояния между обкладками. При нарушении этих условий подвижная обкладка теряет

стабильность и неудержимо устремляется к неподвижной. Это явление получило название эффекта втягивания *«pull-in»* [82].

Система на рис. 1.27 состоит из подвижной обкладки (балка жесткостью -k), расположенной на расстоянии -d относительно основания, к которому приложено постоянное напряжение смещения $-V_{DC}$.



Рисунок 1.27 – Схематичное представление резонатора ЧЭ в виде плоского конденсатора с подвижной верхней обкладкой [83]

Уравнение движения верхней обкладки можно записать как [83]:

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = \frac{\varepsilon A V^2}{2(d-x)^2} | V = V_{DC}, \qquad (1.65)$$

где A – площадь нижней поверхности обкладки, ε – диэлектрическая проницаемость среды, c – коэффициент демпфирования. Выполняя замену $x_1 = x$ и $x_2 = \dot{x}$, преобразуем выражение (1.65) к уравнению (1.66) следующим образом [84]:

$$\dot{x}_2 = \frac{\varepsilon A V_{DC}^2}{2m(d-x_1)^2} - \frac{c}{m} x_2 - \frac{k}{m} x_1.$$
(1.66)

Найти положение равновесия в системе возможно при $x_2 = 0$ и $\dot{x}_2 = 0$. Следовательно,

$$\frac{\varepsilon A V_{DC}^2}{2m(d-x_1)^2} - \frac{k}{m} x_1 = 0, \qquad (1.67)$$

Уравнение (1.67) сводится к кубическому:

$$\left(\frac{x_1}{d}\right)^3 - 2\left(\frac{x_1}{d}\right)^2 + \left(\frac{x_1}{d}\right) - \frac{\alpha}{\gamma d^3} = 0, \qquad (1.68)$$

где:

$$\gamma = \frac{k}{m},\tag{1.69}$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon A V_{DC}^2}{2m}.\tag{1.70}$$

Колебания ограничены и происходят в пределах:

$$0 < \frac{x_1}{d} < 1. \tag{1.71}$$

Очевидно, удовлетворяющие условию (1.71) корни уравнения (1.68) существуют при:

$$0 < \frac{\alpha}{\gamma d^3} < \frac{4}{27} \tag{1.72}$$

Причем таких корней в этом случае будет всегда два – $x_1^{(1)}$ и $x_1^{(2)}$. Соответственно, система имеет два положения равновесия: устойчивое – $x_1^{(1)}$ и неустойчивое – $x_1^{(2)}$. При $V_{DC} = V_{pull}$ они сливаются, тем самым образуя точку бифуркации, которая является точкой максимума ξ_{max} функции:

$$f(\xi) = \xi^3 - 2\xi^2 + \xi - \frac{\alpha}{\gamma d^3},$$
(1.73)

при:

$$\xi = \frac{x_1}{d}.\tag{1.74}$$

$$f^{\prime(\xi)} = 3\xi^2 - 4\xi + 1 = 0, \tag{1.75}$$

когда:

$$\xi_{max} = \frac{1}{3},$$
 (1.76)

$$x_1 = \frac{d}{3},$$
 (1.77)

Таким образом, чтобы реализовать возникновение точки бифуркации, необходимо, чтобы корни $x_1^{(1)}$ и $x_1^{(2)}$ уравнения (1.68) сошлись в один $x_1^{(1)} = x_1^{(2)} = d/3$, что возможно при:

$$\frac{\alpha}{\gamma d^3} = \frac{4}{27}.\tag{1.78}$$

Тогда пороговое напряжение *V*_{pull}, когда система стабильна и не испытывает каких-либо нежелательных эффектов определяется как:

$$V_{pull} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\varepsilon A}},\tag{1.79}$$

где для балки, жестко закрепленной с обоих концов, коэффициент жесткости вычисляется как [66]:

$$k = \frac{384EI}{L^3} + 8,32\frac{N}{L},\tag{1.80}$$

где *L* – длина балки, *E* – модуль упругости, *I* – момент сечения инерции, *N* – аксиальная сила.

Для случая, когда $V=V_{DC}+V_{AC}$, т.е. помимо постоянного напряжения смещения V_{DC} , прикладывается переменное поле в виде V_{AC} , уравнение движения (1.65) примет вид уравнения Дюффинга [83] с гармонической возбуждающей силой:

$$\ddot{u} + 2\mu\dot{u} + \omega_n^2 u + \alpha_c u^3 = f\cos(\Omega t), \qquad (1.81)$$

где ω_n – собственная частота осциллятора, μ – линейный коэффициент демпфирования, f, Ω – амплитуда и частота возбуждающей силы, α_c – коэффициент кубической нелинейности, который может принимать значения $\alpha_c > 0$ или $\alpha_c < 0$.

В работе [85], в качестве примера, были сделаны аналитические выкладки для предсказания поведения МЭМС-резонатора, позволяющие установить связь между механикой и нелинейным вкладом от электростатического взаимодействия.

Отклонение входящей в конструкцию МЭМС-резонатора балки из состояния равновесия в условиях воздействия постоянным и переменным электрическим полем можно записать через функцию $\hat{w}(x,t)$, тогда уравнение Эйлера-Бернулли для случая с жестким закреплением на обоих концах [85] будет выглядеть как:

$$EI\frac{\partial^{4}\widehat{w}(\hat{x},\hat{t})}{\partial\hat{x}^{4}} + \rho bh\frac{\partial^{2}\widehat{w}(\hat{x},\hat{t})}{\partial\hat{t}^{2}} + \hat{c}\frac{\partial\widehat{w}(\hat{x},\hat{t})}{\partial\hat{t}} - \left[\widehat{N} + \frac{Ebh}{2l}\int_{0}^{1} \left[\frac{\partial\widehat{w}(\hat{x},\hat{t})}{\partial\hat{x}}\right]^{2} d\hat{x}\frac{\partial^{2}\widehat{w}(\hat{x},\hat{t})}{\partial\hat{x}^{2}}\right] = \frac{1}{2}\varepsilon_{0}\frac{bC_{n1}\left[V_{AC}\cos\left(\widehat{\Omega}\hat{t}\right) - V_{DC}\right]^{2}}{\left(g_{a} - \widehat{w}(\hat{x},\hat{t})\right)^{2}}H_{1}(\hat{x}) - \frac{1}{2}\varepsilon_{0}\frac{bC_{n2}\left[V_{S} - V_{DC}\right]^{2}}{\left(g_{d} - \widehat{w}(\hat{x},\hat{t})\right)^{2}}H_{2}(\hat{x}), \quad (1.82)$$

где l_d , l, g_a , g_d , b, h – геометрические параметры самой балки и отклоняющих электродов возле неё, согласно рис. 1.28. V_{AC} , V_{DC} , C_{ni} – электрические параметры; E, I, ρ – модуль Юнга, момент инерции сечения и плотность материала балки, соответственно.



Рисунок 1.28 – Модель МЭМС-резонатора с электродами [85]

После введения соответствующих нормировочных безразмерных коэффициентов выражение (1.82) и граничные условия примут вид [85]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + \alpha_2 C_{n2} \frac{[V_S - V_{DC}]^2}{(1+w)^2} H_2(x) =$$
$$= \alpha_2 C_{n1} \frac{[V_{AC} \cos(\Omega t) - V_{DC}]^2}{\left(R_g - w\right)^2} H_1(x) + \left[\widehat{N} + \alpha_1 \int_0^1 \left[\frac{\partial w}{\partial x}\right]^2 dx\right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (1.83)$$

$$w(0,t) = w(1,t) = \frac{\partial w}{\partial x}(0,t) = \frac{\partial w}{\partial x}(1,t) = 0, \qquad (1.84)$$

$$H_{2}(x) = H\left(x - \frac{l+l_{a}}{2l}\right) - H\left(x - \frac{l-l_{a}}{2l}\right),$$
(1.85)

$$H_{2}(x) = H\left(x - \frac{l + l_{d}}{2l}\right) - H\left(x - \frac{l - l_{d}}{2l}\right),$$
(1.86)

$$c = \frac{\hat{c}l^4}{EI\tau},\tag{1.87}$$

$$N = \frac{\widehat{N}l^2}{EI},\tag{1.88}$$

$$\alpha_1 = 6 \left(\frac{\mathbf{g}_a}{h}\right)^2,\tag{1.89}$$

$$R_{\rm g} = \frac{{\sf g}_a}{{\sf g}_a},\tag{1.90}$$

$$\alpha_2 = 6 \frac{\varepsilon_0 l^4}{E h^3 g_a^3},\tag{1.91}$$

$$\Omega = \widehat{\Omega}\tau, \tag{1.92}$$

Следовательно, для решения уравнения (1.83) можно использовать разрывный метод Галеркина как продолжение классического метода конечных элементов [85]. Функция w(x, t) может быть представлена как:

$$w(x,t) = \sum_{k=1}^{n} a_k(t) f_k(x).$$
(1.93)

При условии отсутствия затухания и доминирования первой моды колебания балки, выражение (1.83) преобразуется в [85]:

$$\ddot{a}_{1} + c\dot{a}_{1} + \mu_{1}a_{1}\ddot{a}_{1} + \mu_{2}a_{1}^{2}\ddot{a}_{1} + \mu_{3}a_{1}^{3}\ddot{a}_{1} + \mu_{4}a_{1}^{4}\ddot{a}_{1} + c\mu_{1}a_{1}\dot{a}_{1} + c\mu_{2}a_{1}^{2}\dot{a}_{1} + c\mu_{3}a_{1}^{3}\dot{a}_{1} + c\mu_{4}a_{1}^{4}\dot{a}_{1} + \chi_{2}a_{1}^{2} + \chi_{3}a_{1}^{3} + \chi_{4}a_{1}^{4} + \chi_{5}a_{1}^{5} + \chi_{6}a_{1}^{6} + \chi_{7}a_{1}^{7} + \nu + \zeta_{0}\cos(\Omega t) + \zeta_{1}a_{1}\cos(\Omega t) + \zeta_{2}a_{1}^{2}\cos(\Omega t) + \zeta_{3}\cos(2\Omega t) + \zeta_{4}a_{1}\cos(2\Omega t) + \zeta_{5}a_{1}^{2}\cos(2\Omega t) = 0$$
(1.94)

Уравнение (1.94) является нелинейным относительно канонических членов, входящих в выражение. И как было сказано выше, оно устанавливает связь между механикой и нелинейным вкладом от электростатического взаимодействия. Набор решений, получаемый от разного вклада действующих параметров, можно отобразить графически (рис. 1.29).



Рисунок 1.29 – АЧХ, нормированная по амплитуде, в зависимости от разных VDC, gd [85]

1.4. Выводы по главе 1

- 1. Проанализированы существующие решения современных микровакуумметров и их конструктивно-технологические особенности. В ходе рассмотрения основных принципов функционирования микровакуумметров выявлено, что тепловые вакуумметры обладают невысокой точностью, зависимы от среды, имеют ограниченный температурный диапазон и небольшой срок эксплуатации. Для создания ионизационных вакуумметров необходимо разрабатывать сложные технологические процессы с применением различных материалов, несовместимые со стандартной кремниевой технологией, кроме того, они обладают невысокой стабильностью. Резонансные МЭМС-вакуумметры с монокристаллическим кремниевым резонатором с электростатическим способом возбуждения колебаний являются наиболее предпочтительными, благодаря таким достоинствам как: технологическая совместимость со стандартной кремниевой технологией, широкий температурный диапазон, стабильность и долговечность работы. Возможность создания различных конфигураций резонаторов позволяет повысить чувствительность МЭМС-вакуумметра и расширить диапазон измеряемых значений.
- 2. Исследование основных механизмов, задействованных при работе чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра, показало, что значительную роль на поведение резонатора МЭМС-вакуумметра оказывают нелинейные эффекты, превалирующие в микромасштабе, приводящие к срыву колебаний или к некорректным выходным данным, получаемым со стороны чувствительного элемента. В связи с этим важным этапом разработки является построение точной модели ЧЭ МЭМС-вакуумметра для численного моделирования, объединяющей разнородные физические процессы, с включением в нее расчетов напряженно-деформированного состояния, нелинейной электродинамики, газодинамического и термоупругого демпфирования.
- 3. Наряду с построением точных моделей необходимо разработать технологический маршрут, на базе которого возможно создание экспериментальных образцов. Сами по себе технологические возможности производственной линии накладывают ряд ограничений на конструкцию будущего прибора, что также необходимо принять во внимание при разработке МЭМС-вакуумметра.

ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА 2.1. Кремний – конструкционный материал для МЭМС

Создание кремниевых электронных устройств вызвало резкое ускорение развития новых технологий и их практическую реализацию. Хорошо отработанная кремниевая технология обеспечивает относительно дешевый способ производства широкого круга приборов от простейших дискретных компонентов до сложных интегральных микросхем. В последнее время появляются новые задачи в области создания миниатюрных интеллектуальных датчиков, совмещающих ЧЭ и электронную схему на одном кристалле [2].

Монокристаллический кремний является главным конструкционным материалом в современных МЭМС. Преимущество в использовании этого материала по сравнению с другими обусловлено следующими его достоинствами:

- доступен в промышленных количествах с высокой степенью очистки;
- широкое применяется в промышленности микроэлектронных интегральных схем;
- большое количество разнообразных методов обработки;
- хорошо изученные и контролируемые электрические свойства;
- экономичность в производстве монокристаллических кремниевых подложек;
- превосходные механические свойства.

Последний критерий особенно привлекателен для использования в МЭМС. Монокристаллический кремний реагирует предсказуемым образом на различные воздействия, обладает хорошими упругими свойствами – имеет большой предел прочности и модуль упругости, схожий с нержавеющей сталью, при этом по плотности сравним с алюминием. Кремний способен многократно подвергаться воздействию циклических механических напряжений, не проявляя при этом эффекта усталости, имеет широкий рабочий диапазон температур и высокую коррозионную стойкость. Кроме того, выбор монокристаллического кремния, как основного материала в МЭМС, обусловлен низким коэффициентом теплового расширения, отсутствием гистерезиса и хорошей воспроизводимостью физических свойств [1]. Известно, что механические свойства кремния являются анизотропными. В таблице 2.1 показаны некоторые свойства монокристаллического кремния по сравнению с другими материалами [86].

Таблица 2.1. Механические и термические свойства кремния в сравнении с другими материалами.

Свойства	Si	Нержавеющая	Al	Al ₂ O ₃	a'.o	TC
	{111}	сталь		(96%)	S_1O_2	Кварц

Модуль Юнга (ГПа)	190	200	70	303	73	107
Коэффициент Пуассона	0,22	0,3	0,33	0,21	0,17	0,16
Плотность (г/см ³)	2,3	8	2,7	3,8	2,3	2,6
Предел текучести (ГПа)	7	3	0,17	9	8,4	9
Коэффициент теплового расширения *10 ⁻⁶ (1/K)	2,3	16	24	6	0,55	0,55
Коэффициент теплопроводности при 300 К (Вт/м*К)	1,48	0,2	2,37	0,25	0,014	0,015
Температура плавления (°C)	1414	1500	660	2000	1700	1600

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что кремниевые МЭМСрезонаторы обладают высоким коэффициентом добротности *Q*, демонстрируют низкий температурный дрейф и сочетают отличные характеристики фазового шума с низким энергопотреблением [23].

2.2. Технологические процессы создания МЭМС

Большинство технологических процессов изготовления МЭМС-устройств базируются на технологиях изготовления интегральных микросхем, адаптированных для формирования трехмерных структур, некоторые процессы специально созданы для производства МЭМС. Эти процессы называются микрообработкой [87]. По сравнению с микросхемами, которые основаны на ограниченном наборе «строительных блоков», а именно транзисторах, диодах и конденсаторах, каждое МЭМС-устройство уникально и требует более индивидуального подхода к технологическим процессам изготовления.

В настоящее время выделяется три основных метода микрообработки для изготовления МЭМС-устройств: объёмная, поверхностная и высокопрофильная микрообработка (LIGAтехнология и т.п.).

Типичный процесс поверхностной микрообработки представляет собой повторяющуюся последовательность нанесения на поверхность пластины тонких пленок, формирования на пленке защитного рисунка методом фотолитографии и химического травления пленки. Доминирующий конструкционный материал в поверхностной микрообработкае – это

поликремний, хотя иногда в качестве конструкционных материалов используются металлы, а поликремний служит основой [87]. Чтобы создать подвижные, функционирующие механизмы, в слоях чередуют тонкие пленки конструкционного материала – поликремния и заполнителя, называемого также жертвенным слоем – диоксида кремния. Из конструкционного материала образуются механические элементы, а жертвенным слоем заполняет пустоты между ними. На последнем этапе жертвенный слой удаляется травлением, и конструкционные элементы приобретают подвижность и функциональность (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Технологический процесс поверхностной микрообработки [87]

Поверхностная микрообработка – распространенная технология изготовления, подходящая для группового способа производства. Следовательно, микромеханические компоненты МЭМС, изготовленные с помощью поверхностной микрообработки, поддаются интеграции с чувствительной электроникой на одном чипе. В 1980-х годах были изготовлены довольно сложные конструкции, такие как электростатические приводы (включая гребенчатые приводы), резонаторы и микромоторы [69] (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Поликремниевый резонатор, изготовленный методом поверхностной микрообработки [69]

Объемная микрообработка – это производственный процесс, идущий от поверхности кремниевой пластины вглубь, состоит в процессе удаления материала подложки с целью формирования требуемой структуры [69, 88] (рис. 2.3, 2.4).



Рисунок 2.3 – Результат процесса объемной микрообработки – изготовление микробалки [88]



Рисунок 2.4 – Кремниевый микрозахват и микробалки, полученные с помощью объемной микрообработки [69]

В отличие от других методов, технология объемной микрообработки кремния наиболее полно исследована, полностью совместима с технологией изготовления интегральных схем [1]. Базовой операцией данного метода является операция травления кремния на глубину от десятков до нескольких сотен микрон. Травление кремния может осуществляться двумя методами: жидкостным химическим (ЖХТ) и плазмохимическим (ПХТ). ЖХТ – широко используемый метод микрообработки за счет достаточно высокой скорости травления, низкой стоимости за счет применяемого оборудования и материалов [89]. Для формирования закруглённых углублений, материал удаляется с помощью изотропного травления с одинаковой скоростью растворения по всем направлениям [87] (рис. 2.5). Для получения V-образных канавок, и выемок подходит анизотропное травление с различной скоростью растворения по разным кристаллографическим направлениям [90] (рис. 2.6), а для создания прямоугольных карманов с прямоугольными боковыми стенками применимо глубокое реактивное ионное травление [91] (рис. 2.7).



Рисунок 2.5 – Изотропное травление кремния [87]



Рисунок 2.6 – Анизотропное травление кремния с использованием КОН [90]



Рисунок 2.7 – Глубокое реактивное ионное травление кремния (Bosch-процесс) [91]

Глубокое реактивное ионное травление (Deep Reactive Ion Etching – DRIE) является одной из разновидностей ПХТ. Это существенно анизотропный процесс, он позволяет намного гибче управлять профилями травления и значительно расширить ассортимент изготавливаемых элементов. Данная технология позволяет создавать в объеме кремниевой подложки следующие микромеханические элементы – конструктивные узлы микроэлектромеханических систем и микросистемной техники: мембраны, канавки (или бороздки), отверстия [92]. Существующие подходы к глубокому реактивному ионному травлению кремния отличаются способом достижения пассивации боковой стенки. Одним из таких способов является Bosch-процесс, его суть состоит в многократном повторении двухстадийного цикла травления (рис. 2.7). В первой стадии цикла производится травление кремния через маску на сравнительно небольшую глубину. Во второй стадии цикла производится пассивация стенок протравленного профиля с помощью химически инертного пассивирующего слоя полимера. В следующем цикле травления ионная компонента разряда удаляет пассивирующий слой полимера со дна канавки и углубляет ее, в то время как боковые стенки канавки остаются защищенными маскирующим слоем полимера. Далее снова проводится пассивирующая стадия и т. д. В результате травление идет только в вертикальном направлении с небольшими периодическими «подтравами» в боковых направлениях [1]. Типичные структуры, получаемые с помощью Bosch-процесса, представлены на рис. 2.8.



Рисунок 2.8 – Типичные структуры, получаемые с помощью Bosch-процесса [92]

Целью высокопрофильной микрообработки является получение высокого отношения высоты профиля к его ширине в структуре. Одним из видов высокопрофильной микрообработки является процесс LIGA (Roentgen Lithography Galvanik Abformung, сокращение терминов рентгеновской литографии, гальваники и технологии микроформирования). Эта технология включает в себя разнообразный набор процессов микрообработки с методами рентгенолитографии для получения не кремниевых (металлических) структур с очень высоким аспектным соотношением, достигающим ≈ 100 к 1 [93]. (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Микроактюатор, созданный с помощью технологии LIGA [93]

Процесс изготовления в типичном случае начинается с нанесения фотомаски на полиметилметакрилата (IIMMA). поверхность листа Затем ПММА подвергается экспонированию рентгеновским излучением. Экспонированные участки, не защищенные маской, удаляются с помощью подходящего травителя, в результате чего образуются исключительно точные микроскопические механические элементы. Они сами по себе могут быть конечным продуктом или использоваться в качестве пресс-формы для изготовления небольших, точных полимерных элементов. На рис. 2.10 показан процесс на основе LIGA [94].



Рисунок 2.10 – Технологический процесс LIGA [94]

Технология LIGA хорошо подходит приложений, требующих большего для коэффициента соотношения сторон, чем можно получить с помощью поверхностной микрообработки. Главные преимущества LIGA заключаются в том, что с помощью этой технологии можно создавать прецизионные структуры с высоким соотношением сторон в

масштабах, превышающих те, которые достижимы при использовании процессов на основе кремния, обрабатывать разнообразные материалы. Недостатком LIGA является то, что по сравнению с другими процессами изготовления МЭМС он достаточно сложный, дорогостоящий (дороговизна маски и экспонирования), не может быть комбинирован на одном чипе с полупроводниковой интегральной микросхемой [1, 87, 94].

2.3. Разработка технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Учитывая конструктивные особенности ЧЭ МЭМС-вакуумметра с электростатическим возбуждением резонатора и технологические возможности производственного участка изготовления изделий микросистем, при разработке технологии ключевыми операциями стали непосредственное сращивание кремниевых пластин и глубокое анизотропное плазмохимическое травление кремния (Bosch-процесс).

Непосредственное сращивание кремниевых пластин представляет собой создание неразрывного соединения между двумя и более пластинами без дополнительного промежуточного слоя. Данная технология ввиду доступности материалов и совместимости с оборудованием для производства КМОП предпочтительна при создании МЭМС-вакуумметра.

Существует два вида непосредственного сращивания кремниевых пластин: гидрофильное и гидрофобное. В первом случае кремниевые пластины соединяются друг с другом за счёт слоёв оксида кремния (гидрофильные поверхности), во втором – после удаления слоёв естественного оксида с каждой пластины (гидрофобные поверхности) [95].

При гидрофобном сращивании поверхности пластин представляют собой чистый кремний, и сращивание производится либо в условиях высокого вакуума, либо в среде инертного газа. При таком способе соединения пластин на интерфейсе сращивания наблюдаются дислокации, распространяющиеся на несколько периодов кристаллической решетки обеих пластин (рис. 2.11) [96].



Рисунок 2.11 – Интерфейс сращивания гидрофобных поверхностей кремниевых пластин [96]

При гидрофильном сращивании интерфейс представляет собой слой оксида кремния (рис. 2.12). Толщина оксида, а также его механические и электрические свойства зависят от способа его формирования на поверхности пластин [96].



Рисунок 2.12 – Интерфейс сращивания гидрофильных поверхностей кремниевых пластин с естественным оксидом [96]

Непосредственное гидрофобное сращивание кремниевых пластин требует очень малой величины микрошероховатости поверхности по сравнению со сращиванием через гидрофильные поверхности [97]. Поэтому, вследствие уменьшения трудозатратности процесса и для минимизации дефектности при создании МЭМС-вакуумметра был выбран способ непосредственного гидрофильного сращивания кремниевых пластин.

Данный процесс заключается в приведении очень чистых и гладких кремниевых пластин в контакт при комнатной температуре и их последующем отжиге. В случае гидрофильного сращивания обе поверхности содержат слой SiO₂. Механизм сращивания заключается в трансформации слабых межповерхностных взаимодействий в ковалентную химическую связь при отжиге [98]. Первичный контакт поверхностей осуществляется за счёт слабых взаимодействий (на 1-2 порядка слабее ковалентного взаимодействия). Это главным образом взаимодействие через водородные связи и взаимодействие Ван-дер-Ваальса. Для наблюдения процесса первичного контакта пластин при комнатной температуре используют просвечивание пластин в инфракрасном (ИК) свете, с использованием камеры, чувствительной к длинам волн 0,9÷1,7 мкм. Кремниевые пластины приводят в контакт, после чего слабым надавливанием в какой-либо точке инициируют начало сращивания. При этом по скорости продвижения волны сварки можно судить о качестве соединяемых поверхностей и поверхностной энергии. Фотография сращиваемой пары пластин в разные моменты времени приведена на рис. 2.13 [99].



Рисунок 2.13 – Распространение волны сварки между двумя кремниевыми пластинами, наблюдаемое с помощью ИК камеры [99]

На рисунке 2.13 темные области соответствуют участкам, где сращивания еще не произошло, поскольку на пути света оказываются зеркальные плоскости, разделенные воздушной прослойкой. Светлые области соответствуют участкам, где поверхности плотно контактируют друг с другом. При комнатной температуре они разделяются только 1–2 молекулярными слоями H₂O, адсорбированной каждой поверхностью вследствие их гидрофильности.

Гидрофильная поверхность Si покрыта слоем SiO₂. Поверхность содержит связи Si–O–Si и Si–OH. Именно количество силанольных (Si–OH) групп на поверхности определяет гидрофильность поверхности из-за поляризации гидроксильных (OH) групп. Самым распространённым способом улучшения гидрофильности поверхности является обработка в перекисно-аммиачным растворе (ПАР) [97]. Силанольные группы покрыты несколькими монослоями воды [100], которые сцепляются за счет «мостиков» из водородных связей (рис. 2.14).



Рисунок 2.14 – Поверхность окисленной кремниевой пластины с силанольными группами и адсорбированными молекулами воды [100]

Непосредственно после установления контакта между пластинами поверхности удерживаются вместе с помощью водородных связей и связей Ван-дер-Ваальса между несколькими монослоями молекул воды и гидроксильными группами на поверхностях [97] (рис. 2.15 а).



Рисунок 2.15 – Схема взаимодействия между поверхностями пластин, происходящего при гидрофильном сращивании: а – состояние после приведения поверхностей в контакт; б – формирование конечных ковалентных связей [100]

Во время отжига с увеличением температуры молекулы воды диффундируют с поверхности раздела, растворяются в окружающем материале или вступают в реакцию с кремнием, увеличивая количество силанольных групп на поверхности. Как только эти молекулы воды удаляются, поверхности оказываются соединены только через силанольные группы. Во

60

время дальнейшего отжига эти связи трансформируются в ковалентные Si–O–Si с высвобождением воды в качестве продукта реакции (рис. 2.15 б) следующим образом [97]:

$$Si-OH + Si-OH \rightarrow Si-O-Si + H_2O.$$
 (2.1)

Образовавшиеся в результате реакции молекулы воды диффундируют в SiO₂ на поверхностях. Если молекулы воды достигают поверхности кремния, то происходит реакция с образованием диоксида кремния и водорода [97]:

$$\mathrm{Si} + 2\mathrm{H}_2\mathrm{O} \rightarrow \mathrm{SiO}_2 + 2\mathrm{H}_2. \tag{2.2}$$

Оставшийся водород не вступает в реакцию с кремнием и может образовывать пустоты между пластинами, которые можно обнаружить с помощью ИК камеры или сканирующего акустического микроскопа. На рис. 2.16 показаны образованные водородом пустоты между пластинами, наблюдаемые с помощью ИК камеры [97].



Рисунок 2.16 – Пустоты между пластинами, наблюдаемые с помощью ИК камеры [97]

Данный процесс можно улучшить путем изменения гидрофильности поверхности с помощью предварительной обработки поверхности пластин и при сращивании в различных средах, в том числе в вакууме. Известны методы химической активации поверхности пластин, но они не так эффективны, как плазменная активация [97]. Поверхность пластины активируется обработкой в плазме аргона, азота или кислорода перед сращиванием. Предварительная обработка пластин в плазме позволяет уменьшить шероховатость поверхностей и значительно увеличить энергию связи на интерфейсе сращивания (рис. 2.17) [101].



Рисунок 2.17 – Энергия связи на интерфейсе сращивания в зависимости от температуры отжига при использовании плазменной активации [101]

Выбор технологии непосредственного гидрофильного сращивания кремниевых пластин совместно с объемной микрообработкой, включающей Bosch-процесс, при создании ЧЭ МЭМСвакуумметра обусловлен следующими преимуществами:

- изготовление конструктивных элементов ЧЭ с аспектными соотношениями, недостижимыми при использовании других технологий;
- отсутствие необходимости перфорации элементов конструкции ЧЭ МЭМСвакуумметра для вытравливания жертвенного слоя, использующегося в технологиях поверхностной микрообработки;
- герметизация на уровне пластины с использованием геттеров;
- формирование выемок под активными элементами ЧЭ МЭМС-вакуумметра, что исключает вероятность возникновения эффекта прилипания к подложке.
- возможность трёхмерной интеграции ЧЭ МЭМС-вакуумметра и схемы обработки на основе КМОП на уровне пластины, что позволяет изготавливать пластины раздельно и объединять только в конце маршрута.

ЧЭ МЭМС-вакуумметра изготавливается на основе структуры КНИ, образованной из монокристаллических кремниевых пластин. При сращивании рабочий слой ЧЭ МЭМСвакуумметра с подвижными элементами формируется в одной пластине, а другая пластина является подложкой с вытравленными полостями, обеспечивающими перемещение подвижных частей ЧЭ. В технологический маршрут была введена операция травление выемок глубиной 50 мкм в пластине-основании с помощью Bosch-процесса. Фотография скола структуры, полученной с помощью непосредственного гидрофильного сращивания, представлена на рис. 2.18.



Рисунок 2.18 – Фотография РЭМ скола структуры, изготовленной с помощью непосредственного гидрофильного сращивания пластин кремния с выемками

Для формирования SiO₂, через который осуществляется непосредственное гидрофильное сращивание использовались процессы термического окисления, позволяющие обеспечить меньший уровень шероховатости поверхности по сравнению с процессом химического осаждения из газовой фазы, а значит увеличить адгезию. При термическом окислении с увеличением толщины оксида происходит увеличение механических напряжений, приводящих к достаточно большому прогибу пластин, что делает невозможным проведение операции непосредственного сращивания. В то же время, как отмечалось ранее, диоксид кремния должен быть достаточно толстым для растворения водорода, избыток которого может привести к образованию пустот при сращивании. Фотография разделительного слоя SiO2, полученного в результате сращивания, представлена на рис. 2.19.



Рисунок 2.19 – Фотография РЭМ разделительного слоя SiO2

Непосредственное гидрофильное сращивание чрезвычайно требовательно к чистоте и качеству поверхностей. Основными геометрическими параметрами пластин, влияющими на качество сращивания, являются волнистость и шероховатость. Для качественного сращивания необходимо обеспечить среднеквадратичное значение шероховатости 0,5 нм [97]. Необходимые для качественного выполнения гидрофильного сращивания значения волнистости и шероховатости кремниевых пластин достигаются внедрением в технологический маршрут изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра операции химико-механической полировки на установке G&P Poli 300. Пластины подвергались контролю микрошероховатости с помощью оптического анализатора микросистем Polytec MSA-500. Данная технологическая операция позволила достичь необходимую гладкость поверхностей пластин, а также очистит их от загрязнений. Шероховатость пластин после обработки составила 0,3–0,5 нм.

Помимо исключительно механических факторов, на процесс непосредственной гидрофильной сварки существенно влияют химические загрязнения. Частица размером 1 мкм может создать пустоту между сращиваемыми поверхностями около 1 см² [97]. Поэтому в технологический маршрут изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра для получения прочных соединений были введены операции химической обработки пластин в смеси Каро и ПАР непосредственно перед процессом гидрофильного сращивания.

Существенным недостатком стандартного гидрофильного сращивания является необходимость применения высокотемпературного отжига с температурой 1000–1100 °С для увеличения энергии связи на интерфейсе и создания прочного соединения. Использование в технологическом маршруте высокотемпературного отжига может привести к созданию дополнительных внутренних механических напряжений, соответственно, к деформации приборного слоя и искажению параметров ЧЭ МЭМС-вакуумметра. Кроме того, перед операцией сращивания становится невозможным применение легкоплавких материалов, что исключает сращивание металлизированных пластин и использование данной операции в трехмерной интеграции.

В разработанном технологическом маршруте температура отжига снижается до 400 °C за счет применения предварительной плазменной активации поверхности кремниевых пластин в плазме N₂. Обработка в плазме поверхностей кремниевых пластин перед сращиванием вызывает следующие эффекты:

- удаление поверхностных загрязнений и увеличение энергии адгезии за счёт создания нарушенных связей;
- увеличение количества силанольных групп;
- увеличение скорости диффузии воды через SiO₂;
- увеличение «вязкости» SiO₂ при относительно низких температурах.

После сращивания верхний рабочий слой структуры необходимо утонить до заданного значения толщины ЧЭ МЭМС-вакуумметра 30 мкм. Далее происходит формирование алюминиевых контактных площадок. Заключительным этапом маршрута изготовления ЧЭ является формирование подвижных узлов травлением активной области на глубину 30 мкм с использованием Bosch-процесса, который позволяет выполнить анизотропное травление независимо от кристаллографических плоскостей по сравнению с ЖХТ. Минимальная ширина элемента в приборном слое 5 мкм, минимальный зазор между элементами – 5 мкм. Основные операции технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра приведены на рис. 2.20.



Рисунок 2.20 – Основные операции технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМСвакуумметра

2.4. Выводы по главе 2

- Определено, что использование монокристаллического кремния в качестве конструкционного материала для исполнения ЧЭ МЭМС-вакуумметра позволяет добиться высокой добротности, высокой прочности, низкого температурного дрейфа и малого энергопотребления.
- Установлено, что изготовление ЧЭ МЭМС-вакуумметра с использованием технологии объемной микрообработки в сочетании с Bosch-процессом позволит использовать стандартное оборудование и материалы, использующиеся в технологии производства КМОП, избежать такие нежелательные явления, как дополнительная перфорация приборного слоя, прилипание подвижных частей ЧЭ к подложке и создать элементы с аспектным соотношением, необходимым для корректного функционирования ЧЭ МЭМСвакуумметра.
- Разработан технологический маршрут производства ЧЭ МЭМС-вакуумметра с ключевыми операциями непосредственного гидрофильного сращивания пластин и Boschпроцесса. Совместное использование данных технологий позволит создать законченный полнофункциональный прибор.
- 3) Отработана технология непосредственного гидрофильного сращивания пластин. Использование в технологическом маршруте термического окисления пластин, химикомеханической полировки совместно с механической обработкой позволило добиться необходимой гладкости и плоскостности кремниевых пластин и провести качественное сращивание пластин без пустот и дефектов. Температура отжига при сращивании снижена с 1000 °C до 400 °C за счет применения предварительной плазменной активации поверхности кремниевых пластин в плазме N₂, что позволяет избежать дополнительных внутренних напряжений в приборном слое и использовать легкоплавкие материалы.

ГЛАВА З. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ЧЭ МЭМС-ВАКУУММЕТРА 3.1. Численное моделирование ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Процесс разработки МЭМС-вакуумметра является трудоемким и длительным, поскольку включает в себя решение связанных задач из разных областей физики: теории электрического поля в полупроводниках, физики и механики анизотропных сред, газодинамики, термодинамики твердых тел и др.

При разработке МЭМС-датчиков существует необходимость в современных инструментах моделирования, так как ранние разработки основывались на грубых приближениях при аналитических выводах, а разработчики руководствовались методом проб и ошибок, что значительно увеличивало срок разработки и затраты на изготовление. В процессе создания МЭМС требуются точные модели с контролируемыми параметрами для прогнозирования поведения устройств, позволяющие оценить пригодность устройства для практического применения без создания физических образцов.

Из анализа, приведенного в 1 главе следует, что резонансная частота микрорезонатора с электростатическим возбуждением зависит от напряжения смещения, она уменьшается с увеличением напряжения, то есть происходит уменьшение эффективной жесткости резонатора при электростатическом взаимодействии («смягчение пружины»). В конечном итоге, при большом напряжении смещения баланс между силами электростатического взаимодействия и упругими силами нарушается и происходит «схлопывание» вследствие эффекта втягивания. В противовес эффекту «смягчения пружины» происходит увеличение эффективной жесткости резонатора, вследствие эффектов, связанных с вязким газодинамическим демпфированием: демпфированием сдавленной газовой пленки и демпфированием скользящей газовой пленки. Аналитический расчет параметров резонатора на основе теории механических колебаний не является полным. Необходимо решать систему уравнений колебания резонатора с внешней приложенной силой с дополнительными членами в уравнениях, отвечающих за нелинейные эффекты, совместно с модифицированным уравнением Рейнольдса или использовать средства численного моделирования с корректными настройками связанных переменных и граничных условий.

Модели разрабатываемых МЭМС могут описывать системы с множеством связанных переменных, затрагивающих несколько областей физики, различные силы, превалирующие на микромасштабах, нелинейные эффекты, механизмы диссипации энергии.

Моделирование ЧЭ МЭМС-вакуумметра проводилось с помощью современной среды численного моделирования – Comsol Multiphysics, предназначенной, в том числе, для моделирования работы МЭМС. Ее использование позволило не только сократить время разработки, но и создать точную модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра, которая позволяет оценить добротность системы, учитывая множество входных параметров, описывающих разнородные физические процессы.

При моделировании сложных систем Comsol Multiphysics использует метод конечных элементов для решения систем уравнений с частными производными. Этот метод широко используется для создания точных моделей МЭМС-устройств. Область, на которой численно решаются изучаемые уравнения, представляется в виде сетки конечных элементов. Поле внутри каждого элемента аппроксимируется функциями формы, которые чаще всего представляют собой линейные или квадратичные функции координат. Следовательно, значения поля в любой точке внутри элемента однозначно определяются значениями в узлах элемента и выбранным интерполяционным полиномом (т.е. функцией формы).

В Comsol Multiphysics доступны разные типы конечных элементов (рис. 3.1). Дискретизация модели конечными элементами проводилась в зависимости от геометрии, размеров, свойств областей разбиения, так как некачественное разбиение влияет на сходимость задачи и правильность расчетов.



Рисунок 3.1 – Типы конечных элементов в Comsol Multiphysics

Используемая программная среда позволяет связывать между собой уравнения в математической модели через коэффициенты, переменные, граничные условия, таким образом, решать связанные физические задачи. Этапы моделирования в среде Comsol Multiphysics включают в себя:

- задание параметров и пользовательских функций;
- разработка геометрии модели;
- выбор параметров материалов;
- описание физических процессов, настройка граничных условий и постановка задачи;
- генерация конечно-элементной сетки;
- настройка, в том числе оптимизация расчетов;
- постобработка результатов расчета.

ЧЭ резонансного МЭМС-вакуумметра содержит резонатор с электростатическим возбуждением. На первом этапе разработки была создана простая модель резонатора, в которой резонатор представляет из себя маятник, совершающий колебания вдоль плоскости основания и соединенный с ним посредством подвеса. Одностороннее закрепление резонатора было выбрано исходя из того, что при таком закреплении, в отличие от двухстороннего, деформации линейно зависят от приложенной нагрузки [23]. Кроме того, при двустороннем закреплении резонатора увеличиваются анкерные потери [70]. Для приведения в действие резонатора ЧЭ содержит неподвижные управляющие гребенчатые электроды, которые образуют с гребенками резонатора встречно-штыревую структуру.

Разработка ЧЭ МЭМС-вакуумметра требует соблюдения технических требований и конструкторско-технологических ограничений. Так, согласно технологическим ограничениям имеющегося оборудования на базе участка производства, минимальный зазор между элементами ЧЭ для приборного слоя в 30 мкм составляет 5 мкм, что достаточно велико для современных МЭМС и недостаточно для проявления в полной мере эффектов вязкого газодинамического демпфирования, которые являются основополагающими для реализации контроля уровня вакуума. Поэтому был предложен один из вариантов работы резонатора, когда наблюдается сильное смещение ЧЭ в постоянном электрическом поле для максимального сокращения величины зазора между подвижным и неподвижными элементами и подача переменного гармонического сигнала для возникновения осцилляций. При этом необходимо сохранить баланс, поскольку на электроды подается постоянное смещение V_{DC} и гармоническое возбуждение V_{AC} , а в момент резонанса возросшая амплитуда колебания может приводить к эффекту втягивания в область сильных полей и срыву колебаний, что наглядно продемонстрировано на рис. 1.33. Однако существует и второй вариант функционирования ЧЭ, при котором колебания резонатора осуществляются без исходного смещения в сильном электрическом поле.

3.1.1. Модель резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Учитывая, что одна из областей применения МЭМС-вакуумметра – инерциальные МЭМС-датчики, необходимо, чтобы они были стойкими к синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 5 Гц до 2000 Гц. Поэтому одним из требований при разработке конструкции резонатора было, чтобы собственная частота резонатора находилась в пределах 2300–3000 Гц. С этой целью была создана конструкция резонатора, представленная на рис. 3.2 и проведен модальный анализ на нахождение собственных частот. При этом важно было добиться, чтобы частота основной моды колебания резонатора была бы максимально удалена от частот паразитных мод.



Рисунок 3.2 – Первоначальная конструкция резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Результаты моделирования представлены на рис. 3.3 Величины деформаций значительно увеличены для наглядности. Собственная частота первой рабочей моды 2360 Гц.



Рисунок 3.3 – Моды колебаний первоначальной модели резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра: а – первая мода колебаний, б – вторая мода колебаний

3.1.1.1. Расчет параметров резонатора в зависимости от формы и конфигурации встречноштыревой структуры

В ЧЭ были использованы встречно-штыревые гребенки, так как эти структуры широко используются в МЭМС-устройствах. Гребенчатая встречно-штыревая структура состоит из подвижных и неподвижных проводящих пальцев. Наиболее часто используются прямоугольные встречно-штыревые гребенки. Их пальцы (штыри) создают втягивающее поле, позволяющее перемещать подвижные элементы МЭМС в широком диапазоне смещений, а также линейно изменять емкость в зависимости от смещения, что необходимо в работе большого числа МЭМС-сенсоров.

Напряжение смещения, приложенное к управляющей гребенке, создает электростатическую силу. Величина силы зависит от приложенного напряжения и, в то же время, от функции формы профиля пальцев. В гребенках с прямоугольными пальцами сохраняется постоянный зазор между подвижными и неподвижными пальцами, при их смещении друг относительно друга. Известно, что в отличие от прямоугольных пальцев, пальцы других форм используются для достижения линейной зависимости смещения от электростатической силы. [102-105].

Для того, чтобы найти взаимосвязь между силой и профилем зазора можно рассмотреть модель с пальцами произвольной формы [102], представленную на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Схематичное представление перекрытия пальцев встречно-штыревой гребенки произвольной формы [102]

В данной модели f(x) – функция формы профиля подвижного пальца, g(x) – функция формы профиля неподвижного пальца. Каждая из этих функций имеет область определения [0, L], где L – длина пальца. Перемещение подвижного пальца представлено как x_1 – область

$$F_x = \frac{\partial E}{\partial x_1} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx_1},\tag{3.1}$$

где E – энергия, запасенная между проводящими поверхностями, V – приложенное напряжение, C – емкость между пальцами, x_1 – относительное перекрытие пальцев. Исходя из этого, можно представить электростатическую силу как изменение емкости между перекрывающимися пальцами. Используя приближение плоскопараллельного конденсатора, получим [102]:

$$dC = \frac{\varepsilon_0 t dx}{g(x) - f(x + L - x_1)},$$
(3.2)

где t – это толщина пальцев, ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды в зазоре между пальцами. При этом допущении предполагается, что электроды параллельны друг другу и емкость может быть определена интегрированием:

$$C(x_1) = 2\varepsilon_0 t \int_0^{x_1} \frac{dx}{g(x) - f(x + L - x_1)},$$
(3.3)

Это выражение не применимо к кусочно-непрерывным функциям, имеющим точки разрыва. В выражении (3.3) добавлен коэффициент 2, потому что емкость одинаковая с обеих сторон пальца для пальцев симметричной формы. Если один из пальцев прямоугольной формы, емкость может быть приблизительно вычислена по формуле [102]:

$$C = 2\varepsilon_0 t \int_0^{x_1} \frac{dx}{h(x)} , \qquad (3.4)$$

где h(x) – функция формы профиля зазора между пальцами. Например, для прямоугольного подвижного пальца, когда f(x) = k, где k – константа, h(x) = g(x) - k. Подставляя (3.4) в (3.1), получаем [102]:

$$F_x = \frac{V^2 \varepsilon_0 t}{h(x_1)},\tag{3.5}$$

С помощью описанной модели можно предсказать результирующую силу для различных форм пальцев. В данном приближении сила, действующая на палец, обратно пропорциональна функции формы зазора между пальцами. Для сложных форм пальцев аналитический расчет электростатической силы затруднителен, но возможно найти решение с помощью методов численного моделирования.

При разработке ЧЭ МЭМС-вакуумметра было проведено исследование по расчету и подбору оптимальной формы пальцев гребенок, подходящих для достижения необходимого втягивающего электрического поля, смещения и емкости.

В разрабатываемой конструкции МЭМС-вакуумметра необходимо добиться наибольшего смещения подвижной части резонатора при меньшем напряжении, т.к. большая величина
приложенного напряжения смещения вызовет эффект втягивания, что приведет к «схлопыванию». Были разработаны модели резонаторов с различными формами пальцев и рассчитано максимальное смещение и емкость при изменении напряжения методом конечных элементов. Формы пальцев подбирались, исходя из возможностей изготовления. Были разработаны модели с гребенками, имеющими прямоугольные пальцы (рис. 3.5а), прямоугольные пальцы с закруглением переходов между ними в области втягивания (рис. 3.5б), скругленные пальцы (рис. 3.5в), скругленные пальцы с закруглением переходов между ними (рис. 3.5г), пальцы трапециевидной формы (рис. 3.5д), пальцы скругленной трапециевидной формы с закруглением переходов между ними (рис. 3.5е).



Рисунок 3.5 – Модели резонаторов с разными типами пальцев гребенок: а – прямоугольные пальцы, б - прямоугольные пальцы с закруглением, в – скругленные пальцы, г – скругленные пальцы с закруглением, д – трапециевидной формы, е – пальцы скругленной трапециевидной

При моделировании решалась система связанных уравнений в частных производных. Помимо уравнений, описывающих модель деформируемого твердого тела, решались уравнения, описывающие динамическую модель, то есть задавалась внешняя возбуждающая сила – на управляющий электрод подавалось постоянное напряжение смещения V_{DC} и переменное гармоническое напряжение V_{AC} для возбуждения колебаний резонатора.

Конечные элементы сетки, учитывающие геометрию пальцев, были выбраны в виде тетраэдров и гексаэдров (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Типы конечных элементов для гребенок с разными формами пальцев: а – гексаэдрические конечные элементы, б – тетраэдрические конечные элементы

Была добавлена область с подвижной сеткой вокруг резонатора со свойствами воздушной среды, которая автоматически связана с расчетом деформаций в системе и позволяет корректировать расчет силы при изменении зазоров между пальцами с учетом нелинейностей. На рис.3.7 представлено графическое изображение полученного распределения потенциала смещающей обкладки резонатора, на рис. 3.8 распределение поверхностной плотности заряда между гребенчатыми электродами, создающей втягивающее поле.



Рисунок 3.7 – Электрический потенциал [В] на управляющем электроде резонатора ЧЭ МЭМС-

вакуумметра



Рисунок 3.8 – Поверхностная плотность заряда [Кл/м²], создающая втягивающее поле, в резонаторе ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Для представленных конструкций гребенок было найдено максимальное смещение подвижной части резонатора в зависимости от величины прикладываемого напряжения к управляющему электроду. Графики зависимостей смещения от напряжения представлены на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Зависимость смещения резонатора от напряжения для разных форм пальцев

гребенок

Как видно из рис. 3.9 наибольшее смещение подвижной части резонатора при одном и том же напряжении наблюдается в модели со скругленными трапециевидными пальцами, а наименьшее – с прямоугольными. Скругленные трапециевидные пальцы создают более однородное втягивающее поле (рис. 3.10)



Рисунок 3.10 – Силовые линии поля в зазорах между гребенками: а – с пальцами прямоугольной формы, б – с пальцами скругленной трапециевидной формы

Был проведен расчет емкости в зависимости от приложенного напряжения и смещения для всех 6 моделей. Результаты расчета представлены на рис. 3.11, 3.12.



Рисунок 3.11 – Зависимость емкости от постоянного напряжения для разных форм пальцев

гребенок ЧЭ



Рисунок 3.12 – Зависимость емкости от смещения для разных форм пальцев гребенок ЧЭ

Самое большое значение емкости между гребенками ЧЭ наблюдается у моделей с прямоугольными пальцами. Важным фактором при разработке ЧЭ является возможность его дальнейшего сопряжения со схемой обработки сигнала. При этом, для увеличения чувствительности МЭМС-вакуумметра необходимо обеспечить максимальное изменение емкости при смещении. Самое большое изменение емкости между гребенчатыми электродами при изменении напряжения и расстояния между гребенками (наибольший тангенс угла наклона) у модели с трапециевидными скругленными пальцами.

Исходя из проведенных расчетов, для разрабатываемого МЭМС-вакуумметра оптимальными по форме являются гребенчатые встречно-штыревые электроды с трапециевидными скругленными пальцами.

Была исследована связь между начальной областью перекрытия пальцев встречноштыревых гребенчатых электродов и величиной смещения. Исследовались модели с перекрытием пальцев на максимальную длину, 2/3 длины, 1/2 длины и 1/3 длины. (рис. 3.13)



Рисунок 3.13 – Варианты гребенок ЧЭ с перекрытием пальцев на: а – всю длину, б – 2/3 длины, в – 1/2 длины, г – 1/3 длины

77

Зависимости максимального смещения резонатора при разных напряжениях для всех четырех типов конструкций представлены на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 – Зависимость смещения резонатора от постоянного напряжения при разных перекрытиях гребенок ЧЭ

Были найдены емкость между пальцами гребенок при разных напряжениях и зависимость емкости от смещения для разных конфигураций перекрытия пальцев (рис. 3.15, 3.16).



Рисунок 3.15 – Зависимость емкости от постоянного напряжения при разных перекрытиях ЧЭ



Рисунок 3.16 – Зависимость емкости от смещения при разных перекрытиях гребенок ЧЭ

При наибольшем перекрытии пальцев на максимальную длину при больших напряжениях происходит «схлопывание» вследствие эффекта втягивания из-за малой величины зазора между пальцами, также увеличивается вероятность «схлопывания» при внешних ударных воздействиях и под действием больших значений ускорения. Наибольшее значение смещения и, следовательно, емкости наблюдается у конструкции резонатора с перекрытием пальцев гребенок на 2/3 длины, такая конструкция является наиболье оптимальной.

Помимо формы пальцев в гребенках было оценено влияние размеров пальцев, их количества и начальной области перекрытия пальцев встречно-штыревых гребенок. Для увеличения смещения при меньшем напряжении было увеличено количество пальцев гребенок и их длина. При этом решалась оптимизационная задача, при которой в качестве целевой функции задавался квадрат разности между рассчитываемой и желаемой частотой, а в качестве управляющих параметров выступали геометрические параметры гребенок, т.к. увеличение количества и длины пальцев приводит к утяжелению конструкции резонатора и уменьшению собственной частоты колебаний рабочей моды. В результате расчета количество пальцев гребенок резонатора было увеличено с 9 до 14, а их длина с 25 мкм до 30 мкм.

3.1.1.2. Выбор и оптимизация формы подвеса резонатора

Упругие подвесы являются важными составляющими МЭМС, в ЧЭ в качестве подвесов используются балки, пружины различных форм, торсионы и их комбинации. Выбор конструкции

79

подвесов зависит от конкретной задачи и способа преобразования физической величины в электрический сигнал. Конфигурации упругих подвесов напрямую влияют на чувствительность, точность и стабильность МЭМС-датчиков, поэтому при разработке МЭМС-вакуумметра особое внимание уделялось расчету подвеса резонатора ЧЭ. Излишняя жесткость конструкции резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра может приводить к слабой чувствительности измерения остаточных газов в микрообъеме, к тому же эффективная жесткость может меняться вследствие изменения напряжения (эффект «смягчения пружины»).

Как было сказано выше, первоначальный прототип резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра представляет собой маятник, совершающий колебания вдоль плоскости основания, содержащий двусторонние гребенчатые электроды и соединенный с основанием посредством длинной упругой балки. Геометрические параметры подвеса (рис. 3.2) были выбраны исходя из обеспечения необходимой рабочей частоты (2500-3000 Гц) и величины смещения резонатора. После модификации формы и количества пальцев гребенок, резонатор стал выглядеть следующим образом (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Резонатор с подвесом в виде длинной балки

Слишком длинный подвес не является оптимальным решением, так как может привести к провисанию структуры, к возбуждению паразитных мод при внешних воздействиях. В том числе, линейные подвесы более подвержены нестабильности при больших напряжениях. Для исправления этих недостатков используются различные конструкции подвесов в виде закрепленных балок, имеющих нелинейные характеристики [1]. Такие сложные подвесы не ухудшают частотных характеристик резонатора и обладают схожей технологической воспроизводимостью по сравнению с подвесами простых форм [106, 107]. Были проведены разработка, моделирование и анализ различных форм подвесов резонатора. Уменьшить длину подвеса с сохранением частоты и величины смещения возможно с использованием подвеса зигзагообразной формы (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Резонатор с подвесом зигзагообразной формы

Была также разработана конструкция подвеса с изменяющейся жесткостью. Подвес состоит из конфигурации балки, соединенной с пружинным подвесом (рис. 3.19). Подобное техническое решение способствует приданию необходимой жесткости конструкции для достижения минимального зазора между электродами, считывающими полезный сигнал.



Рисунок 3.19 – Резонатор с подвесом с изменяющейся жесткостью

Была проведена топологическая оптимизация формы и геометрических параметров подвеса – увеличено количество и размеры сегментов пружины подвеса, толщина подвеса, изменена форма гребенок резонатора и области соединения их с подвесом с целью сохранения

необходимой рабочей частоты и максимального возможного смещения. Результат оптимизации конструкции резонатора представлен на рис. 3.20.



Рисунок 3.20 – Оптимизированная конструкция резонатора

Основная рабочая мода колебаний имеет частоту 2614 Гц, вторая мода колебаний – 3391 Гц. Изображения мод резонаторов приведены на рис. 3.21. Величины деформаций значительно увеличены для наглядности.





Рисунок 3.21 – Моды колебаний резонатора: а – первая рабочая мода, б – вторая мода

Результаты расчета максимального смещения для различных конфигураций резонаторов приведены на рис. 3.22.



Рисунок 3.22 – Зависимость смещения от постоянного напряжения для разных конфигураций резонаторов

Моделирование показало, что использование в ЧЭ оптимизированной конструкции резонатора с подвесом с изменяющейся жесткостью позволило добиться максимального смещения при одинаковом значении напряжения по сравнению с подвесами других форм. При этом при напряжениях свыше 25 В задача по нахождению смещения резонатора не имеет решения, что вызвано переходом системы в нелинейную область вследствие «схлопывания» электродов из-за эффекта втягивания.



Результаты расчета изменения емкости от напряжения и емкости от смещения при увеличении напряжения для различных конфигураций резонаторов приведены на рис. 3.23, 3.24.

Рисунок 3.23 – Зависимость емкости от постоянного напряжения для разных конфигураций резонаторов



Рисунок 3.24 – Зависимость емкости от смещения для разных конфигураций резонаторов

Разработанная оптимизированная конструкция резонатора с упругим подвесом с изменяющейся жесткостью позволила добиться максимального смещения и емкости при увеличении напряжения по сравнению с подвесами других форм.

Был проведен механический анализ на расчет напряженно-деформированного состояния конструкции резонатора. МЭМС-вакуумметр должен быть стойким к воздействию линейного ускорения. Механические напряжения, возникающие в подвесе при ускорении 150 g вдоль оси X (оси чувствительности) представлены на рис. 3.25.



Рисунок 3.25 – Распределение механических напряжений по Мизесу в резонаторе ЧЭ МЭМСвакуумметра

Критические точки конструкции, в которых возникают наибольшие механические напряжения располагаются в пружинной части подвеса резонатора, для уменьшения механических напряжений, форма подвеса была изменена – были скруглены углы пружинной части подвеса (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – Форма подвеса резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра со скругленными углами

Механические напряжения, возникающие в измененном подвесе при ускорении 500 g вдоль оси X представлены на рис. 3.27.



Рисунок 3.27 – Распределение механических напряжений по Мизесу в резонаторе с подвесом со скругленными углами ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Решение в виде пружинного подвеса со скругленными углами позволило уменьшить механические напряжения, возникающие в резонаторе при воздействии линейного ускорения.

3.1.2. Расчет добротности резонатора с учетом механизмов демпфирования 3.1.2.1 Расчет добротности резонатора методом конечных элементов

Для эффективного измерения величины давления остаточных газов в системе необходимо было подобрать режим работы, при котором обеспечивается допустимое расстояние между подвижными и неподвижными электродами для максимального проявления эффектов вязкого газодинамического демпфирования и значительного изменения добротности, но при этом рабочая частота должна сохраниться в допустимом диапазоне и не должно быть проявления эффекта втягивания.

К существующей модели, учитывающей механику твердого тела и внешнее воздействие электромеханических сил, был добавлен интерфейс для задания демпфирования в системе и дополнительные граничные условия в областях зазоров между неподвижными и подвижными пальцами гребенчатых электродов для учета эффектов вязкого газодинамического демпфирования. Решалось модифицированное уравнение Рейнольдса с учетом нормальных и тангенциальных сил, связанных с динамикой газа. В качестве входных данных задавались параметры: давление разреженного газа, динамическая вязкость и длина свободного пробега молекул при начальном давлении. Помимо этого, решалась задача по учету потерь, связанных с термическими эффектами в высокодобротном микрорезонаторе, то есть моделирование термоупругого демпфирования. Для этого к интерфейсу механики был добавлен интерфейс по переносу тепла в твердых телах с двусторонней связкой – учетом в качестве источников тепла градиентов деформаций. Была разработана модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра, позволяющая учитывать одновременно несколько физических эффектов: связанные механическое, электрическое, температурное и газодинамическое воздействие (рис. 3.28).



Рисунок 3.28 – Связанные физические эффекты при моделировании ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Совокупность уравнений в частных производных, описывающих процессы механической динамики и теплопередачи в твердотельных системах, а также позволяющих рассчитывать постоянное электрическое поле и течение в тонких пленках, содержат пространственные координаты не выше второго порядка (результат действия оператора Лапласа на функцию координат и времени), поэтому для численных расчетов использовались конечные элементы второго порядка.

В итоговой модели для расчета температуры, электрического потенциала, давления и скорости газовой пленки были использованы изопараметрические тетраэдральные конечные элементы Лагранжева семейства второго порядка. Для расчета перемещений были использованы изопараметрические серендиповы конечные элементы второго порядка [108]. Тетраэдральные конечные элементы в модели были выбраны как универсальные элементы, позволяющие выполнить построение функций формы в виде полных полиномов соответствующего порядка [109–111].

В результате расчета на потери, связанные с термоупругим демпфированием, было получено распределение температуры в области деформируемых областей резонатора рис. 3.29.



Рисунок 3.29 – Распределение нормированного отклонения температуры от температуры равновесия [K] в резонаторе ЧЭ МЭМС-вакуумметра

В областях подвеса, подверженных сжатию, наблюдается увеличение температуры, в областях подвеса, подверженных растяжению – уменьшение. Так как размеры резонатора достаточно большие в масштабе проявления термоупругого демпфирования, сильного влияния на добротность оно не оказывает.

Для расчета добротности и частоты с учетом всех доминирующих эффектов внешних и внутренних механизмов диссипации энергии был проведен параметрический анализ, где в качестве параметра использовалось значение давления остаточных газов в диапазоне 10⁻³–10³ Па. При этом, помимо добавления подвижной сетки в областях проявления нелинейных эффектов, при моделировании было использовано адаптивное изменение разбиения сетки. Для решения нелинейных задач использовался метод Ньютона-Рафсона [112]. При мультифизическом моделировании для решения задачи в связанной постановке использовался полностью взаимосвязанный алгоритм, при котором все связанные между собой физические величины рассматриваются одновременно [113].

Для того, чтобы оценить влияние различных механизмов потерь, на первом шаге моделирование проводилось с учетом потерь, вызванных термоупругим демпфированием и только эффектом демпфирования сдавленной газовой пленки, то есть задавались граничные условия для зазоров, образованных торцевыми областями пальцев гребенок. Далее были добавлены условия для боковых поверхностей пальцев гребенок, т.е. учитывались потери, вызванные эффектом скользящей газовой пленки (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Проявление эффектов вязкого газодинамического демпфирования во встречно-штыревой структуре [114]





Рисунок 3.31 – Зависимость добротности от давления при учете газодинамического демпфирования

Из рис. 3.31 видно, что затухание резонатора происходит в результате рассеяния энергии, вследствие газодинамического демпфирования как при сжатии газа между торцевыми областями пальцев, так и при трении газа о боковые поверхности пальцев гребенчатых электродов резонатора. Можно заметить, что при увеличении уровня вакуума в диапазоне добротность представленной системы меняется незначительно в диапазоне 10⁻³–10⁻¹ Па.

3.1.2.2. Сравнение результатов моделирования с аналитическим расчетом

Как было показано в первой главе, суммарные потери энергии резонатора можно количественно выразить в виде суммы слагаемых в пересчете на единицу добротности как:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{SQFD}} + \frac{1}{Q_{SLIDE}} + \frac{1}{Q_L},$$
(3.6)

где Q_{SQFD} – добротность, описывающая потери энергии в результате эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки, Q_{SLIDE} – добротность, описывающая потери энергии в результате эффекта демпфирования скользящей газовой пленки, Q_L – добротность, описывающая остальные потери.

Расчет добротности проводился для значений давления вакуума: 0.001 Па; 0,01 Па; 0,1 Па; 1 Па; 10 Па; 100 Па; 1000 Па.

На первом этапе проведена оценка вклада эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки и расчет *Q_{SQFD}*. Число Кнудсена, рассчитанное по формуле (1.35) при разных давлениях, представлено на рис. 3.32.



Рисунок 3.32 – Результат аналитического расчета числа Кнудсена

Из рассчитанных значений числа Кнудсена видно, что при всех значениях давления резонатор работает в молекулярном режиме, т.е. поток газа в зазорах не является непрерывным.

Эффективная вязкость, рассчитанная по формуле (1.38) при разных давлениях, представлена на рис. 3.33.



Рисунок 3.33 – Результат аналитического расчета эффективной вязкости для эффекта сдавленной газовой пленки

Было рассчитано число сжимаемости по формуле (1.42) и число сжимаемости отсечки по формуле (1.44). Число сжимаемости отсечки равно 9,9. Для всех значений представленных давлений, число сжимаемости не превышает значения 1,1 (рис. 3.34), что означает, что вязкие силы трения преобладают над силами упругости, и для аналитического решения уравнения Рейнольдса применима модель несжимаемого газа.



Рисунок 3.34 – Результат аналитического расчета числа сжимаемости

Рассчитанный по формуле (1.43) коэффициент вязкого демпфирования представлен на рис. 3.35.



Рисунок 3.35 – Результат аналитического расчета коэффициента вязкого демпфирования для эффекта сдавленной газовой пленки

Зависимость *Q_{SQFD}* от давления, полученная в результате аналитического расчета по формулам (1.39), (1.40), представлена на рис. 3.36.



Рисунок 3.36 – Результат аналитического расчета *QsQFD*

Добротность, описывающая остальные потери – Q_L , как отмечалось в главе 1, зависит в большей степени от внутренних механизмов диссипации энергии, которые незначительны по сравнению с механизмами, вызванными вязким демпфированием. Внутренние механизмы становятся значительными в области очень низкого вакуума. Вычисленная по формуле (3.6) зависимость полной добротности резонатора от давления с учетом только эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки представлена на рис. 3.37.



Рисунок 3.37 – Зависимость добротности резонатора от давления с учетом эффекта сдавленной газовой пленки

На втором этапе проведена оценка вклада эффекта скользящей газовой пленки и расчет *Q*_{SLIDE}. Расчет эффективной вязкости для эффекта скользящей газовой пленки по формуле (1.45) представлен на рис. 3.38



Рисунок 3.38 – Результат аналитического расчета эффективной вязкости для эффекта скользящей газовой пленки

Для определения расчетной модели было рассчитано δ по формуле (1.46) (см. рис. 3.39).

93



Рисунок 3.39 – Результат аналитического расчета δ

Исходя из полученных значений δ , установлено, что к разрабатываемому резонатору применима модель Стокса. Это предположение очевидно также ввиду геометрии конструкции резонатора, в частности встречно-штыревых гребенчатых электродов, между боковыми поверхностями пальцев которых происходит эффект скользящей газовой пленки. Расчет коэффициента вязкого демпфирования велся по формулам (1.47) (1.48) и (1.50). Тогда, добротность, связанная только с эффектом скользящей газовой пленки, вычисляется по формуле:

$$Q_{SLIDE} = m\omega(\frac{1}{c_{sdown}} + \frac{1}{c_{sabove}}) = \frac{m\omega}{\mu_{eff}A}(\frac{H}{F} + \delta).$$
(3.7)

*Q*_{SLIDE}, полученная в результате аналитического расчета по формулам, представлена на рис. 3.40.



Рисунок 3.40 – Результат аналитического расчета Q_{SLIDE}

В итоге полная добротность резонатора с учетом как эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки, так и эффекта скользящей газовой пленки, рассчитывается по формуле (3.6). Полученная в результате аналитического расчета добротность резонатора в зависимости от давления с учетом механизмов вязкого газодинамического демпфирования представлена на рис. 3.41.



Рисунок 3.41 – Результат аналитического расчета зависимости добротности резонатора от давления

Зависимости добротности резонатора от давления, полученные при моделировании и при аналитическом расчете, представлены на рис. 3.42.



Рис. 3.42 – Зависимости добротности от давления, рассчитанные аналитически и с помощью

численного моделирования

Значения добротности резонатора, рассчитанные аналитически и с помощью численного моделирования методом конечных элементов, согласуются между собой, что говорит о корректности построения модели резонатора. Расхождение значений добротности, полученных разными методами, можно объяснить невозможностью учета при аналитическом расчете сложной формы резонатора и эффективной площади поверхностей, участвующих в вязком газодинамическом демпфировании, и недостаточной точностью аналитических выводов по сравнению с численными при нелинейной природе эффектов. Помимо этого, при аналитическом расчете учитывалось влияние на добротность потерь, связанных только с вязким газодинамическим демпфированием, когда как в расчетной модели было учтено так же и термоупругое демпфирование, которое оказывает влияние на диссипацию энергии, а, следовательно, и на величину добротности.

3.1.2.3. Оптимизация конструкции резонатора для увеличения чувствительности

Чтобы разрабатываемый МЭМС-вакуумметр обладал большей чувствительностью и позволял измерять больший лиапазон давлений, конструкция резонатора была усовершенствована. Для максимального проявления эффектов газодинамического демпфирования и большего изменения добротности в зависимости от уровня вакуума, в конструкцию резонатора были введены дополнительные демпферы (рис. 3.43).



Рисунок 3.43 – Резонатор с дополнительными демпферами

Конструкция ЧЭ МЭМС-вакуумметра, содержащая резонатор, электроды и фигуры заполнения, представлена на рис. 3.44. Такое техническое решение позволило увеличить площадь взаимодействия элементов резонатора с молекулами газа и получить максимальную величину полезной составляющей сигнала, сохранив при этом технические характеристики резонатора.



Рисунок 3.44 – ЧЭ МЭМС-вакуумметра: 1 – резонатор, 2 – гребенчатые управляющие электроды, 3 – сигнальные электроды

Сама конструкция ЧЭ, в частности его статорная часть, была спроектирована таким образом, чтобы зазоры между подвижными демпферами резонатора и электродами были минимальны, но при этом отсутствовали бы ограничения для их осцилляций.

Был произведен расчет добротности для усовершенствованного резонатора. Значения добротности и графики зависимости добротности от давления усовершенствованного резонатора в сравнении с первоначальной конструкцией приведены на рис. 3.45.



Рисунок 3.45 – Зависимость добротности от давления для усовершенствованного резонатора в сравнении с первоначальной конструкцией

Как видно из представленных значений и зависимостей, конструктивное решение в виде дополнительных демпферов позволили повысить чувствительность резонатора. Зависимость (рис. 3.45) имеет резкий спад при увеличении давления, что говорит о сильном проявлении эффектов демпфирования в газовых пленках. Добротность резонатора меняется в диапазоне давлений 10⁻³ – 10³ Па, в области низких давлений добротность изменяется более, чем на 1000 относительных единиц на декаду изменения величины давления, что дает возможность создания точного МЭМС-вакуумметра.

3.1.3. Моделирование эффектов, связанных с электростатическим воздействием

Чтобы удостовериться в соответствии техническим требованиям, проведен модальный и частотный анализ для усовершенствованной конструкции резонатора, Собственная частота рабочей моды составляет 2660 Гц, вторая паразитная мода 3398 Гц. АЧХ, полученная при моделировании представлена на рис. 3.46.



Рисунок 3.46 – АЧХ резонатора ЧЭ-МЭМС, полученная при моделировании

Было проведено исследование на влияние эффекта уменьшения эффективной жесткости конструкции резонатора при увеличении напряжения. Результат моделирования представлен на рис. 3.47.



Рисунок 3.47 – Зависимость собственной частоты резонатора от напряжения смещения

Как видно из представленной зависимости, при изменении напряжения от 5 В до 20 В, собственная частота резонатора уменьшается на 150 Гц. Необходимо подобрать режим работы ЧЭ МЭМС-вакуумметра с использованием смещающего напряжения, которое не приведет как к «схлопыванию» структуры, так и к сильному смещению частоты, а, следовательно, и добротности системы.

Рассчитано напряжение pull-in, при котором система теряет стабильность. Для этой цели была решена обратная задача, по нахождению постоянного напряжения смещения, при котором происходило смыкание демпферов и сигнальных электродов, величина зазора между которыми составляла 5 мкм. Это напряжение составило 29,18 В (рис. 3.48). Принимая во внимание выражение (1.55), нестабильное состояние наступает, когда подвижный элемент проходит 1/3 величины зазора, и электростатические силы начинают превалировать над упругими, «схлопывание» демпферов с сигнальными обкладками может наступить при напряжении свыше 21 В (рис. 3.48), которое является напряжением втягивания. Необходимо учитывать это значение при подборе режимов работы МЭМС-вакуумметра.



Рисунок 3.48 – Зависимость напряжения смещения от отклонения резонатора

3.1.4. Моделирование внешних воздействующих факторов

Проведен прочностной анализ на расчет напряженно-деформированного состояния резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра при механических воздействиях. Было промоделировано воздействие линейного ускорения в направлениях Х, Ү, Z с амплитудой линейного ускорения 1470 м/с² (150g). Максимальные механические напряжения по Мизесу, возникающие в подвесе при воздействии ускорения вдоль оси Х (оси чувствительности), составляют 9,2 МПа (см. рис. 3.49), при этом максимальное смещение подвижного узла резонатора – 3,3 мкм.



Рисунок 3.49 – Механические напряжения в резонаторе, возникающие при воздействии ускорения вдоль оси Х

Максимальные механические напряжения по Мизесу, возникающие в подвесе при воздействии ускорения вдоль оси Y, составляют 1,9 МПа (см. рис. 3.50), при этом максимальное смещение подвижного узла резонатора – 0,7 мкм.



Рисунок 3.50 – Механические напряжения в резонаторе, возникающие при воздействии ускорения вдоль оси Ү

Максимальные механические напряжения по Мизесу, возникающие в подвесе при воздействии ускорения вдоль оси Z, составляют 9 МПа (см. рис. 3.51), при этом максимальное смещение подвижного узла резонатора – 4,9 мкм.



Рисунок 3.51 – Механические напряжения в резонаторе, возникающие при воздействии ускорения вдоль оси Z

Максимальные значения механических напряжений, возникающие в резонаторе при воздействии линейных ускорений по всем трем осям, не превышают предела прочности кремния (440 МПа). Можно сделать вывод, что конструкция резонатора является стойкой к линейным ускорениям с большим коэффициентом запаса. Учитывая, что минимальные зазоры в конструкции резонатора 5 мкм, при заданных действующих линейных ускорениях не произойдет замыкания подвижных и неподвижных частей резонатора.

Конструкция ЧЭ должна быть стойкой к удару одиночного действия в направлениях Х, Ү, Z с амплитудой пикового ускорения 1470 м/с² (150g) и длительностью действия ударного ускорения 0,2–0,5 мс. Проведено моделирование воздействия удара, форма ударного импульса приведена на рис. 3.52.



Рисунок 3.52 – Форма импульса одиночного удара

Максимальные механические напряжения по Мизесу, возникающие в критических узлах конструкции упругого подвеса резонатора при воздействии одиночного удара приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Механические напряжения по Мизесу при воздействии одиночного удара.

	Воздействие вдоль	Воздействие вдоль	Воздействие вдоль
	оси Х	оси Ү	оси Z
Величина максимального напряжения по Мизесу (МПа)	5,8	1,1	6,1

Перемещения резонатора при воздействии одиночного удара вдоль осей X, Y, Z в зависимости от времени представлены на рис. 3.53–3.55. Из полученных при моделировании данных можно сделать вывод, что при воздействии одиночного удара с максимальной амплитудой 150g замыкания гребенок и демпферов с неподвижными элементами ЧЭ и замыкания резонатора с подложкой не произойдет.



Рисунок 3.53 – Перемещение резонатора по времени при воздействии одиночного удара вдоль

оси Х



Рисунок 3.54 – Перемещение резонатора по времени при воздействии одиночного удара вдоль



Рисунок 3.55 – Перемещение резонатора по времени при воздействии одиночного удара вдоль оси Z

Проведено моделирование воздействия удара многократного действия в направлениях X, Y, Z (количество ударов 4000, по 667 в каждом направлении) с амплитудой пикового ускорения 196 м/с² (20g) и длительностью действия ударного ускорения 1–3 мс. Максимальные механические напряжения по Мизесу, возникающие в критических узлах конструкции упругого подвеса резонатора при воздействии удара многократного действия приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Механические напряжения по Мизесу при воздействии удара многократного действия.

	Воздействие вдоль	Воздействие вдоль	Воздействие вдоль
	оси Х	оси Ү	оси Z
Величина максимального напряжения по Мизесу (МПа)	1,2	0,3	0,8

Перемещения резонатора при воздействии удара многократного действия по трем осям не превышают величин 5 мкм, что соответствует минимальным зазорам в конструкции ЧЭ. Из полученных при моделировании ударных воздействий данных можно сделать вывод, что конструкция ЧЭ является стойкой к одиночным и многократным ударам.

Конструкция ЧЭ должна обеспечивать стойкость к синусоидальной вибрации в направлениях X, Y, Z в диапазоне частот 5–2000 Гц с амплитудой ускорения 392 м/с² (40g). Выполнено моделирование воздействия синусоидальной вибрации на ЧЭ. Результаты моделирования приведены на рис. 3.56–3.58.



Рисунок 3.56 – АЧХ резонатора при воздействии синусоидальной вибрации вдоль оси Х



Рисунок 3.57 – АЧХ резонатора при воздействии синусоидальной вибрации вдоль оси У



Рисунок 3.58 – АЧХ резонатора при воздействии синусоидальной вибрации вдоль оси Z
Как видно из полученных АЧХ, в заданном диапазоне частот 5–2000 Гц амплитуда резонатора не превышает минимальную величину зазора ЧЭ. Таким образом, конструкция ЧЭ обеспечивает стойкость к синусоидальной вибрации в заданном диапазоне частот.

Проведено численное моделирование стойкости ЧЭ к климатическим воздействиям. Моделирование выполнено для изменения температурного диапазона -60–85 °C (213,15–358,15 К). Изменение частоты при заданном температурном воздействии составило не более 1 Гц (рис. 3.59).



Рисунок 3.59 – Изменение частоты ЧЭ при температурном воздействии

3.2. Анализ результатов исследования экспериментального образца ЧЭ МЭМСвакуумметра

Разработка топологии ЧЭ проводилась с использованием САПР AutoCAD и топологического редактора Virtuoso Layout Editing САПР Cadence. При травлении кремния возникает эффект «подтрава» под маску [1] (рис. 3.60). В зависимости от граничных условий величина Δx (рис. 3.60 а) может быть разной. Как показано на рис. 3.60 б, «подтрав» более сильный, если область между фигурами более широкая. По этой причине эффект «подтрава» фигуры посередине различен с двух сторон, потому что различны расстоянии до соседних фигур.



Рисунок 3.60 – Эффект «подтрава» под маску [1]

При проектировании топологии было учтено, что во время травления, например, пружинной части подвеса, он подвергается большему «подтраву» с внешних сторон. Для того, чтобы избежать этого эффекта на площади приборного слоя, не задействованной в конструкции, выполнены фигуры заполнения, расположенные на выступах подложки. Учитывалось также, что на отдельные элементы ЧЭ должны подаваться и считываться разные электрические сигналы, а сам ЧЭ должен быть подключен к схеме обработки. Следовательно, паразитные емкости между элементами самого резонатора, между резонатором и подложкой должны быть минимальны. ЧЭ имеет управляющую, сигнальную обкладку и вывод подложки, на которых сформированы контактные площадки (КП). Фрагмент топологии ЧЭ приведен на рис. 3.61.



Рисунок 3.61 – Фрагмент топологии ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Пластины с ЧЭ МЭМС-вакуумметра были изготовлены в соответствии с маршрутом изготовления, описанным во 2 главе. Была произведена лазерная резка пластин и сборка кристаллов в корпус H18.64-1B. Фрагмент ЧЭ МЭМС-вакуумметра после разварки в корпус представлен на рис. 3.62.

110



Рисунок 3.62 – Фото фрагмента кристалла ЧЭ МЭМС-вакуумметра после разварки

С целью измерения основных характеристик изготовленного ЧЭ МЭМС-вакуумметра, оценки точности разработанной модели, а также проверки основного режима работы использовался анализатор микросистем Polytec MSA-500 (рис. 3.63). Для измерения добротности, амплитудно- и фазочастотных характеристик ЧЭ МЭМС-вакуумметра на MSA-500 применялся режим стробоскопической видео микроскопии.



Рисунок 3.63 – Анализатор микросистем MSA-500

На данном этапе разработки прибора для измерения выходного сигнала использовался именно анализатор микросистем, а не схема обработки сигнала с ЧЭ, поскольку необходимо было подтвердить работоспособность ЧЭ и верифицировать расчетные данные.

Измерения проводились в вакуумной камере с динамически изменяемым уровнем давления для дальнейшего сопоставления результатов численного моделирования добротности резонатора с экспериментальными значениями (рис. 3.64).



Рисунок 3.64 – Образец ЧЭ МЭМС-вакуумметра в вакуумной камере

Измеренные при давлении 0,05 Па АЧХ и фазочастотная характеристика (ФЧХ) резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра представлены на рис. 3.65.



Рисунок 3.65 – АЧХ и ФЧХ резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра (при давлении 0,05 Па)

Измеренная АЧХ соответствует характеристике, полученной при моделировании. Частота резонатора, полученная при измерении – 2677 Гц.

Измеренная величина добротности для образца ЧЭ МЭМС-вакуумметра при разных давлениях в сравнении с рассчитанными значениями представлена на рис. 3.66.



Рисунок 3.66 – Экспериментальные значения добротности при разных уровнях вакуума резонатора ЧЭ МЭС-вакуумметра в сравнении с результатами моделирования

На представленной зависимости рис. 3.66 наблюдается хорошее согласие между величинами, измеренными и полученными при численном моделировании. Ошибка расчетных значений собственной частоты резонатора относительно эксперимента составила не более 1%, добротности – не более 5%, что подтверждает корректность расчетов мультифизической модели.

3.3. Выводы по главе 3

- Найдена оригинальная конструкция МЭМС, позволяющая осуществлять контроль давления вакуума через величину добротности.
- 2) Выполнен анализ взаимосвязи формы, размеров, количества и области начального перекрытия пальцев встречно-штыревых гребенчатых электродов с величиной втягивающего поля, создаваемого электростатическими силами, и создаваемого им смещения резонатора и емкости между гребенками ЧЭ.

- Для контроля максимального смещения резонатора в зависимости от приложенного напряжения и достижения заданных частотных характеристик предложена оптимизированная конструкция резонатора ЧЭ с подвесом с изменяющейся жесткостью.
- 4) Создана мультифизическая расчетная модель ЧЭ, в которой учтены механика колеблющегося тела и нелинейные эффекты, связанные с газодинамическим и термоупругим демпфированием, действием электрического поля. Установлено, что доминирующее влияние на добротность системы оказывает газодинамическое демпфирование. Проведен учет вкладов механизмов вязкого газодинамического демпфирования: эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки и эффекта демпфирования скользящей газовой пленки в изменение добротности системы с использованием аналитического расчета и численного моделирования.
- 5) Предложено конструктивное решение дополнительные демпферы позволяющее увеличить эффективную площадь поверхности, взаимодействующую с молекулами газа. Установлено, что усовершенствованная конструкция резонатора позволяет отслеживать изменение давления в диапазоне 10⁻³–10³ Па по величине добротности.
- 6) В результате проведенного модального и частотного анализа определено напряжение pull-in, при котором система теряет стабильность. Продемонстрирован эффект уменьшения эффективной жесткости конструкции при увеличении приложенного напряжения.
- 7) Разработанная конструкция ЧЭ МЭМС-вакуумметра обеспечивает сохранение рабочей частоты, необходимой для максимального проявления эффектов, связанных с газодинамическим демпфированием, и обеспечивает стойкость ЧЭ к температурным воздействиям, воздействию линейных ускорений, одиночному удару, удару многократного действия и синусоидальной вибрации с большим коэффициентом запаса по прочности.
- 8) Разработана топология ЧЭ МЭМС-вакуумметра, на основе которой изготовлены экспериментальные образцы. В результате экспериментальных исследований выявлено хорошее согласие измеренных значений собственной частоты ЧЭ и добротности со значениями, полученными с помощью численного моделирования.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛА МЭМС-ВАКУУММЕТРА

Одной из проблем, связанных с созданием МЭМС-датчиков, является проектирование схемы обработки сигнала ЧЭ. В связи с тем, что разнообразие разрабатываемых МЭМС-датчиков велико, и большинство из них уникальны по конструкции ЧЭ, необходим индивидуальный подход к разработке схемы обработки сигнала. Как отмечалось в 1 главе, существует большое разнообразие измеряемых величин и способов преобразования энергий в МЭМС, поэтому возможно множество решений и подходов к разработке схем обработки сигналов.

Наряду с этим, все больший интерес вызывают способы минимизация потребляющей мощности МЭМС-датчиков, используемых в самых различных областях, таких как потребительские товары, беспроводные сенсорные узлы для мониторинга окружающей среды и инфраструктуры [115]. Различные исследования по разработке схем для резонансных МЭМСдатчиков в недостаточной степени затрагивали данную проблему [116–119]. Как упоминалось в 1 главе, одним из преимуществ резонансных МЭМС-датчиков является потенциальная возможность их низкого энергопотребления для обеспечения нормального функционирования приборов в течение длительного времени эксплуатации.

Центральное место в конструкции МЭМС-датчиков с электростатическим возбуждением, как правило, занимает микромеханический генератор [116, 117], физические параметры которого являются функциями интересующих измеряемых величин. Для поддержания колебательного процесса микромеханический генератор обычно включает в себя резонатор в контуре обратной связи усилителя. Для построения таких систем с обратной связью могут использоваться различные схемотехнические решения.

4.1. Расчет эквивалентной электрической схемы ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Как следует из уравнения (1.38), добротность резонатора Q зависит от коэффициента демпфирования ζ резонатора в рабочей среде. Как показано в (1.21), резонансная частота основной моды зависит от геометрических размеров резонатора и материала, из которого он изготовлен.

Для смещения и возбуждения резонатора на гребенчатый управляющий электрод подается постоянное напряжение смещения *V*_{DC} для отклонения резонатора из положения равновесия и

переменное напряжение V_{AC}. Комбинация напряжений V_{DC} + V_{AC} создает изменяющуюся во времени силу, под действием которой резонатор совершает механические колебания. Электростатическая сила описывается выражением [70]:

$$F(x,t) = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \left(V_{DC} + V_{AC}(t) \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \left(V_{DC}^2 + 2V_{DC} V_{AC}(t) + V_{AC}(t)^2 \right), \tag{4.1}$$

где С – емкость между управляющим электродом и резонатором:

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 A}{g - x},\tag{4.2}$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды, A – площадь электрода, g – зазор между электродом и резонатором, а x – смещение резонатора.

Электростатическая сила (4.1) содержит три компонента, принимая во внимание, что отклонение резонатора мало по сравнению с величиной зазора и $V_{DC} >> V_{AC}$:

$$F(t) \cong V_{DC} V_{AC}(t) \frac{\varepsilon_0 A}{g^2}.$$
(4.3)

Изменяющуюся во времени емкость можно выразить в виде тока [70]:

$$i = -(V_{DC} + V_{AC})\frac{\partial C}{\partial t} = -(V_{DC} + V_{AC})\frac{\partial C}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} = -(V_{DC} + V_{AC})\frac{\varepsilon_0 A}{(g-x)^2}\frac{\partial x}{\partial t} \cong -V_{DC}\frac{\varepsilon_0 A}{g^2}\frac{\partial x}{\partial t}.$$
 (4.4)

Как видно из (4.3) и (4.4), можно определить коэффициент электромеханического преобразования *η* [70]:

$$\eta = V_{DC} \frac{\varepsilon_0 A}{g^2}.$$
(4.5)

Из (4.3)–(4.5) следует:

$$F(t) = \eta V_{AC}(t), \tag{4.6}$$

$$i(t) = \eta \frac{\partial x}{\partial t}.$$
(4.7)

Амплитуда резонатора достигает максимума при резонансе, когда частота переменного тока совпадает с собственной частотой резонатора. Колебания резонатора могут быть описаны, как:

$$m_{eff}\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \zeta \frac{\partial x}{\partial t} + k_{eff}x = F(t).$$
(4.8)

Подставляя (4.6) и (4.7) в (4.8), получаем:

$$\frac{m_{eff}}{\eta^2}\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\zeta}{\eta^2}i + \frac{k_{eff}}{\eta^2}\int idt = V_{AC}(t).$$
(4.9)

В результате можно представить систему ЧЭ в виде эквивалентной электрической схемы, в соответствии с методом аналогий, описанным в 1 главе (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Эквивалентная электрическая схема ЧЭ

Характеристики этой схемы [70]:

$$R = \frac{\zeta}{\eta^2} = \frac{\sqrt{k_{eff} m_{eff}}}{Q\eta^2},$$
(4.10)

$$L = \frac{m_{eff}}{\eta^2},\tag{4.11}$$

$$C = \frac{\eta^2}{k_{eff}}.$$
(4.12)

Параметры этой эквивалентной электрической схемы необходимы для разработки схемы управления и обработки сигнала МЭМС-вакуумметра. Для ЧЭ МЭМС-вакуумметра параметры, рассчитанные аналитически по формулам (4.5), (4.10)–(4.12): R = 10 кОм, L = 38 кГн, C = 101 фФ при давлении 10^{-2} Па и Q = 61700.

Дополнительно возникает проходная емкость C_f между управляющим и сигнальным электродом, она может быть измерена экспериментально. Паразитные емкости C_d и C_s связаны с контактными площадками управляющего и сигнального электродов. Значения C_d и C_s оцениваются на основе размеров контактных площадок и технологических параметров.

4.2. Разработка электрической схемы управления и обработки сигнала

В основе схемы управления и обработки сигнала использовался генератор Пирса, ввиду его простоты, стабильности колебательного процесса и перспективы для минимизации мощности при необходимом коэффициенте усиления, обеспечиваемым одним транзистором, с помощью которого можно сформировать трехточечный генератор [116, 117], или парой КМОП транзисторов [120, 121] (рис. 4.2).

117



Рисунок 4.2 – Генератор Пирса [114]

В качестве усилителя в схеме генератора Пирса (рис. 4.2) используется КМОП-инвертор. При увеличении входного напряжения ток насыщения n-канального транзистора увеличивается, а p-канального, наоборот, уменьшается. В результате выходное напряжение может изменяться в диапазоне от 0 до напряжения питания. Если на вход инвертора подать напряжение смещения около половины величины напряжения питания, то оба транзистора будут открыты и смогут усиливать входной сигнал по напряжению [114]. Величина сопротивления R обеспечивает линейный режим работы инвертора и согласование импедансов резонатора и усилителя, резонатор вместе с нагрузочными емкостями C₁, C₂ образует цепь обратной связи. Поскольку емкости C₁, C₂ образуют емкостный делитель, при наличии которого коэффициент передачи цепи обратной связи равен C₁/C₂, то величины C₁, C₂ чаще всего выбирают одинаковыми. Для эффективной работы генератора необходимо согласование их импедансов, так как резонатор является частью цепи обратной связи усилителя [115].

Структурная схема управления и обработки сигнала МЭМС-вакууметра была построена на основе генератора Пирса путем подключения резонатора ЧЭ в обратную связь усилителя, как показано на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Структурная схема управления и обработки сигнала

В схеме на рис. 4.3: I – источник тока; g – генератор Пирса; A – регулятор амплитуды; R_b – резистор смещения для генератора Пирса; эквивалентная электрическая схема ЧЭ; BUF – буферный каскад.

Для поддержания колебаний необходимо выполнение двух условий:

- коэффициент усиления контура должен быть выше или равен единице;

- запас по фазе контура должен быть равен нулю (или кратен 360°).

Критическая крутизна *g*_{crit}, необходимая для поддержания устойчивых колебаний, составляет [117]:

$$g_{crit} = R\omega_0^2 \frac{\left(C_p^2 + 2C_f C_p\right)^2}{C_p^2},$$
(4.13)

где R – эквивалентное сопротивление ЧЭ, ω_0 – собственная круговая частота резонатора.

Емкость C_p включает в себя все паразитные емкости, а также ёмкости на обоих электродах ЧЭ, она неизбежна и особенно важна при потенциальной возможности интеграции МЭМС и КМОП-схем. Однако, схема генератора Пирса требует емкостной нагрузки на входном и выходном узлах резонатора/усилителя для формирования трехточечного генератора. Большая паразитная емкость C_p потребует большого значений критической крутизны и, следовательно, будет рассеиваться большая статическая мощность. Поэтому необходимо обдуманно выбирать C_p , чтобы минимизировать мощность, удовлетворяя при этом критериям генератора Пирса [117].

Эффективная выходная частота колебаний так же зависит от С_p как [117]:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_{out} - f}{f} = \frac{C}{2\left(C_f + \frac{C_p}{2}\right)},\tag{4.14}$$

где *f* – собственная частота резонатора, *f*_{out} – эффективная выходная частота колебаний.

Стабильность частоты требует небольшого Δf , и, следовательно, предпочтительно большое значение C_p , но это непременно приводит к увеличению энергопотребления. Необходимо соблюсти компромисс между энергопотреблением и стабильностью генератора.

Измеренное значение емкости C_f составило 150 фФ. Расчетное значение емкости C_p составило 1,10 пФ.

Максимальное сопротивление, обеспечиваемое генератором Пирса, должно быть больше, чем эквивалентное сопротивление ЧЭ, чтобы обеспечить колебание. Это условие должно быть выполнено с достаточно большим запасом. Условием возникновения колебаний является достижение оптимальной крутизны генератора Пирса [117]:

$$g_{opt} = \omega_0 (2C_p + \frac{C_p^2}{C_f}).$$
 (4.15)

Как показано в [119] для уменьшения критической крутизны и, как следствие, потребляемой мощности, добротность и толщина резонатора, а также постоянное напряжение смещения должны быть как можно выше, в то время как зазор между резонатором и электродами, как можно меньше.

Важным условием для обеспечения стабильного колебательного процесса в ЧЭ МЭМСвакуумметра является ограничение амплитуды колебаний резонатора ЧЭ, чтобы избежать нелинейного поведения («схлопывания»), которое может возникнуть при большом смещении резонатора.

Разработка и моделирование принципиальной электрической схемы управления и обработки сигнала проводилось в САПР Cadence с использованием SPICE-моделей транзисторов по технологии КМОП с проектными нормами 180 нм.

Принципиальная электрическая схема управления и обработки сигнала представлена на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Принципиальная электрическая схема управления и обработки сигнала

Сначала, когда генератор еще не запущен, регулятор амплитуды и схема смещения обеспечивают необходимый пусковой ток для генератора Пирса. Напряжение V_{bias} выбирается так, чтобы n-MOII транзисторы M21, M5 и M6 были смещены в подпороговую область. Таким образом, транзистор M21 выступает в роли резистора смещения генератора Пирса, а транзисторы M5 и M6 работают как резисторы в каскаде регулятора амплитуды в составе RC-фильтров нижних частот. Такое схемотехническое решение позволяет уменьшить занимаемую площадь на кристалле, исключая использование поликремниевых резисторов больших номиналов.

Транзистор *M22* представляет собой n-МОП транзистор, обеспечивающий усиление, необходимое для запуска колебаний, при этом его крутизна регулируется p-МОП транзистором *M10*. В связи с тем, что начальный ток на стоке транзистора очень велик, амплитуда колебаний начинает возрастать, при этом крутизна генератора Пирса больше g_{opt} (4.15). По мере увеличения амплитуды напряжения на стоке транзистора *M22*, которое является управляющим напряжением резонатора ЧЭ, опорный ток I_{out} , подаваемый через транзистор *M10*, уменьшается регулятором амплитуды.

В определенный момент регулируемый ток достигает критической точки, когда коэффициент усиления контура приближается к единице, при этом амплитуда выходного напряжения при данном значении тока выходит в насыщение и остается стабильной. В условиях стабильного колебательного процесса схема работает при минимальном токе, необходимом для удовлетворения требований к малой потребляемой мощности. Кроме того, амплитуда напряжения переменного тока также ограничена, чтобы избежать нелинейного поведения

резонатора. Для стабилизации работы генератора при пониженных напряжениях питания в схему добавлен дополнительный буферный каскад.

Разработка топологии электрической схемы управления и обработки сигнала МЭМСвакуумметра проводилась с использованием топологического редактора Virtuoso Layout Editing САПР Cadence на основе библиотеки элементов КМОП с проектными нормами 180 нм. Разработанная топология представлена на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Топология электрической схемы управления и обработки сигнала

4.3. Результаты схемотехнического моделирования

Схемотехническое моделирование проводилось с учетом экстракции паразитных элементов. Паразитные элементы формируются в топологии схемы и обусловлены топологическими особенностями, такими как наложение или пересечение слоев, сопротивление контактов и слоев и др. Была проведена экстракция электрической схемы с паразитными элементами из разработанной топологии схемы управления и обработки сигнала МЭМСвакуумметра, после чего выполнено моделирование. На рис. 4.6 приведены результаты моделирования схемы управления и обработки сигнала.



Рисунок 4.6 – Результаты моделирования схемы управления и обработки сигнала

Как видно из рис. 4.6, примерно через 220 мс амплитуда выходит в насыщение примерно до 200 мВ и остается стабильной, а среднее значение тока потребления при нормальных климатических условиях составляет 420 нА при напряжении питания 3 В. Значение тока потребления разработанной схемы в диапазоне температур -60–85 °C не превышает 500 нА.

На рис. 4.7 представлены АЧХ и ФЧХ электрической схемы управления и обработки сигнала, полученные в результате схемотехнического моделирования с использованием разработанной модели ЧЭ.

Как видно из рисунка, условия, необходимые для устойчивого колебательного процесса, выполняются. Запас по фазе близок к 0 градусов, при этом коэффициент усиления петли обратной связи составляет около 37 dB.



Рисунок 4.7 – АЧХ и ФЧХ электрической схемы управления и обработки сигнала

Значение резонансной частоты для данной модели составляет $f_0 = 2,66$ кГц, что соответствует рассчитанной частоте при моделировании ЧЭ.

Далее было проведено моделирование электрической схемы управления и обработки сигнала в условиях изменения коэффициента демпфирования чувствительного элемента. Для этого при помощи параметрического анализа менялось эквивалентное сопротивление *R* модели ЧЭ, которое непосредственно связано с коэффициентом демпфирования системы, зависящего от давления остаточных газов в рабочем объеме ЧЭ. Результаты моделирования представлены на рис. 4.8.



(a)



Рисунок 4.8 – АЧХ - (а) и ФЧХ – (б) в зависимости от изменения эквивалентного сопротивления ЧЭ

Как видно из рис. 4.8, коэффициент усиления, как и добротность всей системы нелинейно уменьшается с ростом сопротивления. Максимальное значение добротности составило Q = 61700, минимальное Q = 10. График зависимости добротности от эквивалентного сопротивления ЧЭ представлен на рис. 4.9.



Рисунок 4.9 – Зависимость добротности системы от эквивалентного сопротивления ЧЭ

Разработанная модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра в виде эквивалентной схемы корректно описывает его функционирование. Результаты схемотехнического моделирования согласуются с результатами, полученными при численном моделировании и экспериментальными исследованиями ЧЭ МЭМС-вакуумметра.

Аналитическое представление результатов расчета параметров эквивалентной схемы позволяет проводить оптимизацию конструкции и параметров ЧЭ. Проектирование элементов ЧЭ может быть выполнено путем решения обратной задачи с учетом полученных аналитических оценок и предъявляемых технических требований. Данный подход применим для расчета и анализа работы ЧЭ МЭМС-вакуумметра с учетом внешних воздействий.

Разработанная электрическая схема способна возбуждать колебания резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра и снимать его выходные характеристики. Использование схемотехнического решения в виде генератора Пирса и регулятора амплитуды позволили минимизировать потребляемую мощность и занимаемую площадь на кристалле. Интеграция схемы обработки с ЧЭ дает возможность для создания компактного конечного прибора для измерения уровня вакуума.

4.4. Выводы по главе 4

- Создана модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра в виде эквивалентной электрической схемы, рассчитаны эквивалентные параметры сопротивления, емкости, индуктивности ЧЭ, проведена оценка значений паразитных емкостей.
- Разработана принципиальная электрическая схема управления и обработки сигнала ЧЭ, обеспечивающая устойчивый процесс колебаний. Предложенное схемотехническое решение позволяет минимизировать потребляемую мощность и занимаемую площадь на кристалле.
- Результаты схемотехнического моделирования показали хорошее согласие с результатами численного моделирования, что подтверждает применимость подхода метода аналогий, корректность расчетов эквивалентных параметров ЧЭ и функционирование разработанной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили разработать универсальный, технологически совместимый со стандартной КМОП технологией МЭМСвакуумметр с монокристаллическим кремниевым резонатором, включающий в себя чувствительный элемент и электрическую схему управления и обработки сигнала.

Основные результаты работы:

1. Установлено, что использование ЧЭ МЭМС-вакуумметра с монокристаллическим кремниевым резонатором с электростатическим способом возбуждения колебаний, базирующегося на принципе изменения величины добротности под влиянием механизмов демпфирования, позволит измерить уровень вакуума в микрополостях или ограниченных объемах. Возможность создания различных конфигураций резонаторов позволяет повысить чувствительность МЭМС-вакуумметра и расширить диапазон измеряемых значений. Данное научно-техническое решение совместимо с КМОП-технологией, обладает повышенной применимостью (в МЭМС-датчиках, приборах вакуумной микроэлектроники, в качестве отдельного измерительного прибора), высокой чувствительностью.

2. Разработана оригинальная расчетная модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра, в которой учтены механические колебания, напряжения и деформации, а также нелинейные эффекты, связанные с газодинамическим и термоупругим демпфированием, действием электрического поля. Предложенные конструктивные решения в виде системы демпферов и конфигурации упругого подвеса с изменяющейся жесткостью позволили улучшить характеристики ЧЭ и повысить чувствительность МЭМС-вакуумметра.

3. На основе доступного оборудования и материалов производственного участка разработан технологический маршрут изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра, полностью совместимый с КМОП технологией. Усовершенствование технологических операций травления кремния и непосредственного гидрофильного сращивания пластин позволило изготовить экспериментальные образцы с заданным аспектным соотношением и избежать нежелательные явления, такие как дополнительная перфорация приборного слоя, прилипание подвижных частей ЧЭ к подложке, возникновение дополнительных внутренних напряжений в приборном слое. Наряду с этим, становится возможной трехмерная интеграция ЧЭ МЭМС-вакуумметра со специализированной схемой обработки.

4. Экспериментально установлено, что ЧЭ МЭМС-вакуумметра позволяет отслеживать изменение давления по величине добротности. Различие между значениями добротности, полученными экспериментально и с помощью численных методов, составило не более 5%.

5. Разработана схема управления и обработки сигнала МЭМС-вакуумметра, позволяющая обеспечить устойчивый колебательный процесс, получить выходную характеристику и минимизировать потребляющую мощность. ЧЭ и электрическая схема МЭМС-вакуумметра могут быть интегрированы на одном кристалле.

Разработанный МЭМС-вакуумметр не имеет аналогов в отечественной компонентной базе датчиков микросистемной техники. Алгоритм разработки расчетной модели, используемой в работе, применим и для создания других резонансных МЭМС (МЭМС-акселерометры, МЭМС-гироскопы и др.).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЧХ амплитудно-частотная характеристика
- ВАК высшая аттестационная комиссия
- ЖХТ жидкостное химическое травление

ИК – инфракрасный

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КНИ – кремний на изоляторе

КП – контактная площадка

МСТ – микросистемная техника

- МЭМС микрорэлектромеханические системы
- НИР научно-исследовательская работа
- ПАР перекисно-аммиачный раствор
- ПММА полиметилметакрилат
- ПХТ плазмохимическое травление
- РЭМ растровый электронный микроскоп
- САПР система автоматизированного проектирования
- ФЧХ фазочастотная характеристика

ЧЭ – чувствительный элемент

DRIE (Deep Reactive Ion Etching) – глубокое реактивное ионное травление

LIGA (Roentgen, Lithography, Galvanik, Abformung) – технология высокопрофильной микрообработки, включающая рентгеновскую литографию, гальванику и технологии микроформирования

n-МОП – полевой n-канальный транзистор со структурой металл-оксид-полупроводник

р-МОП – полевой р-канальный транзистор со структурой металл-оксид-полупроводник

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа для моделирования интегральных схем

SQFD (Squeeze-Film Damping) – эффекта демпфирования сдавленной газовой пленки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вавилов В.Д. Микросистемные датчики физических величин: монография в двух частях / В.Д. Вавилов, С.П. Тимошенков, А.С. Тимошенков. М.: Техносфера. 2018. 550 с.
- 2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Под ред. В.В. Лучинина. М.: Техносфера. 2007. 384 с.
- Choa S.-H. Reliability of MEMS packaging: vacuum maintenance and packaging induced stress // Microsyst. Technol. 2005. Vol. 11. P. 1187–1196.
- Getter free vacuum packaging for MEMS / G. Zhiyin, H. Dexiu, W. Xuefang, L. Dong, L.Sheng // Sensors and Actuators A. 2009. Vol. 149. P. 159–164.
- Парфенов О.Д. Технология микросхем: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа. 1977.
 256 с.
- A micromachined Pirani gauge for vacuum measurement of ultra-small sized vacuum packaging / X. Wang [et. al] // Sensors and Actuators A: Physical. 2010. Vol. 161. P. 108–113.
- Extension of operating range towards lower pressures of MEMS-based thermal vacuum gauges by laser-induced heating / T. Dankovic [et. al] // Procedia Engineer. 2012. Vol. 47. P. 1243–1246.
- 8. A wide measurement pressure range CMOS-MEMS based integrated thermopile vacuum gauge with an XeF2 dry etching process / X. Sun [et. al] // Actuat. A-Phys. 2013. Vol. 201. P. 428–433.
- Gorecka-Drzazga A. Miniature and MEMS-type vacuum sensors and pumps // Vacuum. 2009. Vol. 83. P. 1419–1426.
- Dobrott J.R., Oman R.M. Ionization gauge using a SiC p-n junction electron emitter // Journal of Vacuum Science and Technology. 1970. Vol. 7(1). P. 214-215.
- 11. Wilfert S., Edelmann C. Field emitter-based vacuum sensors // Vacuum. 2012. Vol. 86. P. 556–571.
- A contribution to the search for a stable field emission electron source based on W-WO_x-Au and W-Al₂O₃-Au systems / Z. Knor [et.al] // Vacuum. 1998. Vol. 51(1). P. 11–19.
- Pagnia A., Sotnik N. Bistable switching in electroformed Metal-Insulator-Metal devices // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. Vol. 108(11). P. 11–65.
- Stable field emission of single B-doped Si tips and linear current scaling of uniform tip arrays for integrated vacuum microelectronic devices / P. Serbun [et.al] // J. Vac. Sci. Technol. 2013. Vol. 31(2). 02B101.
- 15. Talin A.A., Dean K.A., Jaskie J.E. Field emission displays: a critical review // Solid-State Electronic. 2001. Vol. 45. P. 963–976.
- Ghosh N., Kang W.P., Davidson J.L. Fabrication and implementation of nanodiamond lateral field emission diode for logic OR function // Diamond & Related Materials. 2012. Vol. 23. P. 120–124.

- 17. On-chip electron-impact ion source isin carbon nanotube field emitters / C.A. Bower [et.al] // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 90. 124102.
- Wen W., Wang L., Gao J., Sun D. Studies on MEMS Vacuum Sensor Based on Field Emission of Silicon Tips Array // 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 2007. P. 199–202.
- Concept for a MEMS-type vacuum sensor based on electrical conductivity measurements / Giebel F.J. [et. al] // J. Sens. Sens. Syst. 2017. Vol. 6. P. 367–374.
- 20. Suijlen M.A.G. Model-based design of MEMS resonant pressure sensors. Eindhoven: Eindhoven university of technology. 2011. 136 p.
- Shahraini S. Design and Implementation of Silicon-Based MEMS Resonators for Application in Ultra Stable High Frequency Oscillators // Electronic Theses and Dissertations, 2004–2019. 2019.
 6731. 125 p.
- 22. Cady W.G. The piezo-electric resonator // Proceedings of the IRE. 1922. Vol. 10. P. 83–114.
- 23. Hopcroft M.A. Temperature Stabilized Silicon Resonators for Frequency Reference: PhD dissertation. Stanford University: 2007. 239 p.
- 24. Nguyen C.T.-C. MEMS technology for timing and frequency control // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2007. Vol. 54. P. 251–270.
- Masako T. An industrial and applied review of new MEMS devices features // Microelectronic Engineering. 2007. Vol. 84. P. 1341–1344.
- 26. Newell W.E. Miniaturization of tuning forks // Science. 1968. P. 1320-1326.
- Buser R.A., de Rooij N. F. Resonant silicon structures // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 17. P. 145–154.
- Stemme G. Resonant silicon sensors // Journal of Micromechanics and Microengineering. 1991.
 Vol. 1. P. 113–125.
- 29. Single-crystal silicon high-Q torsional oscillators / Kleiman R.N. [et. al] // Review of Scientific Instruments. 1985. Vol. 56. P. 2088–2091.
- Howe R.T., Muller R.S. Resonant-microbridge vapor sensor // IEEE Transactions on Electron Devices. 1986. Vol. 33. P. 499–506.
- Vacuum-Packaged Suspended Microchannel Resonant Mass Sensor for Biomolecular Detection / Burg T.P. [et. al] // Journal Microelectromechanical Systems. 2006. Vol. 15. P. 1466–1476.
- Paros J.M. Precision digital pressure transducer // ISA Transactions. 1973. Vol. 12. No. 2. P. 173– 179.
- 33. Parsons P., Glendinning A., Angelidis D. Resonant sensors for high accuracy pressure measurement using silicon technology // Proceedings of the IEEE NAECON. 1992. P. 349–355.

- Stemme E., Stemme G. A Balanced Resonant Pressure Sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 1990. Vol. 21. P. 336–341.
- 35. Greenwood J.C. Silicon in mechanical sensor // Journal of Physics E: Scientific Instruments 1988.P. 1114–1128.
- Surface-micromachined resonant accelerometer // Roessig T.A. [et. al] // Proc. 1997 Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators. 1997. Vol. 2. P. 859–862.
- Yun W., Howe R.T., Gray P.R. Surface micromachined, digitally force-balanced accelerometer with integrated CMOS detection circuitry // IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop. 1992.
 P. 126–131.
- 38. Inertial-Grade Out-of-Plane and In-Plane Differential Resonant Silicon Accelerometers (DRXLs) / Kim H.C. [et. al] // Transducers'05 / Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. 2005. P.126–131.
- Hsu W.-T., Clark J.R., Nguyen C. T.-C. A resonant temperature sensor based on electrical spring softening // Transducers'01 / Eurosensors XV. 2001, P. 1456–1459.
- 40. Lin L., Howe R., Pisano A.P. Microelectromechanical filters for signal processing // Journal of Microelectromechanical Systems. 1998. Vol. 7. P. 286–294.
- 41. Nguyen C.T.-C. Microelectromechanical devices for wireless communications // MEMS '98. 11th Annual International Workshop on MEMS. 1998. P. 1–7.
- 42. Rhoads J.F., Shaw S.W., Turner K.L. Nonlinear dynamics and its applications in micro- and nanoresonators // ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference, Parts A and B. 2008. P. 1509–1538.
- 43. Fan L.S., Tai Y.C., Muller R.S. Integrated movable micromechanical structures for sensors and actuators // IEEE Transactions on Electron Devices. 1988. Vol. 35. P. 724–730.
- 44. Tang W.C., Nguyen H.T.-C., Howe R.T. Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 20. P. 25–32.
- 45. Roszhart V. Micromachined silicon resonators // IEEE Electro International/91. 1991. P. 98–103.
- Tang W.C., Nguyen T.C., Howe R.T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures // Sens. Actuators. 1989. Vol. 20. P. 25–32.
- 47. Series-resonant VHF micromechanical resonator reference oscillators / Lin Y.-W. [et. al] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2004. Vol. 39. P. 2477–2491.
- 48. Vacuum encapsulation of resonant devices using permeable polysilicon / Lebouitz K.S. // IEEE International Conference on MEMS. 1999. P. 470–475.
- 49. Sundaresan G.K.Ho., Pourkamali S., Ayazi F. Temperature compensated IBAR reference oscillators// Proceedings of the IEEE International Conference on MEMS. 2006. P. 910–913.

- 50. Imaging of in- and out-of-plane vibrations in micromechanical resonator / Holmgren O. [et. al] // Electronics Letters. 2005. Vol. 41. P. 121–122.
- Pantano M.F., Pagnotta L., Nigro S. A numerical study of squeeze-film damping in MEMS-based structures including rarefaction effects // The Italian research on smart materials and MEMS. 2013. Vol. 23. P. 103–113.
- Chaterjee S., Pohit G. Squeeze-Film Damping Characteristics of Cantilever Microresonators under Large Electrostatic Loading // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2012. Vol. 19. P. 613–624.
- 53. United States Patent № 7047810B2. Micro-electro-mechanical pressure sensor / Kogan Y., Vakhshoori D., Wang P. May 23. 2006.
- 54. European patent № 1530036B1. Pressure sensor / Correale R., Busso M., Maccarrone C. April 2007.
- 55. B. Lee, S. Seok, K. Chun, J. A study on wafer level vacuum packaging for MEMS devices // Micromech. Microeng. 2003. Vol. 13. P. 663–669.
- 56. Sumali H. Squeeze-film damping in the free molecular regime: model validation and measurement on a MEMS // J. Micromech. Microeng. 2007. Vol.17 P. 2231–2240.
- 57. Legtenberg R., Tilmans H.A.C. Electrostatically driven vacuum encapsulated polysilicon resonators. Part I: Design and fabrication // Sens. Actuators A. 1994. Vol.45. P. 57–66.
- Minikes A., Bucher I., Avivi G. Damping of a microresonator torsion mirror in rarefied gas ambient // J. Micromech. Microeng. 2005. Vol. 15. P. 1762–1769.
- 59. Squeezed film damping measurements on a parallel-plate MEMS in the free molecule regime/ L. Mol, L.A. Rocha, E. Cretu, R.F. Wolffenbuttel // J. Micromech. Microeng. 2009. Vol.19 (7). 6 p.
- 60. European patent № 2309241B1. MEMS pressure sensor / Kohing J.J., Beijerinck H.C.W. 2016.
- 61. Горобей В.Н., Кувандыков Р.Э., Тетерук Р.А. Разработка микро-электромеханического вакуумметра // Вакуумная техника и технология. 2019. Т. 29. №1. С. 14–17.
- 62. Senturia S.D. Microsystem Design: Kluwer Academic Publishers, 2001. 689 p.
- 63. Gorman D.J. Free vibration analysis of beams and shafts. NY: John Wiley and Sons. 1975. 386 p.
- Timoshenko S., Young D.H., Weaver W. Vibration Problems in Engineering, 4th ed. New York: John Wiley and Sons, 1974. 538 p.
- 65. Blevins R.D. Formulas for natural frequency and mode shape. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. 492 p.
- 66. Nonlinear limits for single-crystal silicon microresonators / Kaajakari V. [et. al] // Journal of Microelectromechanical Systems. 2004. Vol. 13. P. 715–724.
- 67. Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions / Pamidighantam S. [et. al] // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2002. Vol. 12. P. 438–443.

- 68. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов [и др.]; под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. М.: Техносфера. 2012. 624 с.
- 69. Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Уч. пособие. Петрозаводск: Из-во ПетрГу. 2016. 171 с.
- 70. Khine L. Performance Parameters of Micromechanical Resonators: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. National University of Singapore. 2010. 170 p.
- 71. Шарма Н. Г., Сундарараджан Т., Сингх Г.С. Гибридный резонатор твердотельного волнового гироскопа с высокой добротностью: конструкция с использованием термоупругого демпфирования, исследование чувствительности и определение характеристик // Гироскопия и навигация. 2021. Том 29. №1 (112). С. 70–96.
- 72. Imboden M., Mohanty P. Dissipation in nanoelectromechanical systems // Physics Reports. 2014.Vol. 534(3). P. 89–146.
- 73. Younis M.I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. 2011. NY: Springer. 453 p.
- 74. Nayfeh A.H., Younis M.I. Modeling and simulations of thermoelastic damping in microplates // Micromechanics and Microengineering. 2004. Vol. 14. P. 1711–1717.
- 75. Friedlander S. Stability of Flows // Encyclopedia of Mathematical Physics. 2006. P. 1-7.
- 76. Veijola T. et. al. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer // Sensors and Actuators. 1995. A. 48. P. 239–248.
- 77. Blech J. J. On isothermal squeeze films // Journal of Lubrication Technology. 1983. A. 105. P. 615–620.
- 78. Starr J. B. Squeeze-film damping in solid-state accelerometers // Proceeding of the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop. 1990. P. 44–47.
- 79. Acar C., Shkel A. MEMS Vibratory Gyroscopes. 2009. NY: Springer. 256 p.
- Quality factor in trench-refilled polysilicon beam resonators / Abdolvand R. [et. al] // Journal of Microelectromechanical Systems. 2006. 15(3). P. 471–478.
- Lifshitz, R. and Roukes, M.L. Thermoelastic damping in micro and nano mechanical systems // Physical Review B. 2000. 61(8). P. 5600–5609.
- 82. Малащенко А.Ю. Моделирование динамики мехатронных преобразователей // Молодой ученый. 2011. № 8 (31). Т. 1. С. 73–79.
- Колебаний. М.: Наука. 1958. 408 с.
- 84. Волкова Е.И., Попков С.А. Исследование нелинейных эффектов при моделировании чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра // МЭС-2020. 2020. С. 108-113.

- 85. Nonlinear dynamics of nanomechanical beam resonators: improving the performance of NEMSbased sensors / Kacem N. [et. al] // Nanotechnology. 2010. 20 (27). 11 p.
- 86. Beeby S.P., Ensel G., Kraft M. MEMS Mechanical Sensors. Boston: Artech House. 2004. 281 p.
- 87. Jones T.B., Nenadic N.G. Electromechanics and MEMS. Cambridge University Press. 2013. 559p.
- 88. Kovacs G.T.A. Micromachined Transducers Sourcebook. 1998. NY: McGraw-Hill. 915 p.
- Korvink J. G. Paul O. MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications. Springer. 2006.
 965 p.
- 90. Bean K.E. Anisotropic etching of silicon // IEEE Transactions on Electron Devices. 1978. Vol. 25.
 P. 1185–1193.
- 91. Jackson M.J. Microfabrication and Nanomanufacturing. 2006. FL: CRC Press. 401 p.
- 92. Запевалин А.И. Обзор высоко-аспектных процессов травления кремния // Современная техника и технологии. 2014. № 6. URL: <u>https://technology.snauka.ru/2014/06/3970</u> (дата обращения: 03.05.2021).
- 93. Dai W., Lian K., Wang W. Design and fabrication of a SU-8 based electrostatic microactuator // Microsystem Technologies. 2007. Vol. 13. P. 271–277.
- 94. Guckel H. High-aspect-ratio micromachining via deep X-ray lithography // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86. P. 1586–1593.
- 95. Скупов А. Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники. Выбор материалов и ключевые параметры // Вектор высоких технологий. 2015. № 5 (18). С. 37–44.
- 96. Reiche M. Dislocation Networks Formed by Silicon Wafer Direct Bonding // Materials Science Forum. 2008. Vol. 590. P. 57–78.
- 97. Suni T. Direct wafer bonding for MEMS and microelectronics. Espoo. 2006. 89 p.
- Wafer bonding for microsystems technologies / Gösele U. [et. al] // Sensors and Actuators. 1999.
 Vol. 74. P. 161–168.
- 99. Технологические особенности сращивания пластин кремния / И.Б. Яшанин, С.В. Кононов, О.В. Баранова, С.А. Булохов // Наноиндустрия. 2017. № S (74). С. 213–217.
- 100. Christiansen S. H., Singh R., Gösele U. Wafer Direct Bonding: From Advanced Substrate Engineering to Future Applications in Micro/Nanoelectronics // Proceedings of the IEEE. .2006| Vol. 94. No. 12. P. 2060–2106.
- Effects of Plasma Activation on Hydrophilic Bonding of Si and SiO₂ / T. Suni, K. Henttinen, I. Suni, J. Makinen // Journal of The Electrochemical Society. 2002 Vol. 149 (6). P. G348–G351.
- Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force / James J. Allen [et. al] J. Microelectromech. Syst. 2003. Vol. 12. No. 3. P. 373–383.

- Mukherjee W.Y.S., MacDonald N.C. Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems // J. Microelectromech. Syst. 1998. Vol. 7. P. 16–26.
- 104. Rosa M.A., Dimitrijev S., Harrison H.B. Improved operation of microelectromechanical combdrive actuators through the use of a new angled comb finger design // SPIE Conf. on Smart Materials, Structures, and MEMS. 1997. Vol. 3242. P. 212–218.
- Design, fabrication, and operation of submicron gap comb-drive microactuators / Hirano T. [et. al] // J. Microelectromech. Syst. 1992. Vol. 1. P. 52–59.
- 106. Волкова Е.И., Попков С.А. Влияние технологических погрешностей на чувствительность элементов микроэлектромеханических систем // Датчики и системы. 2017. № 8/9. С. 8–12.
- 107. Волкова Е.И., Попков С.А., Сафонов А.В. Математическое моделирование влияния технологического ухода от заданного номинала линейных размеров на свойства упругих подвесов в приборах микросистемной техники // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 3. С.37–43.
- 108. The Finite Element Method // Comsol: [сайт]. 2017. URL: <u>https://www.comsol.ru/multiphysics/</u> finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62 (дата обращения: 14.11.2021).
- 109. Капустин С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: учеб. пособие. Н.Новгород. 2002. 180 с.
- 110. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.:Мир. 1975. 544 с.
- 111. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир. 1981. 304 с.
- 112. Frei W. Решение стационарных нелинейных задач методом конечных элементов // Comsol: [сайт]. 2017. URL: <u>https://www.comsol.ru/blogs/solving-nonlinear-static-finite-</u> element-problems/ (дата обращения: 14.11.2021).
- 113. Frei W. Ускорение сходимости мультифизических задач // Comsol: [сайт]. 2013. URL: <u>https</u>
 <u>://www.comsol.ru/blogs/improving-convergence-multiphysics-problems/</u> (дата обращения: 14.11.2021).
- 114. Modelling and simulation of the effect of air damping on the frequency and quality factor of a CMOS-MEMS resonator / Dennis J.O. [et. al] // Appl. Math. Inf. Sci. 2015. Vol. 9 No. 2. P. 729– 737.
- 115. Integrated multifunctional environmental sensors / Roozeboom C.L. [et. al] // J. Microelectromech. Syst. 2013. Vol. 22. P. 779–793.
- 116. Micromechanical Pierce oscillators for resonant sensing applications / Seshia A.A. [et. al] // Modeling and Simulation of Microsystems. 2002. P. 162–165.
- 117. Vittoz E.A., Degrauwe M.G.R., Bitz S. High-Performance Crystal Oscillator Circuits: Theory and Application // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1988. Vol. 23 (3). P. 774–783.

- 118. A Pierce oscillator for MEMS resonant accelerometer with a novel low-power amplitude limiting technique / Tocchio A. [et. al] // Proceedings of 2012 IEEE International FCS. 2012. P. 1–6.
- 119. A 78-microwatt GSM phase noise-compliant pierce oscillator referenced to a 61-MHz wine-glass disk resonator / Naing T.L. [et. al] // Proceedings of EFTF/IFC. 2013. P. 562–565.
- 120. Разуваев Ю.Ю. Расчёт и моделирование схемы генератора прямоугольных импульсов с кварцевым резонатором // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. 2017. № 3. С. 50–56.
- 121. Колесников Д.В., Кондратович П.А., Бормонтов Е.Н. Схемотехника высокочастотного кварцевого генератора в элементной базе КМОП 0,18 мкм // Известия вузов. Электроника. 2014. № 1(105). С. 45–50.