

На правах рукописи

Волкова Екатерина Ивановна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЭМС-ВАКУУММЕТРА С
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ**

Специальность 2.2.2 – Электронная компонентная база микро-
и наноэлектроники, квантовых устройств

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Попков Сергей Алексеевич

кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», старший научный сотрудник кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники физического факультета.

Официальные оппоненты:

Калугин Виктор Владимирович

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», профессор Института nano- и микросистемной техники;

Тимошенко Павел Евгеньевич

кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», доцент кафедры «Нанотехнология» физического факультета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**».

Защита диссертации состоится 26 апреля 2023 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1303>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Это в значительной степени касается МЭМС, которые за счет эффективной интеграции друг с другом могут вырасти до более функциональных интеллектуальных систем на одном чипе. 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 таких датчиках наблюдается в вакуумной микроэлектронике. 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.

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. 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. Поэтому отслеживание уровня вакуума

в полостях, где располагается ЧЭ, в процессе всего срока службы очень важно для оценки надежности данных устройств.

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.

Численное моделирование является неотъемлемой частью современного производства микроэлектроники и изделий микросистемной техники. 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 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 научно-технических исследований.

Цели и задачи работы

Целью работы является разработка и исследование физических основ создания МЭМС-вакуумметра, 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 МЭМС-вакуумметра, 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 МЭМС-вакуумметра 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 МЭМС-вакуумметра позволяет повысить чувствительность прибора.
2. Разработанный МЭМС-вакуумметр позволяет измерять давление (10^{-3} – 10^3 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 проведенные 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 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 МЭМС-вакуумметра 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 сжатой 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, степень ее разработанности, сформулированы цель и основные задачи исследования, раскрыта новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проанализированы существующие решения современных микродатчиков вакуума и их конструктивно-технологические особенности. Выявлено, что 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.

Рассмотрены основные механизмы, задействованные при работе ЧЭ МЭМС-вакуумметра. Особое внимание уделено механизмам демпфирования, которые влияют на добротность резонатора в ЧЭ: термоупругое демпфирование, поверхностное рассеяние и внутреннее трение, анкерные потери и потери, вызванные акустическими колебаниями, вязкое газодинамическое демпфирование. Выявлено, что эффекты демпфирования сжатой и скользящей газовой пленки являются доминирующими механизмами диссипации энергии и могут быть использованы для создания МЭМС-вакуумметра. Измерить давление остаточных газов возможно посредством регистрации изменения добротности.

Моделирование эффекта сжатой газовой пленки «*squeeze-film damping*» основано на решении модифицированного уравнения Рейнольдса, которое является упрощением уравнения Навье-Стокса, описывающего движение газа при наличии сил тяжести, инерции, вязких сил и давления, действующего на объем. 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:

$$K_n = \frac{\lambda}{H}, \quad (1)$$

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

$$\lambda = \frac{\lambda_0 P_0}{P}. \quad (2)$$

В (2) λ_0 – длина свободного пробега при нормальных условиях, P_0 – атмосферное давление, P – давление среды.

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:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.638K_n^{1.159}}. \quad (3)$$

Добротность колебательной системы можно определить, как:

$$Q = \frac{1}{2\zeta}, \quad (4)$$

где ζ – коэффициент демпфирования:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega}, \quad (5)$$

где c – 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 и модель Старра для несжимаемой жидкости.

В модели сжимаемого газа коэффициент вязкого демпфирования:

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

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

$$\sigma = \frac{12A\omega\mu_{eff}}{PH^2}. \quad (7)$$

Число сжимаемости является мерой сжатия 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:

$$c = \frac{0.8\mu_{eff}A^2}{H^3(1 + \beta^2)}. \quad (8)$$

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

$$\sigma_c = \pi^2(1 + \beta). \quad (9)$$

Принимая во внимание уравнения (1)–(9), можно найти выражение для расчета добротности колебательной системы в зависимости от давления газа.

Помимо случая, где перемещения одного из электродов происходят вне его плоскости, во встречно-штыревых гребенчатых электродах ЧЭ движение элементов осуществляется также параллельно друг другу. Эффективная вязкость в случае эффекта демпфирования скользящей газовой пленки определяется следующим образом:

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

Существуют две модели, описывающие движение газа при таком взаимодействии с движущейся структурой: модель течения Куэтта и модель Стокса. 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 скорости газа как под плоскостью, так и над ней. Выбор модели для расчета зависит от числа δ , которое характеризует расстояние, на котором амплитуда движения уменьшается в e раз:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu_{eff}}{\rho\omega}}, \quad (11)$$

где ρ – плотность газа, ω – собственная частота колебаний структуры.

Модель Куэтта применима, когда $\delta \gg H$, 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:

$$c_{sdown} = \mu_{eff} \frac{A}{H} \times F, \quad (12)$$

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

$$F = \beta^* H \times \frac{\sin(2\beta^* H) + \sinh(2\beta^* H)}{\cosh(2\beta^* H) - \cos(2\beta^* H)}, \quad (13)$$

где $\beta^* = 1/\delta$. При $\delta \gg H$ 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:

$$c_c = \mu_{eff} \frac{A}{H}. \quad (14)$$

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:

$$c_{sabove} = \frac{\mu_{eff} A}{\delta}. \quad (15)$$

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

Далее в работе описаны причины возникновения неустойчивого состояния при действии электростатических сил, приводящих к срыву колебаний – эффект втягивания «pull-in» (рис. 1).

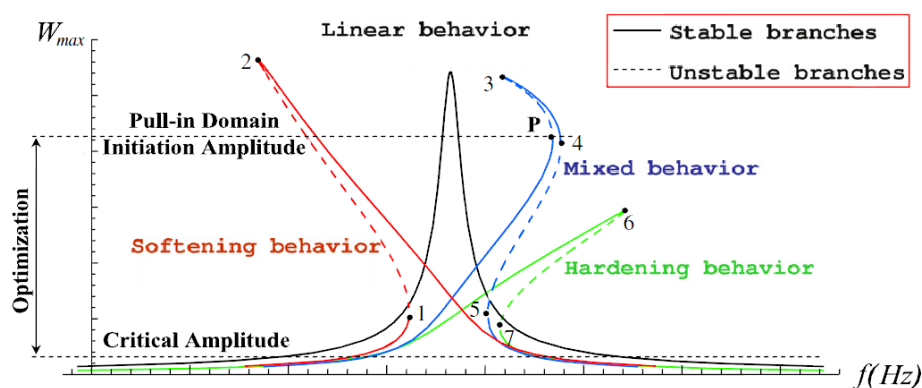


Рисунок 1 – АЧХ, нормированная по амплитуде, в зависимости от разных условий

Рассмотрены подходы к моделированию МЭМС-резонаторов. Сделан вывод о необходимости разработки мультифизической модели ЧЭ МЭМС-вакуумметра для расчета основных характеристик с учетом механики деформируемого твердого тела, газодинамического и термоупругого демпфирования, электростатического взаимодействия.

Во второй главе выявлены основные преимущества монокристаллического кремния, как конструкционного материала для создания МЭМС-структур. Определено, что использование микрорезонаторов из монокристаллического кремния в МЭМС-вакуумметре предпочтительно, благодаря их высокой добротности, высокой прочности, низкому температурному дрейфу и низкому энергопотреблению.

Изучены и проанализированы основные технологические процессы, использующиеся при производстве МЭМС. Установлено, что технология объемной микрообработки в сочетании с Bosch-процессом позволяет 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 МЭМС-вакуумметра.

Разработан технологический маршрут производства ЧЭ МЭМС-вакуумметра с ключевыми операциями непосредственного гидрофильного срачивания пластин и Bosch-процесса. Отработана технология непосредственного гидрофильного срачивания пластин. Использование в технологическом маршруте термического окисления пластин, химико-

механической 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 до 400 °С за счет применения предварительной плазменной активации поверхности кремниевых пластин в плазме N₂. Данная технологическая операция позволяет избежать дополнительных внутренних напряжений в приборном слое и использовать легкоплавкие материалы, что делает возможным сращивание металлизированных пластин и использование данной операции в трехмерной интеграции. Совместное использование непосредственного гидрофильного сращивания пластин и Bosch-процесса позволит создать законченный полнофункциональный прибор. Основные операции технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра приведены на рис. 2.

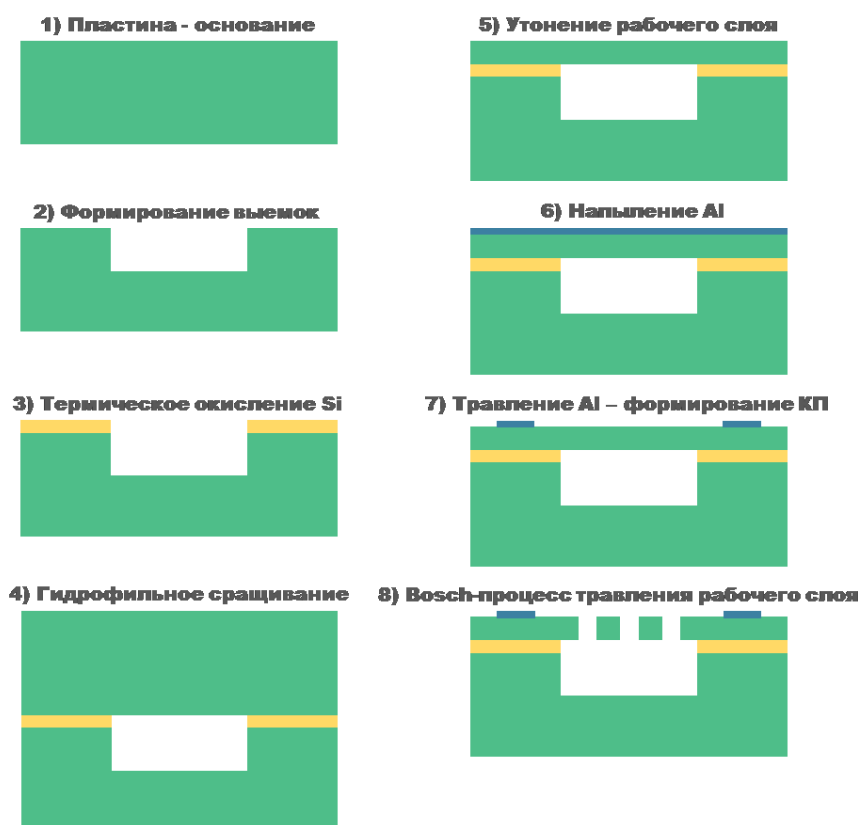


Рисунок 2 – Основные операции технологического маршрута изготовления ЧЭ МЭМС-вакуумметра

В третьей главе представлено исследование физических принципов создания ЧЭ МЭМС-вакуумметра и его разработка на основе моделирования методом конечных элементов. Проведено исследование влияния формы, размеров, количества и области начального перекрытия пальцев встречно-штыревых гребенчатых электродов на величину втягивающего поля, создаваемого электростатическими силами, и величину, создаваемого им смещения резонатора и емкости между гребенками ЧЭ. Исследование проведено для шести форм пальцев.

Установлено, что для разрабатываемого МЭМС-вакуумметра оптимальными по форме являются гребенчатые встречно-штыревые электроды с трапецевидными скругленными пальцами (рис. 3).

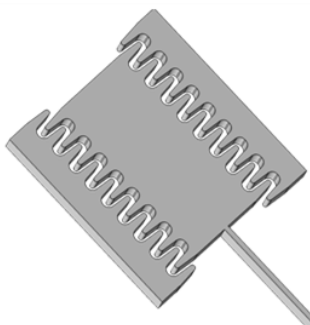


Рисунок 3 – Гребенки резонатора с трапецевидными скругленными пальцами

Исследована связь между начальной областью перекрытия пальцев встречно-штыревых гребенчатых электродов и величиной смещения. При наибольшем перекрытии пальцев на максимальную длину при больших напряжениях происходит «схлопывание» вследствие эффекта втягивания из-за малой величины зазора между пальцами. Наибольшее значение смещения и, следовательно, емкости наблюдается у конструкции резонатора с перекрытием пальцев гребенок на $2/3$ длины. Для увеличения смещения при меньшем напряжении было увеличено количество пальцев гребенок с 9 до 14 и их длина с 25 мкм до 30 мкм.

Проанализировано влияние упругого подвеса резонатора на характеристики ЧЭ, так как конфигурации упругих подвесов напрямую влияют на чувствительность, точность и стабильность МЭМС-датчиков. Излишняя жесткость конструкции резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра может приводить к слабой чувствительности измерения остаточных газов в микрообъеме. Проведено исследование различных конфигураций подвесов резонатора (прямого, зигзагообразного, с изменяющейся жесткостью). Подвесы со сложной геометрией не ухудшают частотных характеристик резонатора и обладают схожей технологической воспроизводимостью по сравнению с подвесами простых форм [1, 2]. Топологическая оптимизация позволяет уменьшить длину подвеса резонатора при сохранении его частоты [3]. Разработанная оптимизированная конструкция резонатора с упругим подвесом с изменяющейся жесткостью (рис. 4) позволила добиться максимального смещения и емкости при увеличении напряжения по сравнению с подвесами других форм.



Рисунок 4 - Оптимизированная конструкция резонатора с упругим подвесом с изменяющейся жесткостью

Резонансная частота МЭМС-резонатора с электростатическим возбуждением зависит от напряжения смещения, она уменьшается с увеличением напряжения, то есть происходит смягчение жесткости резонатора при электростатическом взаимодействии. В конечном итоге, при большом напряжении смещения баланс между силами электростатического взаимодействия и упругими силами нарушается и происходит эффект втягивания. В противовес эффекту электростатического смягчения жесткости происходит увеличение жесткости резонатора, вследствие эффектов, связанных с вязким газовым демпфированием. При разработке ЧЭ МЭМС-вакуумметра необходимо соблюсти баланс между этими эффектами. Необходимо решать систему уравнений колебания резонатора с внешней приложенной силой с дополнительными членами в уравнениях, отвечающих за нелинейные эффекты, совместно с уравнением Рейнольдса [4]. При использовании средств численного моделирования необходимо произвести корректную настройку связанных переменных и граничных условий.

Создана мультифизическая расчетная модель ЧЭ, в которой учтены несколько физических эффектов: связанные механическое, электрическое, температурное и газодинамическое воздействие (рис. 5).



Рисунок 5 – Связанные физические эффекты при моделировании ЧЭ МЭМС-вакуумметра

Установлено, что доминирующее влияние на добротность системы оказывает вязкое газодинамическое демпфирование. Проведено сравнение влияния эффектов демпфирования сжатой и скользящей газовой пленки на количественные значения добротности (рис. 6). Проведен аналитический расчет добротности для вышеописанных эффектов. Значения добротности, рассчитанные аналитически и с помощью численного моделирования, согласуются между собой, что говорит о корректности построения модели резонатора (рис. 7). Расхождение значений добротности, полученных разными методами в области наибольшего проявления эффектов газодинамического демпфирования, можно объяснить невозможностью учета при аналитическом расчете сложной формы резонатора и эффективной площади поверхностей, участвующих в демпфировании, и недостаточной точностью аналитических выводов по сравнению с численными при нелинейной природе эффектов.

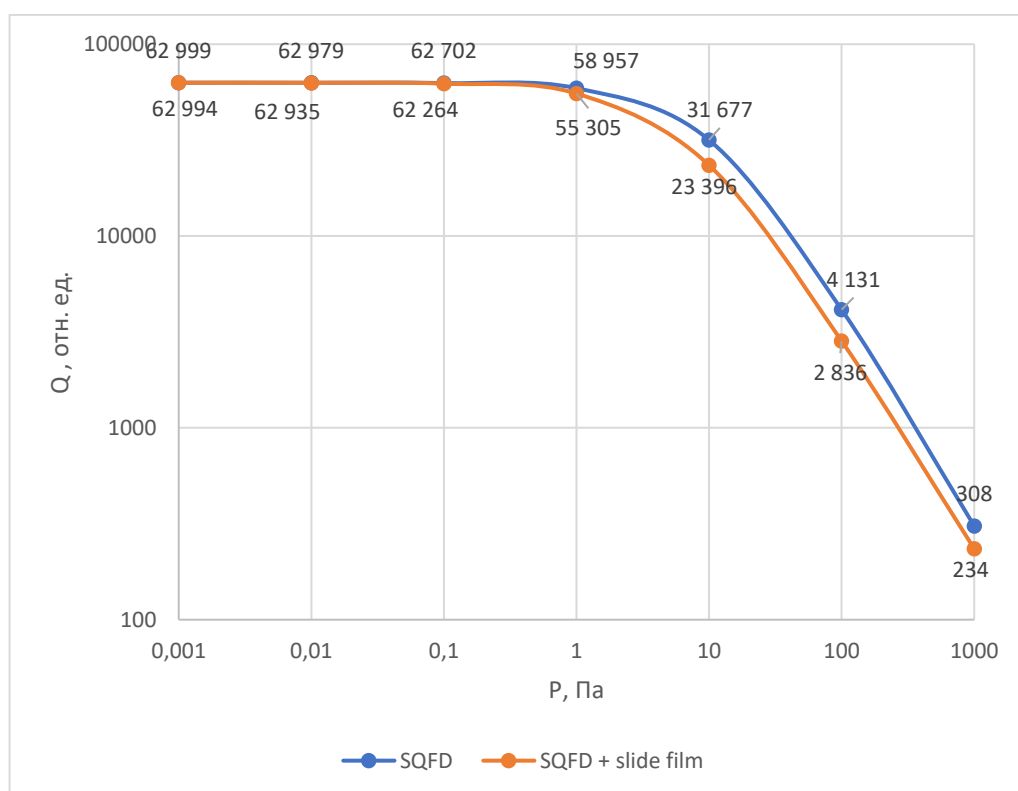


Рисунок 6 – Зависимость добротности от давления при учете газодинамического демпфирования

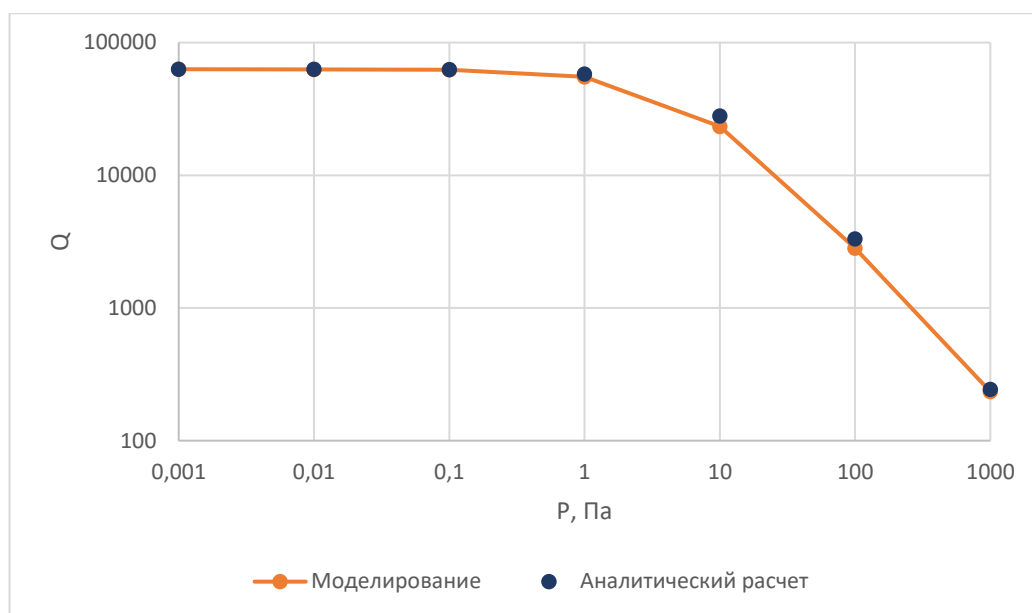


Рис. 7 – Зависимости добротности от давления, рассчитанные аналитически и с помощью численного моделирования

Из представленных зависимостей на рис. 6 видно, что при увеличении уровня вакуума в диапазоне добротность представленной системы меняется незначительно в диапазоне 10^{-3} – 10^{-1} Па. Предложен способ повышения чувствительности МЭМС-вакуумметра без изменения его габаритных размеров [5]. Для максимального проявления эффектов газодинамического демпфирования и большего изменения добротности в зависимости от уровня вакуума, в конструкцию резонатора были введены дополнительные демпферы (рис. 8).

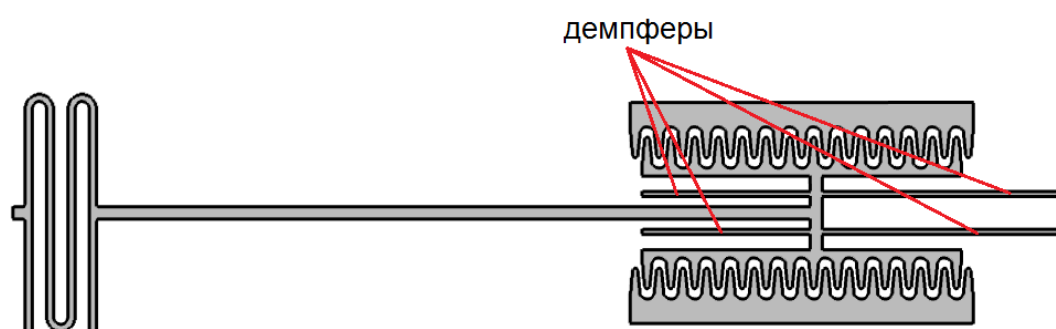


Рисунок 8 – Резонатор с дополнительными демпферами

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. Значения добротности и графики зависимости добротности от давления усовершенствованного резонатора в сравнении с первоначальной конструкцией приведены на рис. 9.

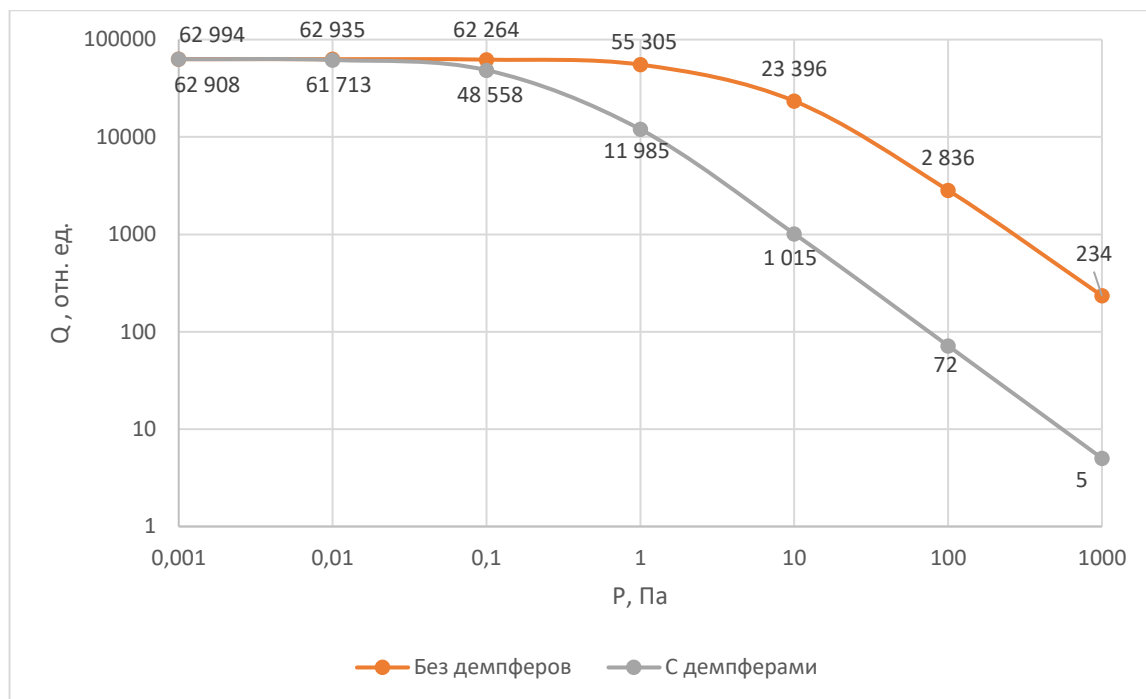


Рисунок 9 – Зависимость добротности от давления для усовершенствованного резонатора в сравнении с первоначальной конструкцией

Как видно из представленных значений и зависимостей, конструктивное решение в виде дополнительных демпферов позволили повысить чувствительность резонатора. Добротность резонатора меняется в диапазоне давлений 10^{-3} – 10^3 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.

Проведен модальный и частотный анализ для усовершенствованной конструкции резонатора, чтобы удостовериться в соответствии техническим требованиям. Основная резонансная частота (рабочая мода) составляет 2660 Гц, вторая (паразитная мода) – 3398 Гц. АЧХ, полученная при моделировании представлена на рис. 10.

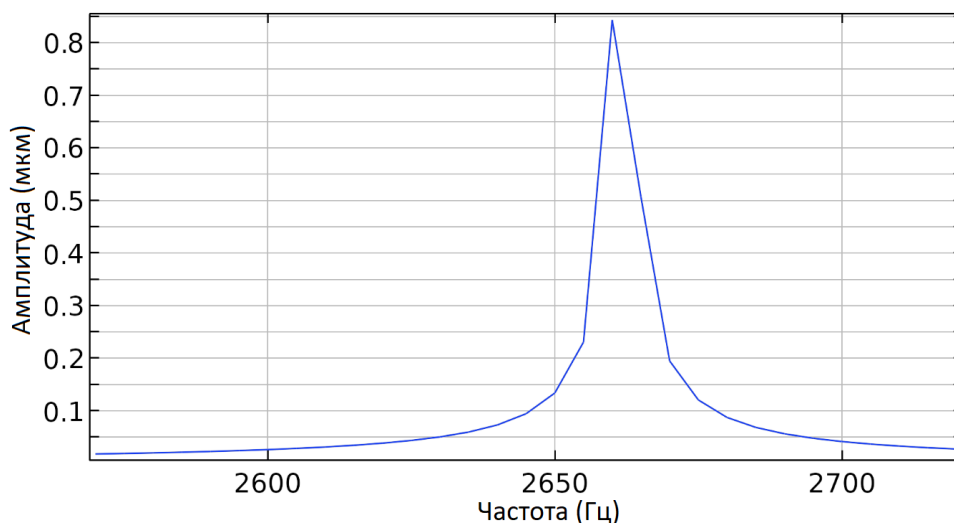


Рисунок 10 – АЧХ резонатора ЧЭ-МЭМС, полученная при моделировании

Проведено исследование на влияние эффекта смягчения жесткости конструкции резонатора при увеличении приложенного напряжения. Результат моделирования представлен на рис. 11.

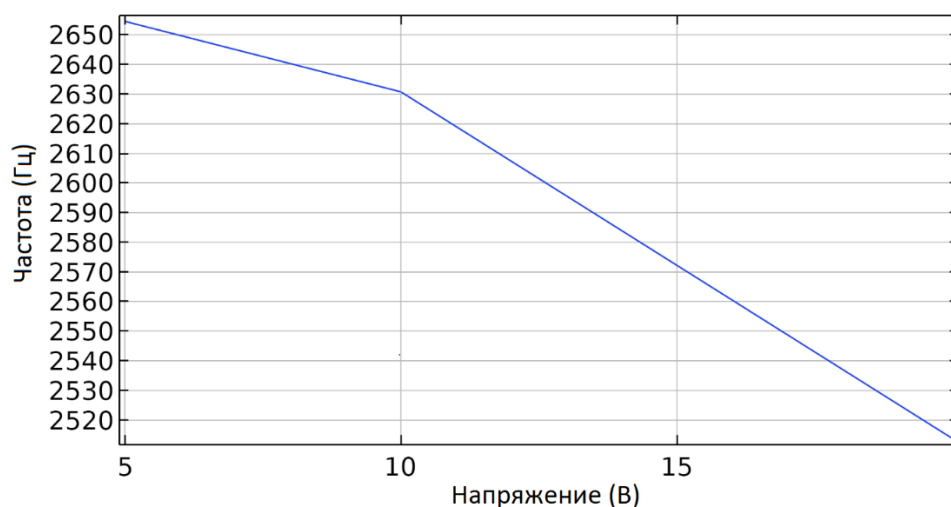


Рисунок 11 – Зависимость собственной частоты резонатора от напряжения смещения

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 (рис. 12).

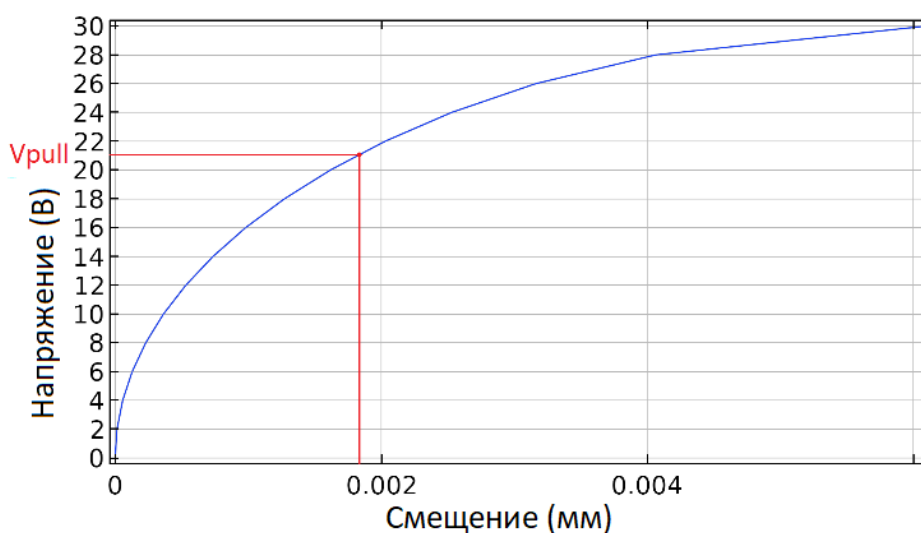


Рисунок 12 – Зависимость напряжения смещения от отклонения резонатора

«Схлопывание» демпферов с сигнальными обкладками может наступить при напряжении выше 21 В, которое является напряжением втягивания.

Проведен прочностной анализ на расчет напряженно-деформированного состояния резонатора ЧЭ при механических воздействиях, в результате которого установлено, что усовершенствованная конструкция резонатора обеспечивает стойкость ЧЭ к воздействию линейных ускорений с максимальной амплитудой 150g, к удару одиночного действия с амплитудой пикового ускорения 150g и длительностью действия ударного ускорения 0,2–0,5 мс, к удару многократного действия с амплитудой пикового ускорения 20g и к синусоидальной вибрации в диапазоне частот 5–2000 Гц с амплитудой ускорения 40g по трем осям с большим коэффициентом запаса по прочности. Изменение частоты ЧЭ при изменении температуры в диапазоне -60–85 °С составило не более 1 Гц.

Пластины с ЧЭ МЭМС-вакуумметра были изготовлены и произведена их лазерная резка и сборка кристаллов в корпусе. Фрагмент ЧЭ МЭМС-вакуумметра после разварки в корпус представлен на рис. 13.

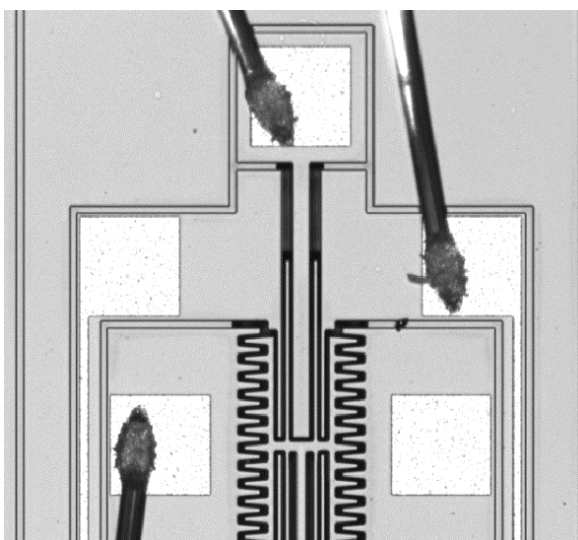
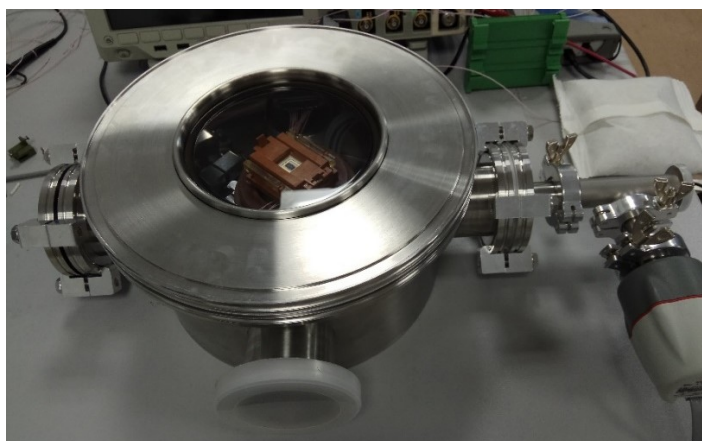


Рисунок 13 – Фрагмент кристалла ЧЭ МЭМС-вакуумметра после разварки

С целью измерения основных характеристик ЧЭ МЭМС-вакуумметра, оценки точности разработанной модели, а также проверки основного режима работы использовался анализатор микросистем Polytec MSA-500 (рис. 14а). Измерения проводились в вакуумной камере с динамически изменяемым уровнем давления для дальнейшего сопоставления результатов численного моделирования добротности резонатора с экспериментальными значениями (рис. 14б).



а



б

Рисунок 14 – Анализатор микросистем MSA-500 – а, образец ЧЭ МЭМС-вакуумметра в вакуумной камере – б

Измеренные при давлении 0.05 Па АЧХ и ФЧХ резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра представлены на рис. 15.

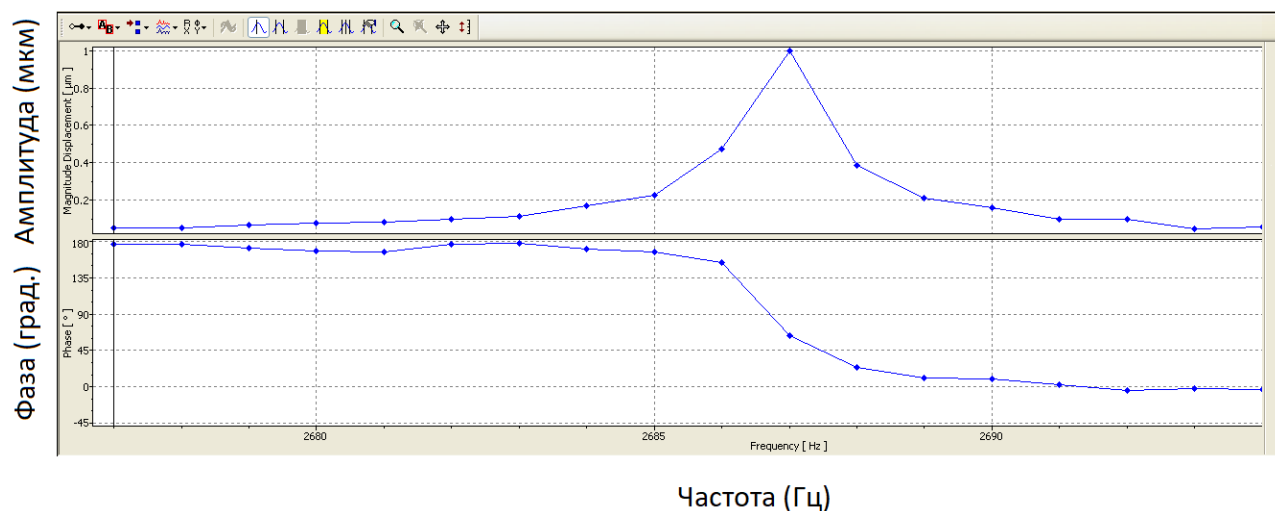


Рисунок 15 – АЧХ и ФЧХ резонатора ЧЭ МЭМС-вакуумметра (при давлении 0,05 Па)

Измеренная АЧХ соответствует характеристике, полученной при моделировании. Измеренная частота резонатора 2677 Гц, расчетная – 2660 Гц. Измеренная величина добротности для образца ЧЭ МЭМС-вакуумметра при разных давлениях в сравнении с рассчитанными значениями представлена на рис. 16.

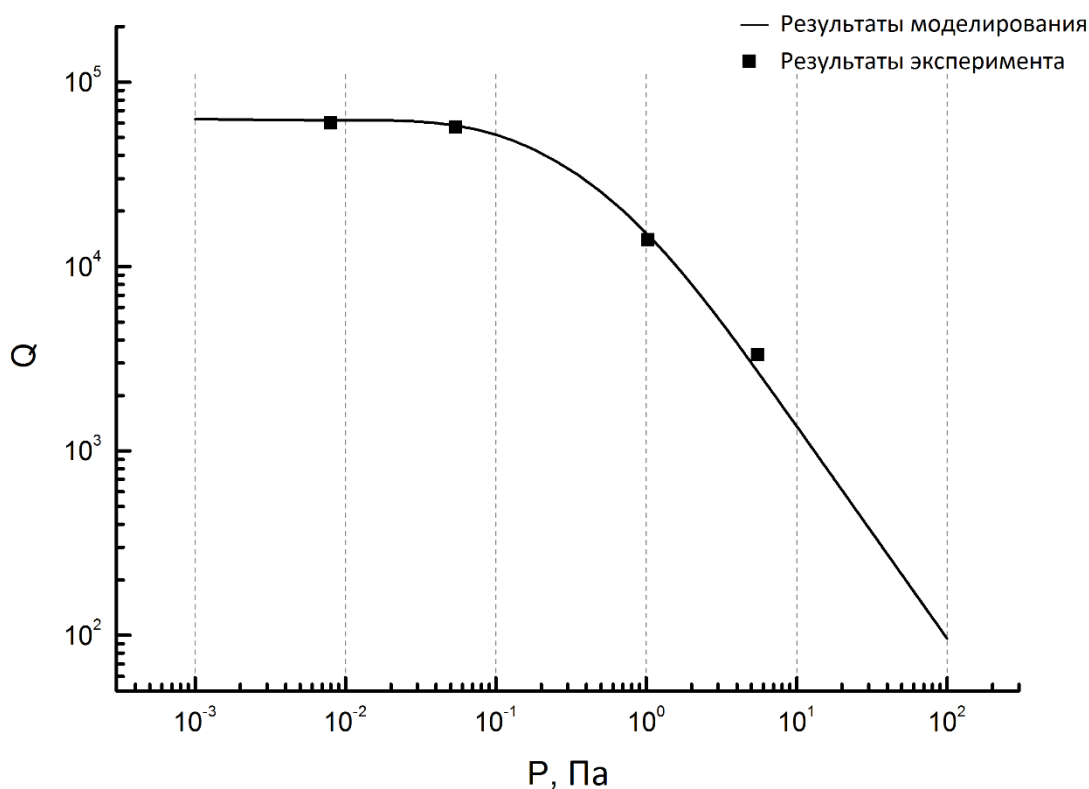


Рисунок 16 – Экспериментальные значения добротности при разных уровнях вакуума резонатора ЧЭ МЭС-вакуумметра в сравнении с результатами моделирования

На представленной зависимости 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. Был сделан вывод, что созданная модель ЧЭ, описывающая механику, трение в газовых пленках, теплопередачу, электромеханику являлась точной, и подход к моделированию микросистем можно использовать при проектировании широкого класса резонансных МЭМС-датчиков.

В четвертой главе было уделено внимание проблеме разработки схемы управления и обработки сигнала МЭМС-вакуумметра. 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, или парой КМОП транзисторов. Для этой цели была рассчитана эквивалентная электрическая схема ЧЭ в виде RLC резонансного контура.

Структурная схема управления и обработки сигнала МЭМС-вакуумметра была построена на основе генератора Пирса путем подключения резонатора ЧЭ в обратную связь усилителя, как показано на рис. 17.

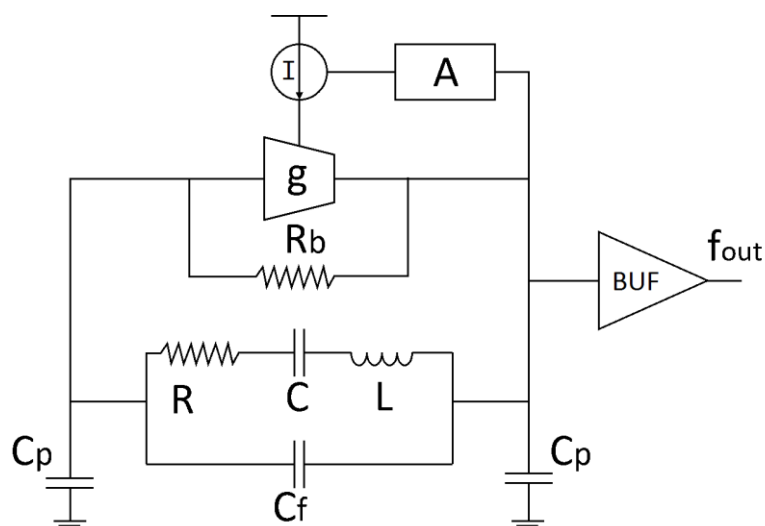


Рисунок 17 – Структурная схема управления и обработки сигнала

В схеме на рис. 17: 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°).

Принципиальная электрическая схема разработанного генератора представлена на рис. 18.

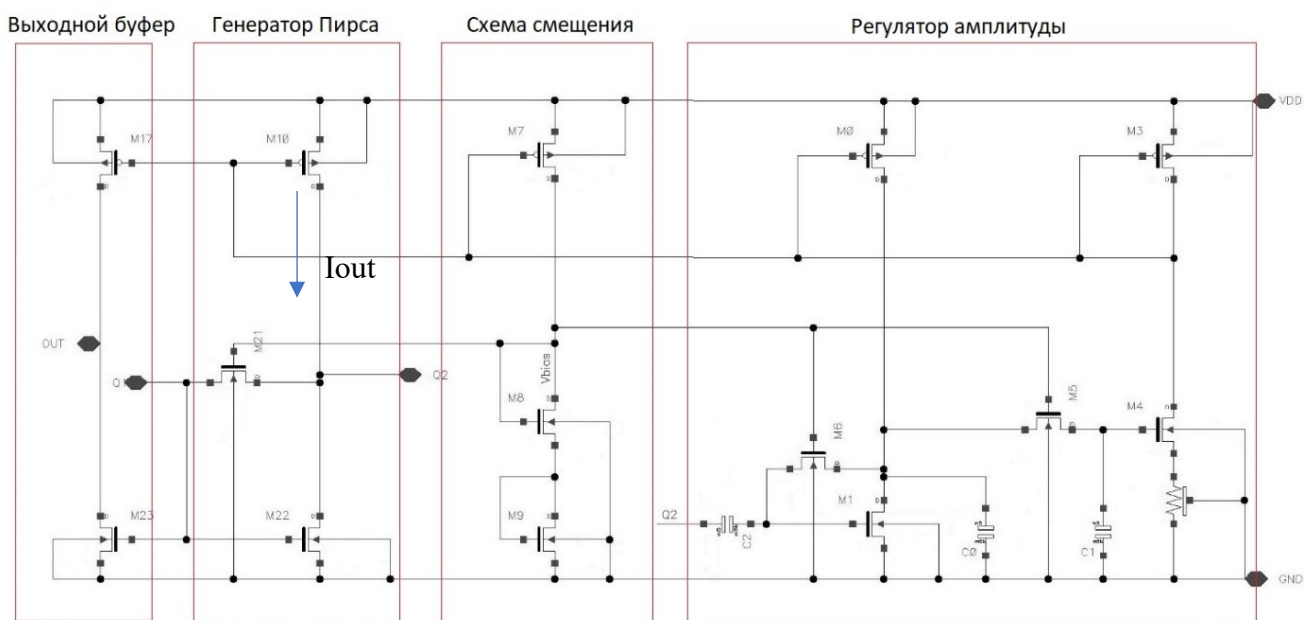


Рисунок 18 – Принципиальная электрическая схема управления и обработки сигнала

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-МОП 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 р-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 оптимальной. 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.

Разработка топологии электрической схемы управления и обработки сигнала МЭМС-вакуумметра проводилась с использованием топологического редактора Virtuoso Layout Editing САПР Cadence на основе библиотеки элементов КМОП с проектными нормами 180 нм. Схемотехническое моделирование проводилось с учетом экстракции паразитных элементов. Среднее значение тока потребления разработанной схемы при нормальных климатических условиях составило 420 нА. Значение тока потребления в диапазоне температур -60–85 °С не превышает 500 нА.

Проведено моделирование в условиях изменения коэффициента демпфирования чувствительного элемента. Для этого при помощи параметрического анализа менялось эквивалентное сопротивление R модели резонатора, которое непосредственно связано с коэффициентом демпфирования системы, зависящего от давления остаточных газов в рабочем объеме резонатора. Результаты моделирования представлены на рис. 19.

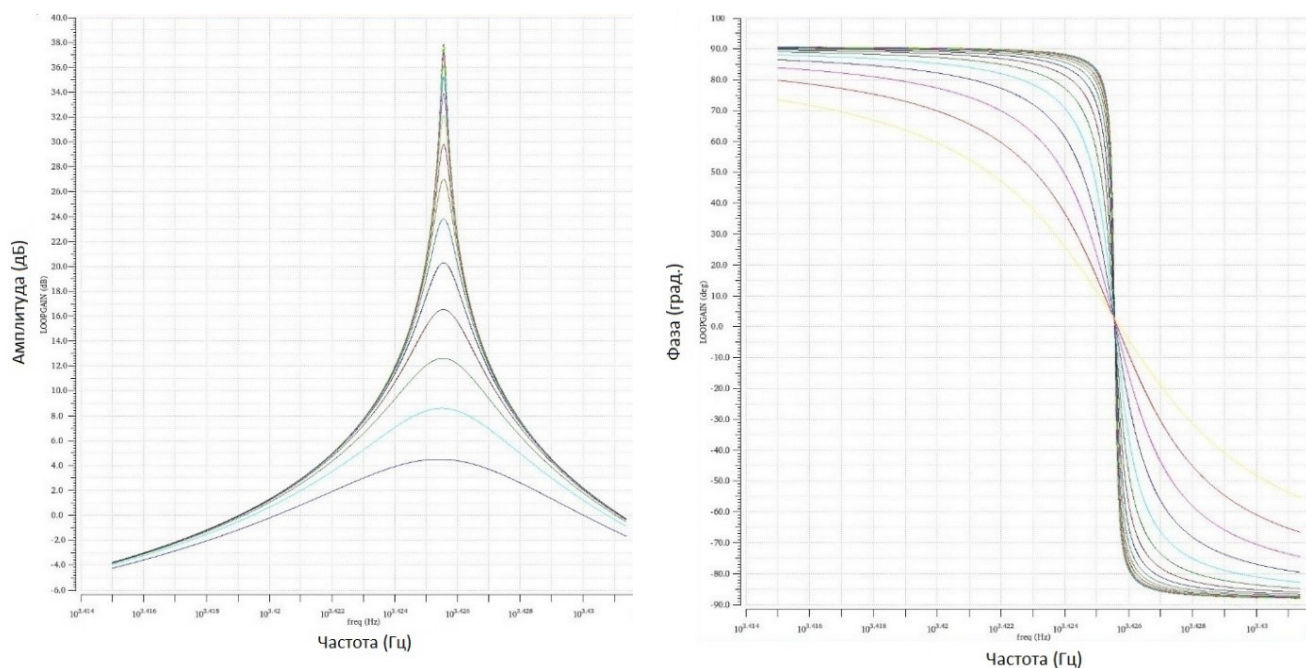


Рисунок 19 – АЧХ и ФЧХ при различных эквивалентных сопротивлениях резонатора

Значение резонансной частоты для данной модели составляет $f_0 = 2,66$ кГц. График зависимости добротности от эквивалентного сопротивления резонатора представлен на рис. 20.

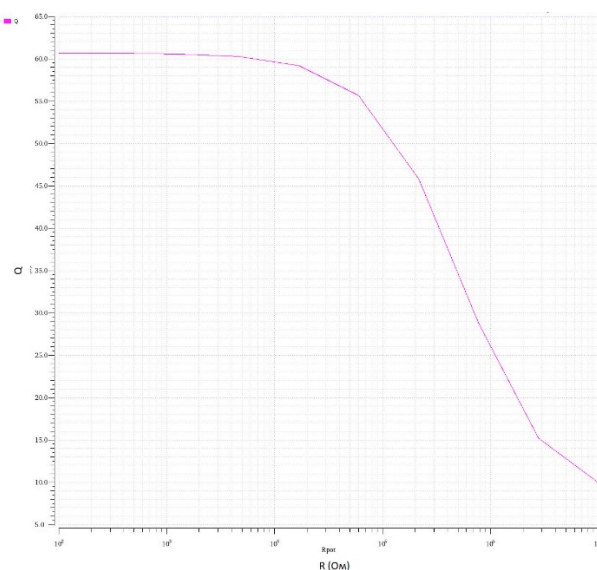


Рисунок 20 – Зависимость добротности системы от сопротивления

Разработанная модель ЧЭ МЭМС-вакуумметра в виде эквивалентной схемы корректно описывает его функционирование. 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. Результаты схемотехнического моделирования согласуются с результатами,

полученными при численном моделировании и экспериментальными исследованиями ЧЭ МЭМС-вакуумметра.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили разработать универсальный, технологически совместимый со стандартной КМОП технологией МЭМС-вакуумметр 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 срачивания 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 в результате научно-исследовательской работы 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.).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации из списка ВАК:

1. Волкова Е.И., Попков С.А. Влияние технологических погрешностей на чувствительность элементов микроэлектромеханических систем // Датчики и системы. 2017. № 8/9. С. 8–12.
2. 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.
3. Волкова Е.И., Попков С.А., Сафонов А.В., Гусейнов Д.В. Форма концентраторов механических напряжений в задаче по расчету собственной частоты МЭМС-резонатора // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, №3(175). 2019. С. 10-14.
4. Волкова Е.И., Попков С.А. Исследование нелинейных эффектов при моделировании чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 3. С. 108-113.
5. Волкова Е.И., Попков С.А., Сафонов А.В., Гусейнов Д.В. Расчет добротности МЭМС-резонатора с учетом вязкого демпфирования при топологической оптимизации его конструкции // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2018. № 4(172). С.62-67.

Патент на изобретение:

6. Патент № 2761072 С1 Российская Федерация, МПК G01L 21/18 (2006.01). Микроэлектромеханический вакуумметр № 2021104510: заявл. 24.02.2021: опубл. 03.12.2021 / Волкова Е. И., Попков С.А.; заявитель Госкорпорация «Росатом», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 11 с.

Прочие публикации:

7. Волкова Е.И., Попков С.А. Моделирование чувствительного элемента микродатчика давления разрежения // Электроника, микро- и наноэлектроника: сборник статей. 2018. С. 27-28.
8. Волкова Е.И., Попков С.А. Газодинамическое демпфирование в задаче по расчету конструкции чувствительного элемента МЭМС-датчика давления разрежения // 24 Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. 2019. С. 212-214.
9. Волкова Е.И., Попков С.А. Особенности разработки чувствительного элемента МЭМС-вакуумметра // Наноиндустрия. 2021. Т. 13. № S4(99). С. 527-528.